HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	金属基板を使用した高性能大型中性子集束スーパーミラーの開発［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	武田, 晋
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12458号
Issue Date	2016-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/63323
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Shin_Takeda_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　武田 晋

学 位 論 文 題 名

金属基板を使用した高性能大型中性子集束スーパーミラーの開発
(Development of high-performance neutron focusing mirrors using metallic substrates)

中性子散乱は他の手法に比較し、同時に測定可能な運動量-エネルギー変化領域が広く、散乱断面積が小さく、電気的に中性であるのにスピンを持っているという特性を持っているため、ユニークな研究手段となっており、特に磁性体の研究やソフトマターの研究には欠かせない。このため数は多くないが、大型・中型の研究用原子炉を用いた研究が続けられてきた。さらにこれを発展させるため、大強度陽子加速器を用いた中性子施設、イギリスの ISIS、アメリカの SNS、日本の J-PARC が運転中であり、さらに大規模なヨーロッパの ESS が建造中である。

これら大型の施設だけでは中性子を用いた研究の需要をまかなうことはできず、特にここ数年、小型の加速器を用いた中性子源に注目が集まっている。北海道大学の HUNS がその草分けであるが、インディアナ大学の LENS、清華大学の CPHS、理化学研究所の RANS といった施設が稼働し、さらに多くの施設が建設中、あるいは計画中である。

一般に中性子施設では、中性子ビームの輸送をするためのガイド管や集束光学素子などの組み合わせによる高分解能化、中性子利用効率の向上等の測定手法の高度化が進んでいる。しかし特に小型中性子源施設においては装置の小型化、高性能化がその施設・装置が実用性を決めるため、その必要性はより高い。そのような試みの一つが集束ミラーである。米国 ORNL の Ice や大阪大学の山村らは、ガラス基板を用い、これを曲げる、あるいは電解研磨によって楕円面形状を作成するなどして集束ミラーとし、中性子ビームの精密な集束に成功している。しかし、ガラス材料を使用した加工方法では曲率の大きな二次曲面の形成は不可能ではないにしろ、困難である。

これに対して金属材料は加工特性が良く、ガラスに比べて製作が格段に容易となる。さらに、支持機構との結合にも有利である。従来、金属材料が中性子スーパーミラーの基板として使用されなかったのは、結晶粒界により表面粗さを下げるのが困難と思われていたためである。しかし、金属基板に無電解 NiP メッキを処理し、アモルファスであるメッキ面を切削・研磨加工することでガラスと同程度の表面粗さが実現できる。また、幅広い波長の中性子を利用するためにはスーパーミラー多層膜を持つ集束ミラーが必須であるが、金属基板を用い、二次曲面にスーパーミラー多層膜を成膜した例はまだない。さらに、ミラー長さは数十 cm 以上の大型のものであることが望ましい。

そこで、中性子に対して高い臨界角を持つスーパーミラーを成膜した金属基板を用いた大型の集束ミラーを開発した。また、分割製作することでさらに大きなミラーを製作できるようになった。基板はアルミ合金に無電解 NiP メッキを施したものを使用し、高い形状精度と優れた表面粗さを同時に得るために超精密切削加工と精密機械研磨加工を組み合わせた加工法を用いた。自由度の高い二次曲面形状に対応するため、超精密切削加工ではシェーパー加工法を、研磨加工では小さな研磨ツールを使用した走査型の研磨方法を採用した。

第 2 章では平板形状の試験片を用いて本手法によって得られる表面粗さを検証した結果について述べた。試験片の表面粗さは 0.6 nm rms を達成し、中性子反射試験によって表面粗さに由来する

散漫散乱強度が実用的なレベルまで低減されていることが分かった。さらに作製した試験片の表面にスーパーミラー多層膜を成膜し、中性子反射率測定によって無電解 NiP メッキの表面にスーパーミラー多層膜が問題なく成膜可能であることを確認した。

第 3 章では、回転楕円形状の小型の試験片を用いて本手法によって到達できる形状精度を検証した結果について述べた。最終的に理化学研究所の郭江博士によって仕上げられた試験片は表面粗さが約 0.2 nm rms であり、形状誤差は 0.5 μm P-V であった。この試験片を使用した中性子集光実験の結果、ϕ1.0 mm FWHM の集光ビームが確認された。さらに、試験片へのスーパーミラー多層膜の成膜試験も行われ、中性子反射率測定の結果、曲率の大きな形状を持つ曲面の表面に問題なく成膜されていることが確認された。

第 4 章では、J-PARC の水平型反射率計 BL06 で小さな試料を用いる際のビーム強度損失を下げるための集束ミラーを製作したのでそれについて述べている。通常のスリット系を用いたのでは、試料が小さくなるほどビーム広がりを抑えるためにスリットが小さくなってしまい、ビーム強度損失が大きくなる。集束ミラーを導入することによって、その損失を減らすものである。

全長 550 mm のマルチセグメント型の大型の楕円面形状ミラーを 2 つの対称な形状のミラーセグメントに分割し、それぞれを超精密切削、研磨加工を行って完成させた。次に形状測定を行い、試験片全体の形状誤差は 4.6 μm P-V、基板の表面粗さは約 0.3 nm rms と表面性状の非常に優れたものができている。京都大学原子炉実験所の日野准教授に依頼し、この試験片に Ni の 3 倍の臨界角を持つスーパーミラー多層膜の成膜をした。中性子を用いた測定で、臨界角付近で 60 80

第 5 章では、小型集束型中性子小角散乱装置 (mfSANS) に用いるための回転楕円形状の集束ミラーを作成したのでそれについて述べている。集束ミラーを用いることにより、原理的には、全長 2.5 m ないし 5 m の mfSANS 型装置であっても、一桁大きな小角散乱装置と同等の運動量変化領域の測定が可能となる。このための集束ミラーとして 900 mm の長さを持つミラーを三分割した中央部分のミラーを作成した。回転楕円形状のミラーで、縦に 3 分割したミラーと分割なしの二つのケースについてミラーの作成を行った。最終的な試験片の表面粗さはどちらも約 0.3 nm rms であり、形状誤差もどちらも約 3 μm P-V であった。両方の試験片を用いて集光実験を行った結果、どちらも ϕ1.3 mm FWHM の集光ビームが確認され、分割しても集光性能に大きな支障はないことが証明された。

以上の結果から、本研究で開発した金属基板を用いた集束用中性子スーパーミラーは実用に耐えうるレベルの集光性能及び反射率を有していることが証明された。さらに反射率計において小さな試料を測定する際の計数効率を 3.3 倍に上げることに成功するとともに、mfSANS に用いるための十分な集束性能があることも実験的に示された。マルチセグメント化により、集光性能を落とすことなくさらに大型の集束ミラーを製作する事も可能であることも証明された。