

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23590

研究課題名(和文) コヒーレント軟X線時分解イメージングによるスピンドイナミクスを観測

研究課題名(英文) Observation of spin dynamics by time-resolved coherent soft x-ray diffraction imaging

研究代表者

石井 祐太 (Ishii, Yuta)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40847232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、軟X線イメージング手法を用いてマイクロ波により誘起されたスピン流の時分解イメージング手法の確立を目指した。当研究期間中に放射光のパルス性を利用した時分解測定系と、軟X線顕微鏡を組み合わせた時分解イメージング測定系を、放射光施設Photon Factoryにて立ち上げた。実際には、時分解2次元イメージングまでは達成できなかったものの、強磁性体中の2次元磁区構造の静的イメージングやマイクロ波により誘起されるスピン振動(強磁性共鳴)の時分解測定に観測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年スピントロニクスデバイスへの応用が期待されているスピン流(スピン角運動量の伝播)の時分解磁気イメージング手法の確立を目指したものであり、その前段階である二次元イメージング手法の確立とピコ秒スケールの時分解測定に成功した。これらを組み合わせることで、高空間時間分解能を有する時分解磁気イメージングが可能となり、これまで明らかにされてこなかったスピン流等の磁気ダイナミクスの微視的機構の解明に繋がるのが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We aimed to establish the way for time-resolved imaging measurement for magnetic texture. We assembled time-resolved imaging measurement system, where we utilize pulse x-ray and soft x-ray microscope to achieve pico-second time-scale imaging for spin current, in Synchrotron radiation facility Photon Factory. In the present study, we achieved 2-dim. static imaging for ferromagnetic maze domain pattern and time-resolved measurements for ferromagnetic resonant induced by microwave, although it remain as issue of time-resolved 2-dim. magnetic imaging.

研究分野：軟X線イメージング

キーワード：時分解磁気イメージング

1. 研究開始当初の背景

外場により磁性体中に誘起されるスピンドYNAMIXは、基礎物性分野だけでなく、スピントロニクスデバイスへの応用の観点からも注目を集め、盛んな研究が行われている。例えば、マイクロ波の AC 磁場成分によりスピン波(スピン角運動量の伝播波)をポンピングする強磁性共鳴や、ポンピングされたスピン波が伝播するスピン波スピン流等は、現在、実用化に向けた目覚ましい研究が行われている。更にはスピンと格子が結合したマルチフェロイック物質において、レーザー照射によるカイラル磁気構造の高速制御や、カイラル磁性体における磁気渦構造(スキルミオン)の超高速生成・消滅等の理論的予言等、多岐に渡る物性分野において、磁気構造の高速制御が予言され、応用化への機運が高まっている。一方で、これらの微視的な機構を観測・理解するためには、ナノメートルスケールの空間領域の磁気構造が、ピコ秒スケールの速い時間スケールで変化する様子を直接捉える必要があるが、その技術は未だ未発達分野であった。

ナノメートルスケールの実空間顕微鏡として活用されているのは、主に、X線、可視光、電子顕微鏡の3つのプローブである。これらは、それぞれ空間分解能や時間分解能に一長一短を持つ。その中で、X線は、数nm程度の空間分解能と10fs-ps程度の時間分解能を持つ他、他のプローブと比べて高い透過力を持ち、試料の3次元構造の可視化が可能である等、顕微鏡として優れた性質を内在している。しかしながら、磁性体中のスピンドYNAMIXを、X線顕微鏡を用いて直接捉える試みは、世界的に見ても始まったばかりである。このX線時分解磁気イメージング手法が確立されれば、スピンドYNAMIXの時空間を合わせた4次元構造の可視化等、様々な応用が期待できる。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究の目的は、コヒーレント軟X線イメージング手法と時間分解測定を組み合わせることで、軟X線時分解磁気イメージング手法を確立することである。軟X線は、波長が1nm程度のX線であり、電子の共鳴現象を介することで電子スピンに敏感なプローブとなる。この性質を用いて、円偏光X線二色性(XMCD)や共鳴X線磁気散乱等の磁気観測手法が開発され、現在では広く利用されている磁気プローブである。一方で、波面が空間的に揃ったコヒーレント軟X線は、回折現象を利用することで、数nm程度の空間分解能の磁気イメージング顕微鏡としても利用できる。更に、軟X線を利用できる放射光施設では、X線は数十ピコ秒程度の幅を持つパルスとして出射される。このパルス性を利用することで、時分解測定が可能になる。そこで、本研究では、コヒーレント軟X線を用いたイメージング手法と時分解測定を組み合わせることで、時分解磁気イメージング手法を確立し、磁性体中に誘起されるスピンドYNAMIXの直接観測を行うことを試みた。実際には、この測定システムを立ち上げ、薄膜磁性体中に誘起されるスピン波スピン流の軟X線時分解磁気イメージングを目指した。

スピン波スピン流は、マイクロ波の AC 磁場成分により誘起する。この現象は強磁性共鳴と呼ばれ、通常マイクロ波の吸収というマクロな物理量として観測される。本研究では、これをX線によって観測することで、スピン流のミクロな情報を取り出すことが目的である。

3. 研究の方法

試料は、SiNメンブレン(600nm)上に磁性体薄膜(100nm)をスパッタ装置により積層させたものを用いた。実際に作製し、測定に用いた試料は以下の通りである。

1. SiN/Ta 5nm / [Pt2nm Co1.2 nm Ta3nm]_{n=10}/Ta 10nm (多層膜試料)

2. SiN/FeNi 100nm/SiO₂ 20nm

これらの試料は、X線反射率にて試料評価を行った他、強磁性共鳴測定装置により、強磁性共鳴スペクトルの観測を行い、マイクロ波の吸収を確認した。

軟X線実験は、国内の放射光施設 Photon Factory の軟X線ビームライン(BL-13A, BL-16A)にて行った。実験の詳細は、以下の研究成果に記述する。

4. 研究成果

本研究では、以下の2つの成果が得られた。

(1) 視野可変な拡大投影顕微鏡による磁気イメージングの確立

(2) パルスX線を利用した時分解測定による強磁性共鳴の観測

これらについて、詳細を記述する。

(1) まず、コヒーレント軟X線を用いた実空間磁気イメージング手法である拡大投影顕微鏡法の確立を行った。図1上段に、実験配置の概要を示す。この手法では、まずX線は集光素子

(Fresnel zone plate : FZP)により、集光される。集光点をすぎると発散していくが、その途中に試料を設置する。更に下流に二次元検出器(CCD カメラ)を設置し、試料からの透過光を観測する。試料が磁性体の場合、XMCD の効果により、磁気構造を直接反映した透過強度パターンを得ることができる。

この測定では、垂直磁化を出現するため Co 薄膜を Pt や Ta で挟んだ多層膜試料(SiN/Ta 5nm / [Pt2nm Co1.2 nm Ta3nm]n=10/Ta 10nm) を用いた。このような垂直磁化をもつ強磁性体薄膜は、迷路状の磁気ドメイン構造を有することが知られている。図1下段には、Co L_{III} X線吸収端に対応するエネルギー($E = 779$ eV)のX線を用いて、Pt/Co/Ta多層膜試料の磁気ドメインを実際に可視化した様子を示している。この撮影には、右巻きと左巻きの円偏光X線を用いており、両者の画像の差分を示している。また、1回の撮影時間は500msである。図1より、迷路上の磁気ドメイン構造に対応して、迷路上の透過強度分布が得られていることが明瞭に見て取れる。

更に、この手法の特徴として、X線の集光点と試料の距離を変えることで、得られる実空間像の拡大縮小が可能であることが挙げられる。例えば、集光点に試料が近い時は拡大した像が、逆に集光点に遠い時は試料の全体像が観測されるはずである。図1下段には、実際に試料位置を変えながら撮影した磁気ドメイン構造を示してある。試料位置の変化に伴い、視野や拡大率が変化していることが確認できる。

以上のように、ナノメートルスケールの静的な磁気ドメイン構造の可視化手法の確立に成功した。この手法は、撮影時間が500msと比較的短いため、外乱の影響を受けにくく、時分解測定との組み合わせに適していると考えられる。

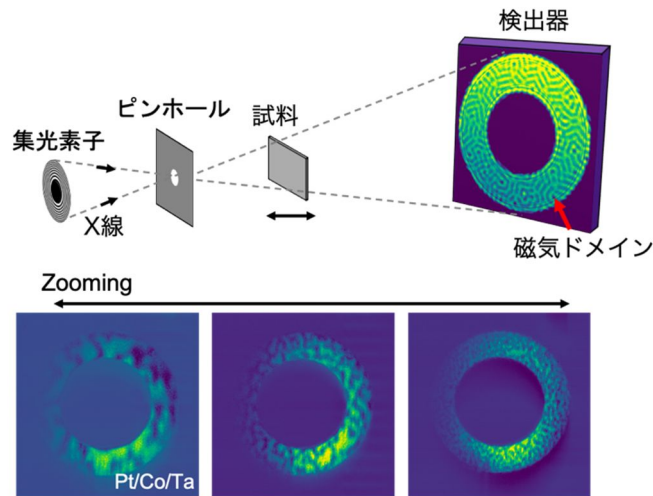


図1. (上段) 拡大投影顕微鏡の概要と(下段) Co 薄膜中の強磁性ドメイン構造の可視化。

(2) 次に、マイクロ波時分解測定システムの構築を行った。図2左図に概要を示す。放射光施設では、X線は周回する電子バンチより生成される。Photon Factoryの場合、2ns(0.5GHz)ごとに、30ps程度の幅をもつパルスX線が出射される。更に放射光施設では、このX線出射のタイミングに同期した、0.5GHzのRF信号(マイクロ波)が利用できる。このマイクロ波を逡倍回路により周波数を変更し試料に照射すると、試料へのマイクロ波照射とX線照射が同期される。この時、マイクロ波の位相を、遅延回路によりpsのスケールでずらしていくことで、時分解測定が可能になる。更に、遅延位相を1Hz程度の正弦波信号で振動させ、ロックインアンプにより振動成分を観測する方法を採択した。

実験では、FeNi合金薄膜(SiN/FeNi 100nm/SiO₂ 20nm)試料に対して、Fe L_{III} X線吸収端に対応するエネルギー($E = 707$ eV)の円偏光X線を照射した。図2右図に、共鳴エネルギー($E = 707$ eV)と非共鳴エネルギー($E = 700$ eV)のX線を用いて、実際に得られた強度変化を示している。横軸は、遅延回路により調整した遅延時間であり、縦軸は右巻きと左巻きの円偏光X線を用いた際の透過強度の差を示している。共鳴エネルギーに対応したX線を用いた場合にのみ、明瞭に強度が振動している様子が分かる。これは、マイクロ波のAC磁場成分によりFeの電子スピンの振動している様子を、XMCDを通して捉えることに成功したことを示している。

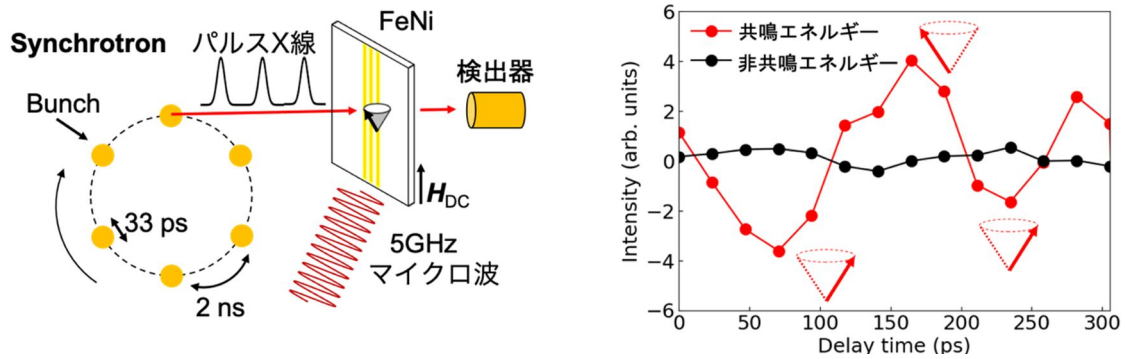


図 2. (左) 時分解測定システムの概要と(右) FeNi 薄膜中に誘起された強磁性共鳴の観測。

以上、(1)(2)に記述した通り、本研究期間中に実空間磁気イメージング手法の確立と、時分解測定システムの構築に成功した。一方で、時分解磁気イメージング手法の確立までには至らなかった。今後は、上述の手法を組み合わせ、時分解磁気イメージング手法を確立し、磁性体試料中を伝播するスピン流の観測を行う予定である。

以上の研究成果は、これまでマクロな物性測定では観測されなかったマイクロなスピン振動やその実空間像の観測に繋がり、国内外の研究において、大きなインパクトがあると予想される。更に、X線の高い透過力を利用すれば、スピンダイナミクスに対して、空間の3次元と時間の1次元を合わせた4次元観測が可能になる等、今後、多彩な研究展開が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井祐太
2. 発表標題 軟X線回折顕微鏡を用いた磁気ドメイン観測
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井祐太
2. 発表標題 マルチスケール軟X線顕微鏡の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井祐太
2. 発表標題 マルチスケール軟X線顕微鏡を用いた磁気ドメイン観測
3. 学会等名 第33回 日本放射光学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------