

**cos  $\alpha$  法による中性子応力測定に関する基礎的研究\***佐々木 敏彦\*<sup>1</sup>, 廣瀬 幸雄\*<sup>2</sup>**Study on Application of the cos  $\alpha$  Method to  
Neutron Stress Measurement**Toshihiko SASAKI\*<sup>3</sup> and Yukio HIROSE\*<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Kanazawa University,  
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

In order to study on a method of neutron stress measurement using the cos  $\alpha$  method, a numerical simulation study was performed comparing with experimental data. The resultant diffraction profiles, which are defined as the distribution of the intensity of diffracted beams in the radial direction from the center of the diffraction ring, were calculated by summing all diffraction profiles which were diffracted at entire depth in the material. The locations of the peak points which were determined using the half value breadth method (or the centroid method) showed dent distribution with respect to the central angle of the diffraction ring even in case of stress free state. Though the stresses calculated by the cos  $\alpha$  method showed different values from the initial stresses, the difference between the calculated and initial stresses almost kept constant for different stress level. These misfit stresses can be vanished after correcting original diffraction radius using that in stress free. The results obtained by the present simulation study agreed with those obtained in the previous experiment, which suggests the validity of the method of neutron stress measurement combining both an area detector and the cos  $\alpha$  method.

**Key Words:** Neutron, Stress Measurement, Image Plate, Diffraction, Penetration Depth

**1. 緒 論**

中性子応力測定法は材料内部の残留応力を高精度に測定できる特長があり、近年、基礎研究および応用の両面から注目を集めている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、現在の標準的な中性子応力測定法には次のような改善が望まれる点もある。まず、精密な格子面間隔の測定が必要な点であり、X線法( $\sin^2\psi$ 法)のようにその相対的な変化から応力測定できることが望まれる。第二の点は、測定時間や効率に関するものである。これは、中性子法では特性線が利用できないため入射ビーム強度が弱く、また、応力変換のため直交する3方向のひずみ測定を必要とすることが背景にある。

以上の改善策として、本研究ではエリアディテクタを用いて中性子回折環を測定し、その形状から cos  $\alpha$  法<sup>(3)(4)</sup>に基づいて応力を算出する方法に着目した<sup>(5)</sup>。本方法によれば、応力は格子ひずみと cos  $\alpha$  ( $\alpha$  は回折環の中心角)との直線関係の傾き(相対的变化)から決定できるようになり、格子面間隔の精密な測定の必要

性は大幅に緩和できる。この点は、X線  $\sin^2\psi$  法の場合と同様であり、信頼性と実用性の向上に大きく貢献する。また、単一入射法によって膨大なデータが取得できるため、試料の回転が不要、測定時間の短縮、測定装置の簡単化(検出器や入射角の走査機構が不要)といった特長もある。

前報<sup>(5)</sup>において本方法の検討を実験によって行ったところ、次のような結果が得られた。すなわち、中性子回折環は無応力状態でも真円にはならず(入射ビーム方向が傾斜する場合)、cos  $\alpha$  法からは約 -400 MPa の圧縮応力が算出されること、一方、無応力状態のときの回折環からの変化量を用いると(補正法)、cos  $\alpha$  法によってほぼ正確な応力が得られること、などが判明した。以上の結果より、エリアディテクタ・cos  $\alpha$  法・補正法を組み合わせることで前述の要求を満たす実用的な中性子応力測定(以下、AD/cos  $\alpha$  法)が可能となる見通しが得られた。

本論文では、前報の再現性の確認および有効範囲に関する検証を目的として基礎的な検討を行った。なお、中性子実験特有の制約を考慮してシミュレーションによる予備的な検討を行い、これを前報の実験と比較した。その結果、シミュレーションの結果は前報の実験結果と同様な傾向を示すことが判明し、また、

\* 原稿受付 2004年3月4日。

\*<sup>1</sup> 正員、金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間町)。\*<sup>2</sup> 正員、金沢大学大学院自然科学研究科。

E-mail: sasakit@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

AD/cos α 法がさらに広い範囲においても有効に適用できることが明らかとなった。

2. 基礎式およびシミュレーションの方法

2.1 回折プロファイル・ピーク位置の計算方法(順解析) まず、図1のように試料座標系をとり、また、入射中性子ビームの方向を  $\phi_0, \psi_0$  で表す。材料の表面から深さ  $z$  で回折したビームが材料内を通過する距離  $L$  を求めると次式となる。

$$L = \frac{z}{\cos \phi_0} + \frac{z}{\cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \cos \alpha \sin \phi_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\alpha$  は回折環上の中心角、 $\eta$  は Bragg 角  $\theta$  の余角 ( $\eta = \pi/2 - \theta$ ) である。回折ビーム強度  $I(z)$  は、材料面から検出器までの間で変化がないとすると次式となる。

$$I(z) = I_0 K \exp(-\mu L) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $I_0$  は入射ビーム強度、 $K$  は回折時の強度減衰率であり、本研究では  $I_0 = K = 1$  とした。 $\mu$  は線吸収係数である。次に、各回折ビームの強度の広がりやを次式のようにガウス関数で表す [図2(a)参照]。

$$I(r, z) = I(z) \exp[-(4 \log_e 2)(r - r_0)^2/h^2] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $r$  は検出器上において回折環中心から半径方向への距離、 $h$  は半幅幅、 $r_0$  は回折ビームの中心点の位置  $r$  である。指数部分における対数項は標準偏差に代わって半幅幅を用いたことにより生じたものである。 $r_0$  は入射ビームと回折ビームとの幾何学的関係から次式のようになる [図2(b)]。

$$r_0 = \left( C_l + \frac{z}{\cos \phi_0} \right) \tan(\pi - 2\theta_\alpha) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $C_l$  は検出器と試験片表面との距離(カメラ長)、

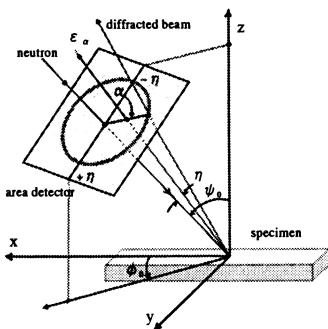


Fig. 1 Definition of coordinate system and other characteristic parameters used in the text

$2\theta_\alpha$  は回折角である。 $2\theta_\alpha$  は回折位置におけるひずみ  $\epsilon_\alpha$  を用いて次式で表される。

$$2\theta_\alpha = -2\epsilon_\alpha \tan \theta_0 + 2\theta_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

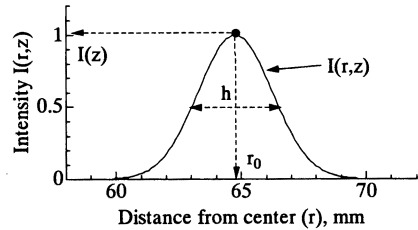
ここで、 $\theta_0$  は無ひずみ状態での Bragg 角を表す。 $\epsilon_\alpha$  は応力成分  $\sigma_{ij}$  を用いて次式で与えられる。

$$\epsilon_\alpha = \sigma_{11}N_{11} + \sigma_{22}N_{22} + \sigma_{33}N_{33} + \sigma_{12}N_{12} + \sigma_{31}N_{13} + \sigma_{23}N_{23} \quad \dots\dots\dots (6)$$

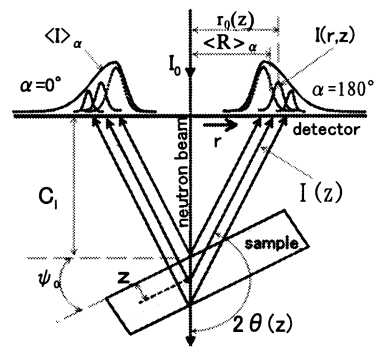
ここで  $i$  と  $j$  は  $i, j = 1, 2, 3$  をとる<sup>(4)</sup>(以下同様)。 $N_{ij}$  は次式となる。

$$N_{ij} = \left( \frac{1+\nu}{E} \right) \lambda_{3i}\lambda_{3j} - \delta_{ij} \left( \frac{\nu}{E} \right) (\lambda_{31}^2 + \lambda_{32}^2 + \lambda_{33}^2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比であり回折に寄与する回折面の平均値である。 $\delta_{ij}$  はクロネッカのデルタ、 $\lambda_{3i}$  は試料座標系から実験座標系への変換マトリックスであり次式で表すことができる<sup>(4)</sup>。



(a) Expression of a profile for individual neutron beam by means of Gaussian function



(b) Superposition of each diffraction beam on area detector, and explanation on symbols used in the text

Fig. 2 Schematic illustration on expression of a profile for individual neutron beam by means of Gaussian function, and superposition of each diffraction beam on detector with symbols used in the text

$$\begin{aligned} \lambda_{31} &= \cos \eta \sin \phi_0 \cos \phi_0 - \sin \eta \\ &\quad \times (\cos \alpha \cos \phi_0 \cos \phi_0 + \sin \alpha \sin \phi_0) \\ \lambda_{32} &= \cos \eta \sin \phi_0 \sin \phi_0 - \sin \eta \\ &\quad \times (\cos \alpha \cos \phi_0 \sin \phi_0 - \sin \alpha \cos \phi_0) \\ \lambda_{33} &= \sin \eta \cos \alpha \sin \phi_0 + \cos \eta \cos \phi_0 \\ &\quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

以上の関係式から、材料の任意の深さで回折する中性子ビームにより検出器上に形成される回折プロフィール  $I(r, z)$  が計算できる [図 2(a)], これを以下では素プロフィールと呼ぶ。次に、素プロフィールを深さ方向に適切な間隔 ( $1/TNUM$ ) で求め [図 2(b)], それらの総和  $\langle I \rangle_\alpha$  を求める。

$$\langle I \rangle_\alpha = \sum_{i=0}^n I(r, z_i) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $n$  は(ビーム本数-1)である。この合成プロフィール  $\langle I \rangle_\alpha$  がエリアディテクタを用いたときの測定プロフィールに相当すると考える。

なお、本研究で採用した計算条件および各パラメータの値は前報<sup>(5)</sup>の実験条件に準じており、それぞれ以下のとおりである。 $\alpha$  Fe 211 回折,  $2\theta_0 = 127.0^\circ$ , 板厚  $t = 5$  mm,  $\mu = 0.12541 \text{ mm}^{-1}$ ,  $C_t = 48.8$  mm,  $h = 3.5$  mm (一部 1.5~6.0 mm),  $\phi_0 = 0$ ,  $\psi_0 = 20^\circ$ ,  $TNUM = 50$  (一部 1~100), 1 個の素プロフィールに対するプロット点数 [図 2(a)の横軸]  $XNUM = 500$ , 応力  $\sigma_{11} = 0 \sim 288$  MPa, 回折環中心角  $\alpha = 0^\circ \sim 359^\circ$  ( $1^\circ$  間隔)。

続いて、得られた合成プロフィールに対して半幅幅中点法(および一部重心法)を適用してピーク位置を決定した。前者は最大回折強度 ( $I_{max}$ ) の 1/2 を挟む二組のデータを検索し、それを結ぶ直線が半幅幅線と交わる二組の点の中点をピーク位置とする。一方、後者は回折プロフィールの図心に相当する。後者の計算式は文献<sup>(6)</sup> によった。こうして決定したピーク位置と回折環の中心(入射ビームの中心)との距離を回折環半径とみなし、 $\langle R_\alpha \rangle$  と表す。この  $\langle R_\alpha \rangle$  は、材料から発生する各回折ビームごとの回折環半径の加重平均に相

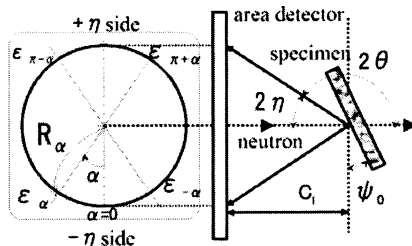


Fig. 3 Strains used for stress calculation and other principal parameters used in the text

当する。

**2・2 cos  $\alpha$  法による応力計算(逆解析)** 上記の方法で求めた回折環半径に対し、最初に与えた応力値を逆解析する方法を以下に述べる。

まず、図 2(b)の  $C_t$  と  $\langle R_\alpha \rangle$  より回折角  $2\theta_\alpha$  が得られる。

$$2\theta_\alpha = 180 - \left( \frac{180}{\pi} \right) \tan^{-1} \left( \frac{\langle R_\alpha \rangle}{C_t} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $2\theta_\alpha$  の単位は deg である。なお、 $\langle R_\alpha \rangle$  に対応する材料の回折位置は中性子侵入深さを考慮して決められるべきであるが、ここでは簡単のため材料表面とした。続いて、次式からひずみ  $\varepsilon_\alpha$  が求められる。

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1}{2} (2\theta_0 - 2\theta_\alpha) \cot \theta_0 \dots\dots\dots (11)$$

このようにして 1 個の回折環から中心角  $\alpha$  ごとのひずみ  $\varepsilon_\alpha$  が得られる。続いて次式の  $a_1$  を求める。

$$a_1 = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \dots\dots\dots (12)$$

なお、 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ ,  $\varepsilon_{-\alpha}$ ,  $\varepsilon_{\pi-\alpha}$  は図 3 に示すように、回折環上の中心角がそれぞれ  $\pi+\alpha$ ,  $-\alpha$ ,  $\pi-\alpha$  の場合のひずみである。続いて、 $a_1$  と  $\cos \alpha$  との回帰直線の傾きを求めると、cos  $\alpha$  法理論に基づいて応力  $\sigma_{11}$  が次式より計算できる<sup>(3)(4)</sup>。

$$\sigma_{11} = - \frac{E}{(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\phi_0} \left( \frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) \dots\dots\dots (13)$$

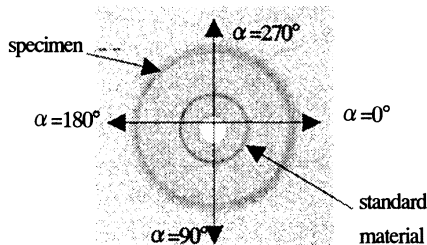
cos  $\alpha$  法は、X 線回折データから  $\sigma_{11}$  または  $\sigma_{12}$  を決定することを目的として考案された方法であり、平面応力状態および等方弾性体であること、深さ方向の応力こう配がないこと、また、侵入深さが浅いことを前提としている。このため、三軸応力状態の場合や中性子回折データには厳密な解析が困難となると予想される。

### 3. シミュレーションの結果と考察

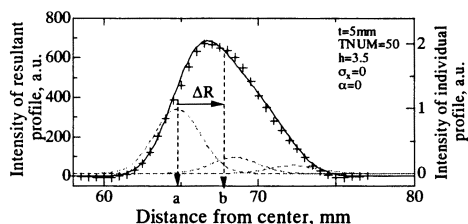
**3・1 回折プロフィール** 図 4(a)に、中性子回折環の測定例<sup>(5)</sup> (S 50 C の  $\alpha$  Fe 211 回折, 板厚 5 mm) と  $\alpha$  方向の定義を示す。また、図 4(b), (c) に本シミュレーションにより得られた 2 種類の  $\alpha$  に対する回折プロフィール(実線)を実験<sup>(5)</sup> 結果(+印, 縦軸の強度はシミュレーションに合わせて調整した)と比較して示す。いずれの場合も負荷応力は零である。シミュレーション条件は  $TNUM = 50$ ,  $h = 3.5$  mm であり、これ以外は実験と同様とした(2・1 節参照)。その結果、 $\alpha = 0^\circ$  では両者はよく一致し、 $\alpha = 180^\circ$  では  $\alpha = 0^\circ$  に比べて若干差があるものの全体的には類似している。他の測定結果もおおむね同様な傾向が得られており、本

シミュレーションによって実験の回折プロフィールが再現可能であると判断できる。

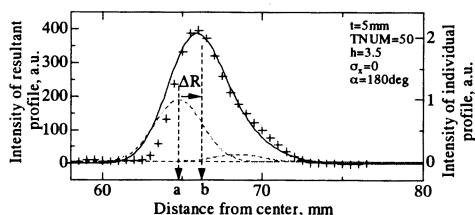
次に、図4の回折プロフィールをαに関して比較すると、両者には半価幅やプロフィールの右側部分において明確な差異が見られる。図4(b)、(c)中の破線は、材料のそれぞれ異なる深さで回折した素プロフィールを表している。図中の左から表面、材料中央、裏面からの素プロフィールである。図4(b)、(c)より材料表面からの素プロフィールはαによらず同様であるものの、材料の内部からのものはαによる差が現れており、α=180°のほうが低強度である。その結果、α=180°では合成プロフィールの右側部分の形状が落ち込み、半価幅の低下、および、ピーク位置の左側へのシフトをもたらしている。これに対し、合成プロフィールの左側では、αによる差は見られない。この部分はαによる強度差が生じない材料表面の回折ビームによって形成されるためである。図中には、材料表面からの素プロフ



(a) Example of neutron Debye Scherrer rings obtained from steel, and definition of angle α



(b) Diffraction profiles for α=0°



(c) Diffraction profiles for α=180°

Fig. 4 Comparison of diffraction profiles between experiment and simulation

イルのピーク位置(記号 a)と合成プロフィールのもの(記号 b)が示されており、α=0°の方のシフト量(ΔR)が大きい。

以上のように、中性子回折環では無応力状態においてもピーク位置が一定とはならず、αごとに変わることが理解できる。また、この変化は板厚、侵入深さが大きいほど増大すると推定される。一方、侵入深さが数10 μm程度のX線回折ではこのような影響は無視できる程度に小さい。

**3・2 回折環半径** 図5は半価幅中点法を用いて合成プロフィールのピーク位置を求め、それと回折環中心点との距離、すなわち、回折環半径を回折環全周について求めた結果である(○:実験<sup>(5)</sup>, 破線:シミュレーション)。図中には重心法による結果も併記した(+:実験<sup>(5)</sup>, 実線:シミュレーション)。その結果、いずれの場合も中央部が凹んだ分布を呈している。このように、中性子回折環の半径分布は無応力においてもαに対して一定とはならず凹みを生じる。このような凹みの原因は、3・1節(図4)で述べたαごとの回折プロフィール形状の変化によって生じている。なお、ピーク位置決定法による違いは回折プロフィールの左右非対称性によるものであり、回折環外周側(図4の右側)に長い裾野を有する中性子回折の特徴により、重心法の方が回折環半径が増加する傾向がある。α<60°および

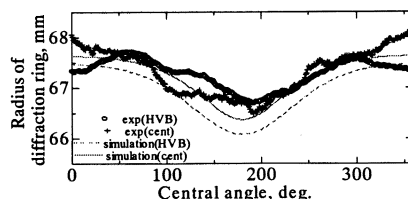


Fig. 5 Comparison of radius of diffraction ring obtained from experiment and simulation. Results of both half value breadth method and centroid method are shown

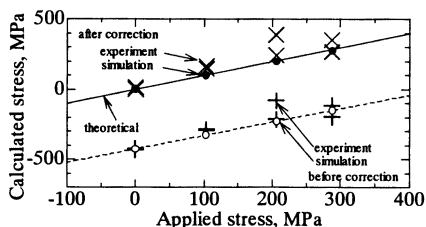


Fig. 6 Results of application of cos α method and correction method to stress determination, and comparison between experiment and simulation. The half value breadth method was used

$\alpha > 300^\circ$  の範囲における半価幅中点法の実験結果の傾向の相違は、回折環撮影時や回折強度の読取り時の誤差、ベント形モノクロメータに起因した中性子ビーム波長の広がり、集光によるビーム方向の変化、画像解析条件(平滑化条件)などが影響しているものと考えられる。

**3.3 cos  $\alpha$  法による応力** 図5の回折環半径に対して cos  $\alpha$  法を適用して応力を求めた結果を図6に示す(+ : 実験<sup>(5)</sup>, ○ : シミュレーション, ● と × は後述する補正結果)。図6より、両者はいずれも圧縮応力側に約 400 MPa のずれを生じ、また、負荷応力に対してほぼ傾き 1 の直線分布(破線)を示している。応力値が圧縮側にずれる原因は、回折環半径の凹み(図5)に起因している。また、傾きが 1 となる原因は前報<sup>(5)</sup>で考察したように、材料内の応力が一定であるため各深さの回折ビームの回折角がすべて等しくなる結果、それらの平均的挙動である合成プロフィールもまた同一の挙動となるためであると考えられる。すなわち、応力に対する合成プロフィールのピークシフト量(半径の変化量)は、回折深さが異なる個々の回折ビームの挙動、すなわち cos  $\alpha$  法の予測と非常に類似したものとなる。

**3.4 補正法の適用結果** cos  $\alpha$  法の適用に当たって、事前に補正法<sup>(5)</sup>を適用した場合について検討する。ここで、補正法<sup>(5)</sup>とは無応力状態の回折環半径を基準として、被測定材料の回折環半径の変化量を求め、これに対して cos  $\alpha$  法を適用する方法である。図5に示した回折環半径について、本補正処理した一例を図7にシミュレーション結果とともに示す。実験、シミュレーションのいずれも上に凸の分布を示し引張応力形の分布となることがわかる。この補正後の回折環半径に対して cos  $\alpha$  法による応力計算を行った結果を図6に併記した(× : 実験, ● : シミュレーション)。その結果、実験、シミュレーションともに図の実線で示される理論値とほぼ一致する応力が得られている。

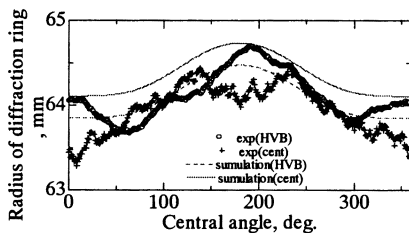
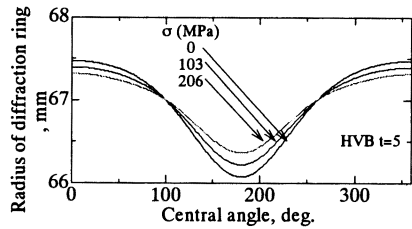
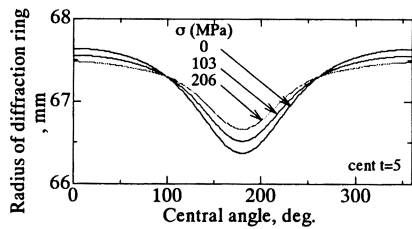


Fig. 7 Distribution of radius of diffraction ring corrected by the present method, and comparison of experiment and simulation

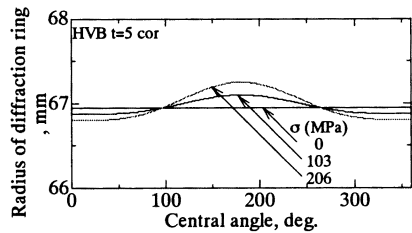
図8は、応力が変化した場合の回折環半径の変化および補正処理後の変化についてシミュレーションによる結果を図示したものである。半価幅中点法と重心法の結果を比較して示してある。いずれの場合も、補正前では無応力において凹みを呈し、また引張応力の増加によって凹みが減少すること、さらに、補正後では無負荷において回折環半径が一定値を示し、また応力に



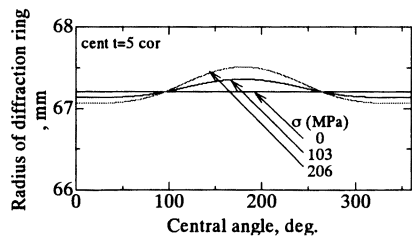
(a) HVB method before correction



(b) Centroid method before correction



(c) HVB method after correction

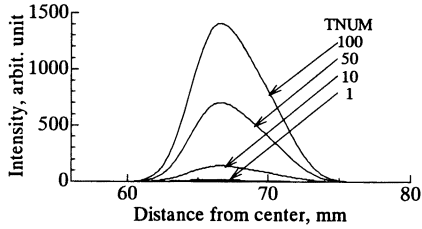


(d) Centroid method after correction

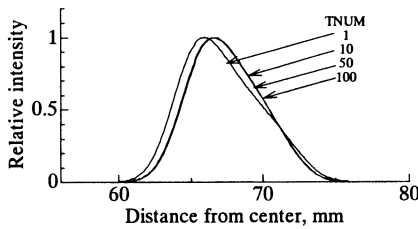
Fig. 8 Radius of diffraction ring due to applied stress for before-correction and after-correction. Half value breadth method and centroid method are used for peak determination

よって凸に成長することがわかる。また、詳細に見れば、補正前の凹みが半価幅法ではやや大きい、補正後では両者の差がほとんど見られなくなっている。このような補正後の分布は cos  $\alpha$  法の予測、すなわち、X線測定の挙動と極めて類似するものである。本補正法は、 $\alpha$  ごとに無応力状態の材料と被測定材料との回折環半径を比較するものであり、標準法<sup>(1)(2)</sup>において  $d_0$  を基準としてひずみを決定する方法と基本的に

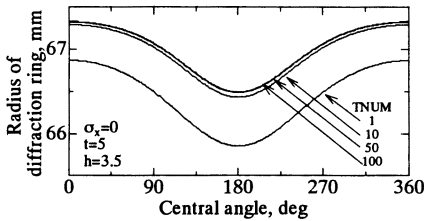
類似するものである ( $d_0$ : 無ひずみ時の格子面間隔)。標準法では、回折環の特定  $\alpha$  方向 (通常  $\alpha=180^\circ$ ) のみを用いるのに対して、本方法では全  $\alpha$  方向に対して  $\alpha$  ごとに比較する特徴がある。 $\alpha$  により吸収効果が異なっており、本補正法は測定データを用いた一種の吸収補正処理法であるということが出来る。以上より、本



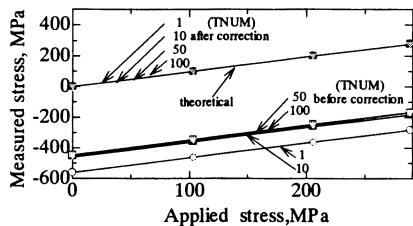
(a) Resultant diffraction profiles on detector



(b) Diffraction profiles normalized

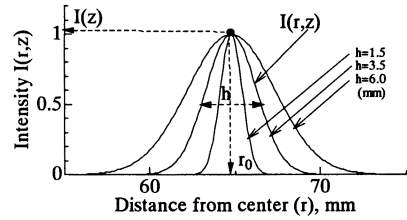


(c) Radius of diffraction ring

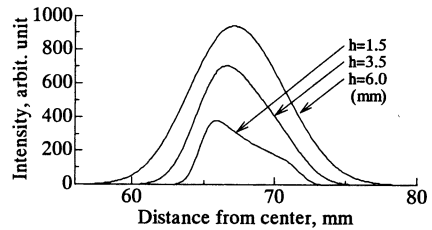


(d) Stress determination by both cos  $\alpha$  method and present correction method

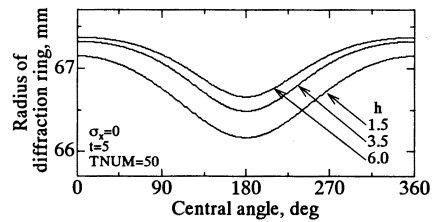
Fig.9 Influence of  $TNUM$  on diffraction profiles, diffraction profiles normalized, radius of diffraction ring and stress determination by both cos  $\alpha$  method and present correction method



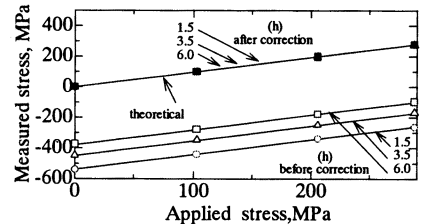
(a) Diffraction profiles for individual beam



(b) Resultant diffraction profiles on detector



(c) Radius of diffraction ring



(d) Stress determination by both cos  $\alpha$  method and present correction method

Fig.10 Influence of half value breadth ( $h$ ) on diffraction profiles for individual beam, resultant diffraction profiles on detector, radius of diffraction ring, and stress determination by both cos  $\alpha$  method and present correction method

シミュレーション条件範囲において前報の実験結果が再現性のあるものであると判断できる。

#### 4. シミュレーション条件の影響

**4.1 TNUM の影響** 図9は、シミュレーション計算を  $TNUM=1$  から 100 の範囲で変えた場合の結果である(半価幅中点法,  $h=3.5$  mm 使用)。その結果、プロファイルの高さは  $TNUM$  に比例して増加するが [図9(a)], おおのこの最大強度で規格化した形状は  $TNUM=10$  以上ではほぼ同一となる [図9(b)]。次に、回折環半径分布は  $TNUM$  の増加によってほぼ平行に増加し、その形状はおおむね等しいことがわかる [図9(c)]。また、 $TNUM$  が 10 以上では収束し、 $TNUM$  による差はわずかとなる。実際の回折ビームは板厚方向に関して連続的に無数発生するが、 $TNUM=50$  程度でも十分それを近似可能であるといえる。図9(d)は、cos  $\alpha$  法による応力計算を種々の  $TNUM$  の場合について行ったときの結果である。cos  $\alpha$  法の与える応力は  $TNUM=1$  では圧縮側へのシフト量が他とやや異なるが、10 以上では差がなくなり、また負荷応力に対する直線性および傾きが 1 である点に関しては図6と同様である。さらに、補正法の適用結果は  $TNUM$  によらずすべて負荷応力と一致している。

**4.2 h の影響** 次に、半価幅  $h$  の影響について図10に計算結果を示す( $TNUM=50$ )。その結果、 $h$  の変化は  $TNUM$  のときとよく類似しており、 $h$  が大きいほど回折環半径が増加し、また cos  $\alpha$  法の与える応力のシフト量は減少する。また、補正法では  $h$  によらず負荷応力とよく一致している。これらは、いずれの場合も実験と類似した傾向であるといえる。このように、 $h$  の変化によらず本方法が有効であることは、回折プロファイルのブロード化に影響を及ぼす材料の微視的ひずみ状態が異なる場合にも本方法が有効であることを示唆している。

**4.3 本方法の特長および適用限界** 本方法の主要な特長は、エリアディテクタにより単一入射によって一度に 360 個程度のひずみデータが測定できるため、現在の標準法に比べてはるかに大量のデータが容易に得られ、これをもとに測定精度の向上が期待できる点、また、cos  $\alpha$  法の適用によって応力は格子ひずみと cos  $\alpha$  との直線関係の傾き(相対的変化量)から算出できるため格子面間隔の精密な測定の必要性は大幅に緩和できる点である。すなわち、X 線  $\sin^2 \psi$  ライクな高精度な測定が可能となる。また、単一入射法の

ため測定時間の短縮が図れることや、さらに、検出器および入射角の走査機構が不要となるため測定装置が極めてシンプルにできるといったメリットも有している。

一方、cos  $\alpha$  法の使用により平面応力状態の測定には有効であるが三軸応力状態下では適用できなくなることが予想される。また、補正法に必要な無応力状態の試料を用意しなければならない点も、本方法の適用上の制約となるものである。このうち、三軸応力状態の測定に関しては、著者らが提案したエリアディテクタ用の三軸応力測定法<sup>(4)</sup>の利用が考えられるので今後の検討課題の一つとして検討していく予定である。

#### 5. 結 言

本研究により、前報<sup>(5)</sup>で報告したエリアディテクタによる中性子応力測定実験結果とほぼ同様な傾向が、本シミュレーションにおいて再現できた。すなわち、エリアディテクタ上の中性子回折環半径は無応力のとき回折環中心角  $\alpha$  に関して凹みを呈し、一定とはならないこと、また、cos  $\alpha$  法の適用による応力算出値は圧縮応力側にずれること、さらに、無応力状態のときの回折環半径を基準として補正した後に cos  $\alpha$  法を適用すると、実用上十分な精度で応力値が得られること、などがいずれも確認できた。

以上より、エリアディテクタと cos  $\alpha$  法をベースとした新しい高精度・高効率な中性子応力測定が可能であると結論できる。

本研究の中性子回折実験は日本原子力研究所東海研究所の実験研究炉 JRR-3 を利用して行ったものであり、同研究所の森井幸生博士、皆川宣明サブリーダー、盛合敦氏に感謝する。また、中性子イメージングプレートに関するご助言に対し新村信雄博士(茨城大学)に感謝する。

#### 文 献

- (1) 林真琴・石渡雅幸・皆川宣明・船橋達・J. H. ルート, 材料, **44**-504 (1995), 1115-1120.
- (2) 秋庭義明・田中啓介・竹園拓也・林真琴・皆川宣明・森井幸生, 材料, **47**-7 (1998), 755-761.
- (3) 平修二・田中啓介・山崎利春, 材料, **27**-294 (1978), 251-256.
- (4) 佐々木敏彦・広瀬幸雄, 機論, **61**-590, A (1995), 2288-2295.
- (5) 佐々木敏彦・皆川宣明・森井幸生・新村信雄・広瀬幸雄, 機論, **69**-688, A (2003), 1711-1716.
- (6) Noyan, I. C. and Cohen, J. B., *Residual Stress, Measurement by Diffraction and Interpretation*, (1987), 166, Springer-Verlag.