

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760046  
 研究課題名（和文） 大強度パルス中性子に対応した中性子干渉光学素子の開発と分光器への  
 応用  
 研究課題名（英文） Development of devices and spectrometer using neutron coherent optics  
 for intense pulsed neutrons  
 研究代表者  
 北口 雅暁（KITAGUCHI MASAOKI）  
 京都大学・原子炉実験所・助教  
 研究者番号：90397571

## 研究成果の概要：

中性子波動を空間的に分割・重ね合わせする素子「ビームスプリッティングエタロン」による Jamin 型冷中性子干渉計は、人工多層膜ミラーを用いることで適用波長を長く、装置を大型化し、干渉計の感度を向上させることができる。ビーム分離の大きいエタロンを用いた大型の干渉計の開発を進めた。またミラーとして複数の波長領域に対して反射できる「多色ミラー」を開発しこれを干渉計に組み込み、「多色中性子干渉計」を構築することに成功した。一方中性子スピンエコーは試料のダイナミクスを測定できる準弾性散乱分光装置である。その一種である共鳴スピンエコーでは共鳴スピンフリップパーの振動磁場の周波数が高いほど測定の分解能が向上する。新しく開発した鉄芯入りの電磁石を用いて、従来の 20 分の 1 の電力で安全に高周波のスピンエコー装置を組むことに成功した。

## 交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,300,000 | 0       | 1,300,000 |
| 2008年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,000,000 | 210,000 | 2,210,000 |

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：中性子光学・J-PARC・中性子干渉計・基礎物理・ソフトマター

## 1. 研究開始当初の背景

低エネルギー中性子はその波動性を利用して重力・電磁気力・核力の中性子波動との相互作用を精密に測定することができる。また中性子は水素等の軽元素に敏感な解析手段であり、特に生体物質の研究においてX線では見ることのできない水素の情報を直接引き出せる。大強度陽子加速器施設 J-PARC

には中性子源が設置され、大強度の中性子ビームを利用できるようになる。J-PARC 等のパルス中性子源では白色の中性子が検出器に波長に応じて時間差を持って到達し、測定を時間分解すると各波長での測定を同時に行うことができる。原子炉で発生させる定常中性子を単色化して用いる場合に比べ実効的に数十倍の強度を得る事ができる。中性子

干渉光学素子を白色パルス中性子に対応させることで、冷中性子干渉計や中性子分光装置の性能向上が可能となる。

## 2. 研究の目的

研究代表者らが開発した「ビームスプリッティングエタロン」は中性子波動を空間的に分割・重ね合わせする素子であり、2つ用いることで **Jamin** 型冷中性子干渉計を構築することができる。ビームスプリッティングエタロンを白色中性子に対応させることで干渉計をパルス中性子に対応させる。パルス中性子を有効に利用することで実質強度を数十倍にし、これまでの干渉実験で不足していた統計精度を向上させることができる。中性子の波動性を用いた基礎物理実験の高精度化を図る。

中性子干渉計開発で培った位相制御技術を分光装置開発に応用する。中性子スピネコー装置は準弾性散乱分光装置としては最高のエネルギー分解能を持ち、試料の散乱による中性子の速度変化を試料前後でのスピン成分間の位相差の変化からとらえる。干渉計でも用いられる中性子スピントリッパーを高周波化しパルス中性子に対応させることで高分解能中性子共鳴スピネコー装置の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 白色パルス中性子対応ビームスプリッティングエタロン2つによる干渉計を構築する。ビームスプリッティングエタロンは2枚の基板上に中性子ミラーを形成し間隔を開けて組み合わせたもので、ビームを斜入射することで中性子を空間的2経路に分割する。幅広い波長域を反射できる中性子スーパーミラーを利用しエタロンを白色対応させる。ミラーとして使用する磁気ミラーを飽和させるために適用する磁場の影響で、中性子波動の位相が乱れてしまう。低磁場で機能する磁気ミラーを開発する。冷中性子ビームを用いて実証実験を行う。

(2) 高周波共鳴スピントリッパーを開発する。中性子共鳴スピネコー分光器のエネルギー分解能は共鳴スピントリッパーの周波数に比例する。より高周波で駆動するスピントリッパーを開発する。開発したトリッパーを用いてスピネコー分光器を構築する。いずれも実験用の中性子ビームラインの整備、制御系、データ収集系の整備として共通しており、それぞれの成果を活用することができる。

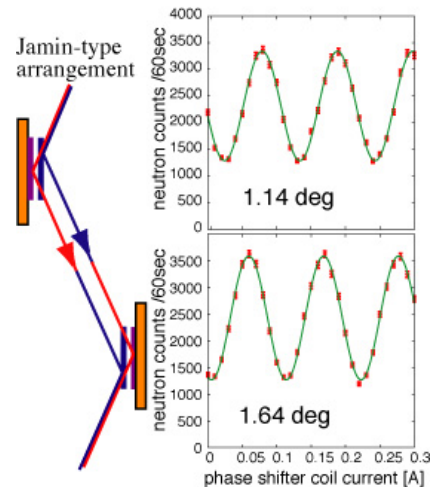
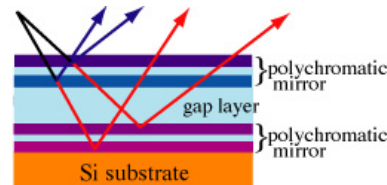
## 4. 研究成果

(1) 中性子ミラーとして複数の波長領域に対して反射できる「多色ミラー」を開発しこれを干渉計に組み込み、「多色中性子干渉計」

を構築することに成功した。

① それぞれの波長に対応した中性子多層膜ミラーをイオンビームスパッタ法によって順に積層した。全体の膜厚が厚くなることで応力変形が起こると、反射波の波面がひずみ干渉計として利用できなくなる。基板裏面から適当な厚さの薄膜をスパッタして基板変形を補償し、平面度の高い中性子ミラーを作成する方法を確立した。また入射中性子をスピン選択的に反射する磁気ミラーとして低磁場で飽和するミラーを作成した。干渉計構築の際非一様な強い外場による干渉の崩れを防ぐことができる。

② 日本原子力研究開発機構3号炉単色冷中性子ビームライン **MINE2** を用いて **Jamin** 型干渉計を構築した。入射中性子波長を変える代わりに入射角度を変化させ、多色対応を模擬した。複数の入射角で明瞭な干渉縞を観測し、「多色干渉計」を実証した。ミラーを幅広い波長幅に対応する「スーパーミラー」にした「白色干渉計」の実験もすすめている。



(上図) 多色ビームスプリッタの構造。

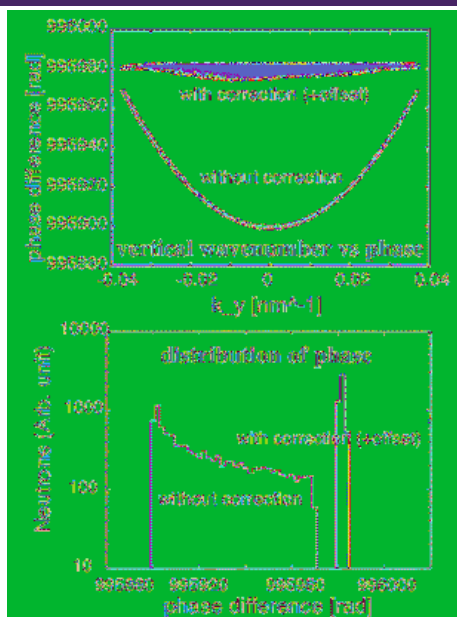
(下図) **Jamin** 型干渉計の配置と得られた干渉縞。単色中性子に対して2つの入射角で干渉を確認した。

③ ビーム分離の大きな干渉計開発を進めた。干渉計のビームの分離を拡大するためギャップ厚さが従来の20倍(0.2mm)のエタロンを作成している。**Jamin** 型干渉計ではその位置精度、位置安定性がギャップに比例して厳しくなる。高精度の位置制御を行うシステムを開発し、除震台を組み込んだビームラインを整備した。またビーム分離の大きな干渉計で行う実験として Aharonov-Casher 効果測

定の準備を進めた。

(2) 高周波共鳴スピントリッパーを開発し、スピネコー分光装置を実証した。

①高分解能共鳴スピネコーのための位相補正法を提案した。高分解能スピネコーでは発散を持つビームによりシグナルのコントラストが低下する。ビームの入射角によってスピネ位相差が積算する距離が異なるためである。共鳴スピネコー法ではスピントリッパーの量子化軸がビーム進行方向に対して垂直なため、従来型のスピネコーで用いられるフレネルコイルが適用できず、ビーム発散補正はこれまで不可能とされてきた。スピントリッパー前後に非一様な静磁場を適用することで共鳴スピネコーのビーム発散効果を補正する手法を提案し、シミュレーションでその可能性を確認した。

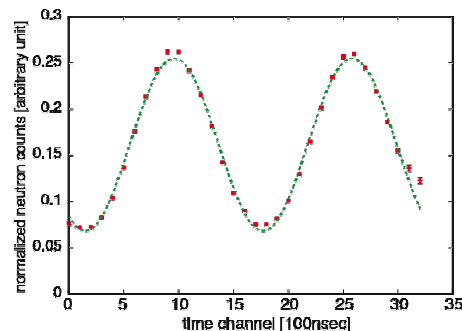


(上図) 位相補正デバイス (Coupling coil) の概念図。スピネ反転前後で空間的に非一様な磁場を通過することで、ビーム進行方向と垂直な方向の補正磁場を作ることができる。

(下図) モンテカルロシミュレーションによる位相分布。波長 2nm、装置長さ 2m、フーリエ時間 1.6  $\mu$  sec に対応した配置。補正なしではビーム入射角に応じて位相が広がるが、補正によって位相の分布が小さくなっている。

②高周波スピントリッパーを開発し、共鳴スピネコーを実証した。共鳴スピントリッパ

ーでは振動数に比例した静磁場が必要だが、空間的な磁場形状の面精度がよい磁場を発生させるために空芯コイルを用いていたため、高周波化に必要な強磁場を安全に発生させることができなかった。空間的な対称性のよい磁場を作る鉄芯入りの電磁石を用いることで、従来の 20 分の 1 の電力で安全に必要な磁場を発生させることができるようになった。これを用いて高周波のスピネコー装置を組むことに成功した。さらに高周波化に向けて開発を続けている。



(上図) 開発した高周波フリッパー。  
(下図) それを用いた MIEZE 型共鳴スピネコーのシグナル (周波数 600kHz)。

## 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 2 件)

① M. Kitaguchi, M. Hino, Y. Kawabata, H. Hayashida, S. Tasaki, R. Maruyama, and T. Ebisawa, Development of devices for beam divergence correction in the high-resolution NRSE spectrometer, Nucl. Instr. And Meth. A600 (2009) 117-119.、査読あり

② M. Kitaguchi, M. Hino, Y. Kawabata, S. Tasaki, R. Maruyama, and T. Ebisawa, Correction for beam divergence effect in a NRSE spectrometer with high resolution, Measurement Science and Technology, 19 (2008), 34014-1-5、査読あり

[学会発表] (計 10 件)

- ①北口雅暁、J-PARC ビームライン用スピ  
ンフリップチョッパー、日本物理学会第 64 回  
年次大会、2009 年 3 月 27 日、東京都豊島区
- ②北口雅暁、パルス中性子対応多層膜冷中性  
子干渉計の開発、中性子科学会第 8 回年会、  
2008 年 12 月 2 日、名古屋市
- ③北口雅暁、J-PARC パルス中性子を用いた  
中性子干渉実験、日本物理学会 2008 年秋季  
大会、2008 年 9 月 23 日、山形市
- ④M. Kitaguchi, Development of Multilayer  
Interferometer for Cold Neutrons  
Polarized Neutrons in Condensed Matter  
Investigations (PNCMI2008), 1 Sep. 2008,  
Tokai, Ibaraki
- ⑤ M. Kitaguchi, Development of Neutron  
Resonance Spin Flipper for High Resolution  
Spin Echo Spectrometer  
Polarized Neutrons in Condensed Matter  
Investigations (PNCMI2008), 1 Sep. 2008,  
Tokai, Ibaraki
- ⑥M. Kitaguchi, Development of devices for  
beam divergence correction in the  
high-resolution NRSE spectrometer,  
International Symposium on Pulsed Neutron  
and Muon Sciences (IPS08), 7 Mar. 2008,  
Moto, Ibaraki
- ⑦M. Kitaguchi, Neutron interferometer at  
J-PARC, The 4th International Workshop on  
Nuclear and Particle Physics at J-PARC  
(NP08), 6 Mar. 2008, Mito, Ibaraki
- ⑧北口雅暁、高分解能共鳴スピ  
ンエコー装置  
のための位相補正デバイスの開発、中性子科  
学会第 7 回年会、2007 年 11 月 28 日、福岡県  
福岡市
- ⑨北口雅暁、中性子共鳴スピ  
ンエコー装置の  
高分解能化のための要素開発、2007 年 9 月  
21 日、北海道札幌市
- ⑩ M. Kitaguchi, Correction for beam  
divergence effect in a NRSE spectrometer  
with high resolution, 4<sup>th</sup> European  
Conference on Neutron Scattering  
(ECNS2007), 26 Jul. 2007, Lunt, Sweden

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北口雅暁 (KITAGUCHI MASAOKI)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：90397571

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし