

「X線強磁性共鳴顕微鏡によるスピン流の直接観察とエンジニアリング」

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門

上野 哲朗

1 研究の背景と目的

最近の人工知能(Artificial intelligence: AI)、Internet of Things (IoT)の普及に伴い、超高速・超低消費電力の情報処理デバイスや超高感度センサのニーズが急速に高まっている。これらのデバイス・センサを実現するためのパラダイムが現在のエレクトロニクスに変わるスピントロニクスである[1]。スピントロニクスでは電子の電荷に加えてスピンの自由度を利用することで超高速・超低消費電力・超高感度などの機能性を実現する。スピントロニクスにおいて最も重要な概念が電子スピンの流れ「スピン流」であり、スピン流を自在に創出・検出・制御することが求められる。一般的にスピン流はそれを電流に変換する「逆スピンホール効果」などの手法によって検出される。しかしながら、スピントロニクスデバイスの多層化・複雑化に対応するには、このような電氣的検出法ではなく局所的かつ直接的にスピン流を検出する手法が必要である。本研究では X 線をプローブとする局所的かつ直接的なスピン流検出法「X線強磁性共鳴(X-ray ferromagnetic resonance: XFMR)顕微鏡」を開発し、スピン流の観察とエンジニアリングに用いる。XFMR 法はこれまで米国 Advanced Light Source や英国 Diamond など海外の放射光施設で研究開発が行われてきたが、国内には SPring-8 をはじめとする多数の放射光施設があるにも関わらず報告例が無かった[2]。このような背景のもと、本研究では XFMR 顕微鏡の開発と応用を試みた。

2 研究方法・研究内容

本研究では X 線強磁性共鳴(XFMR)顕微鏡の開発と XFMR 顕微鏡を用いたスピン流検出及びスピン流エンジニアリングを行う。図 1 に XFMR 法によるスピン流検出の概念図を示す。静磁場中に置かれた強磁性体層/非磁性体層/強磁性体層の積層構造に高周波磁場を印加すると、強磁性体層にスピンの歳差運動が誘起され、これを強磁性共鳴と呼ぶ。強磁性共鳴によって隣接する非磁性体層に交流スピン流が流れる。非磁性体層の構成元素の内殻吸収端に円偏光 X 線のエネルギーを合わせ、透過 X 線または X 線励起可視発光(X-ray excited optical luminescence: XEOL)の強度を測定することで X 線磁気円二色性(X-ray magnetic circular dichroism: XMCD)により、図 1 右のような非磁性層におけるスピンの歳差運動を検出することができる。このようなシグナルの有無によって交流スピン流の発生を直接調べることができる[3]。また XFMR 法と走査型透過 X 線顕微鏡[4]を組み合わせた X 線強磁性

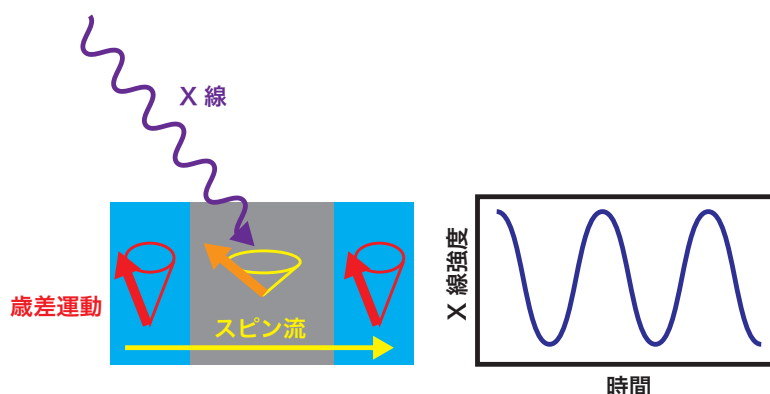


図 1. X線強磁性共鳴法によるスピン流検出の概念図。交流スピン流は右図のような sin 波として観測される。

共鳴顕微鏡を用いてナノ集光ビームによる空間分解観察を行えば、スピン流伝播長の定量評価が可能になると考えられる。

本研究ではまず XFMR 顕微鏡を実現するための要素技術開発を行う。要素技術として、X線励起可視発光(XEOL)によるX線吸収スペクトル(X-ray absorption spectrum: XAS)測定、試料に高周波磁場を印加するためのコプレーナウェーブガイド(Coplanar waveguide: CPW)の開発・テスト、放射光パルスと高周波磁場を同期するための高周波回路の開発がある。XFMR法を実現した後、XFMR顕微鏡の開発とそれを用いたホイスラー合金などの多元物質の元素選択的磁気ダイナミクス解析及びスピン流の検出を行う。これによって高磁化・高磁気異方性・低磁気ダンピング定数など所望の磁気物性を示す材料の開発やデバイス最適化によるスピン流のエンジニアリングを実現する。

### 3 研究成果

本研究では主として高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設(Photon Factory: PF) BL-19Bにおいて研究開発を行なった。図2(a)にX線強磁性共鳴測定装置の写真を示す。図2(a)写真右側が架台に乗った真空チャンバーである。このチャンバーには試料位置を制御するためのマニピュレータ、試料に静磁場を印加するための電磁石を備えている。またビームライン下流側にビューポートを設けており、試料基板から生じるXEOLをフォトダイオードや光電子増倍管などの可視光検出器で検出することができる。図2(a)写真左側の19インチラックには各種電源、ディレイライン、フィルタ、アンプ等の高周波回路、オシロスコープ、ロックインアンプなどが収納されている。本研究ではこの装置を用いて以下の項目について研究開発を行なった。

#### (1) X線励起可視発光によるX線吸収スペクトル測定

酸化マグネシウム(MgO)基板上に成膜したFe薄膜、パーマロイ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ )薄膜のXEOL検出によるXAS測定を行った。試料表面に敏感な全電子収量法によるXASではスペクトル形状が試料表面の酸化を示唆するのに対して、薄膜を透過しX線に比例するシグナル(つまり試料内部のシグナル)を検出可能なXEOL収量法によるXASでは試料内部の金属的なFeのシグナルが支配的であることがわかった。

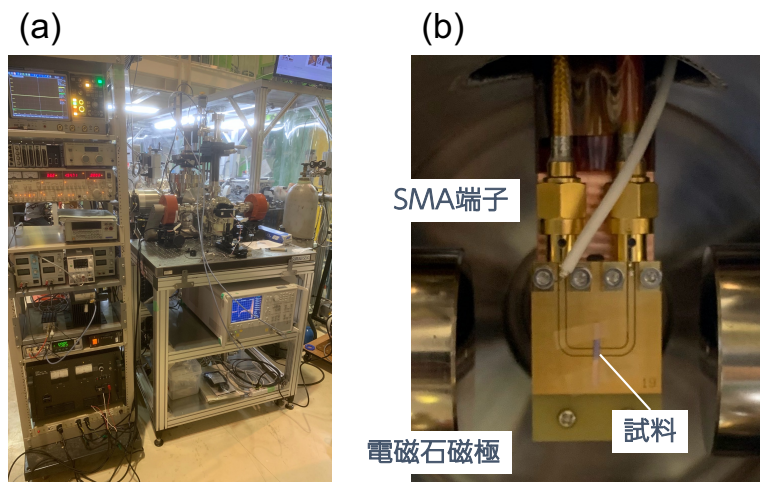


図2. (a)高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設に建設したX線強磁性共鳴測定装置。(b)コプレーナウェーブガイドと試料。

(2) コプレーナウェーブガイドの設計・製作

XFMR 法では試料に高周波磁場を印加するための導波路としてコプレーナウェーブガイド (CPW) を用いることが多い。図 2 (b) に本研究で設計・開発した CPW の写真を示す。CPW はシグナル線 (中央の U 字型の回路) とその周囲のグラウンドからなる。シグナル線には SMA 端子を半田付けして、SMA 端子付きケーブルを通してチャンバー外部との信号のやりとりを可能にしている。紙面方向がビームラインの下流側であり、放射光 X 線は紙面奥からやってくる。シグナル線上には放射光 X 線を透過するためのピンホールを開けており、その上に薄膜がシグナル線に接するように試料を置いている。ピンホールを抜けた X 線が薄膜を透過し、さらに MgO 基板に到達して XEOL を生じる。CPW を挟むように静磁場印加のための電磁石の磁極を配置している。

(3) ベクトルネットワークアナライザを用いた強磁性共鳴測定 (VNA-FMR)

上記の CPW とベクトルネットワークアナライザ (Vector network analyzer: VNA) を用いて、イットリウム鉄ガーネット (Yttrium iron garnet: YIG) 薄膜とパーマロイ薄膜の FMR スペクトルを測定した。VNA は一般に高周波回路の特性評価に用いられる計測機器である。CPW の SMA 端子 2 つを VNA の Port1 と Port2 にそれぞれ接続して透過特性を測定した。FMR シグナルは周波数スペクトルにおいて強磁性共鳴の吸収によるディップとして現れる。図 3 に VNA-FMR で測定した YIG とパーマロイ薄膜の FMR スペクトルを示す。どちらの試料も静磁場の大きさによってピークがシフトすることから FMR シグナルであることを確認した。

(4) 高周波回路の開発

プローブとして用いる放射光パルスと高周波磁場を同期するための高周波測定系を開発した。放射光のマスターオシレータ (約 500 MHz) 信号をコムジェネレータに導入して整数倍信号を生成し、各種の高周波フィルタを用いて所望の周波数を切り出した。さらにディレイラインと高周波ハイパワーアンプを用いて、放射光パルスに対して遅延時間を制御した適切なパワーの高周波信号が CPW に導入される設計とした。スペクトラムアナライザで特定周波数の信号をモニターしながら静磁場や高周波磁場の印加 ON/OFF を切り替えたところ、信号強度に増減が見られた。これは放射光マスターオシレータから生成した高周波磁場によって強磁性共鳴が誘起されていることを示している。

(5) 遅延を制御しながらの X 線吸収スペクトル測定

XFMR 測定には、磁場スキャン、X 線エネルギースキャン、遅延スキャンといった様々な測

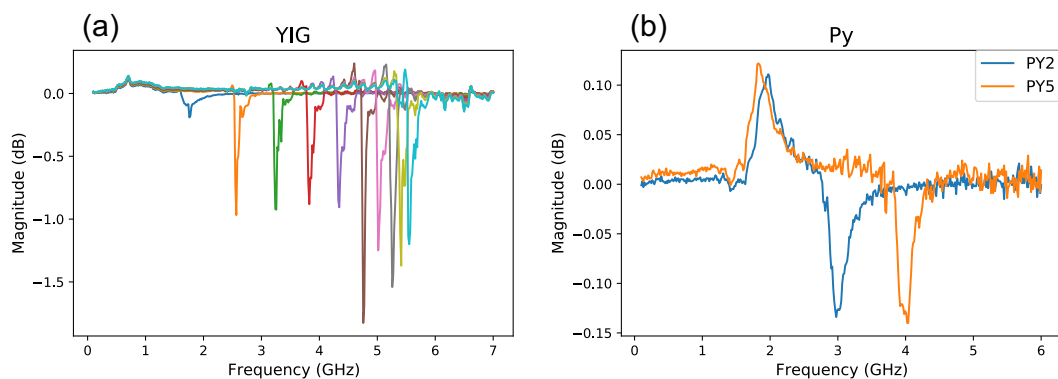


図 3. コプレーナウェーブガイドを用いて測定した (a) イットリウム鉄ガーネット (YIG) 薄膜と (b) MgO 基板上のパーマロイ ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) 薄膜の強磁性共鳴スペクトル。

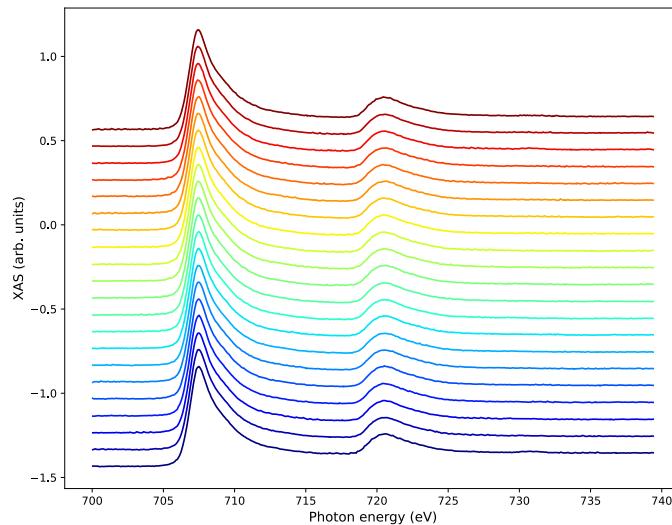


図4. 放射光パルスの遅延を制御して測定したパーマロイ薄膜のFe  $L_{2,3}$  X線吸収スペクトル。

定モードがある。図1に示したsin波状シグナルはX線エネルギーをXMCDスペクトルのピークに合わせ、かつ静磁場を共鳴磁場にチューンした状態で遅延スキャンをすることで得られる。そこで遅延を一定間隔(数10ps)で変えながらX線吸収スペクトル測定を行なった。図4はパーマロイ薄膜に対してこの測定を行なった結果である。XFMRによるsin波状シグナルがあればピーク強度に振動的な振る舞いが現れるが、今回の測定では有意な差は観測できなかった。

#### 残された課題

本研究では以上のようにXFMR顕微鏡の実現と応用を試みたが、残念ながら要素技術の開発に留まった。今後XEOL測定系や高周波回路の見直しを行なってXFMR信号を観測し、早期にXFMR顕微鏡を実現したい。

#### 4 研究がもたらす効果及び波及効果

XFMR顕微鏡の実現によってスピン流の関わる諸現象、スピントロニクスやマグノン伝搬などを詳細に調べることが可能になり、スピントロニクス分野全体の発展に寄与することが期待できる。さらにXFMR法をタイコグラフィ、コヒーレント回折イメージングなどの高空間分解能イメージング手法と組み合わせることで、スピントロニクスデバイスの微細化・高集積化に対応した技術へと発展する。またスピン流エンジニアリングが実現することで、超高速・超低消費電力の情報処理デバイスや超高感度センサの実現に波及する。

#### 参考文献

- [1] B. Dieny *et al.*, *Nature Electronics* **3**, 446 (2020).
- [2] C. Klewe *et al.*, *Synchrotron Radiation News* **33**, 12 (2020).
- [3] J. Li *et al.*, *Physical Review Letters* **117**, 076602 (2016).
- [4] Y. Takeichi *et al.*, *Review of Scientific Instruments* **87**, 013704 (2016).