

超精密な金属製中性子集束ミラーの開発に成功 —多様な中性子ビーム集束デバイスの普及に期待—

理化学研究所（理研）光量子工学研究センター先端光学素子開発チームの細畠拓也研究員、山形豊チームリーダー、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の山田悟史助教、京都大学複合原子力科学研究所の日野正裕准教授らの共同研究グループ^{*}は、金型用の超精密加工技術と金属多層膜の成膜技術を融合させることで、金属材料のみで構成される中性子集束ミラーの開発に成功しました。

本研究成果は、低速中性子ビームの輸送および集束手法を大きく変え、中性子ビーム利用の発展に大きく貢献すると期待できます。

中性子集束ミラーを実現するためには、精密な曲面基板の上に「中性子スーパーミラー^[1]」と呼ばれる金属多層膜を成膜する必要があります。その基板には0.1ナノメートル（nm、1nmは10億分の1メートル）級の滑らかさが求められます。しかし、従来はガラスやシリコンといった硬く脆い材料が採用されていたため、大型化や複雑形状への対応が困難でした。

今回、共同研究グループは、レンズ金型用の無電解ニッケルリンメッキ^[2]を用いることによって、金属材料のみで基板を製作する方法を確立し、実用化に十分な約0.1mm幅の集束ビームを実現しました。この中性子集束ミラーは、耐放射線性の高い金属材料のみで構成されており、従来は困難であった大強度中性子源近傍でも利用可能です。また、金属は多種多様な形状に加工できるため、より複雑で高機能なミラーの開発につながります。具体的には、ナノ構造の空間的な分布を高分解能で捉えるマッピング計測や、顕微法を利用したイメージングまで、さまざまな測定への応用が考えられます。

本研究は、米国の科学雑誌『*Optics Express*』の掲載に先立ち、オンライン版（9月10日付け）に掲載されました。

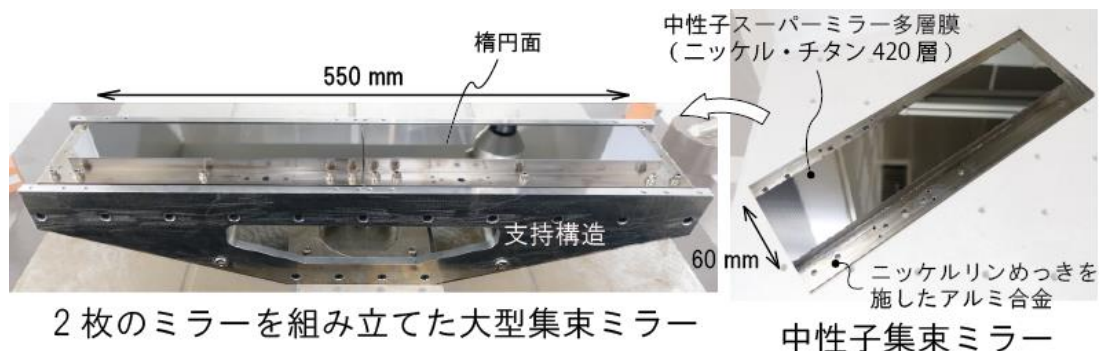


図 金型の加工技術と多層膜の成膜技術の融合による金属製の中性子集束ミラー

※共同研究グループ

理化学研究所 光量子工学研究センター 先端光学素子開発チーム	
研究員	細島 拓也 (ほそばた たくや)
チームリーダー	山形 豊 (やまがた ゆたか)
特別研究員	武田 晋 (たけだ しん)
研究パートタイマーⅠ	河合 利秀 (かわい としひで)
テクニカルスタッフⅠ	竹田 真宏 (たけだ まさひろ)
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 中性子科学研究系	
助教	山田 悟史 (やまだ のりふみ)
特任助教	根本 文也 (ねもと ふみや)
共同研究研究員 (住友ゴム工業)	堀 耕一郎 (ほり こういちろう)
京都大学 複合原子力科学研究所	
准教授	日野 正裕 (ひの まさひろ)
技術職員	吉永 尚生 (よしなが ひさお)

※研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築 (プログラムオフィサー: 吉沢 英樹)」の研究課題「安全で取扱容易なコンパクト中性子源のためのターゲット・減速体・ビーム輸送系の研究開発 (研究責任者: 山形 豊)」、文部科学省「光量子融合連携研究開発プログラム (総括プログラム・オフィサー: 家 泰弘)」の研究課題「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解 (課題責任者: 瀬戸 秀紀)」および「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化 (課題責任者: 大竹 淑恵)」による支援を受けて行われました。

1. 背景

近年、中性子ビームを用いた散乱実験は、X線と同様、物質の構造解析に欠かせない手段になっています。中性子ビームは、対象となる材料の奥深くまで侵入でき、軽元素や同位体をはっきりと識別できるため、“中性子ならではの”物質構造に関する情報を得ることができます。この有用な測定手段を広く提供するため、J-PARC (大強度陽子加速器施設) の物質・生命科学実験施設 (MLF) ^[3]をはじめ、大型の中性子源が世界中で稼働しているだけでなく、理研小型中性子源システム RANS^[4]のような小型の中性子源の整備も盛んに行われています。

中性子ビームを扱う上での困難な問題の一つに、“輸送が難しい”ことが挙げられます。材料分析に用いられる低エネルギーの中性子ビームは、高エネルギービームを減速することによって得られますが、その過程で四方八方に散乱し、指向性^[5]のないビームになってしまいます。そのため、発生源から離れた位置にある測定試料までたどり着ける中性子ビームはごくわずかです。この問題を改善する手段として広く用いられているのが、「中性子スーパーミラー」と呼ばれる特殊な金属多層膜です。この多層膜は、比較的大きな角度で中性子ビームを反射できるため、これを筒状にしたガイド管が発生源から測定試料まで、光ファイバーのように中性子ビームを輸送する手段として用いられています。

中性子スーパーミラーのさらなる応用として、中性子ビームを湾曲したミラーで反射して試料に集める集束ミラーの開発が望まれています。集束ミラーが普及すれば、これまで試料にたどり着かずに無駄になっていた中性子ビームを集めて有効活用できるようになり、測定的大幅な効率化につながります。「中性子集束ミラー」を実現するためには、0.1 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) 級の滑らかさと高い形状精度を併せ持った曲面状の基板に、中性子スーパーミラー多層膜を成膜する必要があります。しかし、従来技術ではこのような基板は光学ガラスやシリコンなどの加工が非常に困難な硬脆材料でしか実現できず、大型化や複雑形状への対応が難しかったため、中性子集束ミラーの実用化と普及の妨げとなっていました。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、中性子スーパーミラー多層膜を成膜するための基板として要求される 0.1 nm 級の滑らかさを実現するための材料として、無電解ニッケルリンメッキに着目しました。このメッキは、プラスチックレンズ金型のコーティングとして広く用いられているもので、アモルファス（非晶質）^[6]であるという特徴があります。

一般的な金属材料は微小な結晶粒が集まってできており、これらの粒はばらばらの方向を向いていて、それぞれ方向によって硬さが異なります。このような金属を加工しても、多く削れる粒と少なく削れる粒の間に段差ができてしまい、中性子スーパーミラーに要求される滑らかさを達成することは困難です。しかし、アモルファスの無電解ニッケルリンメッキには結晶粒がないため、加工しやすい金属であるにもかかわらず、中性子スーパーミラーの要求を満たす超平滑面を容易に得ることができます。

そこでアルミ合金を大まかな形状に加工し、これに無電解ニッケルリンメッキの皮膜を付け、ダイヤモンド工具で形状を整えた上で研磨仕上げしました。さらに、その上に中性子スーパーミラー多層膜を成膜することで、さまざまな形状の中性子集束ミラーを製作する方法を確立しました（図 1）。金属基板は組み立てて接続することが容易であるため、複数の集束ミラーを接続して大面積化し、より多くの中性子ビームを反射して集めることができます。

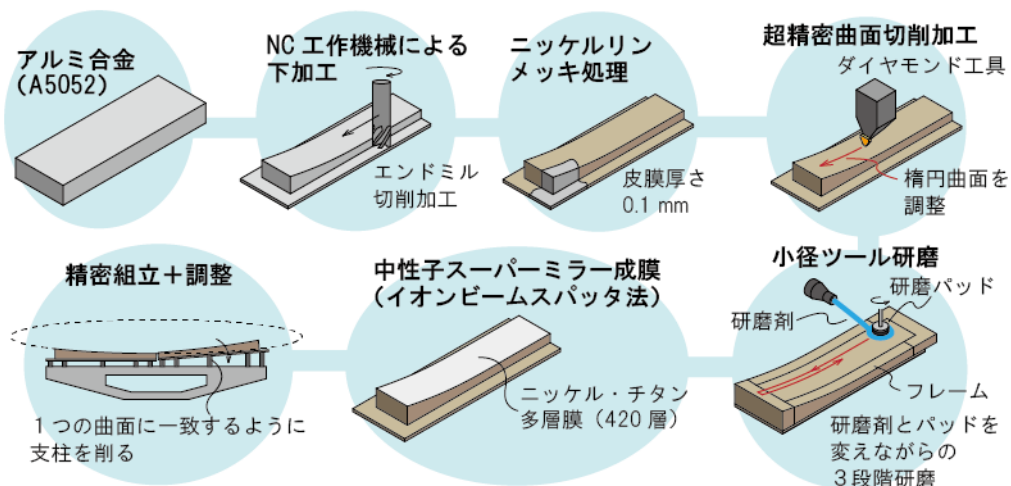


図1 金属製の中性子集束ミラーの製造プロセス

光学素子金型の製造技術と中性子ビーム用金属多層膜の成膜技術を融合させたプロセス。加工しやすい金属の表面にメッキを施し、多様な平滑曲面に仕上げて多層膜を成膜する。組み立てによる大型化も容易。

次に、この方法を使って、実際に稼働中の中性子実験装置である J-PARC MLF の中性子反射率^[7]測定装置 SOFIA に中性子集束ミラーを設置し、性能評価を行いました。この中性子集束ミラーの表面は楕円形となっており、これを用いて 0.05 mm 幅のスリットから出射した中性子ビームを、4.3 m 離れた位置で 0.13 mm の幅（半値全幅^[8]）のガウス分布^[8]状の領域に集束させることに成功しました（図 2）。これほどの長距離で精密に集束させることができる中性子集束ミラーは過去に例がなく、世界最高レベルの性能です。この集束ミラーにより、小さな試料に大強度の中性子ビームを集束して照射することが可能になると期待でき、現在は中性子反射率測定用のミラーとして実用化するための検討を行っているところです。

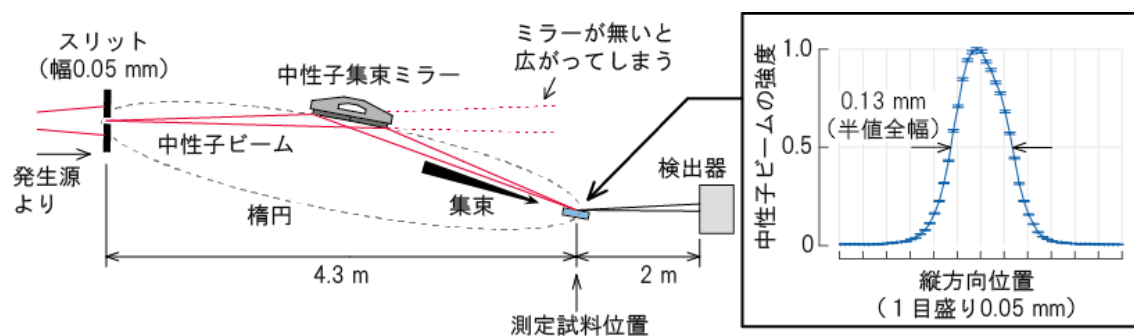


図2 中性子反射率計で実用化した金属製中性子集束ミラーの集束性能

幅 0.05 mm のスリットから広がった中性子ビームを、4.3 m 離れた位置で半値全幅 0.13 mm のガウス分布状に集束させることに成功。小さな測定試料に集中して中性子ビームを照射することで、測定時間が大幅に短縮される。

この集束性能は、ミラーのうねりの少なさ、滑らかさ、そして組み立て精度の高さによって実現されています。金属基板表面の微小なうねりによる角度誤差は、アルミナ研磨剤を用いてエポキシパッドとスエードパッドで交互に研磨することによって、約 30 マイクロラジアン(1km で 30mm の傾斜:約 0.0017 度)まで低減されており、反射した中性子ビームが再び広がることを防いでいます。金属基板の表面はシリカ研磨剤を用いて、達成可能な限界の約 0.1 nm の滑らかさまで均一に研磨されています。

この上にイオンビームスパッタ法^[9]で成膜した中性子スーパーミラー多層膜は全領域において、全反射臨界角^[10]の条件下で約 86%の高い中性子反射率を達成しました。さらに、2 枚の中性子集束ミラーを相対的な角度誤差が 0.1 マイクロラジアン以下になるように調整して組み立てることによって、あたかも一つの大型ミラーであるように機能させることに成功しました (図 3)。

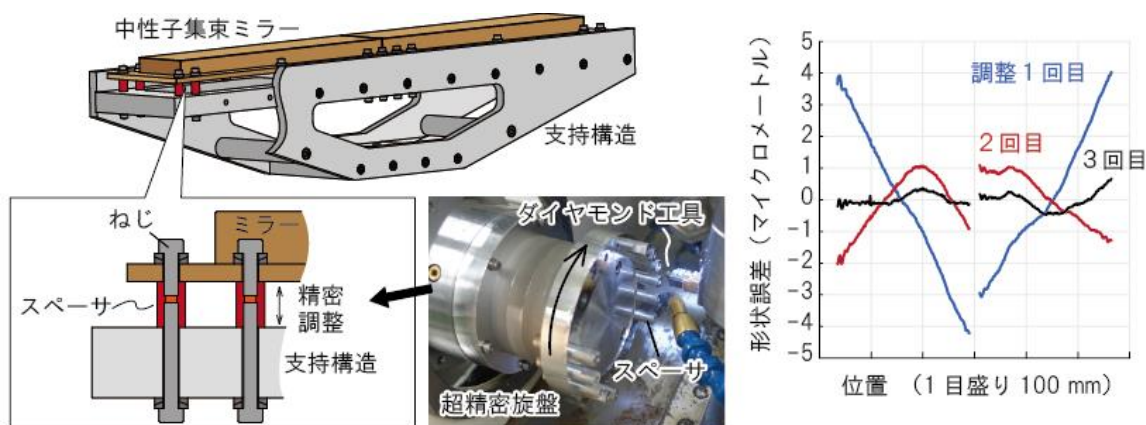


図 3 金属製中性子集束ミラーの組み立て調整

2 枚の中性子集束ミラーが同一の曲面に重なるように、形状測定結果に基づいてスペーサの長さを削って調整する。10nm 単位で工具位置を調節できる超精密旋盤を使うことにより、極めて精密な角度調整が可能。右のグラフは、3 回の調整を経て角度誤差が徐々に低減されていく様子を示している。

3. 今後の期待

金属製の中性子集束ミラーの実現によって、中性子集束ミラーの形状の制約が大幅に低減したことから、今後回転対称形状などの立体的で複雑な形状を持つ高機能な中性子集束ミラーの開発が加速されます。

また、試料の狭い領域にビームを集束させて散乱実験を行うことによって、原子・分子のナノ構造が空間的に分布している様子をサブミリメートルの分解能で捉えるマッピング計測や、試料位置の像を検出器に収束させる顕微鏡光学系を利用したマイクロメートルスケールの顕微イメージングなどが実現可能になります。

このような中性子集束デバイスが世界中の中性子実験施設で実用化されていくことにより、中性子散乱実験による物質構造解析が効率化され、さまざまな材料の改良や新規開発が推進されていくと期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Elliptic neutron-focusing supermirror for illuminating small samples in neutron reflectometry

<著者名>

Takuya Hosobata, Norifumi L. Yamada, Masahiro Hino, Hisao Yoshinaga, Fumiya Nemoto, Koichiro Hori, Toshihide Kawai, Yutaka Yamagata, Masahiro Takeda and Shin Takeda

<雑誌>

Optics Express

<DOI>

10.1364/OE.27.026807

5. 補足説明

[1] 中性子スーパーミラー（中性子スーパーミラー多層膜）

低エネルギーの中性子ビームを、比較的大きな角度で反射できるように設計された金属多層膜。一般的には、ニッケル膜とチタン膜の厚みを徐々に変化させながら交互に積層したもの。

[2] 無電解ニッケルリンメッキ

通電を伴わずに化学的還元作用によってニッケル皮膜を形成するメッキ。リンの含有量が多いものは非晶質となる。ダイヤモンド工具との相性が良く、切削加工によって高精度な曲面が容易に得られるため、例えばスマートフォンのカメラレンズなど、光学素子を成形するための金型に広く用いられている。

[3] 物質・生命科学実験施設（MLF）

J-PARC 内に設置。世界最高クラスの強度の中性子およびミュオンビームを利用して、素粒子・原子核物理学、物質・生命科学などの基礎研究から産業分野への応用研究まで広範囲にわたる分野での研究が行われている。

[4] 理研小型中性子源システム RANS

線形加速器で加速させた 7MeV 陽子 (1MeV は 100 万電子ボルト) をベリリウム (Be) 標的に照射し、Be(p,n) 反応により、エネルギーが最大 5MeV の中性子を発生させる中性子源システム。Be 標的のすぐ後にポリエチレンモデレーターを設置し、発生した高速中性子を熱中性子に減速させ、ビーム状にして取り出す。RANS から取り出される中性子ビームは、減速されない高速成分と熱中性子が混在している。RANS は、RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source の略称。

[5] 指向性

ビームの強度が方向によって異なる性質。例えば、レーザービームは一方向に強度が高く、ほとんど広がらずに進む。低速中性子ビームは全方向にほぼ均一な強度であり、全方向に広がるため指向性がない。

[6] アモルファス（非晶質）

結晶構造を持たない固体の状態。原子が規則正しく並んだ状態を表す「結晶質」の対義語。代表的なアモルファス物質としてガラスが挙げられる。

[7] 中性子反射率

物質表面に入射した中性子が鏡面反射する割合。反射しない分は物質を貫通するか物質に吸収される。

[8] 半値全幅、ガウス分布

ガウス分布は統計学で用いられる正規分布の別称。集束ビームの強度分布の断面形状を表す場合には前者が用いられる。半値全幅は、強度が最大値の半分となる幅のことであり、集束ビームの幅を表現する値として一般的に用いられる。

[9] イオンビームスパッタ法

イオン銃から放出されたアルゴン等のイオンをターゲット材料に衝突させ、飛散した材料を試料に堆積させる成膜手法。高真空中で成膜することにより、純度が高い精密な薄膜を得ることができる。

[10] 全反射臨界角

中性子ビームを反射できる限界の角度のこと。同じ物質表面でも中性子のエネルギーによって異なり、低エネルギーの中性子の方が、全反射臨界角が大きい。