

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14133

研究課題名（和文）大きなビームアクセプタンスをもつ中性子共鳴スピNFLリッパの開発

研究課題名（英文）Development of a neutron resonance spin flipper with large beam acceptance

研究代表者

小田 達郎 (Oda, Tatsuro)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：70782308

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）：静磁場と高周波振動磁場による磁気共鳴を利用して、中性子のスピン状態を制御するデバイスは共鳴スピNFLリッパと呼ばれ、中性子スピンを利用した様々な測定手法の精度を決定づけるキーデバイスである。静磁場の空間分布と中性子ラーモア歳差角の分布幅の対応を調査するため、中性子の軌跡に沿った磁場積分を計算するコードを作成した。共鳴スピNFLリッパによってつくられる、エネルギー差のある中性子重ね合わせ状態を偏極解析することで、中性子強度の時間振動が観測できる。磁場センシングへの応用を目指して、リッパ間に存在する磁場の影響によって生じる振動数シフト量を観測し、計算値と精度よく一致することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共鳴スピNFLリッパは、スピン偏極中性子を利用した様々な測定手法におけるキーデバイスであり、そのビームアクセプタンスを改善するための研究開発は、中性子分光法の高度化や新手法の開発のために重要である。共鳴スピNFLリッパの応用の一つとして、磁気センシングへの応用を目指した時間振動型スピNFLエコー分光法に関する実験を行った。強さを変えた磁場によってシフトした振動数を測定し、実験結果が理論的な予想と精度よく一致することがわかった。これにより、時間振動型スピNFLエコーシグナルの振動数シフトが、ダイナミックレンジ可変な磁場の定量手段として応用できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：Resonance spin flipper can control the neutron spin state through the magnetic resonance by a static and radio-frequency field. The spin flippers are the key device that determines the precision of measurement in various experiments using spin polarized neutron beams. To investigate the effect of spatial distribution of the static magnetic field on the variation of Larmor precession angles, in the context of neutron spin echo spectroscopy, we developed a code to calculate the magnetic field integration along the neutron flight path in a given static field. By using two resonance spin flippers, a superpositioned state of neutron with an energy difference is created and a time-modulation of neutron intensity can be observed. For the feasibility study of the magnetic sensing application using the time-modulation signal, its frequency shifts were measured in the presence of magnetic field between flippers. The experimental results show a good agreement with the theoretical prediction.

研究分野：中性子光学

キーワード：偏極中性子 磁気共鳴 スピNFLリッパ 量子状態操作 中性子スピNFLエコー法 パルス中性子 MIE ZE

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピン偏極した中性子ビームは、ナノスケールの磁気構造解析や磁場イメージングにおいて有用なプローブとして用いられている。静磁場と高周波振動磁場による磁気共鳴を利用して、偏極中性子のスピン状態を制御するデバイスは共鳴スピンフリップパー (Resonance Spin Flipper: RSF) と呼ばれ、中性子スピンを利用した様々な測定手法の精度を決定づけるキーデバイスである。

RSF の一つの重要な応用として、中性子共鳴スピンエコーと呼ばれる、中性子の微小な速度変化を検出可能な分光法がある。このうち、パルス中性子ビームを用いた時間振動型スピンエコー法 (MIEZE 法と呼ばれる [1]) では、2 つの RSF 間の空間に磁場や物質が存在するとスピンエコーシグナル (中性子スピン固有状態間の位相差に依存した干渉縞) の実効振動数がシフトするという特徴がある [2]。このシグナルの振動数シフト量から、RSF 間に存在する磁場の大きさや物質の中性子屈折率を測定することができるが、さらなる利点として、このシフト量は RSF を駆動する振動磁場の振動数や 2 つの RSF 間の距離によって調整できるため、測定磁場の大きさや屈折率のダイナミックレンジを広くできる可能性がある (測定感度の上限は利用できる振動数、距離の最大値から決まる)。従来の磁気イメージングでは、中性子波長と磁場積分に比例するラーモア歳差角を利用して磁場強度を測定するため、例えば狭い空間にある強磁場を測るには非常に高い波長分解能が必要であり、中性子強度や偏極技術の点から困難である場合がある。RSF を応用した磁場イメージング手法は磁場測定のダイナミックレンジが可変なので、この弱点を克服できる可能性がある。このような RSF を応用した磁場イメージングを効率的に行うためには、RSF が径の大きなビームや発散角の大きなビームに対応すること、すなわち大きなビームアクセプタンスが要求される。

### 2. 研究の目的

偏極中性子ビームに対して広いアクセプタンスをもち、精度の高いスピン制御を実現するために、静磁場および振動磁場の空間分布を考慮した RSF の設計を行う必要がある。従来の RSF の仕組みのモデル化においては、理想的な磁場形状のみが想定され、現実のコイルが持つ磁場の非一様な分布とスピンフリップ率、位相の関係については重視されてこなかった。そのため RSF のコイルの設計においては、モデル化しやすい理想的な磁場を作るといったナイーブな設計方針がとられてきた。実験では、基礎的な解析式で検討できる条件から大きく外れないという要求から、細く、平行性のよい中性子ビームを準備することが必要となり、ビームアクセプタンスが制限される。

本研究では、中性子共鳴スピンフリップ技術を応用した測定手法の開発・高度化のために、現実のコイルがもつ非一様な磁場分布における中性子共鳴スピンフリップ現象について理解し、大きなビームアクセプタンスをもった RSF の開発を目指す。具体的には、次に挙げる項目を目標とする。

- (1) 静磁場とスピンの数値シミュレーションにより、発散ビームに対して一様なスピンフリップを実現するためには、どのような磁場形状であるべきかを検討、探索する。
- (2) 振動磁場の振動方向について：振動磁場の方向は、静磁場と垂直であればよいので、ビームに垂直な方向、あるいはビーム進行方向に取る事ができる。ビームに垂直な場合は、解析的に解く際の理想的条件に近いが、振動磁場をビーム進行方向にとると、ビームパス上にコイルを置かなくてよいという大きな利点があるので、数値的シミュレーションにより、振動磁場の方向の違いによる RSF の作用の違いを明らかにする。
- (3) 振動磁場の形状について：振動磁場の空間的形狀もこれまでの解析的アプローチではほぼ考慮されてこなかった。発散ビームを共鳴フリップさせるために、振動磁場に求められる一様性の定量的基準あるいは望ましい磁場形状の傾向を得る。

### 3. 研究の方法

RSF の静磁場については任意の 3 次元空間分布をもつとし、高周波振動磁場については理想的な空間的境界をもつとして、RSF によるスピンフリップ率を計算するコードを作成した。スピンエコー分光法では、スピンフリップ率だけでなく、静磁場の拡がりによって生じるラーモア歳差角のばらつきが小さいことが高精度な分光のために重要である。静磁場の空間分布とラーモア歳差角のばらつきとの空間分布の対応を調査するため、双極電磁石を用いた RSF について、3 次元磁場計算 (図 1) を行い、中性子の軌跡に沿った磁場積分 (ラーモア歳差角に相当する) を計算するコードを作成した。

パルス中性子ビームを用いた実験により、スピンフリップ率の中性子波長依存性を測定した。また、2 つの RSF で構成される時間振動型スピンエコー装置を構築し、RSF 間の磁場の強さと振動数シフトの対応関係を測定した。

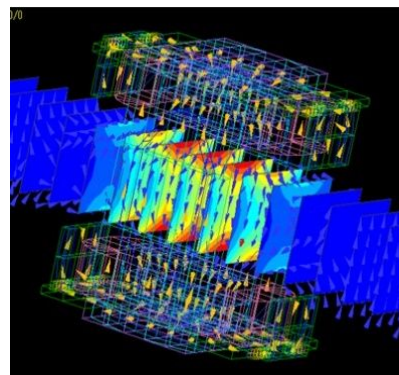


図 1. 中性子ビームが通過する領域に電磁石がつくる磁場の 3 次元計算結果の例。

#### 4. 研究成果

電磁石がつくる静磁場の空間分布によって、あるコリメーションをもったビームに生じるラーモア歳差角の中性子波長ごとの頻度分布の計算結果を図 2(a) に示した。各分布の平均値を差し引いて、中心を 0 とした。この分布の広がりを半値全幅として、波長に対してプロットしたものが図 2(b) である。歳差角は波長に比例するので、その分布幅も波長に対して比例関係にある。歳差角のばらつきは、エコーシグナルの位相のばらつきとなる。装置に起因する位相のばらつきを小さく抑え、エコーシグナルの明瞭度(コントラスト)を広い範囲で 1 に保つことが高精度な測定のために重要である。位相の分布がガウス分布に従い、標準偏差で  $\Delta\varphi$  の幅があるときエコーシグナルのコントラストは  $\exp[-(1/2)(\Delta\varphi)^2]$  の係数で減少する。コントラスト減少の目安として、この係数を波長の関数として図 2(c) に示した。このように磁場の空間分布から、中性子の歳差角の分布を計算し、磁場の広がりのシグナルコントラストに対する影響を推定することができる。

駆動振動数の異なる複数の共鳴スピンフリップパーを応用することで、振動数差から決まるエネルギー差を有する中性子重ね合わせ状態が実現できる。この重ね合わせ状態を偏極解析して検出することで中性子強度の時間振動が観測される。このシグナルのコントラストから中性子の微小な速度変化の情報を抽出するのが、中性子スピンエコー分光法である。本研究では、磁場センシングへの応用を目指して、2 つの RSF 間に磁場が存在する場合の時間振動型スピンエコーシグナルを観測する実験を行った。実験は、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) のパルス中性子ビームライン BL06 の MIEZE 型スピンエコー装置を用いて行った。図 3(a) に示した実験体系のように、2 つの RSF 間にコイルを挿入し、電流値(磁場強さ)を変えてシグナルの振動数を測定した。この振動数シフト量は、 $(L_{12}/L)\Delta f$  で与えられる。ここで  $\Delta f$  は、中性子磁気回転比  $\gamma$  を通して振動数の単位に変換された磁場の強さ  $\Delta f = \gamma B/(2\pi)$ 、 $L_{12}$  は RSF 間の距離、 $L$  はパルス中性子の総飛行距離である。このシグナルの時間振動は RSF の振動数差が定めるエネルギー差から生じるため、その振動数シフトは中性子波長に依らないことが、ラーモア歳差角による磁場センシングとの重要な違いの一つである。図 3(b) に磁場を変化させて観測された振動数と元の振動数 (20 kHz) からのシフト量を示す。実験体系のパラメータから計算される解析的な予想と観測された振動数シフトは精度よく一致した。これにより、時間振動型スピンエコーシグナルの振動数シフトが、ダイナミックレンジ可変な磁場の定量手段として応用できる可能性を示すことができた。

#### <参考文献>

- [1] R. Gähler, R. Golub, and T. Keller, Physica B **180&181**, 899-902 (1992).
- [2] T. Oda, M. Hino, M. Kitaguchi, P. Geltenbort, and Y. Kawabata, Rev. Sci. Instrum. **87**, 105124 (2016).

#### <謝辞>

J-PARC MLF BL06 における中性子ビーム実験は、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の中性子共同利用実験審査委員会によって承認されたビームタイムの一部を利用して行われました(課題番号 2014S07)。

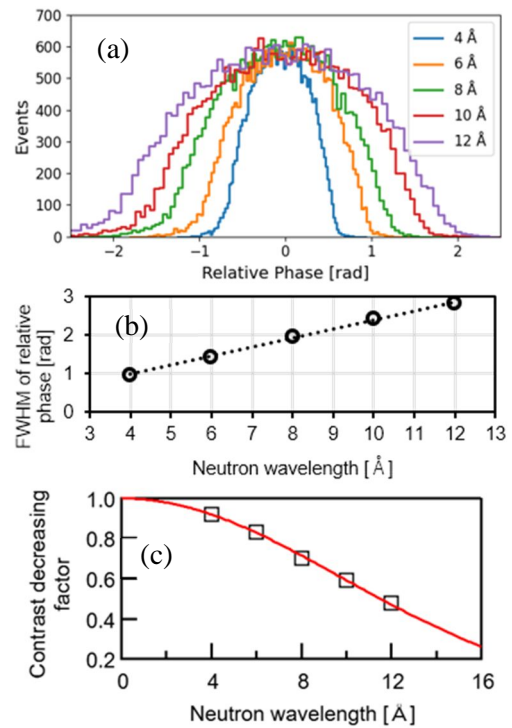


図 2. (a)ある広がりをもった磁場を通過した際の波長ごとのラーモア歳差角の頻度分布。(b) 歳差角のばらつきの波長依存性。(c) 歳差角のばらつきによるスピンエコーシグナルのコントラストの減少割合の計算値。

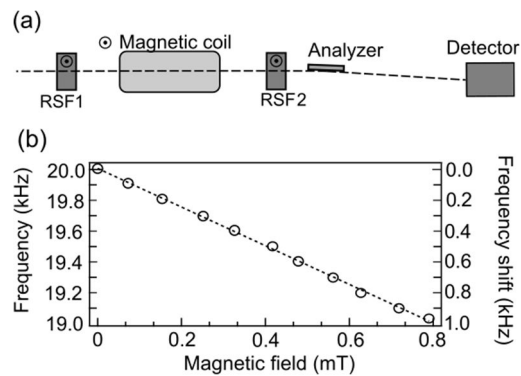


図 3. (a) 時間振動型スピンエコー装置の体系 (b) RSF 間に置いたコイルの磁場強さとスピンエコーシグナルの振動数シフトの関係。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 H. Endo, T. Oda, M. Hino, T. Hosobata,	4. 巻 564
2. 論文標題 Current status of the neutron resonance spin echo spectrometer on BL06 "VIN ROSE" at MLF, J- PARC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 91-93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2018.11.069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Hayashida, M. Hino, H. Endo, T. Oku, T. Okudaira, K. Sakai, T. Oda	4. 巻 1316
2. 論文標題 Experimental test of $^3\text{He}$ neutron-spin filter in MIEZE spectrometer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1316/1/012013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tatsuro Oda, Masahiro Hino, Hitoshi Endo, Norifumi L. Yamada, Yuji Kawabata, Hideki Seto	4. 巻 22
2. 論文標題 Observation of 400-kHz TOF-MIEZE Signals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.22.011029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Oda, M. Hino, M. Kitaguchi, H. Filter, P. Geltenbort, Y. Kawabata	4. 巻 860
2. 論文標題 Towards a high-resolution TOF-MIEZE spectrometer with very cold neutrons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 35-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.03.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, F. Funama, Y. Kawabata, H. Seto
2. 発表標題 Neutron Resonance Spin-Echo Spectrometers at BL06 VIN ROSE at J-PARC MLF
3. 学会等名 European Conference on Neutron Scattering (ECNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田達郎, 日野正裕, 遠藤仁, 船間史晃, 川端祐司
2. 発表標題 J-PARC MLF BL06 VIN ROSE のMIEZE スピンエコー分光器の現状
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, F. Funama, H. Ohshita, T. Seya, Y. Yasu, Y. Kawabata, H. Seto
2. 発表標題 Current status and perspective of the MIEZE spin echo spectrometer of BL06 at J-PARC MLF [poster]
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, F. Funama
2. 発表標題 Current status of the MIEZE spin echo spectrometer at BL06 at J-PARC MLF [poster]
3. 学会等名 Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering (AOCNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田達郎, 日野正裕, 遠藤仁, 川端祐司, 瀬戸秀紀
2. 発表標題 J-PARC MLF BL06のMIEZEスピネコー分光器の現状と今後の展開
3. 学会等名 日本中性子科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Oda, H. Ohshita, H. Endo, T. Seya, M. Hino
2. 発表標題 Data analysis method for MIEZE-type spin echo spectroscopy at pulsed neutron source
3. 学会等名 PNCMI (Polarised Neutrons for Condensed-Matter Investigations) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, Y. Kawabata, H. Seto
2. 発表標題 New Aspects of MIEZE Spectroscopy at Pulsed Neutron Source
3. 学会等名 International Workshop on Neutron Spin-Echo Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, Y. Kawabata
2. 発表標題 Simulation study on resonance spin flippers for high-resolution neutron resonance spin echo methods
3. 学会等名 International Conference on Neutron Scattering 2017, Daejeon (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Oda, M. Hino, H. Endo, Y. Kawabata
2. 発表標題 Experimental study of the high-frequency TOF-MIEZE technique at BL06 at J-PARC MLF
3. 学会等名 International Conference on Neutron Optics (NOP2017), Nara (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小田達郎, 日野正裕, 川端祐司, 遠藤仁, 大下英敏, 瀬谷智洋
2. 発表標題 パルス中性子を用いたMIEZE型スピンエコー分光法のためのデータ解析方法
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会, 吹田市
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小田達郎, 日野正裕, 遠藤仁, 大下英敏, 瀬谷智洋
2. 発表標題 TOF-MIEZEスピンエコー法のデータ解析
3. 学会等名 2017年度量子ビームサイエンスフェスタ, 水戸市
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小田達郎
2. 発表標題 MIEZE 型中性子共鳴スピンエコーシグナルのコントラストについての解析的検討
3. 学会等名 日本中性子科学会第17回年会, 福岡市
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----