

総論

— 「光と磁気」 から 「光とスピン」 へ —

科学技術振興機構
佐藤 勝昭

1. はじめに

拙著「光と磁気」の初版¹⁾が1988年、改訂版²⁾が13年後の2001年である。これらの書では、磁性体という物質中において、磁気が光現象に及ぼす効果を基礎的に論じ、さらには、その応用にまで言及した。このコンセプトの延長におけるその後の発展は、いくつかの解説に述べた^{3),4)}。また、近接場磁気光学および非線形磁気光学については「新しい磁気と光の科学」に述べた⁵⁾。

最近になって、「光と磁気」は「光とスピン」と名前を変えて、新たな飛躍の時期を迎えようとしている。この飛躍には、スピントロニクス、スピンドダイナミクス、超短パルス光制御技術など基礎研究の発展がベースになっている。この小論では、はじめに、これまでの「光と磁気」について復習した後、最近の「光とスピン」の展開について述べたい。

2. 「光と磁気」のこれまで

ここでは、主として拙著「光と磁気（改訂版）」に従って、これまでの「光と磁気」の関係についてまとめておきたい。光と磁気をつなぐには、磁気が光現象に与える効果である磁気光学効果と、光が磁気に与える効果である光磁気効果とがあるが、これまでの研究は、どちらかというところ前者、すなわち、磁気が光に与える効果に重点が置かれていたといえよう。

2.1. 磁気が光現象に与える効果

2.1.1. 磁気光学の基礎^{1)~5)}

磁気光学効果の代表格がファラデー効果、磁気カー効果であるが、これらの効果は、磁化をもつ物質における

光学遷移の円偏光選択則から生じる非相反の現象である。

現象論的には、磁化をもつ物質の左右円偏光に対する屈折率の違いによって直線偏光の回転をもたらす磁気旋光が生じ、左右円偏光に対する消光係数の違いによって楕円性をもたらす磁気円二色性が生じる。屈折率の円偏光による違いは、誘電率テンソルの非対角項の存在によって説明される。

電子論的には、図1に示すように磁化された物質の電子軌道間の光学遷移の選択則がもとになって、光の角運動量（円偏光性のヘリシティ）が電子系の角運動量に伝達され、励起状態のヘリシティがバーチャルに基底状態に取り込まれ、誘電率の非対角成分が現れるとして説明することができる。この場合、磁化、したがって、スピンはスピン軌道相互作用を経由して電子の軌道角運動量に寄与すると考えるのである。

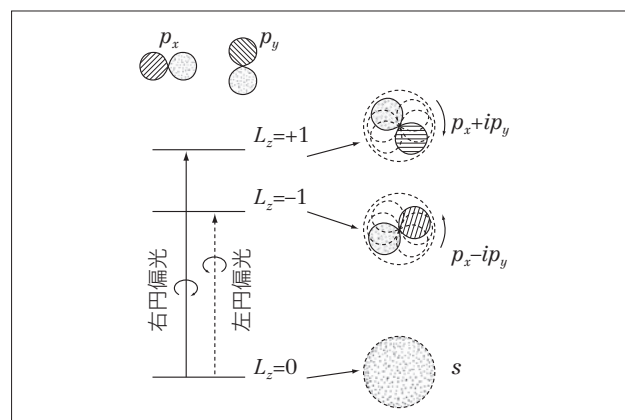


図1 電子の軌道運動と円偏光の選択則

さとう かつあき

磁気光学効果の舞台となる物質のサイズが、ナノスケールになるとどのようなことが起きるであろうか。電磁波の波長よりも十分に小さいサイズの構造をもつ媒質に入射した電磁波は平均した誘電率と透磁率を感じる。媒質が磁性体／貴金属の多層膜または貴金属／磁性体／貴金属サンドイッチ膜においては、それぞれの層が十分厚ければ貴金属のバルクプラズモンのために誘電率の対角成分が負から正に変化するときに磁気光学効果がエンハンスされる効果が現れることが、1980年代に明らかにされた。

その後、原子層オーダーで制御された磁性体の超薄膜を貴金属でサンドイッチした構造において新たな遷移が生じることが見いだされ、さらに精密な実験によってこの遷移が磁性体層厚に依存することが明らかになった。サンドイッチ膜を周期的な人工格子構造とし、変調周期を短くしていくと、新たなバンド構造が出現し、特有の磁気光学スペクトルが観測される。一方、媒質が貴金属微粒子の分散系であれば、微粒子の表面プラズモンによる磁気光学効果のエンハンスが起きる。

最近、磁化が物質の対称性の変化をもたらし、それを通じて非相反な方向二色性現象につながる間接的な磁気光学効果も見いだされている⁶⁾。

2.1.2. 磁気光学効果の応用

磁気光学効果は、(1) 磁気計測・観測の手段、(2) 光磁気アイソレーター、(3) 光磁気記録の再生、(4) 空間磁気光学変調器、(5) イメージングなどに応用されている。

(1) 計測・観測手段

磁気光学効果の時間応答は 10^{-15} s以下と非常に早い。それは、磁気光学効果が電子状態間のバーチャルな光学遷移にもとづいているからである。その高速性を使って、超短パルス光照射による磁化の消失や、超短パルス光による高速磁化反転の観測手段として使われている⁷⁾。磁気光学効果は電子状態間の光学遷移の円偏光選択則からもたらされていることから、電子状態のすぐれたプローブとなっている。磁性半導体の電子構造を探る手段として、赤外・可視・紫外領域の磁気光学スペクトルが有効であることは、第1世代の磁性半導体である CdCr_2Se_4 、第2世代の磁性半導体である $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、第3世代の磁性半導体 GaAs:Mn 、 $\text{TiO}_2\text{:Co}$ 、 ZnTe:Cr などで実証されている。安藤氏は、最近多くの室温磁性半導

体の報告があるが、真に磁性半導体であるかどうかの判断基準として磁気円二色性 MCDを用いることを提唱している⁸⁾。

非線形磁気光学効果は、強い超短パルスレーザー励起によって生成された高次の電気分極による高次光発生が、磁化の影響を受ける効果である⁵⁾。主として、2次高調波発生 (SHG) が使われ、入射偏光に対し出射 SHG 光の偏光が磁化に応じて変化する非線形磁気カー効果 (NOMOKE) が観測されている。例えば Fe は、縦カー配置の線形磁気光学カー回転角はせいぜい 0.1° と小さいが、非線形磁気カー回転は 90° 近い大きな値が報告されている。非線形磁気光学効果は、反強磁性体においても観測され、磁気点群を用いた理論解析が行われている。

(2) 光磁気アイソレーター

磁気光学効果が最も実用されているのが、その非相反性を用いて光を一方通行にする磁気光学アイソレーターである。偏光軸を 45° 傾けた2枚の偏光子で磁性ガーネット結晶を挟み、円筒永久磁石の磁界中においたシンプルな構造ながら、光ファイバー通信において戻りビームの半導体レーザーへの入射を抑えるために不可欠な光コンポーネントとなっている。光多重通信における光ファイバーアンプ EDFA にも線路挿入型の光磁気アイソレーターが使われている。このほか、光サーキュレーター、可変光アッテネーター、光スイッチなどの光通信用にコンポーネントに活躍している。光磁気アイソレーターの課題は、光集積回路への実装である。光多重通信用コンポーネントへの実装を念頭に入れた超小型導波路型アイソレーターの研究が行われている⁹⁾。

(3) 光磁気記録の再生

1990年代に開発されマーケットに投入された光磁気ディスク、ミニディスクは、磁性物理の粋を集めた先端技術の塊ともいえるものであった。熱磁気記録された磁気情報の再生には磁気光学効果が用いられた。記録密度を上げるために直径数十 nm にまで小さくした記録マークを (回折限界を超えて) 読み出すために、磁気超解像の技術が開発され GIGAMO という名称で市場に投入された¹⁰⁾。さらに磁区拡大や磁壁移動を利用した再生技術も開発されたが、コスト高となり、その地位をハードディスク、携帯音楽プレーヤーなどに明け渡し、製造が中止されてしまった。磁気テープの磁気情報を磁気光学膜に転写して光磁気再生する研究は、いまでも続けられている。

(4) 空間光変調器

空間光変調器 (SLM) には通常液晶が用いられるが、応答速度が遅く、分解能も上がらないという問題点を抱えている。磁気光学空間光変調器 MOSLMは高速動作が可能なることから、ホログラフィックメモリーや立体画像ディスプレイなどの分野で期待が大きい¹¹⁾。磁界変調に電流磁界を用いたものはすでに実用化されているが、電力消費の問題があった。井上らは、磁性フォトニック結晶を用いて大きな磁気回転角を得ることによって、低い電流で変調できること、さらにピエゾ素子と組み合わせることによって電圧で制御できることを発表した。最近、強誘電体との界面効果によって、可視域で透明な常磁性物質を用いることが可能になり、新しい展望が開けつつある¹²⁾。詳細は、本誌の高木氏、井上氏による解説「磁性フォトニック結晶を用いた磁気光学空間光変調器」を参照されたい。

(5) イメージング

磁気光学効果は古くから磁区のイメージング手段として用いられてきた。また磁気記録の分野では、磁気ヘッド上の微細な磁気構造の観測にも使われて来た。さらに紙幣の磁性インク・磁気カードなど磁気光学効果の小さな磁性体の磁気状態の観測には磁性ガーネット薄膜などを介して磁気光学イメージングすることが行われている。同じ手法を超伝導体への磁束浸入の観測に用いることができ、超伝導電流の大きさを見積もりイメージングすることも可能になっている¹³⁾。面内磁化イメージングの空間分解能はほぼ光の回折限界で決まるが、近接場光を用いた磁気光学イメージングでは、回折限界以下の微細構造を観測することができる¹⁴⁾。放射光によるX線磁気円二色性 XMCDを利用した元素選択的な磁気光学イメージングも行われている¹⁵⁾。

2.2. 光が磁気に及ぼす効果

2.2.1. 光磁気効果の基礎

光照射による磁性の変化を一般に光磁気効果 (広義) というが、これには、狭義の光磁気効果 (光誘起磁化、光誘起初透磁率変化など) と、光の吸収による発熱に基づく磁化の温度変化 (正確には熱磁気効果) とが含まれる。熱磁気効果にも、キュリー温度や補償温度での磁化や保磁力の変化によるものと、磁化の向きの温度による変化 (温度誘起スピン再配列) とがある。

(1) 光誘起磁気効果

Siを添加したYIG結晶の強磁性共鳴周波数が光照射によって大きく変化する現象は1967年に英国のTeale, Templeらによって発見された¹⁶⁾。この効果はその後オランダのEnzらによって詳細に研究され¹⁷⁾、磁性半導体や他のフェライトにおいても光照射による磁気的性質の変化が見いだされた。例えば、Si添加YIGにおいて77 Kでの光の照射によって、初透磁率が数秒の間に1/10以下に減少する。このほかにも、光誘導磁気異方性、光誘導ひずみ、光誘導二色性などが報告されている。Co添加 (Y,Nd) IG薄膜での光誘導磁気効果が直流磁界に依存する現象も報告されている¹⁸⁾。

これらの応答は数秒から数時間にわたる遅い現象である。動作原理としては、光照射による電荷移動型遷移に伴う3d遷移金属イオンの価数変化、光生成されたキャリアのトラップ準位による捕捉と再解放、電子正孔対の再結合などが考えられるが、いまだに完全な理解が得られていない。

(2) 光誘起磁化

ピックアップコイルを巻いた常磁性体に共鳴する波長のパルスレーザーを照射すると、ピックアップコイルに電圧パルスが誘起される。常磁性体としては、最初の実験はルビーについて行われた¹⁹⁾。照射はルビーレーザーのR線を用いた。基底状態のスピン4重項から最低の励起状態である2重項に光学遷移が起きるときのスピンの変化によって磁化の変化が起きる。熱効果でないことは、円偏光のヘリシティを右から左に変えたとき、コイルに誘起される電圧が反転することから確かめられる。この効果は逆ファラデー効果とも呼ばれ、3d遷移金属イオンや希土類を含む酸化物、磁性半導体、希薄磁性半導体、3d遷移金属錯体などでも観測されている²⁰⁾。

宗片らは、磁性体超微粒子を分散したグラニューラー構造をもつ物質に光を照射することにより、磁化を誘起する実験結果を報告している。光励起によって電子・正孔が母体物質に生成され、それらが微粒子の磁気モーメントをそろえ合う交換相互作用の媒体となっていると考えられる²¹⁾。

(3) 光誘起スピン再配列

RCrO₃ (希土類オースクロマイト) は反強磁性体であるが、不等価な4つのCrサイトを有し、4副格子 (sub-lattice) からなる複雑なスピン構造を有する。このうち

の1つErCrO₃は、9.7 K以下で反強磁性体であるが、この温度以上ではキャント型の弱強磁性となる。4.2 Kにおいて、この物質のCrの配位子場遷移を共鳴的に励起すると、光誘起スピン再配列相転移が起きる。磁気転移が起きたことは、ストリークカメラによるスペクトル線の分裂の変化を観測することにより明らかにされた²²⁾。

(4) 熱磁気効果

①温度誘起磁化反転効果

レーザー光照射によって、局所的にキュリー温度以上に加熱すると磁化を失うが、照射を止めると反磁界によって逆向きに磁化される。一方、フェリ磁性体の補償温度付近では保磁力が大きくなっており、レーザー光照射で補償温度以上にすると保磁力が低下し、冷却時に反磁界によって逆向きに磁化される。これらは熱磁気効果と呼ばれる。

②温度誘起スピン再配列効果

RFeO₃（希土類オソフェライト）は、ある温度を境にスピン再配列相転移を示すものがある。この現象を利用したものに光モーターが知られている。これは、磁界中において希土類オソフェライトなどに光照射すると、熱誘起スピン再配列により、磁化の方向が変化し、磁界中でトルクが発生して回転するというものである²³⁾。

2.2.2. 光磁気効果の応用

純粋のフォトンモードでの光磁気効果は、これまでのところ実用的な応用技術にはなっておらず、応用されているのは熱磁気効果のみである。特に、温度誘起磁化反転現象は、キュリー温度記録、補償温度記録などの形で光磁気記録に利用され、MOディスク、MDなどとして実用化された。光磁気記録に用いられた技術や材料は、MO、MDが市場から消えた後も、Tb/in²を超える次世代超高密度ハードディスクのための熱アシスト磁気記録として利用されようとしている。温度誘起スピン再配列の応用例としては、光モーターがあるが、実用にはならなかった。ここでは、光磁気記録と熱アシスト磁気記録について簡単に述べる。

(1) 光磁気記録²⁴⁾

光磁気ディスクやミニディスクにおける記録には、キュリー温度 T_c における磁化の消滅と、補償温度付近での保磁力の変化が利用される。キュリー温度記録の場合、レーザー光照射により T_c 以上に加熱された領域は

磁化を失うが、冷却の際、周囲からの反磁界を受けて、周囲とは逆向きに磁化される。より安定に記録するため、バイアス磁界が印加される。補償温度記録の場合、補償温度 θ_{comp} 付近で、保磁力 H_c が増大することを利用する。 θ_{comp} が室温付近にあると、レーザー照射によって H_c が減少し、バイアス磁界または周囲ビットからの反磁界で反転が起きる。温度が下がると H_c が大きくなって安定に存在する。実際の光磁気ディスクでは、キュリー温度記録と、補償温度記録の要素をともに利用している。

MOディスクは、光変調記録なので、光の点滅によって形成される記録磁区は涙目型になる。困難であった重ね書きは、 T_c の異なる4層の交換結合多層膜を使ったLIMDOW技術によって可能になった。MDは、磁界変調記録なので重ね書きは容易である。磁界変調記録の記録磁区は矢羽根型になる。

光磁気記録の高密度化のために、光誘起超解像技術に加え、磁区拡大再生技術(MAMMOS)、および、磁壁移動磁区拡大再生技術(DWDD)などが提案された。MAMMOSでは、記録層と再生層がスイッチ層で分離され、再生時の光照射で熱的に記録層から再生層への転写が行われ転写磁区が拡大する。DWDDにおいても、記録層と再生層の分離が行われており、光照射により再生時のみ転写磁区の磁壁が熱的に移動して拡大し信号増大に寄与する。光磁気記録は市場から姿を消してしまい、せつかくの先端技術は日の目を見なかった。

(2) 熱アシスト磁気記録

ハードディスク媒体は、磁性微粒子の集合体である。記録密度の増大に伴い微粒子のサイズが小さくなっていくと、磁気ヘッドによって記録された直後は、記録磁区内のすべての粒子の磁化が記録磁界の方向に向いているが、時間とともに各粒の磁化がバラバラな方向に向いていき、記録された情報が保てないという現象が起きてくる。この現象が起きるのは、粒子の異方性磁気エネルギー $K_u V$ (K_u は単位体積当たりの磁気異方性エネルギー、 V は粒子の体積) が小さくなったことによって、熱揺らぎ kT に打ち勝てなくなるためである。この現象は強磁性粒子がランダム配向するので、超常磁性と呼んでいる。ハードディスクの寿命の範囲でデータが安定であるための条件は、 $\eta = K_u V / kT$ というパラメーターが60以上なければならないとされている。粒径 d が小さくなると、記録される粒子の体積 V はほぼ d^3 に比例して小さくな

る。この減少を補うだけ、磁気異方性 K_u を増大できれば、超常磁性限界を伸ばすことができる。保磁力 H_c は $H_c = 2K_u/M_s$ と書かれるから K_u を増大すると保磁力が増大し、ヘッド磁界が高くなりすぎて記録できなくなる。かつて、超常磁性限界は、40 Gbits/in²とされていたが、AFC（反強磁性結合）媒体の登場で、これをクリアした。しかし記録密度が150 Gb/in²に達した前後から、長手記録での高密度化の進展に急速に限界が見え始めてきたため、これを救う技術として、長年にわたって研究されてきた垂直磁気記録技術が登場し、現在市販のハードディスクはすべて垂直磁気記録となっている。

しかし、垂直磁気記録によって超常磁性限界の到来を多少遅らせることはできても、せいぜい1 TGb/in²までであろうと考えられている。保磁力を大きくすれば安定性が向上することは確実であるが、ヘッドでの記録能力の問題を提起する。ヘッドの飽和磁束密度には限界があるし、ヘッドの寸法の縮小にも限界がある。現行の磁気ヘッドは理論限界の1/2程度のところまで到達しており、改善の余地はほとんど残されていない。

保磁力 H_c の大きな媒体にどのようにして記録するかという課題への回答の1つが熱を使うことである。室温付近では大きな H_c を示すが温度上昇によって通常の磁気ヘッドで記録できる程度に H_c が減少する媒体を用いて、温度を上げて磁気記録し、再生はGMR磁気ヘッドを用いるのが熱アシスト磁気記録HAMRの考えである。HAMRに用いる光ヘッドは、光磁気ディスクのヘッド（媒体との距離がmm）と異なって、媒体との距離がサブナノメートルとなり、ビットサイズも微小（1 Tb/in²では10 nm×75 nm程度）なので、近接場光を使う必要があり、近接場発生素子NFTが使われる。

熱アシスト記録の詳細は、本誌の野口氏の解説「HDD用熱アシスト磁気記録ヘッド」を参照されたい。

3. 「光とスピン」の最近の展開

3.1. 背景

これまでは、主として磁気光学効果が積極的に使われており、光磁気効果は、熱を介したものしか使われてこなかった。もう一度前節のはじめに立ち戻ってみると、磁気光学効果は、「光の角運動量(円偏光性のヘリシティ)が電子系の角運動量に伝達される」と考えるのであるから、当然、光のスピンが電子のスピンに変換されるフォ

トンモードの「光磁気効果」が期待されるのである。前節に述べた光誘起磁化はその1つの現れであるが、磁化反転や磁気相転移を伴うような大きな効果としての観測はなかった。フォトンモードの光磁気効果は最近、スピントロニクス、スピンダイナミクス、超短パルス光制御技術など基礎研究の発展がベースになって、新しい展開を見せつつある。最近のスピントロニクスの進展は、ナノ領域における光とスピンの関係に新たな展開をもたらしてきた。スピン偏極した電子スピンの注入によって、電子を受け取った磁性体の磁化が反転するSTT（スピントランスファートルク）の現象が実験的に検証され、さらにスピンRAMとして実用化されるという急進展があった。このような背景のもとに、最近「光によるスピン制御」の研究が注目されているのである。

3.2. 逆ファラデー効果と光によるスピン波の励起

磁気光学効果の逆効果として逆ファラデー効果がある。この効果は、円偏光が物質に照射される時、光の進行方向に沿って、仮想的な磁界が誘起される現象で、2.2.1の(2)において、光誘起磁化として紹介した。その磁界の方向は、円偏光のヘリシティによって反転する。

キャント型の弱強磁性を示す希土類オソフェライトに円偏光フェムト秒レーザー照射をすることによって、数百GHzのスピン歳差運動が誘起されることが報告され、逆ファラデー効果によって説明された²⁵⁾。弱強磁性体は自発磁化を有するため、歳差運動の周波数は数百GHz程度であるが、反強磁性体を使えば、互いに反平行な副格子磁化をもち巨視的磁化がなく、2つの副格子磁化の間の交換相互作用によりこれまでにない高速のスピンダイナミクスが期待される。最近、反強磁性体NiOにおいて、円偏光フェムト秒レーザーにより非熱的にTHz帯のスピン歳差運動を誘起することに成功している²⁶⁾。さらに、光スポットの位置からスピン波が2次元的に伝搬していく様子が時間分解観測され、新しい概念のTHzデバイスを拓くものと期待されている。詳細は、本誌の佐藤琢哉氏の解説「光によるスピン波の生成と伝播」を参照されたい。

3.3. 光誘起高速磁化反転現象

最近、光磁気記録材料であるGdFeCoの角運動量補償

点付近において、サブピコ秒の光パルスによって磁化反転が生じ、左右円偏光に応じた記録ビットが形成される現象が発見された。現象論的には、逆ファラデー効果によって光のスピンに応じた有効磁界が発生し、それによって磁化反転が起きるといった新しいタイプの光磁気効果であると考えられた²⁷⁾。

また、GdFeCoにおいて、**図2**に示すような光誘起プリセッションナルスイッチングが観測された²⁸⁾。このスイッチングは、直流外部磁場印加中において、磁化補償温度を過ぎ、角運動量補償温度付近へ高速加熱することにより実現する。磁化補償点を跨ぐことにより、正味の磁化と外部印加磁場の関係が、平行から反平行へと反転し、加熱後の冷却時定数に比べ十分短い時間で、磁化反転トルクが誘起される。すなわち、正味の磁化に対し、印加磁場方向が超高速反転したのと同等の効果が誘起される。そして、トルクにより磁化反転が行われる際、高 γ 値、高ダンピング特性を有するため、磁化は歳差運動を伴い高速に反転し、かつ揺り返しはすみやかに収束することとなる。比較的低い照射エネルギー (0.9 mJ/cm^2) においては、初期状態へ回復するが、上記条件を満たす高エネルギー照射 (3.3 mJ/cm^2) においては、照射後急峻な減磁を生じた後歳差運動を開始、最初の回転において約 6 ps 以内に磁化の膜面垂直成分の符号が反転し、約 50 ps で反転状態に達した後、高い減衰振動を数回繰り返して約 200 ps 程度で収束する。熱エネルギーは、磁化反転トルクの誘起と高速磁化応答温度への移行にのみ利用され、磁化反転自体は歳差運動を利用するため一桁以上の高速化が実現したと考えられ、超高速磁気

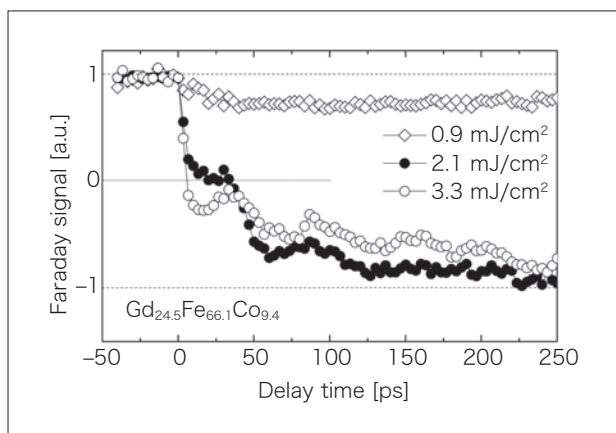


図2 超短パルス照射による超高速プリセッションナルスイッチング過程計測

記録技術として注目される。

最近、X線自由レーザーのフェムト秒X線パルスとパルスレーザー光とを組み合わせたポンププローブ時間分解実験で、フェリ磁性体 GdFe において反強磁性結合している Gd の副格子磁化と FeCo の副格子磁化を元素選択的に観測し、両者の時間ダイナミクスが異なり、サブピコ領域で一時的に強磁性結合していることが見いだされた²⁹⁾ (**図3**)。

3.4. スピン流と光スピンホール効果

スピントロニクスの新展開として散逸のないスピン依存電流であるスピン流がある。スピン軌道相互作用の大きな金属や半導体に電界を印加すると、スピン流が電界に垂直方向に生成されることが示唆され^{30),31)}、半導体において磁気光学的に³²⁾、および電氣的に³³⁾ 観測された。この効果はスピンホール効果 SHE と呼ばれる。また、スピン流に対して、それに垂直な方向に通常の電流に変換される逆スピンホール効果が見いだされ、現在ではスピン流の検出法として確立している³⁴⁾。

最近、SHEの光子版である「光スピンホール効果 SHEL」が提唱されたが、それによると、スピン1の光子は、スピン1/2の電荷と同じ働きをし、屈折率の勾配が、電気ポテンシャルの働きをするとされる³⁵⁾。SHELの結果、円偏光が全反射するとき反射光が横方向にシフトする現象などとして現れることが実験的に検証されている³⁶⁾。この効果については、本誌の小野田氏による「光の幾何学的ホール効果—その物理像と展望—」を参照されたい。

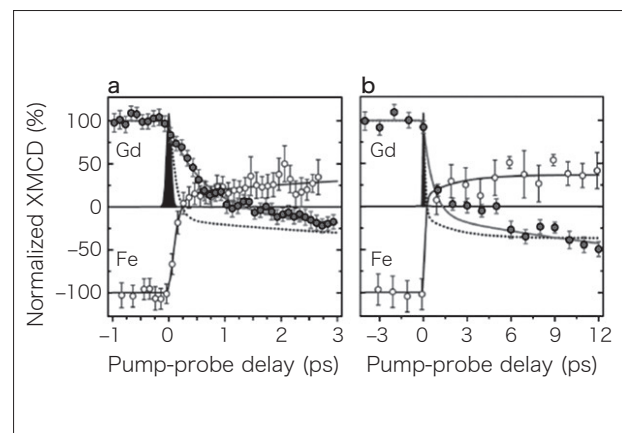


図3 XFELを用いて測定したGdFeにおける原子特定磁化ダイナミクス

3.5. 光クロスオーバー効果による強磁性の発現

遷移金属イオンを含む錯化合物においては、光によって低スピン状態と高スピン状態の転移を示すものが知られている。通常、局在電子系の遷移金属イオンのスピンは、なるべく大きな全スピン角運動量を持つように配置する。これはHundの規則と呼ばれ、高スピン状態が実現し、磁気モーメントが存在する。しかし、電子相関よりも配位子場が強い場合、低スピン状態となり磁気モーメントが小さくなる。光照射によって、低スピン状態から、高スピン状態へと変換する現象は、光スピנקロスオーバーと呼ばれている。もし光スピנקロスオーバー部位が無数に連結した3次元ネットワークをもつ結晶固体の場合高スピン状態のサイト間で磁気秩序を形成し、強磁性状態への転移が期待される。転移に要する時間は数百フェムト秒～数ピコ秒と考えられている。錯体結晶の光クロスオーバー強磁性については、本誌の所氏らによる解説「スピנקロスオーバー光強磁性体」を参照されたい。

3.6. 強相関電子系の光誘起反強磁性・強磁性転移

従来の磁気光学が電子のバーチャルな励起によって生じているのに対し、光が電子の運動をリアルに引き起こし、この電子の運動を通じてスピン系に影響を与える新しい磁気光学が提案された。実際、ペロブスカイト型Mn酸化物において、超短パルス光励起によって、反強磁性絶縁体相から強磁性金属相への転移をポンププローブ法で観測している³⁷⁾。さらに、ペロブスカイト型Co酸化物において、光誘起によって、非磁性の低スピン状態から、中間スピン状態、さらには強磁性の高スピン状態への光クロスオーバー転移が見いだされている³⁸⁾。詳細は本誌の石原氏による解説「光で作るスピンの塊」を参照されたい。

3.7. スピン注入と磁気光学

非磁性半導体へのスピン注入・蓄積現象が磁気光学イメージングを用いて行われ³²⁾、また、半導体LEDからの発光の円偏光度を用いてスピン注入効率を見積もるなどの研究も行われた。また最近、スピン注入磁化反転による磁気カー回転を用いた空間光変調器 (SLM) が発表され³⁹⁾、3Dホログラフィック・ディスプレイのための高速高精細 SLMとして注目されている。これについ

ては、本誌の菊池氏らによる解説「スピン注入型空間光変調器」を参照されたい。

4. おわりに

ここまで述べてきたように、「光とスピン」の現象の基礎研究については、光ホール効果、スピン注入蓄積の磁気光学的観測、光によるスピン波の励起と伝播、ねじれ偏光パルスによるスピンの制御、超短パルス光による超高速磁化反転、自由電子レーザーによる反強磁性結合した磁気モーメントのダイナミクスの観測、逆ファラデー効果などがある。「光とスピン」の材料としては、磁気をもたらす対称性の変化から生じる非相反な方向二色性現象、スピנקロスオーバー光強磁性体、反強磁性体の非線形磁気光学効果、光が作るスピンの塊などがある。「光とスピン」で先端技術に結びつくものとしては、スピン注入空間光変調素子、光アイソレーターの光集積回路への導入、磁気光学空間光変調器・磁性フォトニック結晶、熱アシストHDD、超高速光磁気記録などがある。

新しいフェーズを迎えた「光とスピン」、今後の展開が楽しみである。

参考文献

- 1) 佐藤勝昭：「光と磁気」, 朝倉書店 (1988)
- 2) 佐藤勝昭：「光と磁気 (改訂版)」, 朝倉書店 (2001)
- 3) 佐藤勝昭：“光と磁気”のナノサイエンス”, 日本磁気学会第161回研究会テキスト, pp. 1-8 (2008)
- 4) 佐藤勝昭：“光と磁気を取り巻く最近の進展と将来展望”, 光学, Vol. 42, No. 1, pp. 2-12 (2013)
- 5) 菅野暁, 小島憲道, 佐藤勝昭, 對馬国郎編：“新しい磁気と光の科学”, 講談社サイエンティフィク, pp. 141-174およびpp. 205-228 (2001)
- 6) 有馬孝尚：“非相反な方向二色性・線二色性”, 日本磁気学会第161回研究会テキスト, pp. 9-18 (2008)
- 7) Th. Rasing, H. van der Berg, T. Gerrits, and J. Hohfield：“Ultrafast magnetization and switching dynamics,” in “Spin dynamics in confined magnetic structures II,” eds. B. Hillebrands, and K. Ounadjeta, Springer, pp. 214-251 (2002)
- 8) K. Ando：“Seeking room-temperature ferromagnetic semiconductors,” Science, Vol. 312, pp. 883-1885 (2006)
- 9) 水本哲弥：“異種材料接合による光導波路への光アイソレータ集積”, 光学, Vol. 42, No. 1, pp. 32-34 (2013)
- 10) M. Kaneko：“Magnetically induced superresolution,” in “Magneto-optical recording materials,” eds. R.J. Gambino, and T. Suzuki, IEEE Press, Chapter 9, pp. 350-384 (2000)
- 11) W. E. Ross, J. P. Karins, T. R. Maki, J. R. Lucas, L. G. Kelly, N. Jacksen, J. Cho, D. N. Lambeth, T. Le, K. Mountfield, S. Santhanam, D. D. Stancil, M. H. Randles, J. B. Whitlock,

- and D. J. Garrity : “Measured characteristics of the reflected magneto-optic spatial light modulator (R-MOSLMTM) device,” *Proc. SPIE*, 2240, 292 (1994)
- 12) 高木宏幸, 井上光輝 : “磁気光学効果を用いた新しい空間光変調器”, *光学*, Vol. 42, No. 1, pp. 20-25 (2013)
- 13) 石橋隆幸 : “磁気光学顕微鏡における磁場分布の定量的観察とその高感度化”, *光学*, Vol. 42, No. 1, pp. 13-19 (2013)
- 14) 佐藤勝昭, 石橋隆幸 : “近接場磁気光学顕微鏡”, *光技術コンタクト*, Vol. 44, No. 2, pp. 18-27 (2006)
- 15) P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, G. Denbeaux, A. Pearson, L. Johnson, D. Attwood, S. Tsunashima, M. Kumazawa, N. Takagi, M. Köhler, and G. Bayreuther : “Element-specific imaging of magnetic domains at 25 nm spatial resolution using soft x-ray microscopy,” *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 72, pp. 2322-2324 (2001)
- 16) R.W. Teale, and D.W. Temple : “Photomagnetic anneal, a new magneto-optic effect, in Si-doped yttrium iron garnet,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 19, pp. 904-905 (1967)
- 17) U. Enz, and H. van der Heide : “Two new manifestations of the photomagnetic effect,” *Solid State Commun.*, Vol. 6, pp. 347-349 (1968)
- 18) 大森一稔, 中川活二, 伊藤彰義 : “Co 添加 YNdIG 薄膜の光誘導磁気効果の直流磁界依存性”, *日本応用磁気学会誌*, Vol. 19, pp. 249-252 (1995)
- 19) T. Tamaki, and K. Tsushima : “Optically induced magnetization in ruby,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 45, pp. 122-127 (1978)
- 20) 高木芳弘, 嶽山正二郎, 足立智 : “光による電子スピン配向と磁気変調効果”, *応用物理*, Vol. 64, pp. 241-245 (1995)
- 21) S. Haneda, M. Yamaura, Y. Takatani, K. Hara, S. Harigae, and H. Munekata : “Preparation and characterization of Fe-based III-V diluted magnetic semiconductor (Ga, Fe)As,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, L9 (2000)
- 22) T. Tamaki, and K. Tsushima : “Time-resolved spectra of a laser-induced spin reorientation in ErCrO_3 ,” *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 31, No. 34, pp. 571-572 (1983)
- 23) 玉城孝彦 : “スピン再配列を用いた光磁気モータの試作”, *電子情報通信学会論文誌*, J60-C, pp. 251-252 (1977)
- 24) 佐藤勝昭, 片山利一, 深道和明, 阿部正紀, 五味学共著 : 「光磁気ディスク材料」, *工業調査会*, (1993)
- 25) A. V. Kimel, A. Kirilyuk, P. A. Usachev, R. V. Pisarev, A. M. Balbashov, and Th Rasing : “Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulse,” *Nature*, Vol. 435, pp. 655-657 (2005)
- 26) T. Satoh, S.-J. Cho, R. Iida, T. Shimura, K. Kuroda, H. Ueda, Y. Ueda, B. A. Ivanov, F. Nori, and M. Fiebig : “Spin oscillations in antiferromagnetic NiO triggered by circularly polarized light,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 105, 077402-1-4 (2010)
- 27) C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, and Th. Rasing : “All-optical magnetic recording with circularly polarized light,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 99, pp. 047601-1-4 (2007)
- 28) A. Tsukamoto, T. Sato, S. Toriumi, and A. Itoh : “Precessional switching by ultrashort pulse laser: Beyond room temperature ferromagnetic resonance limit,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 109, pp. 07D302-1-3 (2011)
- 29) I. Radu, K. Vahaplar, C. Stamm, T. Kachel, N. Pontius, H. A. Dürr, T. A. Ostler, J. Barker, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and A. V. Kimel : “Transient ferromagnetic-like state mediating ultrafast reversal of antiferromagnetically coupled spins,” *Nature*, Vol. 472, pp. 205-208 (2011)
- 30) S. Murakami, N. Nagaosa, and S.C. Zhang : “Dissipationless quantum spin current at room temperature,” *Science*, Vol. 301, pp. 1348-1351 (2003)
- 31) J. Sinova, D. Culcer, Q. Niu, N. A. Sinitsyn, T. Jungwirth, and A. H. MacDonald : “Universal intrinsic spin Hall effect,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 92, 126603 (2004)
- 32) Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom : “Observation of the spin Hall effect in semiconductors,” *Science*, Vol. 306, pp. 1910-1913 (2004)
- 33) J. Wunderlich, B. Kaetner, J. Simons, and T. Jungwirth : “Experimental observation of the spin-Hall effect in a two-dimensional spin-orbit coupled semiconductor system,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, pp. 047204-1-4 (2005)
- 34) E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara : “Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, pp. 182509-1-3 (2006)
- 35) M. Onoda, S. Murakami, and N. Nagaosa : “Hall effect of light,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 93, pp. 083901-1-4 (2004)
- 36) O. Hosten, and P. Kwiat : “Observation of the spin Hall effect of light via weak measurement,” *Science*, Vol. 319, pp. 787-790 (2008)
- 37) M. Matsubara, Y. Okimoto, T. Ogasawara, Y. Tomioka, H. Okamoto, and Y. Tokura : “Ultrafast photoinduced insulator-ferromagnet transition in the perovskite manganite $\text{Gd}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 99, pp. 207401-1-4 (2007)
- 38) Y. Okimoto, T. Miyata, M. S. Endo, M. Kurashima, K. Onda, T. Ishikawa, S. Koshihara, M. Lorenc, E. Collet, H. Cailleau, and T. Arima : “Ultrafast spectral weight transfer in $\text{RBaCo}_2\text{O}_{6-\delta}$ (R=Sm, Gd, and Tb): Role of electronic correlation in a photoinduced phase transition,” *Phys. Rev. B*, Vol. 84, 121102 (R) (2011)
- 39) 町田賢司, 青島賢一, 久我淳, 菊池宏, 清水直樹 : “トンネル磁気抵抗効果を用いたスピン注入型空間光変調器の研究”, *NHK 技研 R&D*, No. 138, pp. 51-60 (2013)