

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82121

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25790086

研究課題名(和文)多層膜スピン分波ミラーによる中性子ミクロン磁気イメージング法の開発

研究課題名(英文)Development of a neutron magnetic imaging technique with multi-layer neutron spin splitter

研究代表者

林田 洋寿(Hayashida, Hirotochi)

一般財団法人総合科学研究機構(総合科学研究センター(総合科学研究室)及び東海事業・その他部局等・その他)

研究者番号：50444477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：当初予定していた多層膜スピン分波ミラーを用いた、中性子スピン位相コントラスト法の空間分解能向上については、JRR3未稼働のため実施することができなかった。しかしながら本助成金によって、多層膜スピン分波ミラーの製作および精密制御システムを整備することはできており、JRR3稼働後には実証実験を実施できる環境が整えられた。

一方で、J-PARCによって現状実施可能な条件ではあるが電磁鋼板の磁区可視化の実験を実施した。印加磁場の変化に応じて、磁区の移動もしくは磁区構造の変化に起因する中性子偏極率の変化を観測することができた。

研究成果の概要(英文)：Improvement of a neutron spin phase contrast imaging technique using multi-layered neutron spin splitters could not be performed because the JRR3 could not be operated. However the multi-layered spin splitters and controlling system of them were prepared by the support of the aid. The demonstration can be performed so promptly after starting the JRR3 operation. On the other hand, a visualization test of magnetic steel sheet was performed at J-PARC. Change of magnetic domains with different applied magnetic fields were successfully visualized.

研究分野：中性子イメージング

キーワード：中性子イメージング

1. 研究開始当初の背景

磁性体は広く産業界に応用されているが、未だ磁区構造解析の研究が盛んに行われている。産業界における主な理由の一つとして、エネルギー効率の高いモーターやトランス等の開発が挙げられる。電気自動車の普及が進む近年において、モーター高効率化によるエネルギー効率の向上は重要課題である。無方向性電磁鋼板はモーターに用いられる磁性材料であるが、ヒステリシス損に起因するエネルギー損失を低減させることは、モーターの高効率化に対して必要である。そのためには磁界中における無方向性電磁鋼板の磁区構造を表面のみならず、内部まで明確にすることが必要である。これまで Kerr 効果、Faraday 効果、スピン SEM、放射光などにより、表面の磁区構造研究は行われてきたが、内部の磁区を直接観測する手法が皆無であったために、理論的予測や表面の磁区からの予測に留まっていた。

中性子は他の量子ビームプローブと違い、電荷を有しておらず透過力に優れている。更に、磁気モーメントを有するため、磁性体内部の磁区構造を直接観測することが可能となる。申請者はこれまで中性子を用いた磁気イメージング法の一つである、中性子スピン位相コントラスト法の開発を行ってきた。本手法は、磁場中における中性子スピンのラーモア歳差回転数を検出する手法であり、これまでにトランスの材料であるアモルファスリボンの磁区の可視化に成功している。しかしながら、これまで中性子スピン位相コントラスト法では空間分解能が $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ までしか到達できていない。例えば冒頭で述べた無方向性電磁鋼板においては、典型的な磁区サイズがミクロンから数十ミクロンオーダーとされているので、更なる空間分解能向上が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、まず中性子スピン位相コントラスト法におけるミクロンオーダーの空間分解能を目標として空間分解能向上を行い、また、電磁鋼板の磁区可視化実験を実施することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では多層膜スピン分波ミラーの導入によって空間分解能向上を目指した。多層膜スピン分波ミラーの原理を図 1 に示す。多層膜分波ミラーはシリコン基板上に非偏極ミラー層、ギャップ層、偏極ミラー層の順に製膜されたミラーである。磁場に対して平行/反平行のスピン状態(それぞれ $|\uparrow\rangle$ 、 $|\downarrow\rangle$) として表記されている)を持つ中性子ビームが入射すると、まず表面の偏極ミラー層によって磁場に対して平行なスピン状態を持つ中性子が反射される。反平行成分はギャップ層を透過し、非偏極ミラー層によって反射される。結果、ギャップ層の厚みに依存して平行/反平行成分が実空間で分波される。ギャップ層の厚みを制御することで実空間における分波の精度を制御することができ、この原理を利用して図 2(b)に示すように試料に対して別の経路で中性子ビームを照射することによって高空間分解能を実現することを考案した。

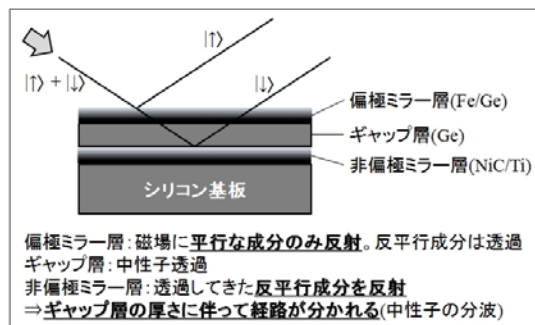


図 1. 多層膜スピン分波ミラーの原理

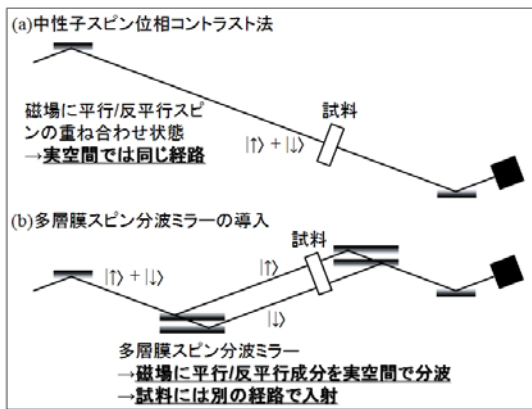


図 2. (a)中性子スピン位相コントラスト法の概念図。(b)多層膜分波ミラーを導入した際の中性子位相コントラスト法の概念図。

中性子スピン位相コントラスト法はこれまで日本原子力研究開発機構、JRR3 内の MINE2 ポートにおいて開発が行われてきた。そこで本研究は JRR3 の MINE2 ポートで実施を予定した。

4. 研究成果

多層膜スピン分波ミラーの製作を行い、多層膜分波ミラーを用いた空間分解能向上のための実験準備を整えた。実験を予定している MINE2 ポートの中性子波長(0.88nm)と、実空間においてミクロン単位での中性子ビームの分波を考慮して、ミラーの膜厚を下記のように決定した。

- ・非偏極ミラー層：NiC/Ti 28.6nm
- ・ギャップ層：Ge 0.5 μ m
- ・偏極ミラー層：Fe/Ge 28.6nm

H25 年度は開発のために 2 週間のマシンタイムを確保できたが、JRR3 が稼働せず、MINE2 での実験が実施できなかった。代替案としてパルス中性子施設である J-PARC での実験も検討したが、ハドロン実験施設で発生した事故により J-PARC も長期停止となったため、H25 年度に予定していた多層膜スピン分波ミラーを用いた空間分解能向上の実証実験を実施することができなかった。

H26 年度も JRR3 が稼働せず、MINE2 ポートでの実証実験は実施できなかった。J-PARC での代替実験を試みたが、MINE2 のようにスピン位相コントラスト法のセットアップ環境が全く整っていないため、十分なマシンタイムの確保に至らなかった。

一方で、空間分解能向上の前のセットアップではあるが、J-PARC/BL10 NOBORU ポートにおいて電磁鋼板の磁区可視化の実験を行った。図 3 に試料及び測定結果を示す。

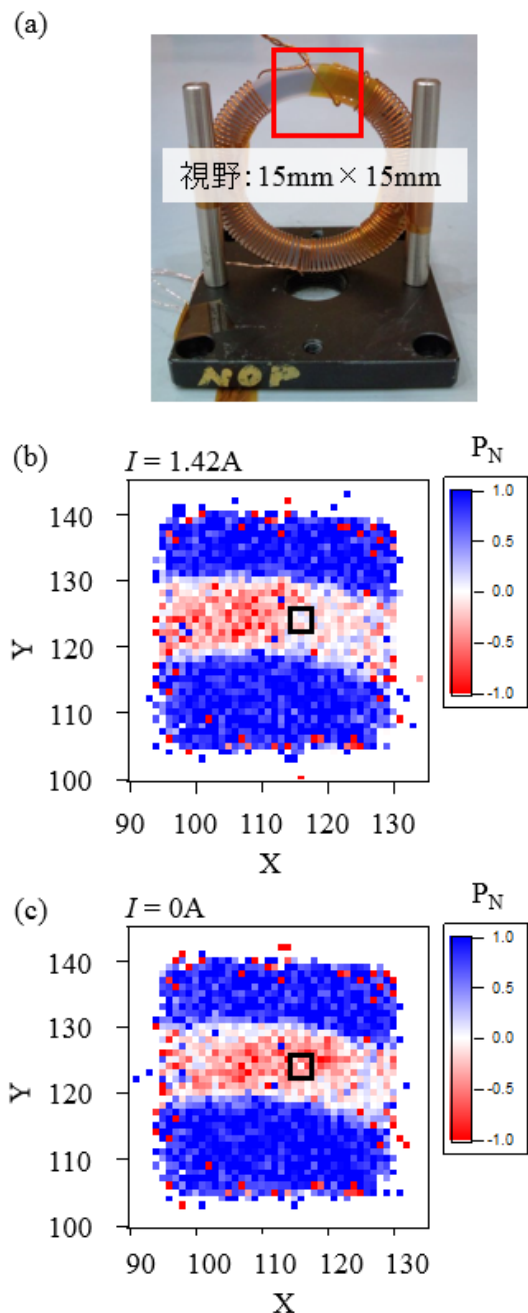


図 3. (a)測定に用いた電磁鋼板の。(b)(c)中性子偏極率の 2 次元イメージ

図 3(a)は試料として用いた電磁鋼板の写真であり、印加磁場を制御するためにソレノイドコイルが巻かれている。図 3(b), (c)は中性子偏極率の2次元イメージであり、それぞれソレノイドコイルに流れる電流値が $I=1.42\text{A}$, $I=0\text{A}$ であった。視野は約 $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ であった。

2次元イメージで青の領域は試料を通過していないので偏極率が+1である。一方試料を通過した部分では赤い領域($P_N = -1$)と白い領域($P_N = 0$)が混在している。中性子の偏極率は磁場の大きさと向きのみに応じて変化(試料の吸収等の影響は受けない)するため、試料を透過してきた領域における偏極率の変化は磁区構造を反映していると考えられる。図 3(b)と(c)を比較すると、赤い領域が移動している様子が観測され、この結果は印加磁場の変化に応じて磁区が移動した、もしくは磁区構造が変化したなど、何らかの変化が生じた様子を観測した結果だと考えられる。

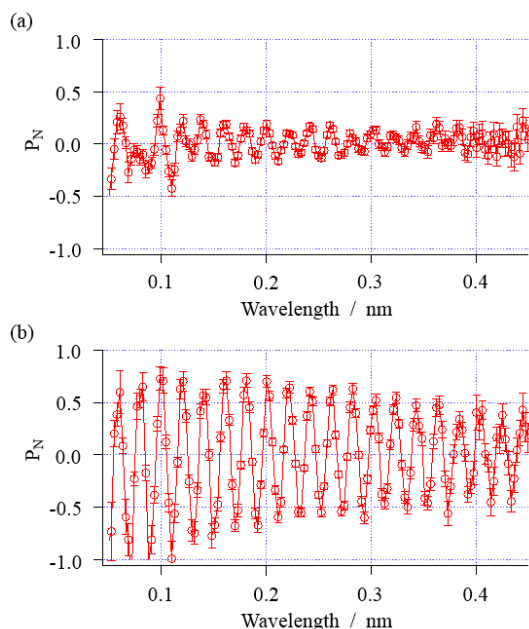


図 4. 中性子偏極率の波長依存性

図 4 は中性子偏極率の波長依存性を示した結果である。図 3(b), (c)中の四角で囲まれた領域は、それぞれ同じピクセル領域を示して

いる。図 3(b)の四角の領域を抜き出して、中性子偏極率の波長依存性を示したものが図 4(a)であり、同様に図 3(c)の四角の領域を抜き出したものが図 4(b)である。先にも述べた通り、中性子偏極率は磁場の大きさと向きに依存して変化する。図 4(a), (b)は明らかに異なる振る舞いであることが分かる。このことは、印加磁場の変化に応じて磁区構造に変化が生じたことをさらに売らずける結果である。これらの結果は雑誌論文に投稿済みで、現在査読中である(掲載決定ではないので「5. 主な発表論文等」には記載していない)。

本研究の結論として、当初予定していた多層膜スピン分波ミラーを用いた、中性子スピン位相コントラスト法の空間分解能向上については実施することができなかった。しかしながら本助成金によって、多層膜スピン分波ミラーの製作および精密制御システムを整備することはできており、JRR3 稼働後には実証実験を実施できる環境が整えられた。

一方で、J-PARC によって現状実施可能な条件ではあるが電磁鋼板の磁区可視化の実験を実施した。印加磁場の変化に応じて、磁区の移動もしくは磁区構造の変化に起因する中性子偏極率の変化を観測することができた。

JRR3 稼働後には本助成によって整備した機器を用い、更なる高空間分解能の条件下で磁区挙動解明に向けた研究を継続していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① H. Hayashida, et al., Journal of Physics: Conference Series 528 (2014) 012007.

[学会発表] (計 3 件)

- ① H. Hayashida, et al., Development and demonstration of a ^3He nuclear spin flip system for the in-situ SEOP ^3He neutron spin filter, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, June 2014, Tsukuba Japan.
- ② H. Hayashida, et al., Development of an in-situ SEOP ^3He neutron spin filter for magnetic imaging techniques, Polarized Neutrons for Condensed Matter Investigations 2014, Sep. 2014, Sydney Australia.
- ③ H. Hayashida, et al., Development of an in-situ SEOP ^3He neutron spin filter for magnetic imaging techniques at J-PARC, International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Sep. 2014, Mito Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

林田洋寿(HAYASHIDA Hirotooshi)

一般財団法人・総合科学研究機構・副主任

研究員

研究者番号 : 50444477

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :