

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22604010

研究課題名（和文） 中性子顕微鏡を実現するための要素技術の開発

研究課題名（英文） Development of essential devices for the neutron microscope

研究代表者

酒井 卓郎（SAKAI TAKURO）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・副主任研究員

研究者番号：70370400

研究成果の概要（和文）：

本課題では、 $10\mu\text{m}$ 以下の空間分解能を有する中性子ラジオグラフィ技術を実現するため、その要素技術である、「中性子用光学素子」と「高感度かつ高分解能の蛍光板」の開発をすることが目的である。具体的には、プロトンマイクロビームやレーザーを用いた微細加工技術による中性子用光学素子の作製に成功した。また、酸化ガドリニウム膜をコーティングした新たな高輝度蛍光コンバーターの開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this subject is development of the neutron microscope. Therefore, we have developed two essential devices. One is novel neutron optics device, and the other is high-spatial-resolution fluorescent converter plate. These devices are fabricated by the proton microprobe and laser-processing method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：中性子、ラジオグラフィ

1. 研究開始当初の背景

中性子ラジオグラフィ法は、X線では観ることの出来ない厚い試料内部の可視化や水（水素）分布の挙動などを調べる有効な手段として広く使われている。しかしながら、エネルギーの揃っていない熱中性子を一点に集光することは技術的に困難であり、また研究用原子炉や核破碎中性子源などの大型施設であっても、毎秒 $\sim 10^8$ 個/cm²程度の中性子束しか得ることが出来ないため、コリメーターによりビームを10 μ m以下にまで細くすると、十分なビーム強度が得られなくなる問題がある。さらに中性子の検出には、ホウ素やリチウム、ガドリニウムなど中性子を捕獲して荷電粒子を放出する核反応が利用されるが、放出される荷電粒子の飛程は、数 μ m \sim 数10 μ m程度あるため、最良でも10 μ m程度の分解能しか得ることが出来ない。このため、中性子ラジオグラフィ法において10 μ m以下の空間分解能は達成されておらず、中性子顕微鏡と言える技術は、未だ確立していない。

2. 研究の目的

本研究では、実空間で10 μ m以下の分解能を有する中性子顕微鏡を実現するため、その要素技術である、「中性子光学素子」と「高感度かつ高分解能の蛍光板」を開発することが目的である。

3. 研究の方法

1) 中性子光学素子の開発

ポリエチレンなど水素を多く含む材料は、中性子の散乱体になることはよく知られている。実際、この散乱体を別の中性子源と見立てて、ラジオグラフィの投影面を増やす方法が原子力機構で開発された。本課題におい

ては、中性子散乱体の内側を円錐形状にくり抜くことで、集光効果があることを確認しており、熱中性子用の新たな集光技術として開発を行った。

また、中性子ラジオグラフィの空間分解能を評価するためのテストチャートの作製も併せて行った。

2) 高い感度、かつ高い空間分解能で中性子を検出できる蛍光板の開発

中性子の検出においては、中性子捕獲材料と蛍光体の混合物（蛍光コンバーター）がよく用いられる。蛍光コンバーターを厚くすることで高い感度が得られるが、内部で光が発散してしまうため空間分解能は劣化してしまう。このため、中性子に対して高い捕獲断面積を有し、可視光に対しては透明である酸化ガドリニウム膜で蛍光コンバーターの表面をコーティングすることで、中性子に対する検出効率を向上させて、発光量を向上させる新たな蛍光板の開発を行った。

4. 研究成果

1) 中性子光学素子の開発

中性子散乱体であるポリエチレンを円錐状にくり抜いた集光素子を製作し、さらに、中性子をコリメートするための微細な貫通孔を有するガドリウム板のレーザー加工を行い、10 μ m径の貫通孔を有するコリメーターの製作に成功した。上記の素子を組み合わせることで、中性子集光素子を開発した。その効果確認実験を行った。その結果、10 μ m程度の微小な中性子スポットを創出できることが確認でき、集光効果を実証した。この中性子ビームを点線源として利用することで拡大光学系を実現することができ、中性子顕微鏡を開発するための大きな課題の一つ

を解決した。

また、電子ビームに比べ物質中での直進性の高い MeV 級のプロトンビームを用いて、75 μm 厚の亚克力シートに線幅 100~5 μm 程度の貫通部を有する微細加工を行った。この微細なパターンにレーザー蒸着法によって、中性子の吸収体であるガドリニウム膜の蒸着を施し、中性子ラジオグラフィの空間分解能を評価するパターンの作製に成功した。図 1 に作製したテストチャートの顕微鏡写真を示す。

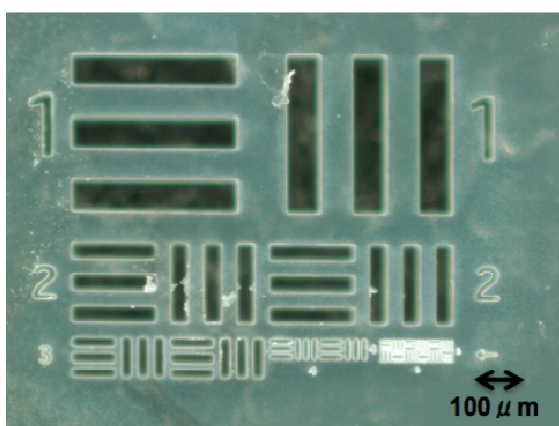


図 1 作成した空間分解能評価用テストチャートの顕微鏡写真

2) 高い感度、かつ高い空間分解能で中性子を検出できる蛍光板の開発

高分解能の中性子用検出器として、中性子捕獲材料としてフッ化リチウム (${}^6\text{LiF}$) と蛍光体 (硫化亜鉛、 ZnS(Ag)) の混合物からなる新たな蛍光コンバーターの開発を行った。空間分解能を上げるため、蛍光体の厚さが 15 μm 程度と非常に薄い蛍光板の作製に初めて成功した。また、この蛍光体表面に、レーザー蒸着法によって酸化ガドリニウム膜を約 1 μm 厚でコーティングした。ガドリニウムは熱中性子に対して非常に高い捕獲断面積を有し、中性子捕捉に伴い内部転換電子を放出する。このため発光量の増加が見込める。

また、可視光に対しては透明であるため、発生した蛍光を減衰することは無い。

この蛍光板の評価実験は、研究炉 JRR-3 が震災の影響で停止していたため、京都大学原子炉実験所で行った。その結果、中性子に対する発光強度を約 30% 向上出来ることを確認した。また、この蛍光コンバーターを用いることで、30 μm の線幅からなるラインペアを中性子ラジオグラフィで観察することに成功した。より強度の強い中性子ビームを利用することで、10 μm 程度の空間分解能を達成することも十分可能であると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, W. Kada, M. Kohka, T. Satoh, T. Ohkubo, Y. Ishii and K. Takano, “Micromachining of Commodity Plastics by Proton Beam Writing and Fabrication of Spatial Resolution Test-chart for Neutron Radiography”, 査読有り, Nucl. Instr. Meth. B 306 (2013) 229-301, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2012.10.030>
- ② T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, “Development of a High-Performance Optical System and Fluorescent Converters for High-Resolution Neutron Imaging”, 査読有り, Phys. Procedia 43 (2013) 223-230, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.026
- ③ T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, M. Koka, T. Sato, T. Ohkubo and Y. Ishii, “Development of

Neutron Optics Devices Using Proton Microbeam”, 査読有り, JAEA-Review 2010-065 172 (2010),
<http://jolissrhc-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2010-065.pdf>

④ T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, M. Koka, T. Sato, T. Ohkubo and Y. Ishii, “Development of Fine Devices Using Proton Microbeam”, 査読有り, JAEA-Review 2011-043 165 (2011),
<http://jolissrhc-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2011-043.pdf>

[学会発表] (計 5 件)

- ① 酒井卓郎、安田良、飯倉寛、野島健大、松林政仁、山本春也、江夏昌志、佐藤隆博、大久保猛、石井保行、高野勝昌、「プロトンマイクロビームとレーザー蒸着法による中性子用素子の開発」、第7回高崎量子応用シンポジウム、2012年10月12日、高崎市
- ② T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, W. Kada, M. Kohka, T. Satoh, T. Ohkubo, Y. Ishii and K. Takano, “Micromachining of Commodity Plastics by Proton Beam Writing and Fabrication of Spatial Resolution Test-chart for Neutron Radiography”, 第13回核マイクロプローブ技術と応用に関する国際会議 (ICNMTA-13)、2012年7月26日、リスボン (ポルトガル)
- ③ T. Sakai, R. Yasuda, H. Iikura, T. Nojima, M. Matsubayashi, “Development of a High-Performance Optical System and Fluorescent Converters for High-Resolution Neutron Imaging”, 第7回中性子ラジオグラフィに関する国際会議

(ITMNR-7)、2012年6月20日、キングストン (カナダ)

- ④ 酒井卓郎、安田良、飯倉寛、野島健大、松林政仁、山本春也、江夏昌志、佐藤隆博、大久保猛、石井保行、高野勝昌、「プロトンマイクロビームによる微細素子の開発」、第6回高崎量子応用シンポジウム、2011年10月14日、高崎市
- ⑤ 酒井卓郎、安田良、飯倉寛、野島健大、松林政仁、山本春也、江夏昌志、佐藤隆博、大久保猛、石井保行、「イオンマイクロビームによる中性子用光学素子の開発」、第5回高崎量子応用シンポジウム、2010年10月14日、高崎市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 卓郎 (SAKAI TAKURO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
量子ビーム応用研究部門・副主任研究員
研究者番号：70370400

(2) 研究分担者

安田 良 (YASUDA RYO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
量子ビーム応用研究部門・主任研究員
研究者番号：20414592

石井 保行 (ISHII YASUYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
高崎量子応用研究所・副主任研究員
研究者番号：00343905

佐藤 隆博 (SATO TAKAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
高崎量子応用研究所・副主任研究員
研究者番号：10370404

(3) 連携研究者

該当なし