

中性子応力測定へのエリアディテクタの適用に関する基礎的研究*

佐々木 敏彦^{*1}, 皆川 宣明^{*2}, 森井 幸生^{*2}
新村 信雄^{*2}, 広瀬 幸雄^{*1}

A Study on Application of Area Detector to Neutron Stress Measurement

Toshihiko SASAKI^{*3}, Nobuaki MINAKAWA, Yukio MORII,
Nobuo NIIMURA and Yukio HIROSE^{*3} Department of Materials Science and Engineering, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

A fundamental study was carried out on an application of an area detector to neutron stress measurement. A neutron image plate (NIP) was used in this experiment to obtain neutron diffraction rings of polycrystalline steel specimen. The diffraction data were stored on a NIP and were converted to digital image data. Strains were obtained from these data and were analyzed to determine stress using the $\cos \alpha$ method. Though these stresses were different from applied stresses, they increased in proportion to applied stresses. Namely, the differences between measured and applied stresses were almost constant during loading. Based on these experimental results, two practical methods were proposed for determining exact stress using a NIP. The stresses obtained using one of these methods showed good agreement with applied stresses. From these results, it is concluded that we can obtain mean stress in materials using neutron diffraction technique with an area detector.

Key Words: Neutron, Stress, Image Plate, Residual Stress, Diffraction, Steel

1. 緒 言

中性子応力測定法は、中性子の高い透過能により材料の内部の応力を測定することができるとともに、X線応力測定法と同様な原理であることから結果の信頼性が高く、近年注目を集めている⁽¹⁾⁽²⁾。一般に、中性子応力測定ではディフラクトメータが使用され、材料から発生する回折環の一端をポイント測定している。このため、回折環の大部分は利用されないまま捨て去られているともいえる。これは、通常の中性子検出器が特定の方向の点状あるいは直線状にしか計測できない事情によっている。このため、中性子を面で測定可能な二次元的検出器、いわゆるエリアディテクタ(area detector)を用いれば、一度に回折環全体を測定できるため、そこに含まれる膨大な回折データを有効に利用できるようになる。そのため、従来法に比較して効率的で高精度な中性子応力測定が期待できる。しかし、そのようなエリアディテクタを用いた中性子応力測定の成功例はまだ報告されていない。

最近、新村ら⁽³⁾は200 mm×250 mmの面を空間分解能100 μm (または50 μm)にて計測できる中性子用のイメージングプレート(neutron image plate, NIP)を開発した。NIPを用いることで、上述の新しい中性子応力測定が技術的に可能になる。そこで本研究では、これまで未検討であったエリアディテクタによる中性子応力測定の可能性についてNIPを用いて実験的な検討を行った。

これまで著者らは、X線イメージングプレート(X-ray image plate, XIP)を使用したX線応力測定について検討を行っており、従来の平面応力測定法($\sin^2 \phi$ 法)および三軸応力測定法(Dölle-Hauk法)に匹敵する測定が行えることや、それに加えて、二相複合材料のマクロ応力・ミクロ応力測定、粗大結晶粒材料の平均応力測定、コンピュータトモグラフィ法を応用した材料表面の応力分布測定、などにも有効なことを報告してきた⁽⁴⁾⁻⁽¹¹⁾。そこで、本研究では、まず、XIPの経験で蓄積してきたIP画像の解析技術や測定技術を応用し、日本原子力研究所JRR-3MにおけるNIP用の応力測定装置および画像解析プログラムの試作を行った。さらに、引張応力を与えた鋼材の平均応力測定を実施し、X線法との相違点や改善法などいくつかの有用な所見を得た。

* 原稿受付 2003年3月12日。

^{*1} 正員, 金沢大学(〒920-1192 金沢市角間町)。^{*2} 日本原子力研究所(〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4)。

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

2. 実験方法

本実験は、日本原子力研究所の実験研究炉 JRR-3 M に設置されている残留応力測定エリア (RESA) にて行った。本 NIP 測定装置の主な構成は、試験片負荷装置 (引張応力専用) と NIP を入射ビームに対して垂直に保持するジグ (NIP カメラ) のみであり、標準法のディフラクトメータ法と比べて非常にシンプルである。本装置を RESA の 2θ 軸を 0° に設定した状態で 2θ 軸上に設置し、背面反射回折が測定可能となるようにした。図 1 に本研究で使用した NIP 用実験装置の全体写真を、また、図 2 に光学系の概略を示す。NIP カメラは、NIP を正確に平面に固定する目的で、NIP と接する面に直径 0.5 mm の穴を 20 mm 間隔の格子状に空け、背面から真空吸引できる構造とした。NIP の表面側には、NIP の押さえ、および、 γ 線の遮断を目的として厚さ 1 mm のアルミニウム板を全面に被せた。このアルミニウム板の中央部には円すい状の基準材ホルダを取付け、試験片および基準材 (厚さ 1 mm, 直径 20 mm の円形軟鋼板) の回折環を同時に撮影できるようにした。基準材は中性子回折像における入射ビーム位置および NIP と試験片との距離を決定

する目的で使用した。試験片負荷装置は、試験片入射ビームに対して 27° 傾斜させた状態で、試験片から発生する回折ビームを遮らないように設計した。

試験片には、図 3 に示す形状の機械構造用炭素鋼 S 50 C を機械加工後に応力除去焼なましして使用した。板厚は 5 mm とした。負荷応力は引張軸に用いた台形ねじをナットで回転して与え、試験片に貼り付けたひずみゲージを通して検出した。ひずみゲージは試験片の両面に照射点を挟むそれぞれ 2 箇所ずつに取付けた。こうして、負荷ひずみが 0, 500, 1 000, 1 400 ($\times 10^{-6}$) の四段階についてそれぞれ 2 回ずつ回折環 (α Fe 211 回折) を測定した。中性子照射時間は 5 時間とした。主な測定条件を表 1 にまとめて示す (カッコ内は基準材の条件)。

本研究で使用した中性子ビームは、ガイドチューブ内でパイログラファイトの 0001 回折によって、波長を 0.208 88 nm に単色化された後、厚さ 10 mm, 穴径 10 mm の B_4C 製スリット、および、フライトチューブ出口に置かれた厚さ 0.5 mm, 穴径 3 mm の Cd 製スリットをそれぞれ通過した後、試験片に入射した。

NIP に撮影された中性子回折環画像は、IP 読取装置 (Fuji Film, BAS-1800) にて位置分解能 100 μ m, 輝度分解能 16 bit の条件でデジタル画像データとし

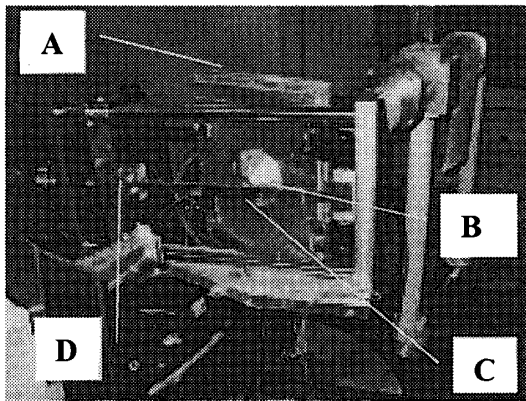


Fig. 1 Photograph of experimental set-up for neutron stress analysis using neutron image plate (A: NIP holder, B: standard material, C: specimen, D: loading device)

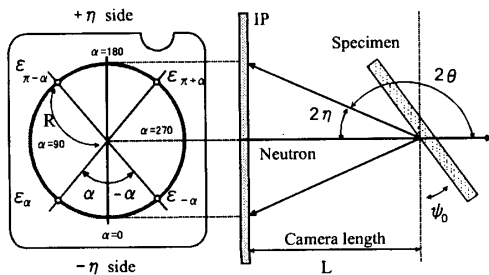


Fig. 2 Strains used for stress calculation and other principal parameters used in this paper

Table 1 Experimental conditions

Diffraction	α Fe211, $2\theta=127^\circ$
Wave length of neutron beam	0.20888 nm
Distance from NIP to specimen	48.8 mm (20 mm)
Incident angle of neutron beam	20° (0°)
Irradiated time	5 hr
Irradiated area	ϕ 3mm
Thickness of specimen	5.0 mm
Thickness of s.m.	1.0 mm
NIP used	Fuji Film, BAS-ND2025
NIP reader	Fuji Film, BAS-1800

(note: figures in parenthesis indicate for standard material (s.m.))

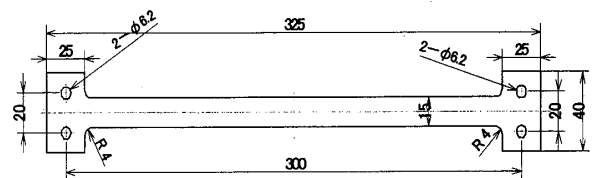


Fig. 3 Shape and dimensions of specimen used. Thickness of specimen is 5 mm

て読取り、コンピュータに保存した。得られた画像データの容量は、1個の回折環当たり約10MBである。次に、画像データを本研究で作成したVisual C++による解析プログラムにより、回折環半径方向の回折強度分布曲線(回折プロファイル)の算出、基準材の回折環に対する入射ビームの中心位置決定、試験片の回折環半径の決定、 $\cos \alpha$ 法による応力計算⁽¹²⁾、をそれぞれ行った。回折プロファイルは、一辺200 μm の正方形領域内のピクセルの平均強度を、100 μm 間隔で回折環半径方向に連続的に求めて使用した。このような計算を $\alpha=0^\circ$ から 359° まで 1° おきに行った。さらに、 $\alpha \pm 30^\circ$ 内にある合計61個の回折プロファイルの平均を求めるとともに、半径方向に前後7点(合計15点)の移動平均をそれぞれ行って平滑化した。こうして得られた回折ピークに対して8/10価幅の midpoint 位置を計算し、その位置と回折環中心との距離を回折環半径(R_α)とした。回折環の中心は、基準材の回折環半径を円と考え、180個の直径の中心点の差異が $10^{-2}\mu\text{m}$ 以下になるまで収束計算を行って決定した。回折環半径から応力計算までのプロセスを付録にまとめた。

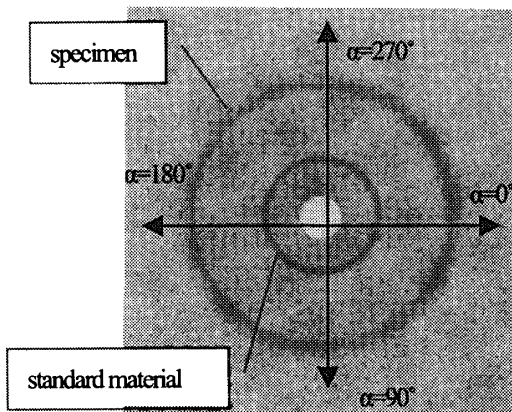


Fig. 4 Neutron diffraction rings obtained from steel specimen (outer ring, $\alpha\text{Fe-211}$ diffraction) and standard material (inner ring, $\alpha\text{Fe-211}$ diffraction). Applied strain is 1400×10^{-6}

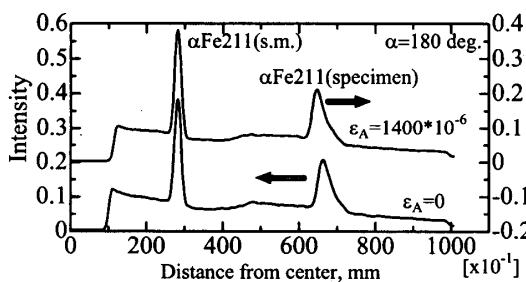


Fig. 5 Diffraction intensity distributions in radius direction in different stress state (s.m.: standard material)

3. 実験結果

図4に本実験で得られた $\alpha\text{Fe 211}$ 中性子回折像について、負荷ひずみ(ϵ_A)が 1400×10^{-6} の場合のものを示す。なお、IP読取装置の設定のため、得られた画像は裏面側から見たものとなっている。図4には2種類の回折環が見られるが、直径の大きいほうが試験片からの回折、内側が基準材料の回折($\alpha\text{Fe 211}$ 回折)である。図4より、負荷応力による回折環の変化は目視では明確に確認することは困難であることがわかる。このため、NIPを使用した応力測定には精密な画像解析技術が不可欠である。

次に、回折環半径方向の回折強度分布の一例を図5に示す。図中の2個のプロファイルのうち、上側が負荷ひずみ 1400×10^{-6} の場合、下側が零の場合である。いずれも回折環中心角は $\alpha=180^\circ$ である。各プロファイルの左側(回折環中心側)のピークは基準材の回折($\alpha\text{Fe 211}$)によるもので、右側は試験片の回折によるものである。両者のプロファイルの相違はNIPとの距離、材料の厚さ、入射角の相違によるものである。図5より、試験片の半価幅のほうが明らかに大きく、また、入射角の傾斜のため非対称なプロファイルとなっていることがわかる。

図6は、回折環半径を求めた結果である。図6より、回折環半径は中央に大きなV形の凹みを持った分布を示していることがわかる。また凹みの大きさは無ひずみのときのほうが大きい。図6の結果には、試験片の残留応力の影響が考えられるが、本実験の侵入深さは試験片の板厚以上と推定されること、および、残留応力の総和は板厚全体において零であることから、残留応力の影響は少ないと思われる。このため、あらかじめシミュレーションによる予備検討を行った。その結果、図7に示すように、入射ビームが傾斜して材料に照射される場合には、同一深さから回折する場合、 $\alpha=180^\circ$ では回折ビームの材料内通過経路長が他の α のときより大きくなり、材料による吸収の影響をより

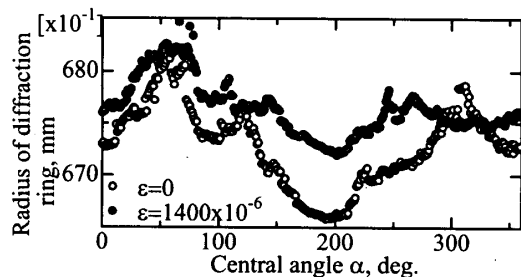


Fig. 6 Radius of diffraction rings in different stress state (applied strain; \circ : 0, \bullet : 1400×10^{-6})

大きく受けて強度を減衰させることが確認された。さらに、NIP 上の合成プロフィールは回折環の外側の強度が α に依存して異なり、これが α による半価幅の減少、および、回折環半径の減少(半径分布の凹み)を引き起こすことも認められた。一方、引張応力を負荷すると、 $\cos \alpha$ 法の理論より個々の回折ビームは $\alpha = 180^\circ$ の半径を増加させる傾向を示し、これが $\epsilon_A = 1400 \times 10^{-6}$ における中央部の凹みの減少を生じさせた要因と考えられる。なお、基準材では入射角を垂直としているため、試験片のような凹みは現れない。

図 8 は、後述する付録の式(8)で定義される a_1 を $\cos \alpha$ に対してプロットしたグラフである。うねりも見られるものの、全体的にほぼ直線的に分布する傾向が認められる。この近似直線の傾きが材料の応力に比例している。なお、負荷応力が零のときも右下がりの傾きを示したのは、図 6 における回折環半径の凹みに対応するものである。

次に、図 8 に対して $\cos \alpha$ 法を適用して応力を求め、負荷応力と比較した結果を図 9 に○のプロットで示す。図中の実線は負荷応力と 1 対 1 に対応する線を示し、破線は測定データを 1 次式に近似した結果である。それぞれ 2 回ずつの測定を行ったが、全体的に再現性のある結果が得られている。図 9 より、測定値は負荷応力に対してほぼ 1 の傾きを持った直線的挙動を示すとともに、負荷に対して圧縮応力側に約 390 MPa

のずれを示している。 $\cos \alpha$ 法は X 線回折を対象とした方法であるので、本実験の中性子回折像の応力測定には適用範囲外であるが、得られた測定結果は予想以上にシンプルな傾向を示している。本実験結果に基づいて測定値を校正すれば(すなわち、 $\cos \alpha$ 法による応力値からそのずれ量-390 MPa を差し引くことによって)、未知の応力状態が本実験条件範囲において推定できると考えられる(第一法)。なお、応力のずれ量は、図 6 に示した無負荷時の回折環半径の凹形分布に対応するものである。この値は、試験片の厚さや、回折条件で決まる可能性があり、それらの関係が明らかになれば適用可能な範囲が広がる可能性が考えられる。

4. 考 察

図 9 中の●のプロットは、各負荷レベルにおける回折環半径と、 $\epsilon_A = 0$ のときのそれとの差を求め、さらに各回折環の平均半径を加算したのに対して再度 $\cos \alpha$ 法を適用したときの結果である。図 9 より、負荷応力に対する傾き、無負荷状態のときの応力値(切片)、および直線性、のいずれの点に関しても負荷応力とよく一致した応力値が得られていることがわかる。この結果は、無応力状態の回折環と未知の応力状態の回折環が得られるならば、NIP によって応力が直接推定できる可能性を示すものであり、3 章で述べたずれ応力の補正法(第一法)に対する第二の補正法である。

従来のディフラクトメータを用いた中性子応力測定においても、無応力状態のときの格子面間隔 d_0 が必須であり、本第二法も無応力時の情報を利用するという点で同様であるといえる。ただし、従来法では 1 個の d_0 を必要とするが、本補正法では 1 個の回折環全体の半径分布 $R(\alpha)$ が必要である。

JRR-3 M の場合には、ベント形のシングルモノクロメータ方式のため、入射中性子ビームの単色化の設定条件にもよるが中性子回折環はその場所ごとにプロフィールや半価幅が若干異なる傾向にある。また、垂直

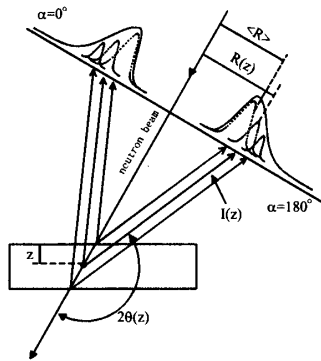


Fig. 7 Calculation of neutron diffraction profiles built up on image plate

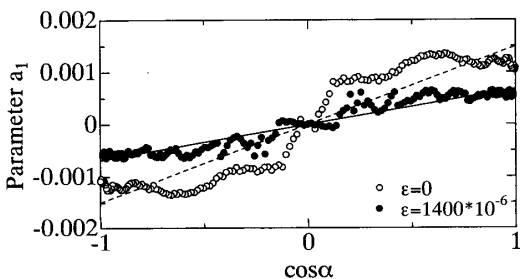


Fig. 8 a_1 vs. $\cos \alpha$ plots for two kinds of stress state

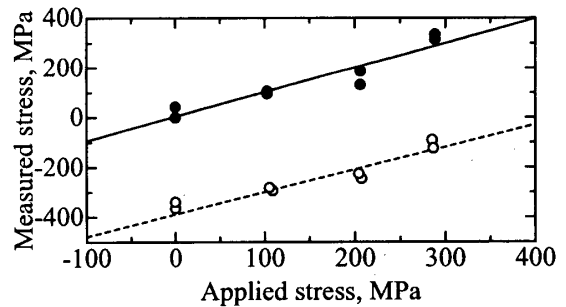


Fig. 9 Stresses obtained from raw data (○) as well as from corrected data (●) using the $\cos \alpha$ method as a function of applied stress

入射以外では、回折環を形成する各回折ビームは異なった材料内経路長を取る結果、吸収量が異なるので回折強度分布が回折環上で同一とはならない。このように、回折環の各部は応力以外の要因によっても影響を受ける。無応力状態の回折環の使用は種々の因子の影響を相殺させ、回折環と応力との関係をシンプルで明確なものとする効果があり、本方法による応力測定の信頼性向上に有効である。

さて $\cos \alpha$ 法は、本来、材料の表面で回折したビームを対象とした方法であるため、侵入深さが極めて浅い X 線応力測定には有効であるが、その数百倍以上の侵入深さを示す中性子回折では正しく適用できないはずである。それにもかかわらず、本実験結果のように $\cos \alpha$ 法によって NIP の測定結果が比較的簡潔に整理できた理由について次に考察する。図 10 および図 11 に材料の表面、および任意の深さ z での回折ビームの挙動に関する模式図を示す。無負荷(図 10 の点線)および深さ方向に一定の応力が作用したとき(実線)の回折ビームは、それぞれ、どの深さのものも皆平行な方向に回折する。また、応力による NIP 上でのピーク位置の移動量(ピークシフト)は回折深さに依存し、深さ z でのピークシフト($z_1 z_2, \Delta R_z$)と、試料表面のもの($s_1 s_2, \Delta R_s$)との比 a は次式のようになる。

$$a \equiv \frac{\Delta R_z}{\Delta R_s} = 1 + \frac{z}{L \cos \psi_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L はカメラ長、 ψ_0 は中性子ビームの入射角である。上式より、 a は z に比例し、 z が最大となる裏面の回折ビームが最大のピークシフトとなる。しかしながら、通常の測定では、 L は板厚 t に比べて十分大きいので ($L \gg t \geq z$)、式(1)の右辺第 2 項は無視できる程度に小さく $a \approx 1$ とみなすことができる。その結果、すべての深さからの回折ビームは NIP 上においてほぼ等しいピークシフトとなる(ただし、応力が内部で一様な場合)。このため、それらの合成である NIP のピークシフト (ΔR_{NIP}) も個々の回折ビームと同様のピークシフトとなる。このうち、最表面の回折

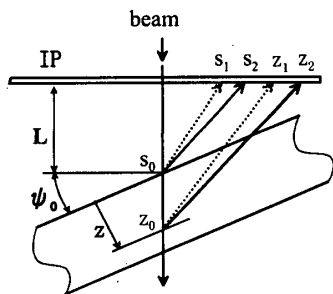


Fig. 10 Explanation on peak shift of beams diffracted at different depth in material

は $\cos \alpha$ 法で正しく応力に変換可能であるので、NIP でも同様に $\cos \alpha$ 法が有効となる。本実験結果が $\cos \alpha$ によって整理できた背景は以上のような理由によるものと解釈できる。

なお、厳密には式(1)の右辺第 2 項の影響により、NIP のプロフィールは試験片最表面のものとは若干異なり、板厚にもよるが表面から 1~2 mm 内部の回折ビームの挙動と最も近い傾向を示す。したがって、NIP のデータを $\cos \alpha$ 法で解析する場合にはカメラ長 L をこの分だけ補正し、 $L + (1 \sim 2 \text{ mm})$ として応力計算することで、より高精度な結果が得られると予想される。この点に関しては現在シミュレーションを行って検討中である。

以上、本研究はエリアディテクタによる中性子応力測定法の開発に向けた第一ステップとして、引張応力を与えた鋼板の平均応力について検討を行った。このような測定は基礎的側面のみならず、応用として、燃焼合成法などの異材接合材の各層の残留応力、あるいは、複合材料の相応力状態の評価方法として利用できるものであり、実用的な側面も持ち合わせている。

5. 結 言

中性子イメージングプレートを用いた応力測定の可能性について、日本原子力研究所 JRR-3 M の熱中性子実験施設において厚さ 5 mm の試験片(S 50 C)を用いて検討した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 中性子回折環は、無応力時においてもその半径(ピーク位置)が一定ではなく、 $\alpha = 180^\circ$ の部分が他の部分に比べて小さくなる。
- (2) その結果、 $\cos \alpha$ 法による応力計算値は圧縮

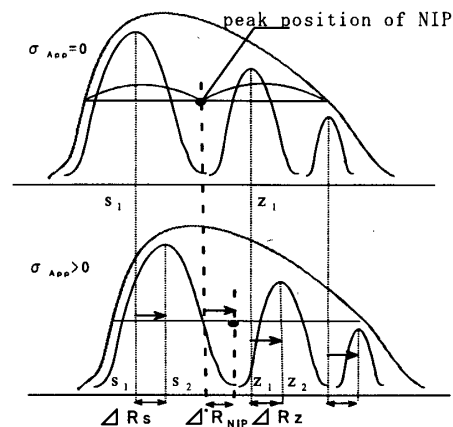


Fig. 11 Explanation on peak shift of beams diffracted at different depth in material and relation to peak shift of composition profile in case of $\alpha = 180^\circ$ (σ_{APP} : applied stress)

応力側にずれる(本実験条件において約 390 MPa)。

(3) 上記の応力のずれ量は、負荷応力によらずにほぼ一定値となり、 $\cos \alpha$ 法による応力は負荷応力に対してほぼ 1 の傾きを示す。

(4) 負荷応力状態の回折環半径と無応力状態の回折環半径との差に、負荷応力状態の回折環の平均半径を加算すると、 $\cos \alpha$ 法によって負荷応力とほぼ一致する応力が得られる。

(5) 以上より、 $\cos \alpha$ 法の応力に測定条件に依存した補正量(本実験条件では 390 MPa)を加算する方法(第一法)、または、結論(4)に述べた無応力時の回折環を基準とした補正方法(第二法)、のいずれかによれば中性子イメージングプレートによる正確な応力測定が可能となる。

終わりに、本実験において献身的な協力をいただいた金沢大学大学院生、斎藤徹、鷹合滋樹、根本真倫、矢澤和路、江原崇、新垣匠、深谷義輝、柳沢寿、渡邊英明、関勝博の諸氏、ならびに、装置の改良に協力をいただいた九州職業能力開発大学校・平塚剛一教授に感謝の意を表す。

付録 $\cos \alpha$ 法による応力計算

本文の図 2 より、回折環半径 R_α は回折角 $2\theta_\alpha$ と、IP と材料との距離 L を用いて次式から求められる(添字 α は回折環の α 角方向と対応することを示す。以下同様)。

$$R_\alpha = -L \tan 2\theta_\alpha \dots\dots\dots (2)$$

Bragg の条件式よりひずみ ε_α 、格子面間隔 d 、 $2\theta_\alpha$ には次の関係がある。

$$\varepsilon_\alpha = (\Delta d/d)_\alpha = (1/2)(2\theta_0 - 2\theta_\alpha) \cot \theta_0 \dots\dots (3)$$

ここで、 Δd は d の変化量、 $2\theta_0$ は無ひずみのときの 2θ 値である。式(2)、(3)より R_α から ε_α が得られる。 ε_α は試料座標系 (S_i) のひずみと次式の関係を持つ。

$$\varepsilon_\alpha = n_{3i} n_{3j} \varepsilon_{ij}^s \dots\dots\dots (4)$$

n_{ij} は S_i 系から実験座標系 (L_i) への変換マトリックスであり、また、 ε_α は L_3 軸方向の縦ひずみである。 n_{ij} は、必要な成分のみについて示すと次のようになる。

$$\begin{aligned} n_{31} &= \cos \eta \sin \phi_0 \cos \phi_0 \\ &\quad - \sin \eta \cos \phi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha - \sin \eta \sin \phi_0 \sin \alpha \\ n_{32} &= \cos \eta \sin \phi_0 \cos \phi_0 \\ &\quad - \sin \eta \cos \phi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha + \sin \eta \cos \phi_0 \sin \alpha \\ n_{33} &= \cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \sin \phi_0 \cos \alpha \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 ϕ_0 は入射ビームと S_3 軸のなす角、 ϕ_α は入射ビームの $S_1 S_2$ 面への投影と S_1 軸とのなす角を表す。

材料を等方弾性体とすると、応力とひずみの関係 (S_i 系) は次のようになる。

$$\varepsilon_{ij}^s = \left(\frac{s_2}{2} \right) \left[\sigma_{ij}^s + \delta_{ij} \frac{(s_1)}{(s_2/2)} (\sigma_{11}^s + \sigma_{22}^s + \sigma_{33}^s) \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。 s_1 と s_2 は回折弾性定数を表し、ヤング率 (E) とポアソン比 (ν) により次式で与えられる (E および ν はいずれも回折用の値を用いる必要がある)。

$$s_1 = -\nu/E, \quad s_2 = 2(1+\nu)/E \dots\dots\dots (7)$$

次に、中心角が $\alpha, \pi+\alpha, -\alpha, \pi-\alpha$ となるような 4 個のひずみを $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_{\pi+\alpha}, \varepsilon_{-\alpha}, \varepsilon_{\pi-\alpha}$ と表し、これらから次式の a_1 を求める。

$$a_1 \equiv (1/2)[(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \dots\dots (8)$$

式(4)~(8)を用いて a_1 を応力成分で表示すると、 $\phi_0=0$ のとき次式のようにになる。

$$a_1 = [-(s_2/2) \sin 2\eta \sin 2\phi_0] \sigma_{11}^s \cos \alpha \dots\dots (9)$$

続いて、 a_1 を $\cos \alpha$ で偏微分すると次式を得る。

$$\sigma_{11}^s = [-(s_2/2) \sin 2\eta \sin 2\phi_0]^{-1} (\partial a_1 / \partial \cos \alpha) \dots\dots\dots (10)$$

右辺の s_2, ϕ_0 は既知数として扱えるので、 $a_1 - \cos \alpha$ 線図の傾きから応力 σ_{11}^s が決定できる。以上が $\cos \alpha$ 法による応力計算法である⁽⁵⁾⁽¹²⁾。なお、 η は応力に依存するが $\sin 2\eta$ 値への影響はわずかであるため、 2η を無応力のときの値 $\eta_0 (= \pi - 2\theta_0)$ で置き換えても実用上支障はない。

文 献

- (1) 林真琴・石渡雅幸・皆川宣明・船橋達・Root, J. H., 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) Niimura, N., Karasawa, Y., Tanaka, L., Miyahara, J., Takahashi, K., Saito, H., Koizumi, S. and Hidaka, M., Nucl. Inst. Meth., A, 349 (1994), 521-525.
- (4) 佐々木敏彦・広瀬幸雄, 材料, 44-504 (1995), 1138-1143.
- (5) 佐々木敏彦・広瀬幸雄, 機論, 61-590, A (1995), 2288-2295.
- (6) 佐々木敏彦・広瀬幸雄, 機論, 62-604, A (1996), 2741-2749.
- (7) 佐々木敏彦・広瀬幸雄・安川昇一, 機論, 63-607, A (1997), 533-541.
- (8) 佐々木敏彦・広瀬幸雄, 機論, 63-614, A (1997), 2196-2204.
- (9) 佐々木敏彦・後藤時政・田畑裕之・広瀬幸雄, 材料, 46-7 (1997), 756-762.
- (10) 後藤時政・佐々木敏彦・広瀬幸雄・長嶋晋一, 機論, 64-620, A (1998), 1120-1127.
- (11) 佐々木敏彦・矢澤和路・広瀬元, 材料, 48-12 (1999), 1431-1436.
- (12) 平修二・田中啓介・山崎利春, 材料, 27-294 (1978), 251-256.