

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22604009

研究課題名（和文）偏極パルス中性子による空間磁場可視化法の開発と応用

研究課題名（英文）Development and application of spatial magnetic field imaging technique using polarized pulsed neutrons

研究代表者

篠原 武尚（SHINOHARA TAKENAO）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究副主幹

研究者番号：90425629

研究成果の概要（和文）：本研究は、中性子の持つ高い物質透過能力と中性子磁気モーメントと磁場との直接的な相互作用を活用し、磁性材料内部や空間中の磁場を可視化する手法を開発するものである。中性子スピン偏極度を 3 次元的に解析する技術と、パルス中性子を用いて高効率・高精度に偏極度の波長依存性の解析技術を組み合わせることにより、磁場の方向および強度を定量的に評価することを可能とし、空間中および軟磁性材料中の磁場の分布を定量的に解析することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Development of spatial magnetic field imaging technique using polarized pulsed neutron has been performed. The combination of the three-dimensional neutron polarization analysis and the neutron wavelength dependence analysis using pulsed neutrons makes it possible to quantify both the direction and strength of magnetic fields. Using this technique, we have succeeded to evaluate the magnetic field distribution inside a soft magnetic material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：放射線、X線、粒子線 中性子

1. 研究開始当初の背景

近年の電気自動車等の普及に伴い、より高性能の永久磁石の開発におけるニーズが高まっている。その永久磁石の性能を検討する上で、磁石内部の磁区構造の可視化は非常に重要な情報を与える。しかしながら、物質内部の磁区構造を観測するプローブはこれまで存在しなかった。一方、中性子は高い物質透過能力とスピン自由度を有するため、物質

内部の磁場を検出する可能性を持つ。特に、中性子スピンのラーモア歳差運動に伴うスピン状態の変化は、磁場空間を通過した前後での偏極度の変化として現れるため、中性子の偏極度を位置毎に検出することによって物質内部の磁場の分布の画像化し、磁石内部の磁区の観察を可能とすると期待される。

一方、中性子スピンの回転角は磁場の強さと中性子が磁場空間に滞在する時間に依存

するため、偏極度の中性子波長依存性を調べることでスピンの回転角の絶対値を求めることが可能となり、磁場の定量化ができる。そのため、パルス中性子を用いた飛行時間分析法を利用することで、高精度かつ高効率に中性子偏極度の波長依存性を位置毎に調べ、高精度かつ定量的に磁場の空間分布および強度分布を可視化することが可能となる。本研究では、さらに中性子スピンの3次元制御技術を導入することで、より高度な中性子イメージング技術を確立し、実際の磁性材料などへ応用する。

2. 研究の目的

本研究では、偏極パルス中性子の偏極度解析技術を応用し、従来の磁気プローブでは困難であった物質内部や空間中の磁場分布状態を可視化する新しい手法を開発することを目的としている。そこで以下に関する開発を進める。

(1) スピン量子化軸制御機器の開発と磁場ベクトル解析手法の確立

中性子スピンの偏極度を3次元的に解析することにより中性子偏極度をベクトル的に取扱うことが可能となるとともに、その変化から、観測対象の磁場のベクトル要素を検出することが原理的に可能である。そこで、パルス中性子のスピン量子化軸を制御するための機器を開発する。そして、各スピン条件において偏極度の波長依存性を解析することにより、磁場を位置および方向の多次元で解析・イメージングする技術を確立する。

(2) 応用研究

3次元スピン制御に基づく磁場ベクトル解析手法を確立した後、これらを応用して磁性体内部の磁区構造の可視化および空間中の磁場の可視化実験を行い、応用研究を進める。

3. 研究の方法

本研究では、偏極パルス中性子を用いた空間磁場可視化法の開発とその応用研究を実施する。本研究における主たる開発要素は、以下である。

- ・偏極中性子のスピン量子化軸制御方法および中性子スピンを高度にハンドリングする輸送技術の確立
- ・空間磁場を可視化するために必要となる磁場空間設計とその実現
- ・実験データとして得られる中性子偏極度からベクトルとしての磁場を得るための解析手法の確立

これらの基盤となる手法が構築された後、応用研究として永久磁石内部および外部の磁場分布の可視化実験を実施し、手法の妥当性の検証および改良を行い、より一般的な磁

性体や磁場空間の可視化を行う。これにより、より高度な偏極パルス中性子イメージング法の開発を目指す。

(1) スピン量子化軸制御機器の開発と磁場ベクトル解析手法の確立

中性子スピンの量子化軸を3次元的に制御するための機器を設計し、構築する。偏極素子および検極素子の間に、平板状コイル（スピン回転子）を設置し、ここにパルスに同期した電流を印加して幅広い波長範囲で中性子スピンを $\pi/2$ 回転させる。このとき、スピン回転子が正しく動作するための環境整備、偏極中性子の偏極度を損なうことなく輸送するための磁場の設計を併せて実施する。

構築したスピン量子化軸制御機器が機能することをパルス中性子を用いて検証する。実験にはJ-PARC/MLFのビームラインBL10を使用する。テスト試料にはソレノイドコイルを用い、コイル内部の磁場による偏極度変化を3次元で解析可能であることを実験的に証明する。

(2) 応用研究の実施

確立した3次元偏極度解析の応用として、磁石や電流が作る空間中の磁場、磁性体内部の磁場の可視化実験を行う。また、偏極度の波長依存性の解析から、磁場の方向と強度を定量的に求める手法を確立する。

4. 研究成果

(1) スピン量子化軸制御機器の開発

偏極パルス中性子のスピン量子化軸制御方法の確立に向けた実証試験を実施し、量子化軸制御機器の設計および製作を行った。

偏極中性子の量子化軸制御方法として、本研究では磁場環境下での中性子スピンの回転を利用する方法を検討した。試験研究では、2台の平板状のスピン回転子を直行して配置し、それぞれのコイルに独立に電流を印加することによって、Z方向、X方向（ここで、ビーム進行方向をZ軸とする）へスピン量子化軸を変更できることを確認した。パルス中性子の場合、そのエネルギーが中性子飛行時間に依存するため、コイルに印加する電流値を中性子の飛行時間に同期させて変化させることによって、広いエネルギー範囲の中性子について一定のスピン回転を与えることが可能となる。そこで、ビーム試験においてスピン回転コイルへの印加電流を時間変化させ、偏極中性子のスピン量子化軸を一定に制御可能であることを冷中性子領域で確認した。さらに、このスピン回転コイルを使用してX、Y、Zの3次元でスピン量子化軸を制御し、検極子を用いてスピン解析を行うことにより、ビームが通過する空間中の磁場をベクトル的に検出した。この結果から、位置敏

感型中性子検出器と組み合わせたイメージング実験とスピン制御技術を組み合わせることで、位置毎の磁場ベクトルの情報を得ることが可能となることが示された。

この試験結果に基づき、5cm×5cmのビームサイズの中性子について使用可能なスピン回転子を設計し、製作を行った(図1)。

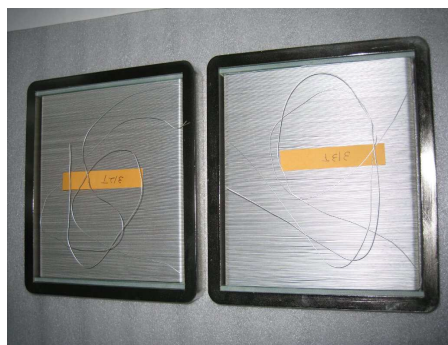


図1 スピン回転子

また、試験研究より、スピン回転子を正確に動作させるためには回転子周囲の外部磁場を遮断することが重要であることが判明し、パーマロイ製のシールドボックスの中に回転子を設置した。また、シールドボックス中に偏極中性子の偏極度を損なわずに導くための接続コイルを整備した。

中性子スピン量子化軸制御素子の性能試験として、素子への電流印加によって中性子スピンの量子化軸が適切に変化することを確認した。素子に印加する電流値は予め数値計算により求めた値と一致し、素子が設計通りに正常に動作することが確認された。この素子を利用し、中性子スピンの量子化軸をX, Y, Zの3次元で制御し、素子の間に配置したコイルの内部に発生する磁場の強度および方向の定量化を実施し、コイルの設計値と一致する結果を得た。

(2) 応用研究の実施

これまでに開発した偏極パルス中性子を用いた3次元スピン解析法による磁気イメージング手法を用いて、厚さ30 μm の軟磁性金属箔についてイメージング試験を実施し、縞状の偏極度分布を得た。この試料について3次元でのスピン偏極度解析を行い、その中性子波長依存性を位置毎に解析し、磁場ベクトルを評価した。その結果、縞状の分布が磁区構造を反映するものであり、磁場の方向が各縞同士で180度反転していることがわかった(図2)。偏極度の波長依存性の解析から、試料内部の磁場強度は、 $1.28 \pm 0.07 \text{ T}$ であることが見積られた(図3)。

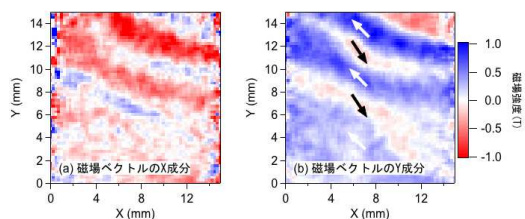


図2 軟磁性金属箔の測定結果(左: X方向(水平方向)の磁場成分の分布、右: Y方向(垂直方向)の磁場成分の分布)

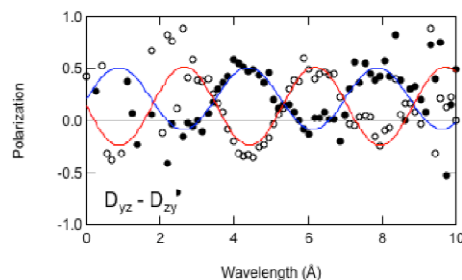


図3 偏極度の波長依存性。(○は図2右図の白矢印の位置、●は同じく図2右図の黒矢印の位置での偏極度を示す。)

また、厚さ0.23mmの電磁鋼板試料についても同様の試験を行った(図4)。3次元スピン偏極度解析より、試料内部の磁場強度の定量化と磁場方向を評価した結果、試料内部の磁場は電磁鋼板の異方性の方向と一致し、偏極度の波長依存性の解析から見積られた磁場強度($1.79 \pm 0.02 \text{ T}$)は磁気測定結果と矛盾しないものであることがわかった(図5)。

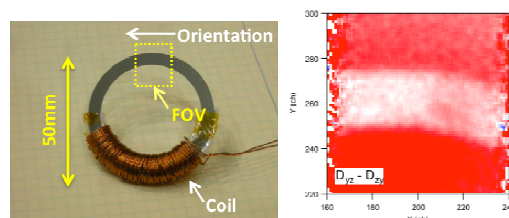


図4 電磁鋼板試料(左)と偏極度の空間分布(右)

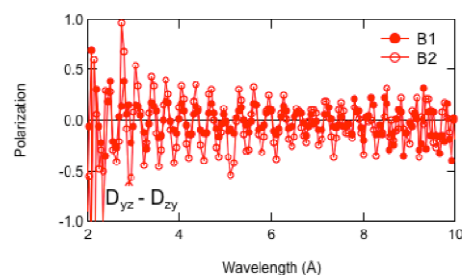


図5 偏極度の波長依存性。

このように、スピン量子化軸制御素子を偏極パルス中性子を用いた磁気イメージング法に導入することにより、磁場の空間分布を画像として取得するだけでなく、局所的な磁場強度とその方向を定量化できることが実

験的に示された。

さらに、電流を印加した銅線の周囲に発生する磁場の可視化とその解析による電流密度の評価に関する試験を実施した。銅線周囲に形成される磁場の可視化結果は、数値計算により得られた結果と定性的には一致することが確認されたものの、3次元スピン解析による実験結果の一部が数値計算結果を再現しないことがわかった。これは観測対象の磁場に対して測定系外部からの漏洩磁場の影響が強かったことに起因するものと考えられた。

以上のように、偏極パルス中性子の3次元スピン解析に基づく磁気イメージング法の開発により、磁性材料中の磁場の定量的な可視化および空間磁場の可視化が可能となった。

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 5 件)

- (1) T. Negishi, T. Shinohara, H. Sato, H. Hasemi, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi; "Preliminary experiment of magnetic imaging using polarized pulsed neutrons at HUNS", Physics Procedia (accepted). 査読無し
- (2) Y. Kiyonagi, H. Sato, T. Kamiyama, T. Shinohara; "A new imaging method using pulsed neutron sources for visualizing structural and dynamical information", J. Phys.: Conference Series 340 (2012) 012010. 査読有り
- (3) T. Shinohara, K. Sakai, T. Kai, M. Harada, K. Oikawa, F. Maekawa, J. Suzuki, T. Oku, S. Takata, K. Aizawa, M. Arai, Y. Kiyonagi; "Quantitative magnetic field imaging by polarized pulsed neutrons at J-PARC", Nucl. Instr. Meth. A 651, 121-125 (2011). 査読有り
- (4) 篠原武尚「偏極中性子を用いた磁気イメージング」日本中性子科学会誌「波紋」Vol.21, 180-183, 2011. 査読有り
- (5) 鬼柳善明, 佐藤博隆, 篠原武尚「パルス中性子を用いた新しいイメージングの展開」日本真空協会誌 Vol.53, No.12, 758-764, 2010. 査読有り

[学会発表] (計 10 件)

- (1) 篠原武尚, “偏極パルス中性子を用いた軟磁性材料中の磁場の可視化”, MLF シンポジウム, 2012 年 10 月, 東京
- (2) T. Shinohara, “Quantitative Imaging of Magnetic Fields inside Fe Based Soft Magnetic Sheet using Polarized Pulsed Neutrons”, IUMRS-ICEM2012, 2012 年 9

月, 横浜

- (3) 篠原武尚, “偏極パルス中性子を用いた磁気イメージング法の開発 III”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月, 横浜
- (4) T. Shinohara, “Development of quantitative magnetic field imaging using time-of-flight neutron polarization analysis”, PNCMI2012, 2012 年 7 月, パリ, フランス
- (5) T. Shinohara, “Visualization of magnetic field distribution in a soft magnetic foil by polarized pulsed neutron imaging”, 1st AOCNS, 2011 年 11 月, つくば
- (6) T. Shinohara, “DEVELOPMENTS OF ENERGY-RESOLVED NEUTRON IMAGING TECHNIQUES USING PULSED NEUTRONS AT J-PARC”, NEUWAVE-4, 2011 年 10 月, ノックスビル, アメリカ
- (7) 篠原武尚, “偏極パルス中性子を用いた磁気イメージング法の開発 II”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月, 富山
- (8) T. Shinohara, “QUANTITATIVE MAGNETIC FIELD IMAGING BY POLARIZED PULSED NEUTRONS AT J-PARC”, WCNR9, 2010 年 10 月, ピラネスバーグ, 南アフリカ
- (9) T. Shinohara, “Magnetic Field Imaging using Polarized Pulsed Neutrons at J-PARC”, PNCMI2010, 2010 年 7 月, デルフト, オランダ
- (10) T. Shinohara, “DEMONSTRATION OF MAGNETIC FIELD IMAGING WITH POLARIZED NEUTRONS AND SOME OTHER TEST EXPERIMENTS AT J-PARC”, NEUWAVE3, 2010 年 6 月, 札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 武尚 (Shinohara Takenao)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター・研究副主幹
研究者番号: 90425629

(2) 研究分担者

酒井 健二 (Sakai Kenji)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター・研究副主幹
研究者番号: 40272661

(3) 連携研究者

鈴木淳市 (Suzuki Junichi)
一般財団法人総合科学研究機構・東海事業
センター・利用研究促進部部长
研究者番号: 40354899