

強度変調型永久六極磁石を用いた中性子磁気レンズの開発及びその応用研究

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A MAGNETIC NEUTRON LENS WITH MODULATING PERMANENT MAGNET SEXTUPOLE

山田雅子[#]

Masako Yamada[#]

Paul Scherrer Institute, Villigen PSI, 5232, Switzerland

Abstract

A novel magnetic neutron lens, which is able to focus a wide-wavelength-band neutron beam and is named modulating Permanent Magnet Sextupole (mod-PMSx), has been developed. This refractive lens employs the interaction between the neutron magnetic dipole moment and a field gradient in a sextupole magnet as its focusing force. The lens consists of two concentric permanent sextupole magnets, whereby rotation of the outer magnet around the fixed inner magnet modulates the field gradient. Synchronized modulation of the field gradient with beam pulses fixes the focal length independent from neutron wavelength. Permanent magnets and newly developed torque-canceling elements make the device compact, its production costs low, and its operation simpler than that of other magnetic lenses.

Such modifications as treatment of temperature rise during operation, installation of newly developed magnetic torque canceler and installation of the modular structure have made mod-PMSx possible to apply for beam with ~30Hz.

1. はじめに

中性子は物質と作用する際にもっぱら核力を介するため、物質中の透過率が高い、同位体識別能を持つ、水素などいくつかの重要な軽元素に対して高い感度を持つ、といった特性があり、中性子ビームは多岐にわたる研究分野で物質の静的・動的構造の解明に大きく貢献してきた。

中性子ビーム源の主流は近年、到達可能な中性子ビーム強度の上限値に達したと言われている核分裂原子炉から、ピーク強度がそれを凌駕しさらに飛行時間法 (Time of Flight, ToF) により無駄なくエネルギー分光が可能な加速器ベースの核破碎中性子源へと移行しつつある。2000 年代より世界各地で大型施設の建設が進められ、J-PARC、SNS、ISIS などが稼働している他、現在 ESS が建設中である。また一方で、中性子の利用機会を増やすため、小型中性子源開発も活発に行われている。いずれの場合にも得られる中性子ビームはほとんどの場合パルスビームであり、中性子光学素子もパルスビームに対応することが求められる。

京都大学化学研究所粒子ビーム科学領域では 2008 年より高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で、加速器の磁石技術を中性子ビーム制御に応用して、パルス中性子ビーム集光用広いエネルギー (波長 λ) 分散をもつワイドバンドのパルスビームを色収差なく集束できる磁気レンズ「強度変調型永久六極磁石 (modulating-Permanent Magnet Sextupole, mod-PMSx)」の開発を行ってきた。電磁石に比べて強力かつコンパクトな永久 6 極磁石を同軸状の二重リング構造にして、入れ子になった固定内輪の周りで外輪を回転させることにより強い磁場の強度変調が可能になる。強度変調を中性子パルスと同期させ位相を適切に選

べば集光位置を中性子のエネルギーによらずに一点に保つことができる^[1]。永久磁石と新たに開発した磁気トルクキャンセラー(mag-TC)^[2]を用いて、コンパクトな装置サイズ、比較的安価な製作・運転コスト、容易な取り扱いと普及可能なシステムを目指して開発を行った。

筆者は Mod-PMSx 初号機の試作後に入学し、運転上の問題点の改良を施した 2 号機の開発を行った^[3]。フランス・グルノーブル Institut Lau-Langevin (ILL) の極冷中性子(VCN)ビームラインにて自ら開発した 2 号機を持ち込んで実験を行い、白色中性子ビームの集束を実証した^[4-5]。その後、集光力を約 3 倍増強し、かつ実験で得られた中性子実験上の問題点に関して改良を加えた 3 号機を開発し、再び ILL 同ビームラインにてこれまで達成されたことのない 2 倍 ($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 2$) の波長範囲の集束を達成した。この時の中性子束は対象波長域で 43 倍と高い集光効率が実証された。実験時 mod-PMSx を像拡大器として用いる拡大イメージングのデモンストレーションも行い、約 4 倍の拡大像の取得に成功した^[6-7]。

本稿では mod-PMSx の白色ビーム集光原理、磁場強度変調運転及び中性子実験上必要不可欠であった改良、3 号機の集光実験結果、拡大イメージング実験結果、最後に今後の課題について報告する。

2. パルス中性子ビーム集光

2.1 原理

電荷をもたない中性子も磁気能率 μ を持ち、eq.(1) のように磁場勾配に比例した力を受ける。

$$M \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \square |\mu| \nabla |\mathbf{B}| \quad (1)$$

ここで M は質量、 \mathbf{B} は磁場である。右辺の符号は

[#] masako.yamada@psi.ch

それぞれ中性子スピンの磁場に平行/反平行の場合に対応する。そのため、磁場勾配が軸からの距離に比例する6極磁場 B_6 (eq.(2))中では、磁場に平行なスピンを持つ中性子はビーム軸 (z 軸とする) に垂直な面内で振動運動する。

$$B_6 = \frac{G_6}{2}(x^2 + y^2) \quad (2)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x, \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 y, \frac{d^2z}{dt^2} = 0 \quad (3)$$

ただしこのとき、磁場の方向を軸とした中性子の Lamor 歳差運動の角振動数が中性子の重心系からみた局所磁場の変化率に比べて十分大きくなければならない。ここで G_6 は6極磁場勾配の大きさを表す正の定数、 $\omega^2 = G_6 \mu M^{-1}$ である。磁場勾配 G_6 、磁石長 L_m の6極磁石レンズによってド・ブロイ波長 λ の中性子が倍率1で集束される場合、光源から磁石入り口と磁石出口から集束位置までの距離 L^* は以下のように与えられる。ここで新たに変数 $\Omega \equiv (\omega v_z)^2 = (h^2 G_6 M \mu \lambda^2)^{-1}$ を導入した (導出は[1]参照)。

$$L^* = \frac{1}{\Omega} \cot\left(\frac{\Omega \cdot L_m}{2}\right) \approx -\frac{L_m}{6} + \frac{2}{\Omega^2 \cdot L_m} \quad (4)$$

パルスビームの1バンチ中の中性子の波長 λ は h をプランク定数として飛行時間 t より

$$\lambda = \frac{h \cdot t}{M L} \quad (5)$$

と与えられるので、集光位置を波長によらず固定するためにはビームパルスのタイミングに同期して Ω を一定に保つ、つまり G_6 を以下のように変調すればよい。

$$G_6 \propto \lambda^{-2} \propto t^{-2} \quad (6)$$

この式から、 $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 2$ の波長域を集光するためには G_6 は少なくともその2乗の変調域が必要であることがわかる。

2.2 永久6極磁石の磁場強度変調

mod-PMSx の集束レンズはネオジウム磁石を extended-Halbach 型に組んだ強力な6極磁石である。磁極部分を境に内輪と外輪を分割して二重リング構造とし、内輪を固定したまま外輪を回転させることで G_6 が3回対称な余弦関数的に変調される (Fig.1(c))。

入手可能な素材のうち最も高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材料パーメンジュール (Fe-Co-V(49%-49%-2%)) を磁極としてビームボアに近い部分に用いることで、最大磁場強度を増強するだけでなく、最小磁場強度を大きく押し下げる効果がある。磁場変調域が大きく拡張され、その結果広い波長域の集束が可

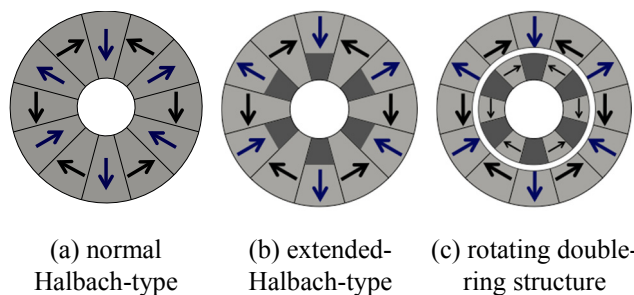


Figure 1: Sextupole magnet configuration.

能となる。

Mod-PMSx は外輪がネオジウム磁石 (NEOMAX NMX-39EH 相当品) 12 ピース、内輪はネオジウム磁石 (NEOMAX NMX-46H 相当品) 12 ピースとパーメンダ-6 ピースからなる。ビームボア径および外輪外形はそれぞれ $\phi 15$ mm、 $\phi 76$ mm である (Fig. 3)。mod-PMSx の最大磁場強度は 5.86×10^4 Tm² でこれまで製作された全磁気レンズの中でもっとも高い単位磁石長さあたりの集光効率を持つ^[7]。

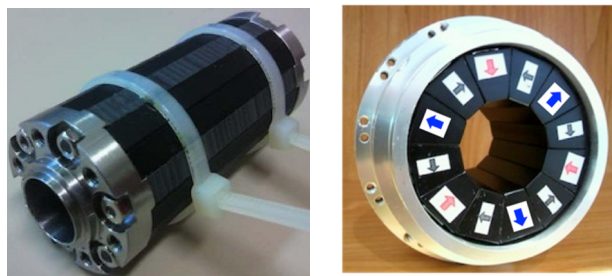


Figure 2: (a) inner and (b) outer rings of the unit of the mod-PMSx.

3. mod-PMSx の製作

J-PARC などの大型施設でのビームパルス繰り返し周期 f は 20~50Hz で通常施設ごとに固定で運転されている。Mod-PMSx は冷中性子ビーム集束に適していることから、比較的繰り返し周波数の低い 30 Hz を目標値に設定した。Mod-PMSx の G_6 変調が3回対称性を持つことから外輪の回転周期は $f/3$ 、つまり 10 Hz でよいものの、 G_6 が大きいために外輪回転に必要なトルクが大きく、かつ外輪1回転中で3回極性を変えることによる技術的な難しさがある。本節ではその他初号機及び2号機を用いて行った運転上及び中性子実験上重要な改良点を述べる。

3.1 駆動部の改良

外輪を回転させる機構として、初号機では駆動モーター軸の歯車に対して減速比 1/3 の歯車を外輪外周に取り付けた (Fig.3(a))。しかしながら先にも述べたように外輪回転1周あたり3回符号を変えるため、有限のバックラッシュのある歯車では摩滅が非常に大きく、長期運転には堪えないことがわかった。そこで2号機では外輪周辺に歯車付きのプーリーを取り付け、タイミングベルトを介してモーター軸の動力を伝える機構に変更した (Fig.3(b))。

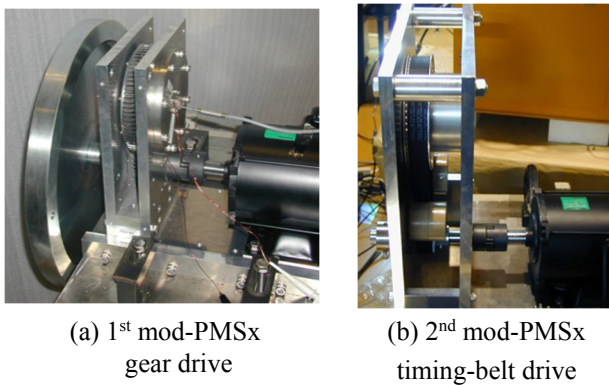


Figure 3: Mechanics of mod-PMSx.

3.2 発熱対策

初号機の 25 Hz でのテスト運転時にビームボア表面と外輪・内輪間のギャップで環境温度から 35°C 以上の発熱が認められた。ネオジム磁石は残留磁束密度や保持力の点で他の磁石より優れているが、キュリー温度が低い弱点があるため、mod-PMSx 運転時の平衡温度はキュリー温度に比べて十分低い 60°C 程度までに抑える事を目標とした。発熱の主な原因は磁極に用いているパーメンジュール内の磁束がビーム繰り返し周期で極性を変える際に発生する渦電流損及びヒステリシス損である。渦電流損に対しては磁極を積層構造とすることが有効である。一方素材のヒステリシス損は全機械加工工程終了後の磁気焼鈍が有効である。

最適な磁石形状を決定するため、焼鈍処理前の t2.5mm 試料、焼鈍処理後の t2.5mm, t0.35mm, t0.5mm 試料の B-H カーブのヒステリシスループ面積を測定し比較した。その結果、層厚が薄くなるほど面積は小さくなるものの、焼鈍による改善の効果が層厚の効果に比べて大きいことがわかった。機械的強度や組立の煩雑さ、入手しやすさも考慮し、層厚 t2.0mm で磁気焼鈍を行い、層ごとに接着して強度を持たせることとした。接着剤にはデンカのハードロック G55 を使った。接着材以外積極的な絶縁はしていないが、1 磁極の両端での電気抵抗の測定値はバルク形状に比べて 1 万倍大きくなり、十分な効果が得られた。また、磁極間に流れる電流をさらに遮断するため、内輪磁石端版を SUS から樹脂に変更してみたが、測定の結果 2°C の温度上昇の増加が見られた。これは熱伝導が悪くなり、放熱性が悪化したためと考えられ、結局元の SUS を採用することとした。これらの改良の結果、35°C 以上あった温度上昇が 18°C にまで抑えられた。

3.3 磁気トルクキャンセラーの開発

6 極磁場強度が強いために、mod-PMSx の内輪・外輪磁石間のギャップに生じる回転トルクは最大約 36 Nm と大きい。ギア比 1/3 で減速したモーター軸

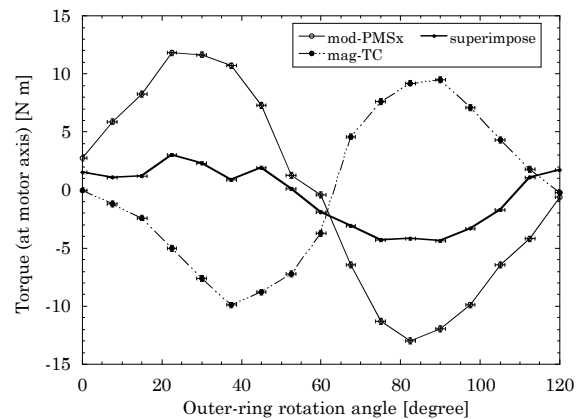


Figure 4: Torque of mod-PMSx, mag-TC, and their composite.

上での測定トルクを Fig.4 に示す。しかしながら、磁場の蓄積エネルギーはモーター軸を通して出し入れがあるものの、磁場変調一周期分にわたる積分値は 0 なので、トルクの平均も基本的に 0 である。符号が交互に変化するトルクを平均化してやることで、ピークトルク及び連続回転維持に必要なモーターのパワーが軽減され、小型の汎用モーターで動力をまかなうことができるようになる。また低い減速比で回転できるので、早い繰り返しのビームにも対応できる。初号機では Fig.3 (a)にあるように鉄製のフライホイールを用いてトルクを平滑化していたが、装置のコンパクト化および次節で述べるユニットを連結して磁石長を自由に変更するユニット構造を実現するため、集束レンズ磁石の同軸周りに取り付けられる磁気トルクキャンセラー(mag-TC)を開発した (Fig. 3)^[3]。mod-PMSx のトルク測定より、二倍波が基本波の 30%程度存在していることが分かったため、それを再現するように mag-TC を設計した (Fig.5 (a))。内側から mod-PMSx 内輪、mod-PMSx 外輪、mag-TC 内輪、mag-TC 外輪で、mod-PMSx と mag-TC の外輪が一体となって回転する (Fig.5 (b))。

mag-TC を導入することにより減速比 1/3 のギアを介したモーター軸上で 12 Nm あったピークトルクが 3 Nm まで大幅に軽減された (Fig.4)。この結果、1.5kW の IPM 汎用モーター(重量 11kg)により運転が可能となり、mod-PMSx システムのコンパクト化と低コスト化が可能となった。

3.4 ユニット構造

6 極磁場強度 G_6 が決まると、集光対象波長域および集光距離の要請から、必要な磁石長 L_m が求まる。ネオジム磁石は長手方向の製作可能上限値があるため、mod-PMSx は 1 ユニットの磁石長を上限値の 66 mm とし、必要な磁石長を満たすように直列連結するユニット構造を導入した。この構造により、任意の磁石長を実現できるため非常に汎用性の高いシステムになっている。

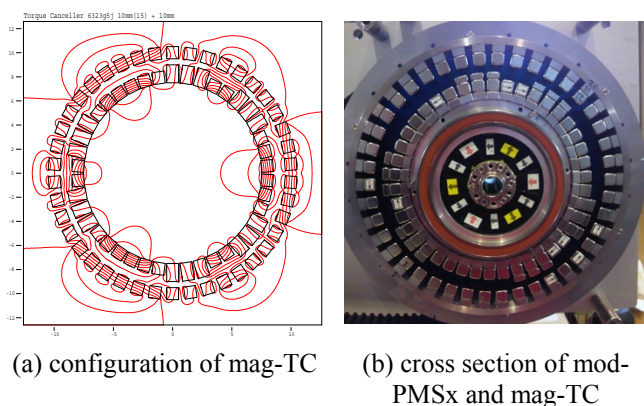


Figure 5: Magnetic torque canceler.

ILL の VCN ビームで最も中性子フラックスの大きい 27-55 Å を集光対象波長域とし、倍率 1 での集光距離全長（光源から集光位置まで）を 2 m とすると、§2.2 で述べた mod-PMSx 磁石で必要なユニット数は 3 である。有効磁石長 198 mm の 3 連 mod-PMSx システムを製作した(Fig.6)。磁場強度および変調域は個体差があるものの、ユニット平均は $1.06 \times 10^4 - 5.86 \times 10^4 \text{ Tm}^2$ で、2 倍の波長域を集束するのに十分な変調域を備えている。

mag-TC の導入によりユニット間のギャップは 22 mm まで近づけられる。内輪磁石は接着剤で全ピースが接着されている上、ユニット間に O-リングを用いているために気密性が保たれ、上流からサンプル位置までヘリウムガス等で満たすことにより中性子ビームの空気散乱による減衰を防ぐことができる。また、最上流と最下流のユニットにはスピニングガイド磁場が連結可能で、変化する局所磁場を通過する際にもビームのスピニング偏極率を維持できる。ユニット構造、ビームパスの気密性、スピニングガイド磁場の配置は 2 号機を用いた集光実験および集光型小角散乱実験を通して判明した改善点で 3 号機製作時に取り入れられた。

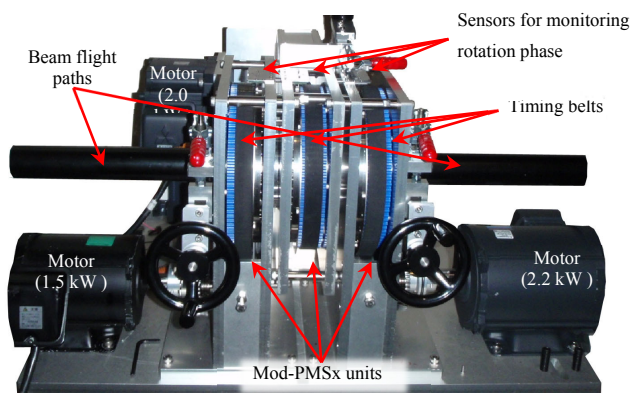


Figure 6: Triplet mod-PMSx system.

4. ワイドバンドパルス VCN 集束実験

3 連 mod-PMSx システムを ILL の PF2-VCN ビームラインに持ち込み、集光実験および拡大イメージングのデモンストレーションを行った。

4.1 セットアップ

建屋最下部に有る冷中性子源から最上階の VCN キャビンにやってくる連続ビームをディスクチョッパーで 30Hz にパルス化し、偏極ミラーで磁場に平行なスピニングを持つ中性子のみを反射して選択する。この時 27 Å より波長の短い中性子は反射されずに偏極ミラーを通り抜ける。一方 55 Å 以上の中性子はフラックスが小さいため積極的に排除しなかった。チョッパーから 394 mm 下流に光源とする $\phi 2 \text{ mm}$ の Cd 製ピンホールを設置し、ここから 798 mm 下流にレンズ入り口を設置した。レンズ入り口にはビームポア表面の放射化及び減磁を防ぐため、 $\phi 13.5 \text{ mm}$ の Cd 製レンズアパチャを取り付けた。偏極ミラー以下レンズ入り口まではスピニング偏極を維持するようガイド磁場を設けた。レンズ出口から 798 mm 下流に 2 次元位置敏感型 TOF 検出器 RPMT を用いて集束位置での中性子ビームの TOF ごとの空間分布を測定した。TOF のトリガー信号はディスクチョッパーの回転によって生成される。ディスクチョッパーと各ユニットの回転はそれぞれ独立にタイミングジェネレータが生成するクロック信号に同期されている。ただし、レンズの位置及び各レンズユニットの最適位相は中性子ビームを用いて最適化した。

4.2 測定結果

集束位置(b)及びレンズ入り口(a)の波長ごとのビームスポットサイズを Fig.7 に示す。1 マスは実空間の $20 \times 20 \text{ (mm}^2)$ に対応している。集束作用を受ける前のビームがレンズアパチャ($\phi 13.5 \text{ mm}$)程度に広く分布しているのに対して、集束位置では 27-55 Å の波長域全体にわたって光源ピンホール ($\phi 2 \text{ mm}$)程度に抑えられていることが確認できる。

レンズ入り口の 27-42Å のビームが 2 つのピークを示し扁平な形状をしているのは VCN ビームガイドの形状及び性能によるビームの構造であることをビーム発散角測定にて確認している。冷中性子源表面を出発した中性子は冷中性子源から鉛直上方にガイドされた後、比較的小さな曲率半径 (13 m) で水平方向に 90° 方向を変えて VCN キャビンに到達するため、特に鉛直方向の短波長域におけるビーム発散角が小さい。

VCN プライマリービームが構造を持ち非等方的であることから、集束ビームのスポット面積は水平・鉛直方向それぞれに射影したプロファイルを 1 次元ガウス関数でフィットすることで評価した。一方、Fig.7(a)より非集束ビームは 2 つのピークから成ることが分かるため、水平・鉛直方向それぞれに射影したプロファイルをダブルガウス関数でフィットすることで評価した。そうして得られた各波長の非集束・集束ビームの面積とビームカレント(n/s/Å)からビームフラックス(n/s/cm²/Å)を算出した。その結果、集束ビームは非集束ビームに対して波長平均で 43 倍密度が増強されており、mod-PMSx の集光効率の高さが示された。ただし、非集束ビームについてはレンズ入り口から集光位置まで進む間のビーム広が

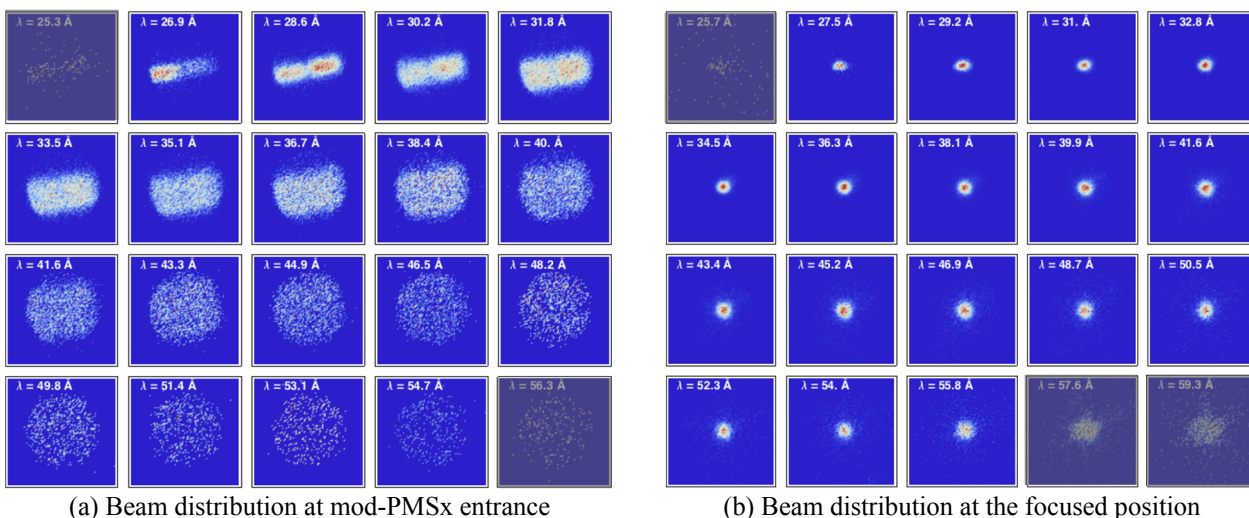


Figure 7: Triplet mod-PMSx system.

りを考慮した。

5. 拡大イメージングデモンストレーション

mod-PMSx レンズの応用可能性の一つとして、mod-PMSx を像拡大器として用いる拡大イメージングのデモンストレーションを行った。上記集束実験のセットアップで光源として用いたピンホールを $\phi 1.0$ mm と $\phi 3.5$ mm のピンホール及び幅 0.5 mm のスリットからなる Cd 製マスク (Fig.8 参照) で置き換え、倍率 1 の配置 (Fig.9(top)) で集束位置での像を中性子用イメージングプレート (NIP) を用いて測定した。次にマスクと NIP 位置を移動し、倍率 5 (Fig.9(bottom)) となる配置で同様にイ

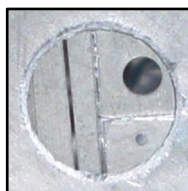


Figure 8: Sample mask.

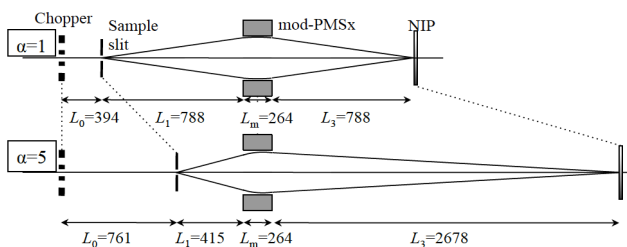


Figure 9: Optical arrangements for the magnification 1 and 5.

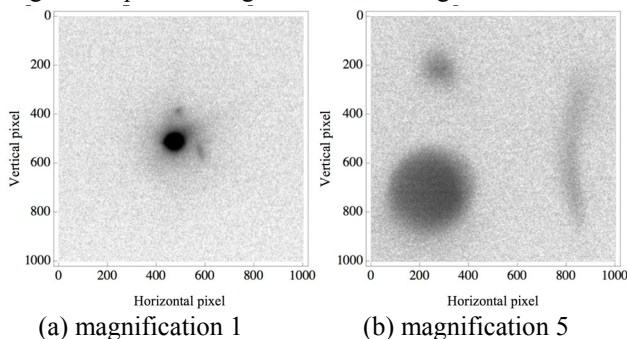


Figure 10: Images of the sample mask.

メージを NIP で測定した。その結果をそれぞれ Fig.10(a, b)に示す。

集束実験と同様に 2つのピンホール像の水平・鉛直方向への射影に対して 1次元ガウス関数でフィットし、中心点を求めた。それぞれの像の中心点間距離の比を算出したところ、倍率 5 の配置で測定した場合の中心間距離は倍率 1 の場合に比べて 4.1 倍であった。倍率が理論値に比べて小さい理由として、集光対象波長域成分の混入、マスク・mod-PMSx・NIP のミスアライメント、そして mod-PMSx ボア近傍の高調波成分の寄与などが考えられるが、これらの評価及び改善については今後の課題である。

6. 今後の課題

§5 で述べたように、磁場の高調波成分や漏れ磁場による収差の評価と改良は拡大イメージングや小角散乱といった応用利用時には必要不可欠である。

2 倍の波長域という実用上十分な広さのワイドバンドパルスビームの集光の集光原理実証に成功したので、高空間分解能即発ガンマ線分析や TOF 集光型偏極小角散乱といった高度な中性子実験技術のデモンストレーションで性能評価を行い、応用利用可能性の高さを実証したい。

謝辞

mod-PMSx の開発研究は、私が京都大学粒子ビーム科学領域に在籍していた時に一貫して取り組んだテーマです。この度加速器学会奨励賞という荣誉ある賞を受賞することができたのは、長年にわたり本当に多くの皆様にご協力・ご指導いただいたおかげです。特にこの中性子レンズの発案者の一人であり指導教官でもあった岩下芳久准教授には本研究に携わる機会を与えていただき、日々の活発な議論を通じて知識、実験、論文執筆など本当に多岐にわたりご指導いただきました。研究室の皆様には、mod-PMSx の製作や実験結果の議論など多大なるご協力をいただきましたことを感謝申し上げます。

また、もう一人の発案者である名古屋大学の清水裕彦教授（元 KEK 教授）には、修士課程在学時から中性子研究全般にわたって非常に親身な御指導・ご支援を頂き、研究を遂行する環境を整えて頂きました。NOP コラボレーションの皆様には中性子実験のいろはを一から現場で教えていただき、沢山のことを学ばせていただきました。ILL における長期の実験において、PF 2 グループの責任者、Dr. Peter Geltenbort の協力なくして本研究は成し得ませんでした。

この場をお借りして、これまでご指導・ご協力いただき支えてくださった皆様に、心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Iwashita et al., Nucl. Instrum. Meth. A 586, 73 (2008).
- [2] Y. Iwashita, IEEE Trans. on Applied Supercond., 22, 4000905 (2012).
- [3] 山田雅子, パルス中性子ビーム集束用の強度変調型回転永久六極磁石の開発研究, 京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修士課程 (未刊行) (2009).
- [4] M. Yamada, et al., Physica B, 406, 2453-2457 (2011).
- [5] M. Yamada, et al., NIMA, 634, 156-160 (2011).
- [6] 山田雅子, 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, 京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士課程 (2013).
- [7] Masako Yamada, et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 043G01 DOI: 10.1093/ptep/ptv015 (2015).