スーパーミラーを用いた熱中性子集光デバイスの開発

長壁 豊隆,¹ 曾山 和彦,² 鈴木 浩二,² 三代 達也

(日本原子力研究所先端基礎研究センター,¹ 日本原子力研究所中性子利用研究センター,

² アドバンスド・マシン・工房)

Development of Thermal Neutron Focusing Device Using Supermirrors

Toyotaka Osakabe,¹ Kazuhiko Soyama,² Koji Suzuki,² Tatsuya Miyo

JAERI-ASRC,¹ JAERI-NSRC,² Advanced Machine Workshop

1. はじめに

超高圧や強磁場などの極限環境下の中性子散乱実験では、実験装置の制約から試料サイズが微小なものになってしまうことは避けられない。高輝度放射光に比べ桁違いに弱い中性子ビーム強度でこれを補うには、中性子を試料位置に精度良く集光して実効的な強度を稼ぐことや散乱中性子を効率良く検出することが有効である。

中性子を集光する方法としては、(1)中性子ミラーによる反射光学デバイス、(2)物質界面での屈折を利用した屈折光学デバイス、(3)勾配のある磁場中で中性子磁気モーメントが受ける力を利用した磁気屈折光学デバイスが挙げられる。実際に MgF_2 製の凹レンズを多数組み合わせた屈折光学デバイスが実用化されており、NIST の SANS に設置されている[1]。また理研を中心とした NOP グループにより MgF_2 製のフレネルレンズを使用した屈折光学デバイスや超伝導 6 極磁石を利用した磁気屈折光学デバイスの開発が精力的に進められている[2]。しかしながらこれらの光学デバイスは主に冷中性子用、特に小角散乱装置において低散乱角度側の測定範囲拡大と中性子強度利得を目指したもので、固体の(静的あるいは動的)構造解析のためには 1~2 Å 程度の熱中性子を使用することが望ましい。我々は、熱中性子集光が極限環境下の固体研究にとって不可欠な技術的要素であり、中性子スーパーミラーの反射を利用した光学デバイスが最も効果的であろうと考えて、集光デバイスの開発を行ったので本稿で紹介する。

2. 熱中性子集光デバイスの開発

筆者の 1 人(TO)は以前、高圧力下中性子散乱において微小試料からの非常に弱い磁気散乱を観測することを目的に、円形状のスーパーミラーを試料上流に多数枚配置する熱中性子集光デバイスの有効性について検討、報告した[3]。今回開発した集光デバイスはこの原理に基づいている。Figure 1 に集光デバイスの概念図を示す。この集光デバイスは汎用の中性子散乱装置に設置される。幅 50 mm 程度の第 2 コリメータから出てくる発散を持った中性子であっても複数の円形状ミラーのいずれかの内側で等角度で反射を起こし、

Figure 1. Schematic drawing of the neutron focusing device.

(b) LTAS, $\lambda=3.80 \text{ \AA}$, Beam width: 0.5mm

Figure 2. (a) Photograph of the neutron supermirror. (b) The reflectivity of the mirror.

第2 コリメータと試料間の 600 mm 程度の短い距離で試料部分に集光するというものである。集光原理が全く幾何学的なものなので、集光効率は変化するが、どの波長の中性子に対しても焦点が変化することがない。また、デバイス自体がコンパクトなので気軽に持ち運んで中性子散乱装置に設置できるという利点がある。

我々は中性子スーパーミラーとして Osmic 社製で 100 mm×100 mm サイズ、0.25 mm のシリコン基盤に蒸着された NiC/Ti の 3Qc 仕様のものを 75 枚用意した。このミラーは基盤が薄いため、ある程度自由にミラーの形状を制御することができる。Figure 2 にスーパーミラーの写真と実測した反射率のデータを示す。後で述べるシミュレーション計算ではこのデータを使用している。

用意したスーパーミラーの枚数は限られているので、Figure 1 の円形状ミラーの長さや円形状ミラーの設置枚数の間で最適な条件を探す必要がある。また、デバイスの設置場所は試料上流になるが、冷凍器の使用を考慮して試料から最低 150 mm 以上上流に設置する必要がある。我々は中性子散乱実験デバイス用の汎用 2 次元モンテカルロシミュレーションソフトウェア(McStas もどき)を新たに構築し、集光デバイスを JRR-3M の TAS-1(2G) 分光器に設置する場合についておよそ 200 通りの計算を行い、最適なデザインを決定した。最終的なパラメータを Table 1 に示す。デバイスの長さは 400 mm で円形状ミラーは片側 9 枚、焦点距離はデバイス下流端から 150 mm となっている。Figure 3 にシミュレーションによる、2.36 Å に単色化した中性子に対する分布プロファイルをいくつか示す。最大強度を得るために第2 コリメータをブランクガイドの状態とした計算なので、半値幅 90 分程度の発散角度を持つ中粒子が集光デバイスに入射していることになる。最適条件では集光デバイスを設置しない場合に比べ、試料幅 3 mm の積分強度で約 3 倍の利得がある。

集光デバイスの実際の製作にあたっては、円形状ミラー間の特殊な形状のスペーサを製作し、このスペーサで各ミラーを挟み、両外側の枠で締め

デバイス長: 400mm		
焦点距離: 550mm		
円形状ミラー: 全 18 枚		
ミラー (外側から)	中心	半径
1	(0. 0, -6037. 50)	6062. 50
2	(0. 0, -6756. 16)	6778. 51
3	(0. 0, -7667. 81)	7687. 51
4	(0. 0, -8862. 44)	8879. 49
5	(0. 0, -10496. 27)	10510. 67
6	(0. 0, -12866. 47)	12878. 22
7	(0. 0, -16616. 33)	16625. 43
8	(0. 0, -23446. 39)	23452. 84
9	(0. 0, -39800. 73)	39804. 53
原点はデバイスの入り口中心。残りのミラーは上記と反転位置。		

Table 1. Optimum parameter set for the focusing device.

Figure 3. The results of the Monte Carlo simulation of the neutron intensity in some conditions.

Figure 4. Photograph of the components of the focusing device.

Figure 5. Photograph of the focusing device installed in the TAS-1(2G) spectrometer.

付けて円形状の精度を出す構造とした。初めはガラスエポキシ樹脂に対してエンドミル加工でスペーサを製作したが精度が出なかったため、材質を 2017 番の Al 合金に変えて放電加工で製作した (Figure 4)。完成した集光デバイスを TAS-1 分光

器に設置した様子を Figure 5 に示す。集光デバイスは、中性子分光器の光学ベンチに取付けられた微調整機構の上に設置される。これにより中性子ビームに対して上下流方向と横方向に位置調整が可能となっている。

Figure 6 に、集光デバイスを TAS-1 に設置し、焦点距離にイメージングプレートを置いて測定した中性子分布プロファイル、及び、シミュレーションによるプロファイルを示す。特に Figure 6(b) は、Figure 1 で集光デバイス中心部の円形状ミラーがない場所の入り口に Cd マスクをした場合であり、ミラーで反射した中性子のみの分布に相当する。両測定とも実測の結果はシミュレーションの結果とおおよそ一致していることから、実際にミラーの反射により集光しており、デバイスとしてほぼ所定の性能が出ていることが判る。

集光デバイスによる集光では、原理上、発散角の大きい中性子がより多く試料に入射することになる。そのため、集光デバイスの効果は単結晶の干渉性散乱を測定する場合には試料のモザイク分布に影響される。Figure 7 に、試料のモザイク分布と集光によるビーム発散をガウス型とする場合に、1 つの結晶回転角度に対する強度利得の様子を示す。(試料に入射する中性子数は横軸の発散角に比例して増加する。)モザイクが 40 分程度の良い単結晶試料では集光デバイスの効果は殆どないが、例えば高压実験で加圧によりモザイク分布が広がったような試料では有効に働くことが判る。注意しなければならないのは、散乱中性子も

Figure 7. The relation between the intensity at the Bragg angle and the divergence of the incident neutron beam.

Figure 8. Diffraction peaks of Ni measured with or without the focusing device.

Figure 6. The comparison of the neutron intensity by the M.C. simulation with that by the IP measurement.

広い発散角を持つということである。ブラッグ反射などの干渉性散乱を測定する場合、入射中性子ビームの広がりそのまま広がった散乱中性子となる。集光デバイスを効率良く利用するには例えば LLB で行われている様に検出器側を 2 次元にするなど、試料下流側の対策も必要となる[4]。また、典型的な中性子散乱装置で使用する場合には分解能の緩い縦方向に使用するのも良いかもしれない。

Figure 8 に、実際に直径 6 mm の容器に入った Ni 粉末試料を焦点位置に置いて測定した回折パターンを示す。測定前に集光デバイスの完全な位置調整をしておらず、また、試料の直径が大きくて集光の効果が見えにくい、それでもピーク積分強度で 2 倍強の利得がある。この測定では 1 次元検出器を移動してスキャンを行っているが、上で述べたように 2 次元検出器を使用するなどの工夫で測定効率を上げることが重要になる。

3. おわりに

本稿では、3Q_c 仕様のスーパーミラーを円形状に多数枚配置することによって熱中性子でも 600 mm 程度の比較的短い距離で集光できることを示した。今後より高い Q_c 仕様のスーパーミラーが気軽に利用できるようになれば、同じ設計で

より効率のよいデバイスの開発が可能になる。(例えば, 4Qc 仕様のミラーを使用すれば, 2.36 Å の中性子に対して試料幅 3 mm の積分強度で 4 倍の利得が見込まれる。) また, 今回開発した集光デバイスは 2 次元面内の集光であるが, 理研で開発が行われているような自由曲面スーパーミラーの利用が将来可能になれば, 微小試料に対する実験効率を飛躍的に上げることができると考えられる[5].

謝辞

この開発は原研先端基礎研究センター極限環境中性子散乱法研究グループのテーマの 1 つとして行われたものです。同グループの石井氏にはシミュレーションソフトウェアの作製で, 原研中性子利用研究センターの田中氏には IP 測定で御協力頂きました。両氏に感謝致します。

参考文献

- [1]S.-M. Choi *et al.*, J. Appl. Cryst., **33**, 793 (2000).
- [2]例えば, 奥隆之 他, 日本中性子科学会第 3 回年回 P1-068, 篠原武尚 他, 同 P1-069, 鈴木淳市

他, 同 P1-070, 安達智宏 他, 同 P2-069, H. M. Shimizu *et al.*, Physica B **311**, 123 (2002) など.

[3]長壁豊隆, 波紋 **10**, 25 (2000).

[4]I. N. Goncharenko *et al.*, Neuron News **14**, 20 (2003).

[5]池田一昭 他, 日本中性子科学会第 3 回年会 P2-067, 曾山和彦 他, 日本物理学会 2002 年秋季大会 8aSL-5

Abstract:

The neutron-focusing is an indispensable technical element in the experiments under extreme condition with tiny samples. In this article, the development of the thermal neutron focusing device is reported. The device has 18 pieces of the 3Qc NiC/Ti neutron supermirrors with the shape of a circle. The extension of the end of each mirror meets at a focal point (sample position). Neutrons are repeatedly reflected with the same angle by the inner side of the circle and arrive at the sample position. The test results show that the integrated intensity increases by a factor of 2 or more for the neutron wavelength of 2.36 Å.