

新博士紹介

氏名 山田 雅子* (理化学研究所)
 論文提出大学 京都大学
 学位種類 博士 (理学)
 取得年月日 2013年3月25日
 題目 パルス白色中性子ビーム集光のための強度変調型永久六極磁石を用いた ToF レンズ
 ToF-lens for focusing pulsed white neutron beam using permanent magnet sextupole with modulation capability

1. はじめに

中性子源は従来主流であった核分裂原子炉が到達可能な中性子ビーム強度の上限値に達したため、加速器ベースの核破砕中性子源へと移行しつつある。米国 (SNS, ORNL), 日本 (J-PARC, JAEA, KEK) で超大型の大強度中性子線施設が稼動を開始し、加速器ベースの中性子源の開発及び利用が世界的に活発化している。

我々は加速器科学で長年培われた荷電粒子ビームに対するビーム制御技術を中性子ビームに適用し、発生した中性子の利用効率を向上させる中性子レンズの開発を行ってきた¹⁾。博士課程においては、飛行時間 (Time of Flight, ToF) 情報を用いて広い波長分散をもつパルスビームを色収差なく集光できる新しいタイプのパルス白色中性子ビーム集光レンズシステムを、強度変調型永久六極磁石 (modulating-Permanent Magnet Sextupole, mod-PMSx) と命名し、開発と集光性能テスト実験を行なった。

2. 強度変調型永久六極磁石 mod-PMSx

中性子は電気的には中性であるが、有限の磁気モーメントをもつため磁場中でポテンシャルを感じ、磁場の勾配に比例した力を受ける。六極磁場では磁場勾配が中心からの距離 r の二乗に比例して大きくなるため、中性子はビーム軸からの距離

に比例した力を受ける。これが中性子ビーム集光力の源である^{2,3)}。

この原理を使った六極磁石レンズの集光距離は中性子波長 λ の二乗に反比例した量で、白色ビームに対しては色収差が生じる。しかしながら、パルスビームの場合1つのパルス内の全中性子はパルス発生時刻を共通の時間原点として持つため、ある時刻 t にレンズ磁石に到着する中性子の波長は一意に決まる。磁場強度を t^{-2} に比例して変調し、この ToF 法を利用してビームパルスに同期することで集光力の波長依存性を相殺すれば、ワイドバンドなパルスビーム全域にわたって集光距離が一定となり、色収差効果を抑えた集光が可能となる。

mod-PMSx の六極磁石は永久磁石を extended-Halbach 型⁴⁾ に組み立てて非常に強力な六極磁場強度 G_6 を発生させており、レンズシステム全体の小型化に成功している。永久磁石を用いながらも G_6 を変調して色収差効果を抑制するために、回転二重リング構造を導入した。六極磁石を同軸二重リングに分割し固定された内輪の周りに外輪を回転させると、六極磁石軸上のビームボアに発生する六極磁束密度が余弦関数的に変調される。ワイドバンドビーム集光に必要な t^{-2} 変調に対して、変調1周期のうちおよそ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ の範囲を近似的に用いる。

磁束の集中する磁極のビームボアに近い部分の磁石を飽和磁束密度の大きな軟磁性材料 (パーマネンジュール) で置き換えることで、強度変調する際の最大値が拡大されるだけでなく、最小値も大幅に下がり、変調域を飛躍的に拡張することに成功している。この結果、開発した磁気レンズはビームボア径 $\phi 15$ mm で磁場変調域 $0.95 \leq G_6$ [10^4 T/m²] ≤ 5.6 , 変調幅 5.9 倍 ($G_{6\max}/G_{6\min} = 5.9$) を持ち、最長波長 λ_{\max} が最短波長 λ_{\min} の2倍 ($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 2$) というこれまで達成されたことのない広い波長域を集光する性能を有す。この磁場強度をもつ磁石長 66 mm の六極磁石を3ユニット直列連結し、有効磁石長 198 mm とした

* 理化学研究所 RIKEN (E-mail: yamadamasako@riken.jp)

磁気レンズシステムを構築した。1ユニットの断面を図1に示す。

開発にあたり最大の機械的課題は、六極磁場強度が強いために、内輪-外輪磁石リング間のギャップに生じる周期的に変化する最大39 Nmの外輪回転トルクであった。レンズシステムを小型に抑えるため、レンズ六極磁石の同軸上に配置された磁気トルクキャンセラー (magnetic Torque Canceller, mag-TC) を開発した。mag-TCはレンズ部分の六極磁石と同様に、同軸上二重リング構造をもち、レンズ磁石と大きさが同じで逆の極性を持つトルクを発生する。これがレンズ磁石と打ち消し合い最大トルクの大きさを大幅に抑制する。その結果ピークトルクは12.5 Nmにまで軽減された。さらに適切な減速ギアを用いることで1.5 kWと比較的小型の汎用モーターで運転が可能となり、30 Hzのパルスビームに対して安定した運転が可能となった。

mod-PMSx 開発の詳細は文献5に記述している。

3. mod-PMSx の集光性能テスト実験

製作した mod-PMSx の集光性能を実証するため、フランスのグルノーブルにある Institut Laue-Langevin の極冷中性子ビームライン、PF2-VCN⁶⁾にて集光実験を行なった。

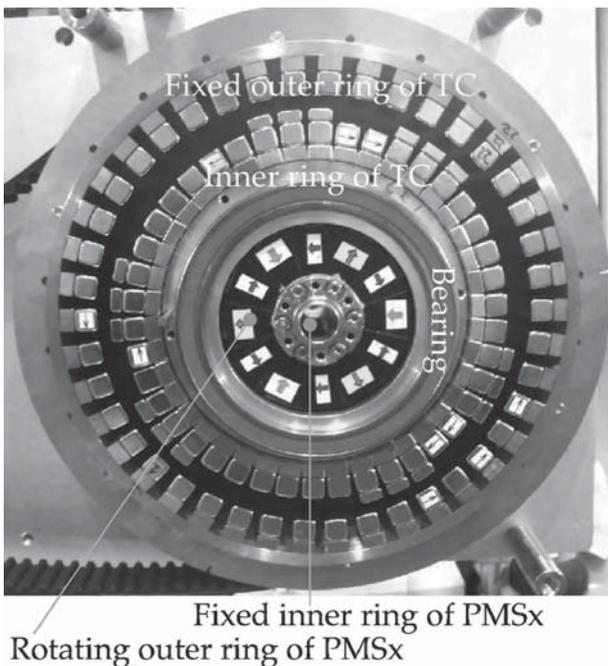


図1 mod-PMSx 1ユニットの断面図。レンズとmag-TC計4重同軸リング構造となっている。

3.1 実験セットアップ

まず、プライマリービームをディスクチョッパーを用いて30 Hzにパルス化した上、磁気スーパーミラー⁷⁾により集光対象波長域 $27 \leq \lambda [\text{\AA}] \leq 55$ の波長を持ちかつアップスピンを持つ中性子のみを選択した。ビームをスピン偏極するのは、六極磁場は中性子のアップまたはダウンスピンに対してそれぞれ、集光または発散させる作用があるためである。偏極ミラーの後段に $\phi 2 \text{ mm}$ のスリットを設置し、そこを光源とした。mod-PMSxの放射化を防ぐためレンズ入り口に $\phi 14 \text{ mm}$ のアーチャーを設置し、ビームをコリメートした。このようにして偏極した上述の波長域を持つパルス中性子ビームをmod-PMSxに入射し、集光作用を受けたビームの結像位置における二次元空間分布を、抵抗分割型二次元検出器RPMT¹⁾を用いて時分割測定した。

3.2 実験結果

集光作用を受ける直前の mod-PMSx 入り口におけるビームの二次元空間分布と、集光作用を受けて結像したビームの二次元空間分布をそれぞれ図2に示す。中性子発生ターゲットから我々が使用しているビームポートに輸送されるまでの中性子ガイド管の輸送可能最大発散角に波長依存性があるため、短波長側でビームダイバージェンスが小さい。レンズ入り口でもその影響がみられるが、結像位置における集光ビームスポットサイズの半値全幅 (FWHM) は集光対象波長域にわたってソースアーチャーサイズ ($\phi 2 \text{ mm}$) におおよそ一致し、波長幅2倍以上のワイドバンドパルスビームの集光が実証された。この時、実験的に決定した集光距離全長はわずか1.84 mとコンパクトなビームラインを実現している。結像位置における単位時間・単位面積当たりの中性子数は集光作用を受けない場合に比べて対象波長域で積分すると63倍となり、中性子利用効率を1桁以上向上させることに成功した。

4. 今後の展望

mod-PMSxは冷中性子ビームへの応用も充分可能で、利便性の高いシステムであるため、多くの核破碎中性子源や小型中性子源に設置されているビームラインにおいて標準的に利用され、実験効率の向上に貢献することが期待できる。中性子

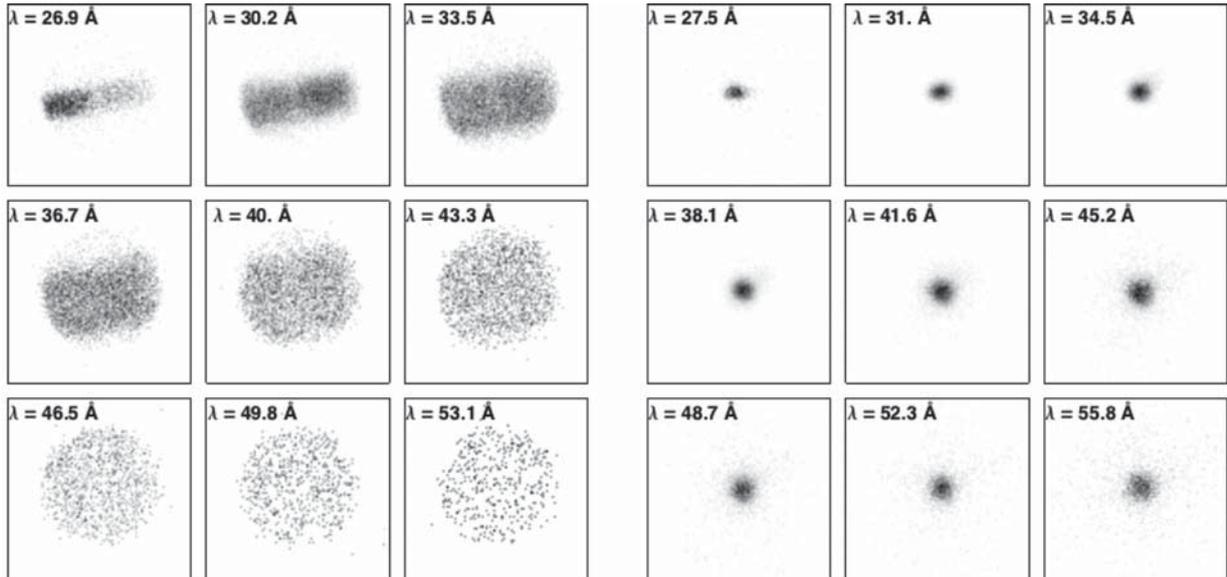


図2 mod-PMSx 入り口での入射ビームの二次元空間分布(左)と結像位置での集光ビームの二次元空間分布(右). 1マスは20 mm×20 mmの実空間に相当し, 左上から右下に向かって最短波長 λ_{\min} から最長波長 λ_{\max} にわたる各波長に対応している.

装置への応用例として, 集光実験と同時にこのレンズを拡大器として用いた高分解能中性子イメージングのデモンストレーションを行った. 光源に置かれたサンプルスリット像を上記波長域にわたって5倍に拡大した像をイメージングプレートを用いて測定し, mod-PMSxが拡大レンズとして機能することを確認した. また, 同様に集光パルスビームを用いた中性子小角散乱実験(Small Angle Neutron Scattering, SANS)のデモンストレーションを行った. 集光ビームはスピン偏極しているため, 偏極解析も可能である. 同等の性能をもつ従来型に比べて装置サイズを全長わずか2 mと1/5にまで小型化することに成功した. 高分子機能材料や磁性材料に対してSANS測定を行ない, その測定性能が実証された.

5. 近況と抱負

博士号取得後, 理化学研究所の特別研究員として採用され, 幸運にも中性子装置開発に関する研究を続けている.

理化学研究所では, 2012年度に小型陽子線ライナックを用いた小型中性子源システムRANSの開発に着手し, 同12月に中性子ビーム発生に成功, 現在では中性子イメージング実験を行なっ

ている. RANSは従来大型施設に限定されていた中性子線利用の壁を破り, 大学やメーカー等産業界の研究者にも広く簡便に利用できる中性子線源の普及を第一目的に掲げている. その中で私は小型中性子源RANSの運転から中性子イメージング測定までの技術を習得し, 日々研鑽を積んでいる. そして高輝度, 高品質の中性子ビーム実験装置の設計及び開発を行なってゆく予定である. RANSの普及性を飛躍的に高めることだけでなく, 従来の手法ではJ-PARCなどの強力な中性子線源でも不可能であった測定を実現し, 新たな物理の展開に貢献する研究ができればと思う.

参考文献

- 1) Y. Iwashita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 586 (2008) 73.
- 2) P. S. Farago, Nucl. Instr. and Meth. 30 (1964) 271.
- 3) H. M. Shimizu, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 430(1999) 423.
- 4) M. Kumada, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 12 (2002) 129.
- 5) M. Yamada, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 634 (2011) s156.
- 6) <http://www.ill.eu/instruments-support/instruments-groups/instruments/pf2/characteristics/>
- 7) M. Hino, et al., Physica B 385-386 (2006) 1187.