

熱中性子集光スーパーミラー素子を用いた散乱実験手法の確立

東北大・金研
原研機構・中性子
理研・イメージ情報研究ユニット

平賀晴弘、大山研司、加藤直樹、山田和芳
山口泰男
池田一昭、清水裕彦

1. はじめに（1から5まで10ポイント）

中性子はスピン1/2の電気的中性な粒子であり、同時に、波の性質としてのエネルギーと波長の両方が固体の励起状態のそれらに近いという特長がある。このような中性子と結晶内の原子・スピンとの干渉効果を利用する中性子散乱手法は、今や、材料・物性研究に欠かせない強力な実験手段の一つである。本所は、十年以上前から日本原子力研究開発機構東海研・改3号炉に熱中性子散乱実験装置を2台（HERMES, KSD [現AKANE]）設置し、理学部・東大物性研と共に全国大学共同利用を根底から支えつつ、粉末・単結晶試料を用いた基礎研究をなしてきた。近い将来、大強度パルス中性子源J-PARCが稼働を始めることもあり、これからの中性子科学に対する本所の大きな役割が期待されている。

中性子は物質中の原子・スピンとの間に働く相互作用が弱い為、散乱断面積の精密決定には、入射中性子束の増強や測定試料の大型化など、測定データの質を向上させる努力が常に為されている。本研究では、スーパーミラーを利用し高輝度中性子ビームを実現することで、実効的なビームタイムの増加、ひいては高品質・高効率なデータ採取システムの構築を目指した。この試みが成功した暁には、微量試料あるいは本質的に散乱断面積が小さい場合など、これまで微弱信号故に中性子散乱実験が困難だったケースを克服することが出来、中性子散乱実験の応用範囲を飛躍的に高めるブレークスルーに成り得る。具体的には、[1] 本所の中性子散乱装置に集光技術を組み込み、輝度10倍の増強、[2]他に先駆けた集光熱中性子による散乱実験手法の開発、の2点を目指した（図1参照）。

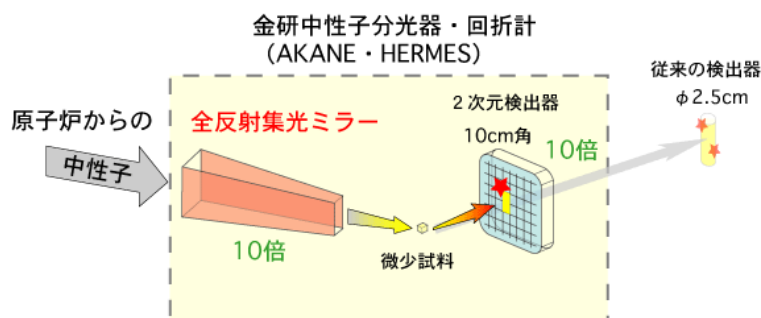


図1、中性子散乱の模式図。点線の中は、今迄にない組合せ。

2. 研究経過

スーパーミラーは、中性子の全反射と低角のブラッグ反射を利用する鏡で、これまで、原子炉から実験装置のある利用施設まで中性子束を効率良く引き出すのに使われてきた素子である。共同研究者である理研グループは、エネルギーの低い冷中性子に対し曲面をつけたスーパーミラーを使って実効的に中性子を曲げる光学デバイスの開発に成功しており、この分野で世界をリードしている存在である。

おおよその研究経過は、次の通りである。

①2005年度中性子ビームタイム（4~11月）において、HERMESとAKANEを使い、集光デバイスの

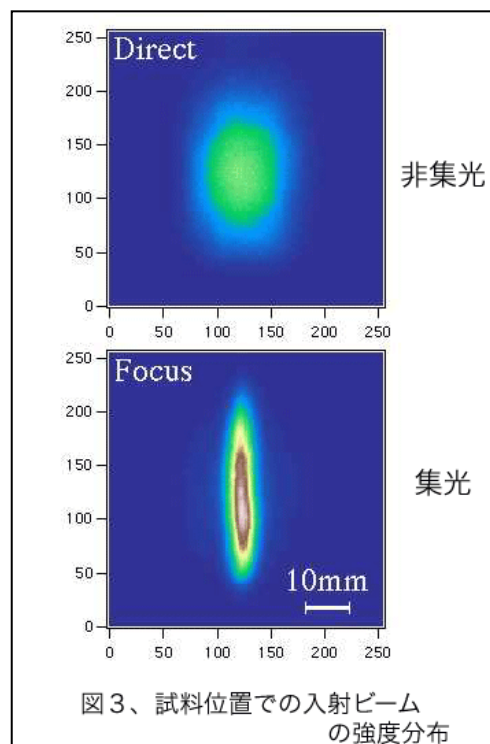
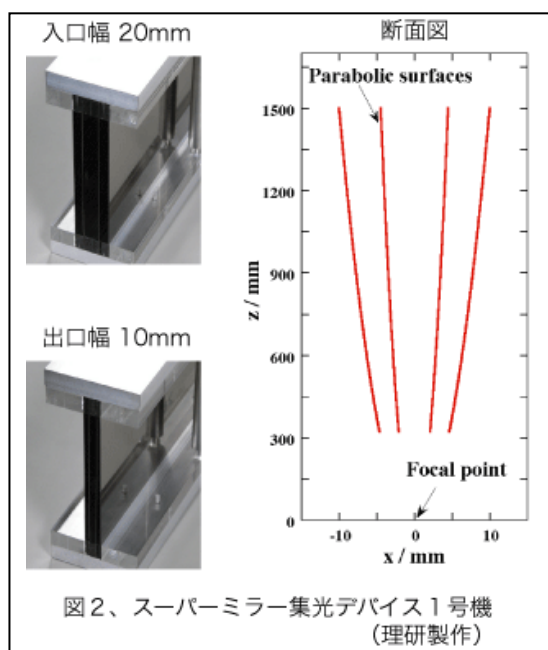
実験と2次元位置敏感中性子検出系のテスト実験。平賀と大山が各々5回程度、茨城県東海村へ出張。

- ② 2005年6月、共同研究者である理研の池田氏が、スーパーミラー集光の原理と実際について本所にて講演。討論を交えた後、具体的な新型集光デバイスのモデル検討開始。
- ③2005年11月、新型デバイスと位置決め治具が完成。
- ④2006年1月、本研究課題の成果報告会を金研にて開催。講演者9名。

3. 研究成果

[1] 中性子ビームの高輝度化

図2に、理研グループがHERMESの装置サイズに合わせて設計・製作したスーパーミラーを示す。これを分光器にセットし、試料位置におけるビーム集光の具合を調べた。ここでは、ミラーを配置する曲面に放物面を選び、その焦点が試料位置になるよう設計されている。図3に、試料位置で測定した入射中性子の強度分布を示す。強度の強い点が明るい色で表されている。集光デバイスにより、空間的にビームが絞られ、強度の増加していることが明らかに見て取れる。定量的に解析した結果、中心部で輝度が3倍まで上昇しているこ



とが判った。

この結果を受けて、スーパーミラーデバイス2号機を2006年秋までに製作した(図4)。このデバイスは出口幅を調整することが可能で、更なる高輝度化と、複数装置での可換性を目指している。つまり、金研の2装置(HERMES+AKANE)に装着できる設計となっている。原子炉長期シャットダウン期間中のため、年度内にその性能調査を行えなかったが、新年度以降のマシントイムにて実際に使用する予定である。

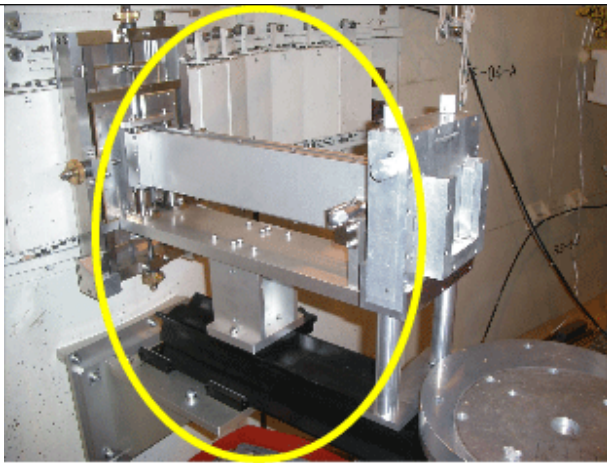


図4、スーパーミラー集光デバイス2号機
(金研製作)

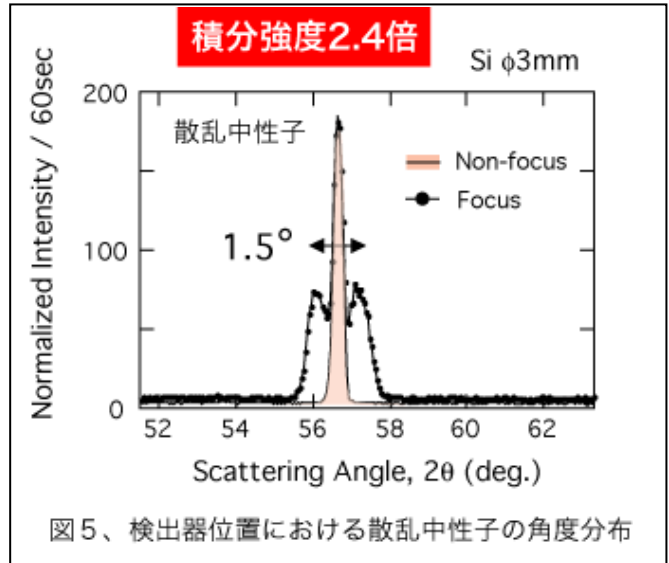


図5、検出器位置における散乱中性子の角度分布

[2] 集光ビームを使った回折実験の具体化

■散乱中性子の角度分布

試料位置へ実際に Si 粉末 (φ3mm) をセットし、回折ピークを中性子検出管で実際に観測した。その散乱角 2θ 依存性を図5に示す。ビーム集光前のシャープなシングルピーク (赤色で塗ったピーク：分解能限界) に加えて、その両脇±0.7° 程度外れた位置に、強度が半分弱で若干ブロードな散乱が観測された。角度積分した結果、集光前に比べて2倍以上の強度ゲインがあった。三軸型中性子分光器 AKANE で観測する高エネルギー遷移領域の中性子非弾性散乱のように、角度分解能よりも、強い散乱強度を必要とする実験に向いている。一方、HERMESで行う結晶・磁気構造解析のように、精密な角度分解能を必要とする実験には、更なる改良が必要である。

■入射ビームの検討と新しいモデル

以下に、考察を行う。本来1本であるべき散乱ピークが3本に分裂するのは、試料位置での入射ビームに不連続な角度分布があることを意味する。この原因は、図6に模式的に示すような、2系統の入射ビームにあると考えられる。すなわち、スーパーミラー放物面 (赤色) 経由後に焦点 (試料位置) に寄ってくる反射ビーム (青色) と、ミラーに当たらず試料位置にそのまま到達するダイレクトビーム (緑色) の2成分の存在である。これを解決するには、全ての入射ビームを一枚のスーパーミラーで一度反射させればよい。図7に、そのようなモデルを示す。離散的なピーク分裂を防ぐことが主目的であるが、副産物として、 $\lambda/2$ のような高調波の混入を抑制する働きがあり、精密な回折実験にとっては好都合である。スーパーミラー自体の長さ・試料までの距離・試料がダイレクトビームから外れる距離・試料位置での発散角などのパラメータが十分実現可能な値である。次年度にこのミラーを製作し、実験でその有効性を確かめる予定である。

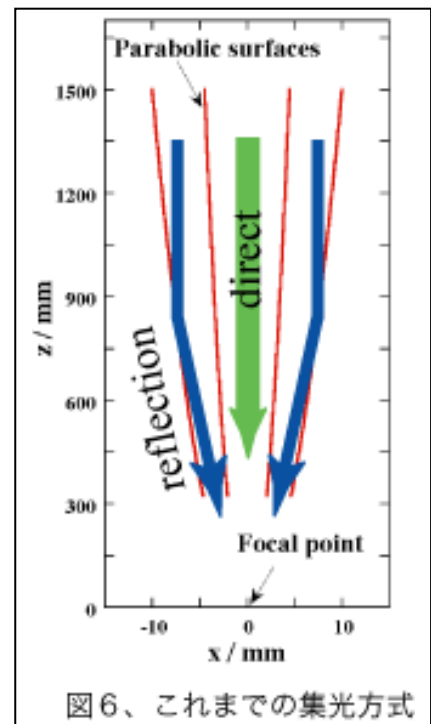


図6、これまでの集光方式

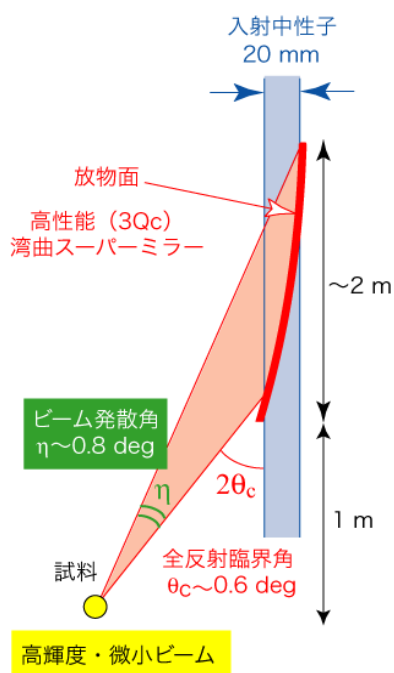


図7 全ての入射中性子をミラーで反射する、別モデル

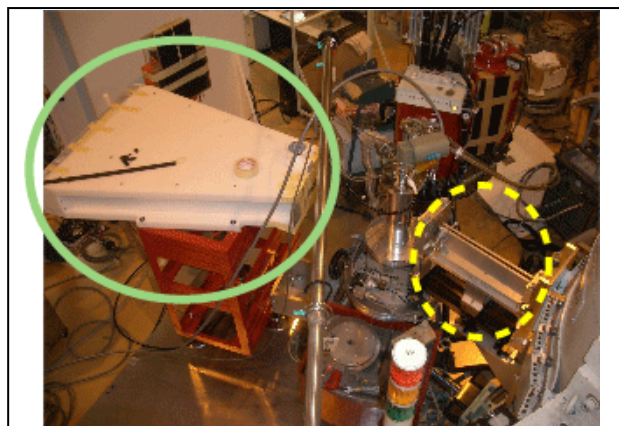


図8 2次元PSD (緑の楕円内) をセットしたAKANE。黄色の点線内は、スーパーミラー集光デバイス2号機。

■ 二次元位置敏感中性子検出器

これまでの中性子回折実験（特に三軸型中性子分光法）では、1本の検出管を載せたアームを角度スキャンすることで、散乱断面積を測定してきた。しかし、散漫散乱のように比較的広い角度分布をもつシグナルや、多くの Brillouin zone に亘る強度 contour map の対称性を観る時など、この方式では時間的な効率が悪い。そこで本研究課題では、最近性能が上がっている一次元位置敏感中性子検出管を複数並べることで、擬二次元位置敏感中性子検出系を形成し、もって測定時間の大幅な短縮（実効的には中性子高輝度化）を目指した。この方式では、散乱面上下に広がる二次元的な散乱断面積の観測も可能となり、物理的にも大きな意義がある。まだ試験運用の段階ではあるが、ほぼ予想通りの性能であることを確認した。スーパーミラー集光デバイス2号機（図4）と組合せる、新しい測定方式の状況を図8に示す。更に野尻グループとの共同研究で、試料位置へパルス強磁場発生装置をセットすることで、20T以上の強磁場中性子散乱実験を世界に先駆けて実現化したことも付記しておく。このように、金研2装置のオプションとして、極限環境下での高効率測定機能を備えるに至った。

4. まとめ

世界的にも貴重な研究資源である中性子ビームを有効利用するため、他に先駆けて、スーパーミラー集光デバイスを用いたビーム高輝度化と中性子散乱実験への応用に取り組んだ。現時点で、入射ビーム・散乱ビーム共に2～3倍の輝度上昇に成功した。更なる高輝度化と複数の装置にも対応可能な flexibility を取り入れるため、集光デバイス2号機を製作した。また、入射ビームの角度分散（2成分の存在）という問題点を明らかにし、それを解決するための新たな方策を検討し、具体的な設計段階に入った。さらなる測定効率の向上を目指し、擬二次元位置敏感中性子検出系を組上げた。これにより、金研が管理する2台の中性子散乱装置（AKANEとHERMES）の付加価値をより高め、世界に先駆けた新しい測定方法の開拓に成功した。

5. 発表（投稿）論文・記事

“Versatility of Advanced KINKEN Triple-Axis Neutron Spectrometer, AKANE”, H. Hiraka, K. Ohoyama, Y. Yamaguchi, and K. Yamada, abstract submitted to *International Conference on Magnetism* 2006.

“Renewal of Double-axis Neutron Diffractometer, KSD --- Upgrade to Triple-axis Neutron Spectrometer, AKANE ---“, H. Hiraka, Y. Yamaguchi, and K. Yamada, *Research Highlights* 2005, pp. 14, Neutron Science Laboratory, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo.

“Advanced KINKEN Triple-Axis Neutron Spectrometer, AKANE”, H. Hiraka, Y. Yamaguchi, and K. Yamada, 2005 年秋季所内講演会、ポスター発表

以上。