

Internal Residual Stress Measurement by Neutron Diffraction Method

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/555

中性子回折法による内部残留応力測定

佐々木敏彦* 渡邊 英明*

Internal Residual Stress Measurement by Neutron Diffraction Method

Toshihiko SASAKI and Hideaki WATANABE

1. 緒言

中性子応力解析法^{1)~7)}は実績ある X 線応力測定法と同様の原理 (Bragg の回折条件) に基づいた高い信頼性を持った解析法である。また、材料内部の残留応力状態を非破壊的かつ高精度に測定することができる。一方、近年、日本原子力研究所により中性子イメージングプレート (中性子 IP) が開発された。中性子 IP は従来の中性子検出器と比較して、計数率や位置分解能に優れているとともに、測定面積が約 100mm ~ 400mm と広範囲であることや柔軟性に富むことによる幾何学的な自由度を有しているなどの特長をもっている。現在、主に生体の構造解析などへの適用が検討されている。しかしながら、工業的に重要な残留応力解析への検討はまだなされていない。

そこで、本研究では中性子 IP による (残留) 応力解析法の開発を目標とし、そのための基礎的問題について実験的な検討を行った。すなわち、種々の板厚を有する材料について、得られる中性子回折プロファイル形状およびその半価幅の特徴を調べた。また、材料の材質や中性子ビームの入射角の影響を調べた。さらに、高精度な応力解析にとって不可欠となる、中性子 IP 画像中における入射中性子ビームの中心位置を高精度に決定するための方法について検討した。

2. 実験施設 (日本原子力研究所・東海研究所)

2.1 実験用原子炉 (JRR-3 M)

本研究での中性子の実験では全て、日本原子

力研究所の東海村研究所における実験用原子炉 (JRR-3 M) を使用した。Fig. 1 に実験用原子炉の外観の写真を示し、Fig. 2 に実験用原子炉の内観の写真、Fig. 3 に実験用原子炉の概要図を示す。中性子が発生してから、試験片に照射されるまでの過程を Fig. 4 に示すが、その概要は次のとおりである。

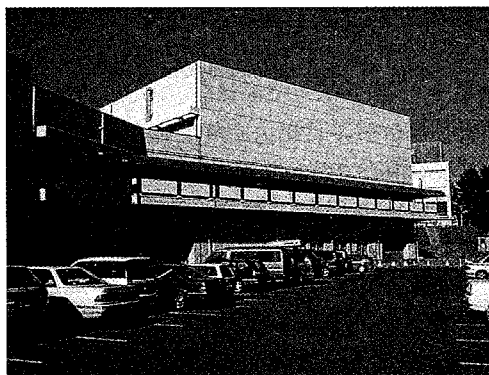


Fig. 1 Reactor used for neutron source.



Fig. 2 Beam hall in JRR-3 M showing thermal neutron guide tubes.

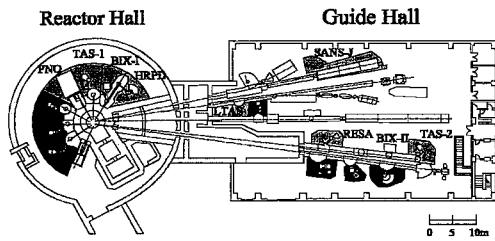


Fig. 3 Schematic view of reactor and guide hall at JRR-3 M in JAERI used for neutron diffraction experiment.

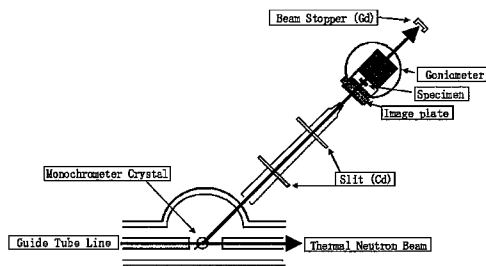


Fig. 4 Expansion diagram of RESA

原子炉ホールに出力20MWのスィミングプール型の炉心において ^{235}U を核分裂させて高速中性子を発生させる。高速中性子は減速材の重水素と衝突することにより熱平衡に達して熱中性子に変わる。この熱中性子は約0.2nmに最大ピークを持つようなエネルギー分布(Maxwell分布)を呈している。続いて熱中性子は炉心の周りに設置された重水タンク中の水平実験孔を通りリアクターホールの外へと取り出される。さらに、ガイドチューブを通り実験利用棟(ガイドホール)へと導かれる。ガイドチューブは内面にNi被膜が被服された幅20nm、高さ200mmのガラス製のチューブである。熱中性子はガイドチューブ内の側面に衝突し全反射することで強度の低下を抑えている。また進行方向にやや曲面を持たせることで熱中性子に含まれる γ 線をカットしている。その後ガイドチューブを通った熱中性子はパイログラファイト製モノクロメーターにより、波長 $\lambda=0.2088$ 8 nmに単色化されて同時に進行方向を変えて

RESA (Residual Stress Analyze Equipment) と名付けられた残留応力測定装置へと進む。Fig. 4にRESAの拡大図を示す。続いて中性子はアルミニウム製の導波管(全長約2m, 直径約100mm)内を通り試験片へと照射される。導波管の入り口には、直径10mm, 厚さ7mmの円状の形をした B_4C ゴム製のスリットを置き、出口には直径3mm, 厚さ0.5mmの円状の形をしたCd製のスリットを置いて中性子ビームの照射面積を調節した。¹⁰⁾

2. 2 応力測定装置の概要^{1)~2)}

導波管を出た中性子は試験片に照射され、回折像を中性子IPで記録できるようにした。中性子IPは中性子ビームに対し垂直に設置し、試験片を $0^\circ \sim 24^\circ$ 傾け、導波管の出口と試験片との距離(カメラ長)を45mmに設置した。中性子IPは黒色の封筒状ケースに入れ、さらに γ 線をカットする為に表面と裏面に厚さ1mmのPb板およびAl板を密着させて回折中性子を測定した。試験片はZ軸方向に移動可能で水平方向に引張り荷重を与えられる小型ジグ(Fig. 5参照)に設置した。また、Fig. 6に本研究の応力測定装置の主要部分の写真を示す。

3. 実験方法

3. 1 解析条件決定のための基礎的検討^{1)~2), 10)~16)}

供試材に市販の一般構造用炭素鋼SM400を使用し、縦100mm, 横50mm, 板厚を1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25mmの8種類に加工した。加工の影響を除去するためにFig. 7に示す熱処理を施した。

測定条件は、中性子入射角を 0° (垂直入射)と

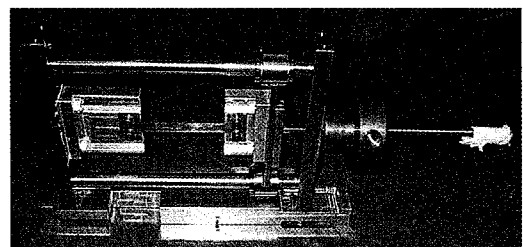


Fig. 5 Small system for specimen hold.

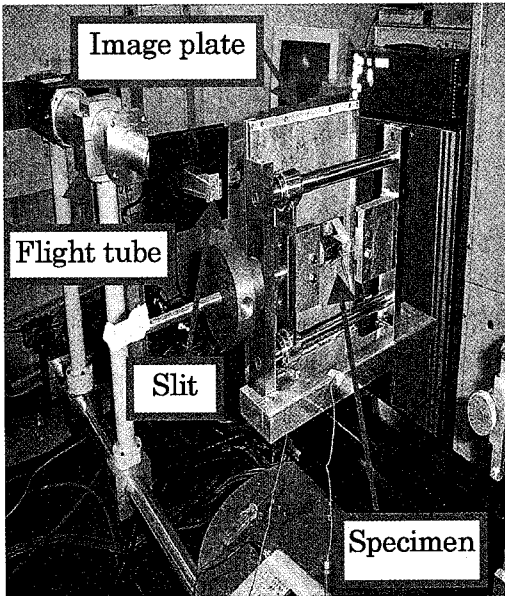


Fig. 6 Photograph of experimental set-up used in this study.

45°の2種類とし、カメラ長を45mm、露光時間を全て30minとした。

板厚の異なる8種類の試験片のプロファイルを比較し、さらにこの回折プロファイルから半価幅を求め、入射ビームの角度が0°と45°を比較した。

3. 2 標準材料の選定および使用法の検討

試験片に市販の炭素鋼S50Cを用いた。Fig. 8に示すような形状に加工した。また、いずれも均一な回折環を得るため、Fig. 7に示すような熱処理を施し、残留応力を除去したものをを用いた。Table. Iに3種類の標準材料の測定条件を示し、中性子応力測定を行う上で最適な入射角度や板厚等の条件を検討した。

ここで注目することは2点ある。1点目は(a), (b)において(a)が試験片の板厚に比べ標準材料の板厚が厚いのに対し、(b)は試験片と標準材料が同一の板厚であることである。

2点目は(b), (c)において(b)が入射角を傾けているのに対し、(c)は垂直入射で測定した。以

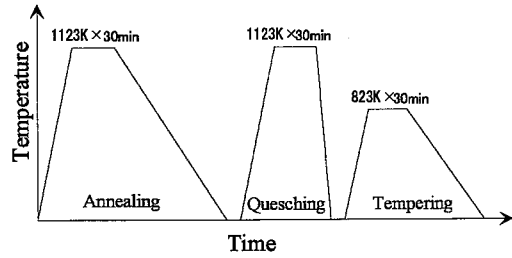


Fig. 7 Heat treatment of process.

後、これらを比較し検討を行う。

また、標準材料であるCuに圧延の影響と考えられる配向性が見られたため、Feへと変更した。

4. 実験結果

4. 1 中性子回折プロファイル^{1)~2), 10)~16)}

Fig. 9, 10に $\psi_0 = 0^\circ$ および $\psi_0 = 45^\circ$ の時のIP画像を示す。いずれも外側のリングは試験片であるFe211回折($2\theta = 127^\circ$)で内側のリングは標準材料であるCu311回折($2\theta = 147^\circ$)を示す。Fig. 9から試験片の板厚の増加に伴い、回折環の幅も増加していることがわかる。また、板厚が5mm以上の場合では回折環の幅がほぼ一定になっていることがわかる。Fig. 10からいずれの場合にも中心角によって回折環の幅が変化していることわかる。詳細に見ると、 $-\eta$ 方向である $\alpha = 0^\circ$ の時が最大になっており、逆に $+\eta$ 方向である $\alpha = 180^\circ$ の時が最小になっていることがわかる。この原因として $+\eta$ 方向の回折環は材料に吸収されることが考えられる。また、

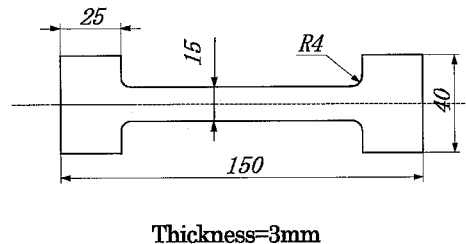


Fig. 8 Dimensions of specimen

$+n$ 方向の回折環が不連続になっていることがわかる。この原因として試験片を傾けていることから回折線が試験片内部を通ってきた回折環よりも試験片の裏からの回折環の方が試験片内部を通過する距離が短く強度が強いため、不連続に IP 上に記録されたように見えると考えられる。Fig. 11は $\alpha=0^\circ$ の時のプロフィールを試験片の板厚と比較したものである。この結果、板厚が薄いものは比較的、左右対称のプロフィールが得られた。また逆に板厚が厚いものは左右が非対称なプロフィールが得られた。回折環の中

心側のプロフィール(プロフィールの左側)が急勾配で、回折環の外側方向のプロファイル(プロフィールの右側)がなだらかな勾配になる傾向が見られる。この原因として Fig. 12に示すように、材料内部の回折線が影響し右側に小さなプロフィールができるため、結果的に左側が急勾配で右側がなだらかな勾配を持つ左右非対称なプロフィールになると考えられる。このことにより比較的左右対称でかつ最大となるプロフィールは、試験片の板厚が約 2 mm であることがわかった。

Table. I Experimental condition on standard material.

	Material	Diffraction hkl	Incident angle, deg	Thickness, mm	Size, mm
(a)	Cu	311	24	2	50×40
(b)	Cu	311	20	2	15×40
(c)	Fe	211	0	2	15×40

また、Fig. 13に板厚の変化に対する半価幅の影響を示す。これより $\psi_0=0^\circ$ と $\psi_0=45^\circ$ ではほぼ同じ傾向を示しているが $\psi_0=45^\circ$ が全体的に半価幅が大きいことがわかる。この原因としては Fig. 12より $\psi_0=45^\circ$ ではの方が回折線が試験片内部を通る距離が短いことからプロフィールの回折強度が大きくなる。したがって半価幅も大きくなることが考えられる。また、板厚が約 5 mm までは板厚の増加に伴い、半価幅が増加する傾向が見られるが、板厚が約 5 mm を超えると半価幅はほぼ一定になることがわかる。この原因としてプロフィールのすそ野の強度が増加しても半価幅には影響しないことが考えられる。つまり、半価幅を計る場所より下の場所でプロフィールのすそ野が増加し左右非対称になっている。

以上より、応力解析の時に比較的左右対称なプロフィールを得た板厚が薄いものは補正の必要はないと考えられる。逆に左右非対称なプロフィールを得た板厚が厚いものは何らかの補正(Kampfe⁹⁾や重心方の補正等)が必要である

と考えられる。

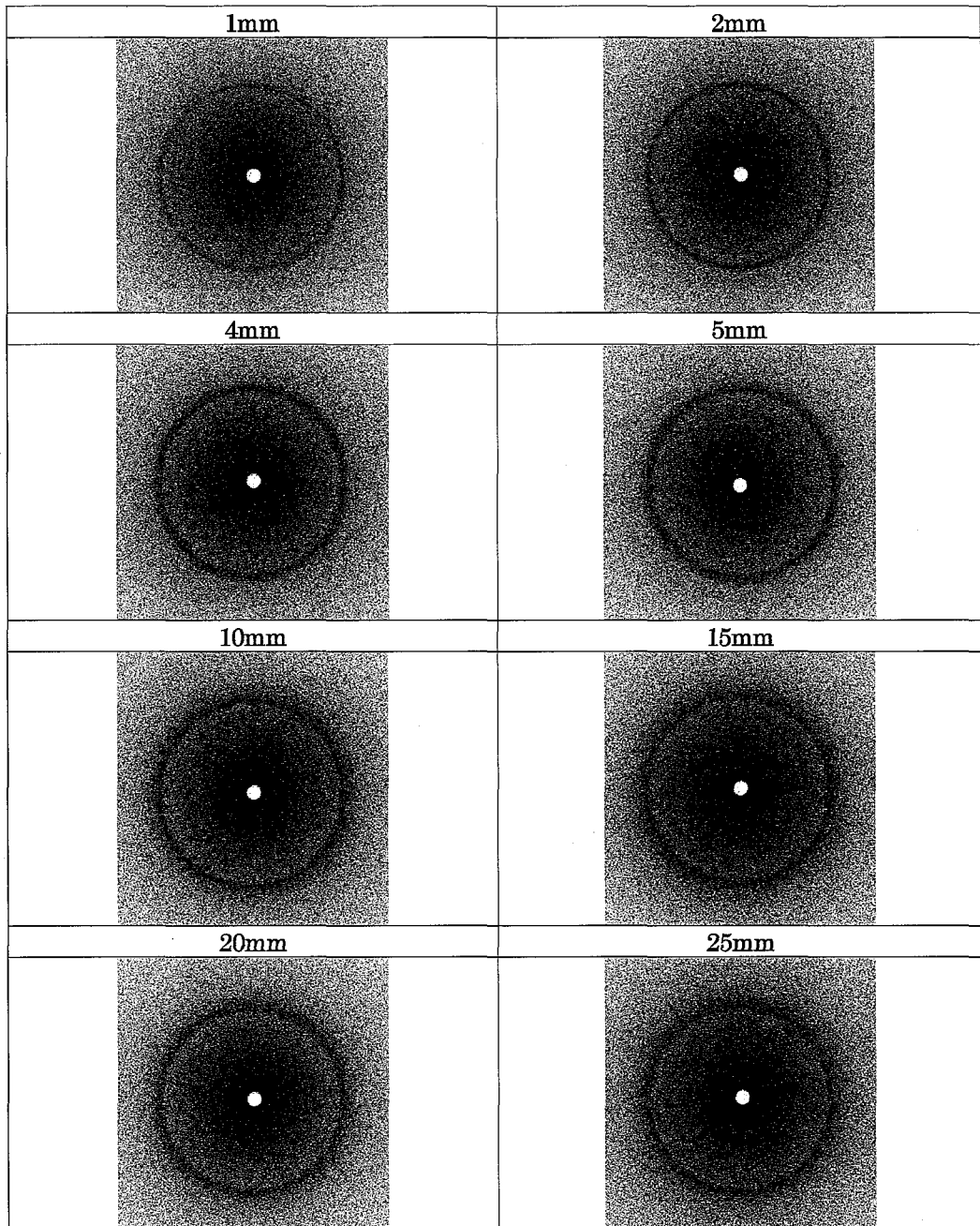
4. 2 標準材料の検討^{1)~2), 10)~16)}

Fig. 14に Table I の条件で露光された中性子 IP 画像を示す。また、Fig. 15には各標準材料から回折環の中心を決定し、試験片の回折環半径を求めて比較したものを示す。

Fig. 15(a)と Fig. 15(b)を比較して、Fig. 15(a)の方が標準材料と試験片の中心がずれている事がわかる。その原因として(a)は試験片より標準材料の幅が大きいため、照射領域が試験片と標準材料で異なっていることが考えられる。

また Fig. 15(c)より Fig. 15(b)の方が中心のずれが大きいことがわかる。この原因として Fig. 15(c)が垂直入射であるのに対して、Fig. 15(b)は標準材料を傾けていることから半価幅が一定でないことが考えられる。

以上の結果より今回用いた 3 種類の標準材料では(c)が最適だといえる。

Fig. 9 Debye-Scherrer rings made by neutron beams. ($\psi_0=0^\circ$)

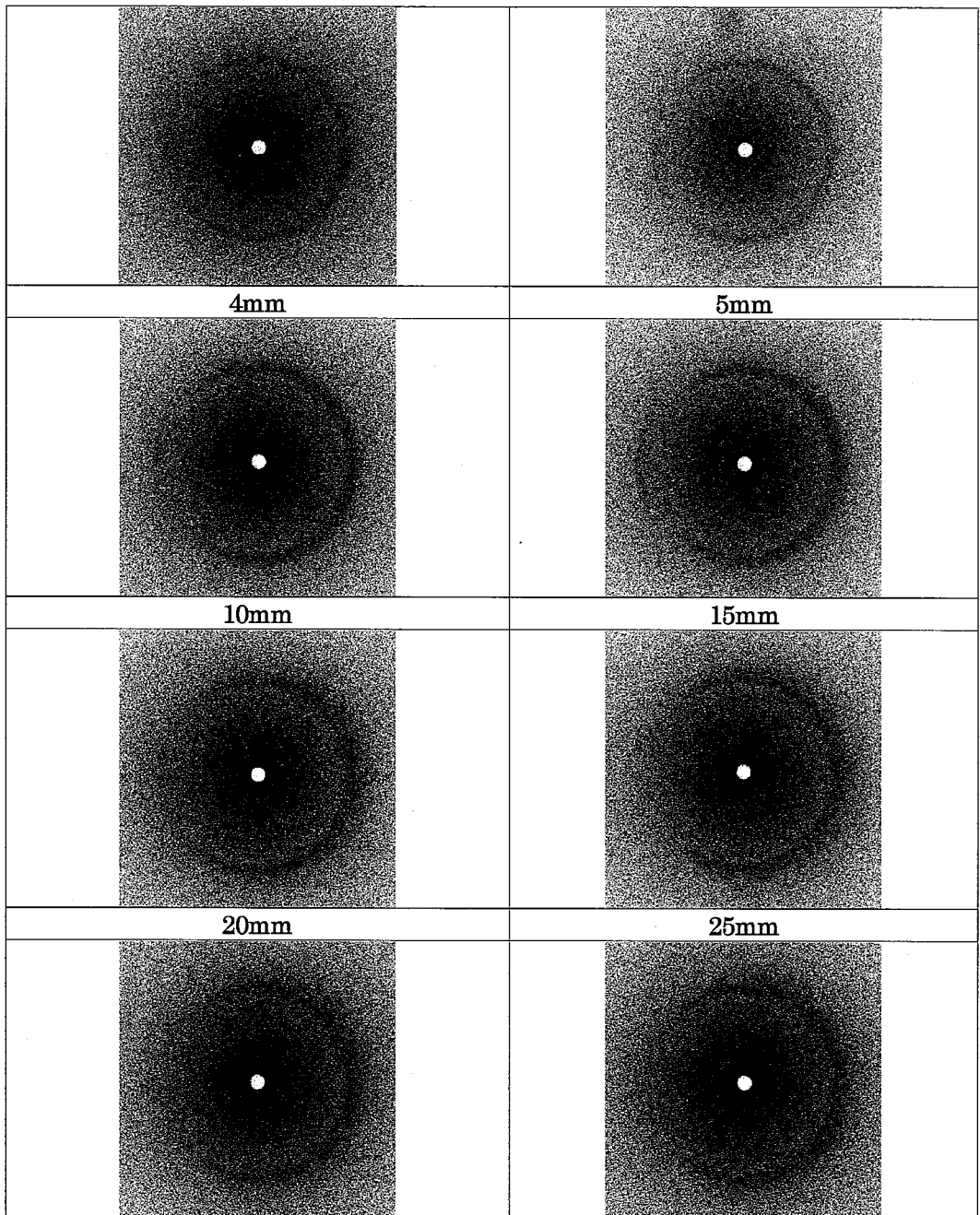


Fig. 10 Debye-Scherrer rings made by neutron beams. ($\psi_0 = 45^\circ$)

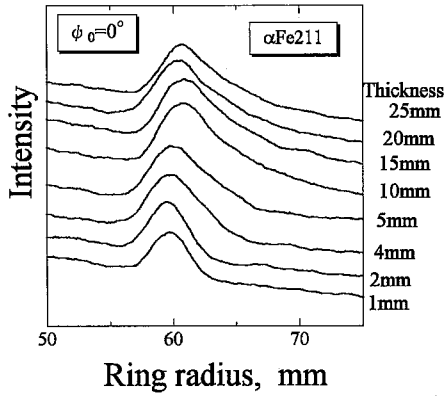


Fig. 11 Diffraction profiles of Fe 211 deiffraction.

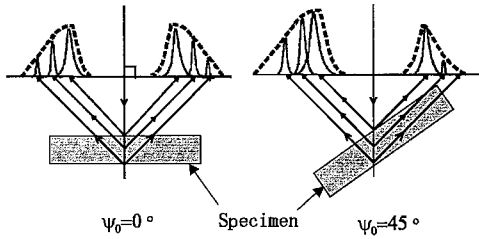


Fig. 12 Diffraction profiles from specimen.

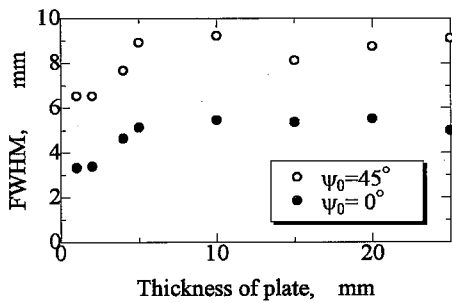


Fig. 13 Relationship between FWHM and thickness of specimen.

5 結 言

本研究は、中性子 IP を使用して応力解析を行うための幾つかの基礎的事項について検討したものである。まず試験片の板厚や中性子入射角の変化による中性子回折プロフィール（半価

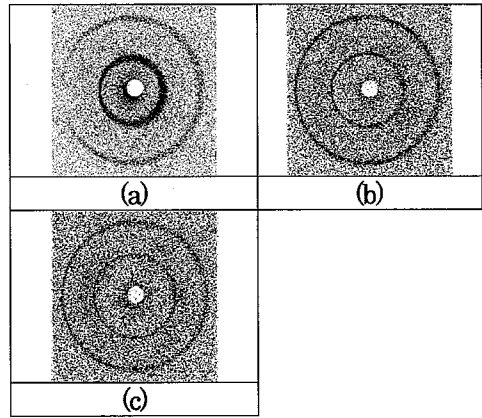


Fig. 14 Debye-Scherrer rings by neutron beams.

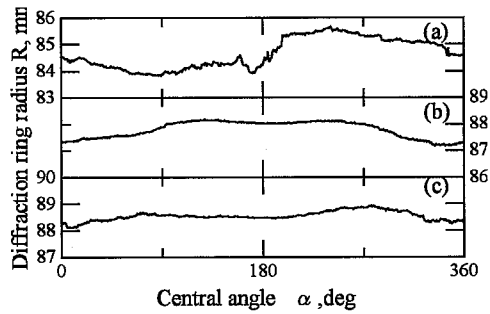


Fig. 15 Radius of Debye-Scherrer rings obtained from specimen under different conditions of standard material.

幅) の変化を調べた。また、入射中性子ビームの中心位置決定のために用いられる標準材料の選定および使用法を検討した。本研究によって得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 試験片の板厚が薄いもの（板厚約 2 mm 以下）は比較的、左右対称な中性子回折プロフィールが得られた。また、板厚が厚いものは、材料内部からの回折線の影響で左右非対称なプロフィールとなり、左側（回折環中心側）が急勾配で右側が緩やかな勾配を持つことがわかった。
- 2) 試験片の板厚が約 5 mm までは板厚の増加に伴い半価幅も増加する傾向が見られたが、

- 5 mm 以上では半価幅はほぼ一定値を示した。これは、プロフィールのすそ野の強度は増加するものの半価幅位置付近以上の強度には影響しないことによるものである。
- 3) 試験片と標準材用の板幅は等しいことが望ましい。両者が異なる場合には、画像解析により決定される入射ビームの中心位置が $\alpha=90^\circ$ 方向にずれる傾向がある。
- 4) 本実験範囲では標準材料の板厚は約 2 mm, 試験片と同一の板幅, かつ入射ビームを垂直入射とする測定条件が好ましいと判断される。
- 参考文献 —
1. 新村信雄, 放射線と産業, 66, 41 (1995)
 2. 新村信雄, 原子力工業, 41, 54 (1995)
 3. 林眞琴, 石渡雅幸, 皆川宣明, 船橋達, J.H.Root, 材料, 44, 1115 (1995)
 4. 林眞琴, 石渡雅幸, 皆川宣明, 船橋達, 材料, 44, 1464 (1995)
 5. 林眞琴, 石渡雅幸, 森井幸生, 皆川宣明, 材料, 45, 772 (1996)
 6. 秋庭義明, 田中啓介, 竹園拓也, 林眞琴, 皆川宣明, 森井幸生, 材料, 45, 755 (1987)
 7. 佐々木敏彦, 皆川宣明, 森井幸生, 新村信雄, 広瀬幸雄, 日本機会学会投稿中
 8. 日本材料学会編, “X線応力測定法” 54 養賢堂 (1981)
 9. A. Kämpfe, B. Kampfe, S. Goldenbogen, B. Eigenmann, E. Macherauch, D. Lohe