

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82121

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02816

研究課題名(和文) 磁束格子デザインによる中性子ビーム新集光法の開拓

研究課題名(英文) Development of technique for neutron beam focusing by magnetic flux lattice

研究代表者

鈴木 淳市 (Suzuki, Jun-ichi)

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)及び中性子科学センター(研究開発・中性子科学センター・主任研究員)

研究者番号：40354899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導体内に六極磁場等の多極磁場による磁束格子を作り、中性子をこの格子で回折させることで、中性子ビームを強い集光力で集光する新手法を世界に先駆けて開拓することを目指した。超伝導転移点の上下で集光力を比較する実験を行った。集光力の変化は確認できたが、増大させることはできなかった。中性子が多極磁場による磁束格子の回折条件を満たさなかった原因の特定が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁束格子を中性子の制御に応用するための技術開発に挑戦した。しかし、期待通りの成果を得るためには更なる磁束格子デザイン、形成に関する研究が必要である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a new method of focusing a neutron beam with a strong focusing force by creating a magnetic flux lattice by means of a multipole magnetic field such as a sextupole field in a superconductor and diffracting neutrons through this lattice. We have performed experiments to compare the focusing power above and below the superconducting transition temperature. A change in focusing power was observed, but it could not be increased below the transition temperature. It is necessary to identify the reason why the neutron did not meet the diffraction conditions of the magnetic flux lattice due to the multipole field.

研究分野：中性子小角散乱法の開発と応用、中性子光学

キーワード：中性子 集光 磁束格子

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 単色中性子磁気レンズの開発

「中性子光学素子の開発と応用 (代表者: 清水裕彦)」を共同推進し、世界に先駆けて種々の中性子光学素子の開発と応用を行う総合研究に取り組んだ。その成果の一つとして六極磁石を利用した中性子磁気レンズと四極磁石を利用した中性子偏極子の開発に成功し、さらに両磁石を中性子ビームの焦点を検出器面上に結ばせる集光型中性子小角散乱法に応用することで、従来のピンホール型中性子小角散乱法では小角分解能の制限により困難とされてきた約 0.5~5 ミクロンの微細構造の評価を、従来の手法の約 100 倍の効率で行うことを可能にした。そしてこの技術を日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 (JRR-3) の単色中性子ビームラインに設置された集光型偏極中性子小角散乱装置 (SANS-J-II) で実用化した。

### (2) 白色パルス中性子磁気レンズの開発

前項の手法には白色中性子を同一の焦点に集光できないという課題があった。我々はこの色収差の課題を克服するために白色パルス中性子の飛行時間と同期させて集光力を時間的に変化させるという着想を得て、パルス六極電磁石を利用した白色中性子磁気レンズの開発、さらに「多重連結磁石による白色中性子ビーム集光法の開拓 (代表者: 鈴木淳市)」を進め、多重連結磁石と中性子スピン反転器から構成される白色中性子磁気レンズの開発に成功した。そして後者の多重連結磁石を利用する白色中性子磁気レンズの技術を J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) の白色中性子ビームラインに設置された中性子小角・広角散乱装置 (大観) に搭載し、実用化した。

### (3) 磁束格子の中性子磁気小角散乱法による研究

超伝導転移温度以下にある第二種超伝導体では、第一臨界磁場から第二臨界磁場までの外部磁場を印加すると、磁場は量子化され磁束量子の格子(磁束格子)を作り超伝導体内に侵入する。我々はこれまでに種々の超伝導体 (Nb、Nb<sub>3</sub>Sn、CeRu<sub>2</sub>、Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub> 等) に均一磁場を印加して作った磁束格子を中性子磁気小角散乱法を利用して観測し、各超伝導体内にどのような磁場侵入長や超伝導異方性を持つ磁束格子が形成されるのかを明らかにした。

### (4) 本研究のアイデア

我々はこのように(1)単色中性子磁気レンズの開発、(2) 白色パルス中性子磁気レンズの開発の開発と研究を進展させ、中性子の適用範囲を広げることができた。しかし、適用範囲の制限がなくなった訳ではなく、中性子ビームの利用にはまだ高度化が求められている。本研究では、(1)、(2)で開発した技術に(3)の研究で蓄積した知識と技術を融合させる。そして超伝導体内に作った磁束格子を利用することで、中性子を高効率に集光する新手法の開拓を行う。

## 2. 研究の目的

中性子は物質透過能力等の優れた特長を持つ解析プローブである。しかし、ビーム強度は大強度施設といえども絶対的に不足しており、中性子の適用範囲に制限を与えている。これは中性子の幅広い利用を促進する上で克服すべき重要な課題である。この克服には優れた中性子光学技術が不可欠となる。我々は多極磁場(六極磁場等)が中性子の高精度かつ高効率な制御に極めて有効であることをこれまでの研究で見出した。そこで本研究では、超伝導体内に多極磁場による磁束格子を作り、中性子をこの格子で回折させることで、中性子ビームを強い集光力で集光する新手法を世界に先駆けて開拓することを目指す。

## 3. 研究の方法

これまでに均一磁場が作る磁束格子による中性子の回折は観測できていたが、本研究ではその知識を応用してループ磁場で磁束格子をデザインし、中性子を回折させることを試みた。

磁束格子による波長  $\lambda$  の中性子の回折条件は  $2d\sin\theta = \lambda$  となる。ここで磁束格子の面間隔  $d$  は磁束密度  $B$  の平方根に反比例する ( $d \propto (\varphi_0/B)^{1/2}$ 、ただし、 $\varphi_0$  は磁束量子)。これは  $B$  が低い領域では  $d$  が大きくなり長波長中性子を回折でき、 $B$  が高い領域では  $d$  が小さくなり短波長中性子を回折できることを意味する。例えば、正三角格子による  $\theta = 3 \text{ mrad}$  の回折では、 $B = 0.1 \text{ Tesla}$  の場合、 $d = 1,340 \text{ \AA}$ 、 $\lambda = 8 \text{ \AA}$  となり、 $B = 1 \text{ Tesla}$  の場合、 $d = 430 \text{ \AA}$ 、 $\lambda = 2.6 \text{ \AA}$  となる。

理想的な円形ループ磁場は直線電流で発生できるが、本研究で必要な約 0.1~1 Tesla の磁束密度の発生には大電流が必要になり現実的でない。そこで本研究では永久磁石を利用して超伝導体に磁場を印加し、その磁場勾配分布により格子面間隔が連続的に変化する磁束格子を作り、白色パルス中性子ビームを集光する技術開発に挑戦した。

### (1) 磁束格子のデザイン

中性子ビームを集光するのに最適な磁束格子を超伝導体内に作る磁石と超伝導体のデザインの検討として、中性子磁気レンズで実績のある六極磁石及び四極磁石の形状、サイズ、配置、超伝導体の形状、サイズ等を考慮した磁束密度の有限要素解析を行った。

図 1 に異方性フェライト磁石で構成した六極磁石の生み出す磁束密度分布の有限要素解析結果を示す。六極磁石の中心に低い磁束密度、その周辺に高い磁束密度の分布を生み出せることを確認した。図 2 に異方性フェライト磁石及びネオジム磁石で構成した四極磁石の生み出す磁束密度の動径分布を示す。磁束格子による中性子の回折を観測するために適当な 50 mTesla の磁束密度が超伝導体の内側に印加できるデザインを検討した。

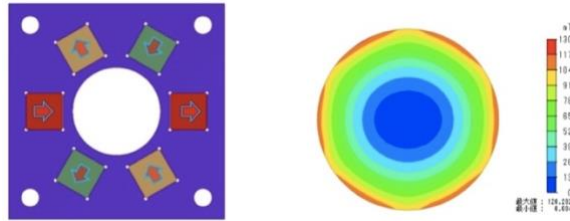


図 1. 有限要素解析で求めた六極磁石の生み出す磁束密度分布。

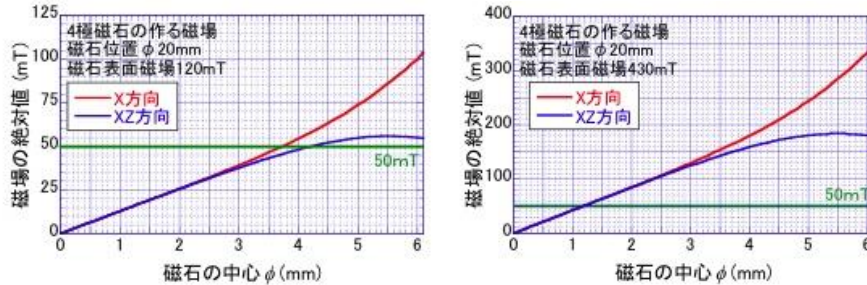


図 2. 四極磁石の作る磁場（計算）。（左）磁石が異方性フェライト磁石の場合、（右）磁石がネオジム磁石の場合

## (2) 超伝導材料と磁石材料の選択

最適なデザインを実現する超伝導材料と磁石材料を検討した。超伝導材料の臨界磁場は温度に依存する。磁性材料としては超伝導体に第一臨界磁場から第二臨界磁場までの磁場を印加できるものを、超伝導材料としては、クライオスタットの冷却温度 (>約 2 K) で、その範囲の磁場を受けられるものを検討した。また、超伝導材料の結晶性が磁束格子の形状に影響を与える可能性があるため、その結晶性や結晶方位を検討した。

超伝導材料には大きな単結晶が得られるニオブを選択した。磁石材料には異方性フェライト磁石（表面磁束密度：130 mTesla）とネオジム磁石（表面磁束密度：330 mTesla）を選択した。また、中性子の透過率、印加できる磁場の大きさを検討し、ニオブ単結晶のサイズを 10 mmφ × 10 mm 及び 12 mmφ × 10 mm、磁石のサイズを 5 mm × 5 mm × 15 mm、磁石中心の位置を 17 mmφ 及び 20 mmφ とした。

## (3) 中性子ビームによる実験

中性子ビームによる原理実証実験及び性能評価実験は、J-PARC の物質・生命科学実験施設（MLF）の中性子小角・広角散乱装置（大観）にクライオマグネットを設置し、その内部に試験体を取り付けて行った。図 3 に超伝導体（ニオブ単結晶、円柱軸// (111)）と六極磁石（異方性フェライト磁石）を組み合わせた場合の写真及びクライオマグネットのセットアップの写真を示す。実験では試料方位の調整に小角検出器を、8.5~15.5 A の中性子の磁束格子による回折の測定に超小角検出器を利用した。超伝導体のみを取り付け、50 mTesla の均一磁場を印加した場合の中性子の回折を測定し、多極磁石以外の機器構成に問題がないことを確認した（図 4）。

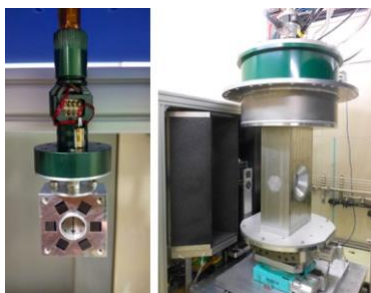


図 3. 試験体及びクライオマグネット。

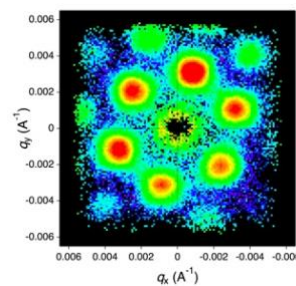


図 4. 均一磁場（50 mTesla）を印加した場合の磁束格子による中性子回折

## 4. 研究成果

六極磁石及び四極磁石と超伝導体を組み合わせた場合の中性子回折を超伝導体（ニオブ）の転移点（9.29 K）以上（100 K）と転移点以下（2.3 K）で比較した。種々のデザインの試験体の中性子回折を測定したが、転移点以上と転移点以下で中性子回折の顕著な差を観測することができなかった。それらの中でも最も大きな差が確認できた超伝導体（ニオブ単結晶、サイズ：10 mmφ × 10 mm、円柱軸// (111)）と四極磁石（ネオジム磁石、サイズ：5 mm × 5 mm × 15 mm、磁石中心の位置：17 mmφ）を組み合わせた場合の結果を図 5 及び図 6 に示す。

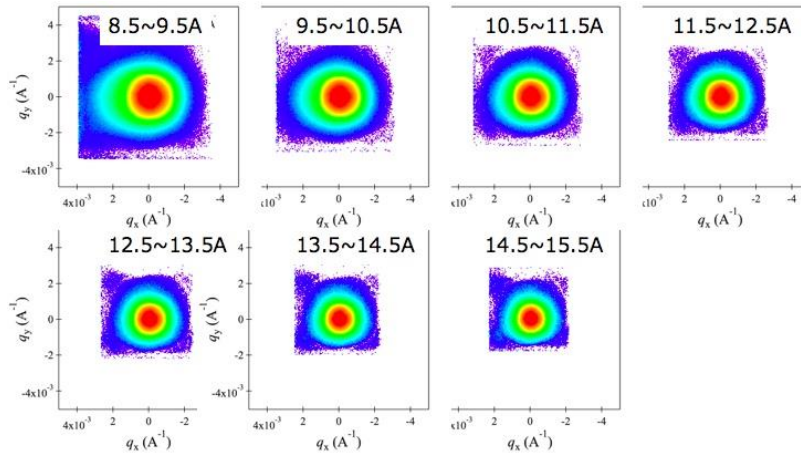


図 5. 四極磁場を印加した場合の超伝導転移点以上の回折像

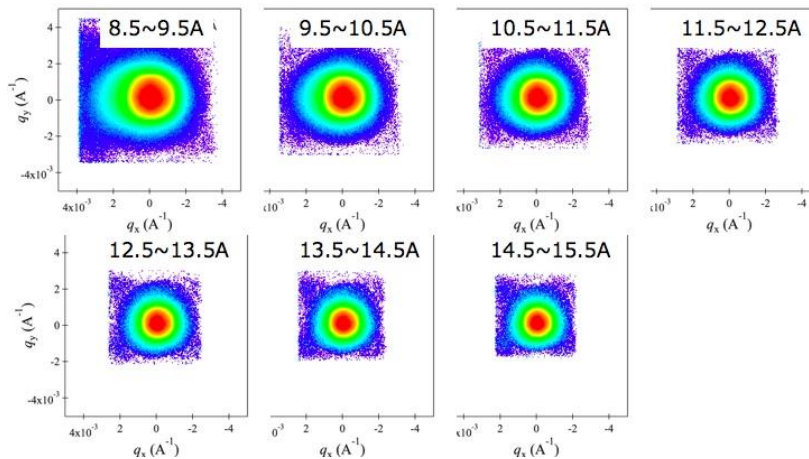


図 6. 四極磁場を印加した場合の超伝導転移点以下の回折像

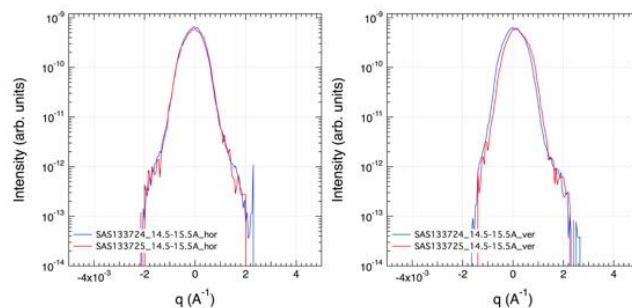


図 7. 中性子波長が 14.5~15.5 Å の場合の回折データの (左) 水平断面プロファイル及び (右) 鉛直断面プロファイル。青線：超伝導転移点以上、赤線：超伝導転移点以下。

図 7 に中性子波長が 14.5~15.5 Å の場合の回折データの水平断面プロファイル及び鉛直断面プロファイルを示す。超伝導転移点以下でビーム中心強度が低下するとともに裾の強度が低下し、ピークが鉛直方向にシフトする様子の変化量は僅かであるが観測された。ビーム中心強度が顕著に増大し、その一方で裾の強度が低下する結果を期待したが、予想と異なる結果となった。

予想と異なる結果は、中性子が多極磁場による磁束格子の回折条件を満たさなかったことが主な原因と考えられるが、磁束格子の形状が適切なループ状になっていない、強い磁場勾配により超伝導状態が弱まり磁束格子が形成されていない等の可能性がある。原因の特定のためには、今後、磁極の数を 1、2、3 等に減らし、磁極依存性を分析する、あるいは中性子波長範囲を変えて回折像の変化を分析することが必要と考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 J. Suzuki, S. Takata, K. Ohishi, H. Iwase, K. Kawamura, K. Hiroi, T. Morikawa, M. Sahara
2. 発表標題 The small and wide angle neutron scattering instrument (TAIKAN) of J-PARC
3. 学会等名 The 17th International Conference on Small Angle Scattering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Suzuki, S. Takata, K. Ohishi, H. Iwase, K. Kawamura, K. Hiroi, T. Morikawa, M. Sahara
2. 発表標題 The small and wide angle neutron scattering instrument (TAIKAN) of J-PARC
3. 学会等名 The 17th International Conference on Small Angle Scattering (国際学会)
4. 発表年 2018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
連携研究者	大石 一城  (Ohishi Kazuki)  (60414611)	一般財団法人総合科学研究機構・中性子科学センター・副主任研究員   (82121)	
連携研究者	吉良 弘  (Kira Hiroshi)  (50400239)	一般財団法人総合科学研究機構・中性子科学センター・技師   (82121)	