

イメージングプレートを用いた粗大結晶粒材料の残留応力分布測定†

佐々木 敏彦* 矢澤 和路** 広瀬 元***

Measurement of Residual Stress Distribution on Coarse-Grained Polycrystalline Materials by Means of Imaging Plate

by

Toshihiko SASAKI*, Kazumichi YAZAWA** and Hajime HIROSE***

In this paper, a method for determining the distribution of residual stress on the surface of a coarse-grained material was studied. The method used in this study was a combination of the method based on the $\cos\alpha$ method with an imaging plate (IP- $\cos\alpha$ method) and the computerized tomography (CT). In the present method, mean stresses over many different irradiated linear area are measured using the IP- $\cos\alpha$ method first. Second, the distribution of stress on the surface of the material is reconstructed through the CT approach. A method for determining the least distance, which is needed to obtain mean stresses accurately was also studied and the fractal analysis was applied to diffraction image for this purpose. An experiment was performed using a steel which consisted of grains having diameter around $200\mu\text{m}$. It was found from the experiment that the distribution obtained from the present method almost agreed with that obtained from the $\sin^2\psi$ method using both the parallel beam and the oscillation methods. The present method has a feature that the measurement is easier because the analytic method for polycrystalline materials can be used. In principle, the method is applicable to more coarse-grained materials as long as the material is large enough to keep the irradiated area more than the least distance and thus it will be useful to obtain actual residual stress state on coarse-grained materials.

Key words: Nondestructive inspection, X-ray stress measurement, Imaging plate, Computerized tomography, Residual stress, Coarse-grained material, Fractal analysis

1 緒 言

2次元X線検出器であるイメージングプレート(IP)^{1)~3)}をX線応力測定に使用すると、回折環の全周から多数のひずみの情報が得られるため、応力を精度よく得ることができる。また、本方法は単一入射法であるため測定時間の大幅な短縮が図られるとともに、大量のひずみデータを用いることで、三軸応力などのような複雑な応力状態の解析に有効である可能性を秘めている。なお、本法の応力計算プロセスは、標準法の $\sin^2\psi$ 法とは異なり、回折環の中心角(α)とその半径の関係を利用して行う。すなわち、 α 角を基準とした応力測定法であり α 角基準法と言うことができる(従来の $\sin^2\psi$ 法は ψ 角基準法となる)。 $\cos\alpha$ 法⁴⁾はX線フィルム時代に提案された α 角基準法であるが、 $\sin^2\psi$ 法と同様な優れた特長を持っている。そのため、 $\cos\alpha$ 法はIPを用いたX線応力測定用の応力計算原理として利用され^{5)~17)}本研究でも用いている。

さて、IPを使用したX線応力測定では通常ピンホールカメラ法が使用されるが、その結果、結晶粒が十分細かい材料では問題ないが、結晶粒径が比較的大きな材料になるとX線照射領域内の結晶粒の個数が不足し回折環が斑点状(スポッティ)になり易い。また、このような場合には、X線のひずみの測定精度が著しく低下するため、

それから変換される応力も誤差を含んだものとなる。

そこでこの問題の対策として、著者らは試料平面揺動法を提案した¹⁸⁾。試料平面揺動法は、X線照射中に試験片を線状もしくは面状に移動する方法であり、これにより回折に寄与する結晶粒の個数が増加するため連続的で滑らかな回折環が得られるようになる。試料の面積が十分であれば、本方法により任意の結晶粒径の材料について応力測定が、原理上、可能である。ただし、こうして得られる応力値は、全X線照射領域内の平均的な応力値であり、微小領域の応力状態を知ることはできない。

そこで著者らは次の展開として、試料平面揺動法によって測定した複数の線上の平均応力に、コンピュータトモグラフィ(CT: Computerized Tomography)¹⁹⁾の手法を適用して、2次元残留応力分布を推定する方法を提案した²⁰⁾。前報では、第一段階として測定が容易な微細な結晶粒(平均粒径約 $10\mu\text{m}$)からなる材料について基礎的な検討を行った。そこで本研究では、第二段階として、粗大結晶粒材料上に均一な応力分布が生じている場合について検討を行った。試験片は機械構造用炭素鋼材(S55C)で、熱処理によって平均結晶粒径を約 $200\mu\text{m}$ とするとともに、研磨によりほぼ均一な圧縮残留応力を発生させたものを用いた。なお、CT解析に必要な直線上の平均応力を正確に求める際に、X線照射距離の設定を

† 原稿受理 平成10年10月8日 Received Oct. 8, 1998

* 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町, Dept. of Mat. Sci. & Eng., Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

** 学生会員 金沢大学大学院 〒920-1192 金沢市角間町, Graduate Student, Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

*** 正会員 金城短期大学 〒924-8511 松任市笠間町, Kinjo Junior College, Kasama-machi, Matto, 924-8511

どのようにすべきかという問題にも注目し、フラクタル解析法を適用した判定方法についても検討を行った。

その結果、平均結晶粒径が約 200 μm の試験片では点測定による個々の測定精度は著しく低下するが、本研究の線測定で得た平均応力、および CT 理論を経て得られた応力分布はともに実用上十分な精度を示すことを確認した。この結果は、本方法の目標である粗大結晶粒からなる材料の表面に発生した不均一な応力分布の測定の可能性を示すものであると考えられる。

2 CT 理論および $\cos\alpha$ 法

2.1 CT 理論

試料面上に Fig. 1 に示すような試料座標系 (x, y) を設定する。また、原点を中心として反時計方向に θ 回転した座標系を XY 座標系とし、試料面の応力分布を $\sigma_{ij}(x, y)$ と表す。ここで、Y 軸に平行な直線 AB 上の X 線応力測定について考える。試料平面揺動法を適用すれば、照射線 AB 上の平均的応力の測定が可能になる。^{18), 20)} 以下、この応力を $\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta)$ と表す。ここで、コリメータの径が小さく、応力は照射点内において X に関して一定であると仮定する。そうすると $\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta)$ について次式が成立する。

$$\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta) = \frac{\int_{AB} \sigma_{ij}(x, y) dY}{l(X, \theta)} \quad (1)$$

このとき、 $l(X, \theta)$ は試料上の AB の長さを表す。次に次式のように $p(X, \theta)$ を定義する。

$$p(X, \theta) = \sigma_{ij}^{IP}(X, \theta) \cdot l(X, \theta) \quad (2)$$

そうすると式 (1), (2) から次式が得られる。

$$p(X, \theta) = \int_{AB} \sigma_{ij}(x, y) dY \quad (3)$$

このとき $p(X, \theta)$ は、 $\sigma_{ij}(x, y)$ の θ 方向へのプロジェクションであり、ラドン変換 (Radon Transform) と呼ばれる。CT 理論による断層画像の再構成プロセスを適用すると、 X および θ の異なる種々の線上のプロジェクション $p(X, \theta)$ から応力分布 $\sigma_{ij}(x, y)$ が求められる。

次に、本研究で用いた再構成法 (convolution 法) について述べる。convolution 法は、投影像に対してフィルタ補正を行い、その後、逆投影を行う手法である。本法によると、応力分布 $\sigma_{ij}(x, y)$ は次式のように表される。

$$\sigma_{ij}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi q_0(X) d\theta \quad (4)$$

ここで、各パラメータは次の通りである。

$$X = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5)$$

$$q_0(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p(X - S, \theta) h(S) dS \quad (6)$$

$$h(X) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U| \exp(inX) dU \quad (7)$$

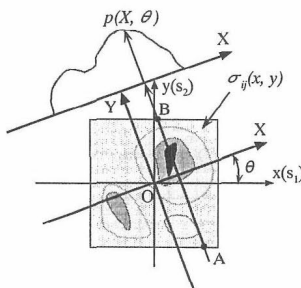


Fig. 1. Principle of computerized tomography.

U は XY 座標系に対応するフーリエ空間上の UV 座標に対応するものである。式 (4) ~ (7) は、フーリエ逆変換である $h(X)$ と $p(X, \theta)$ との重畳積分 $q_0(X)$ をまず求め、次に、 $q_0(X)/2\pi$ の値を θ に関して積分すれば、 xy 平面における応力分布 $\sigma_{ij}(x, y)$ が得られることを示している。

本 CT 測定方法によれば、従来の X 線入射角 ψ_0 または回折環中心角 α に関する揺動操作によつては、正確な測定値が求められないような粗大結晶粒材料であっても、十分長い直線上の平均的応力が得られる限り、CT 理論によつて試料表面上の応力分布が推定可能となる。

2.2 $\cos\alpha$ 法

Fig. 2 に示すように、入射 X 線ビームを試料の法線方向から ψ_0 だけ傾斜して入射させ、これによって材料から発生する回折環を入射ビームと垂直に配置した IP 上に撮影する場合について考える。入射ビームが xz 面内にある場合 ($\phi_0 = 0^\circ$)、試料座標系の x 軸方向の応力 σ_x は次式により求められる。^{4), 12), 13)}

$$\sigma_x = -\left(\frac{2}{s_2}\right) \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha}\right) \quad (8)$$

ここで、 α は回折環中心角 (Fig. 2, 3)、 η は Bragg 角 θ の余角 ($\eta = \pi/2 - \theta$)、 s_2 は X 線弾性定数 ($s_2 = 2(1 + \nu)/E$) を表す。また a_1 は、Fig. 3 に示すように回折環の中心角がそれぞれ $\alpha, -\alpha, \pi + \alpha, \pi - \alpha$ であるような回折ビームから得られる X 線のひずみ $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_{-\alpha}, \varepsilon_{\pi + \alpha}, \varepsilon_{\pi - \alpha}$ から次式によつて導かれるパラメータである。

$$a_1 \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi + \alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi - \alpha})] \quad (9)$$

式 (8) を利用すると、1 個の回折環全体の X 線のひずみのデータから a_1 対 $\cos\alpha$ 関係を求め、その直線の傾きを得ることにより、応力 σ_x が決定できることになる。

3 最小線上揺動距離の決定

CT 測定は、前節において述べたように、線上揺動に

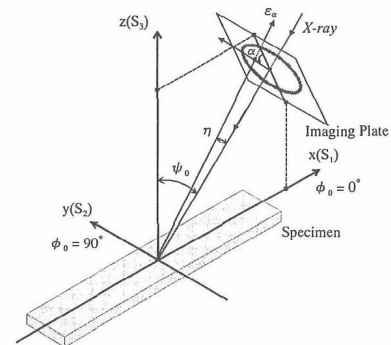


Fig. 2. Definition of coordinate system and symbols.

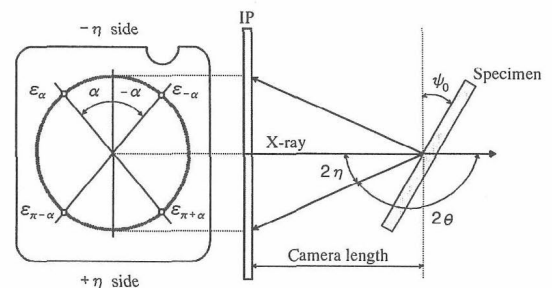


Fig. 3. X-ray strains used for stress calculation.

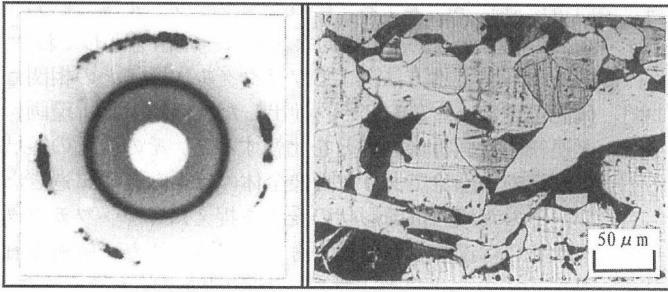


Fig. 4. Debye-scherrer pattern obtained with IP and microstructures of sample.

よって求めた複数の線上の平均応力値から応力分布を再構成する方法である。したがって、線上揺動長さが十分に得られなければ、粗大結晶粒材料の場合には回折環が不連続または斑点状になってしまい、精度良い応力値の算出は困難となる。そのため、信頼できる応力値を得るために最低限必要な揺動距離（最小線上揺動距離）の決定は、高精度かつ効率的なCT測定を行うためには重要な問題である。

ここでは、回折環画像（回折環の連続性）が応力測定精度にどのように影響をもたらしているかを定量評価するために、フラクタル解析を用いて検討を行い、最小線上揺動距離の判定方法について検討した。

3・1 実験方法

本実験では、市販の炭素鋼 S55C を L55mm × W10mm × H5mm の形状寸法に加工した後、1573K で焼鈍し、平均結晶粒径が約 200μm の試験片を作製して使用した。Fig. 4 にその組織写真および無揺動時の回折環を示す。回折環は外側のリングが試験片、内側のものが入射 X 線位置を決定するために二重撮影した Fe 粉末の 211 回折環である。結晶粒径が比較的粗大であるため、回折環が斑点状となっていることが確認できる。また、組織写真より線分法を用いて結晶粒度番号を求めた結果を Table I に示す。

実験は、X 線照射中に 0 ~ 25mm の長さの線上揺動を行い、それぞれの線上揺動長さにおいて各 5 回づつ X 線測定を行った。このときの測定条件を Table II に示す。試験片は線上揺動装置である XZ-stage の Z テーブル面に貼り付け、コンピュータを介した遠隔制御により線上揺動を行った。なお、本装置の最小移動距離は両軸ともに 1μm である。また、フラクタル解析は、得られた全ての回折環に対して行い、そのフラクタル次元値と、応力測定値のバラツキとの相関について考察した。

3・2 フラクタル解析方法

対象とする図形のフラクタル特性を客観的に扱うため、フラクタルの持つ複雑さを定量的に表した媒介変数がフラクタル次元である。フラクタル次元 D の解析方法は各種定義されているが、同一の対象物であっても、その定義方法によって次元値が異なる。そのため、幾つかの解析方法を用いて、より多角的に解析を行い、測定対象に合致した解析方法を選択する必要がある。

本研究では、2次元フーリエ変換フラクタル法²¹⁾ (2D-FFT法) および Yardstick 法²²⁾ の二種類の方法を用いてフラクタル次元 D を算出した。以下にその具体的な解析方法について述べる。

Table I. Grain size number and mean grain size of specimen.

Grain size number, N	1.9
Mean grain size, μm	200

Table II. X-ray diffraction conditions.

Characteristic X-ray	Cr-K _α	
Diffraction line	α-Fe211	
Tube voltage, kV	30	
Tube current, mA	50	
Collimator φ, mm	1 (diameter)	
Incidence angle ψ, deg	Specimen	30
	Fe-Powder	0
Camera length, mm	Specimen	80
	Fe-Powder	45

3・2・1 2次元フーリエ変換フラクタル法 (2D-FFT

法) 2D-FFT法による解析では、回折環全周を 128 × 128 画素の画像データに変換した。すなわち、Fig. 5 に示すように回折環ピーク近傍の円周方向の画像を平面画像に変換することによって対象画像を作成し、フラクタル解析を行った。本解析方法は、始めに上記の 2次元画像データに対して 2次元高速フーリエ変換を行い、周波数変換する。周波数に変換された画像の濃淡（つまり輝度値）はスペクトルを表示している。この周波数変換された画像より、中心（原点）からの周波数 f とスペクトルをそれぞれ横軸、縦軸にとり両対数線図上にプロットし、さらに最小自乗法により一次関数に近似する。この近似した直線の傾きを β とすると、次式からフラクタル次元 D が算出できる。

$$D = \frac{5 - (\beta + 1)}{2} \quad (10)$$

3・2・2 Yardstick 法 Yardstick 法は、Fig. 6 に示すように、円を用いて線分で曲線の長さを近似するため、対象とする図形の位相次元が 1 のときに有効な方法である。そこで、回折環全周について半径方向の積分強度を算出し、その線形データ (Fig. 7) を用いて解析を行い、フラクタル次元を算出した。

ここで、本方法の手順について説明する。まず対象とする曲線の一端を始点とし、その点を中心にして半径 r の円を描き、その円で最初に交わった点と始点とを直線で結ぶ。その交点を新たな始点と見なして、以下同様の操作を繰り返し、長さ r の折れ線によって曲線を近似するのに必要な線分の総数 $N(r)$ を数える。指数 $-D$ において、 $N(r)$ と r^{-D} の間に比例関係があるとすれば次式が成り立つ。

$$N(r) = c \cdot r^{-D} \quad (11)$$

式中の D をその曲線のフラクタル次元と定義する。個数 $N(r)$ と r^{-D} が比例関係にあるならば、その自然対数をとれば式 (12) となるので、 $\log N(r)$ と $\log r$ の関係は、両対数線図上において、 $-D$ を比例定数、 c を切片とする 1 次式で表される。

$$\log N(r) = -D \log r + \log c \quad (12)$$

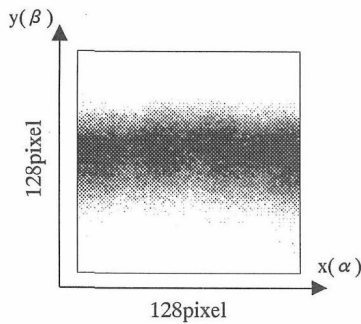


Fig. 5. Whole ring image sampled around diffraction peak for 2D-FFT fractal analysis.

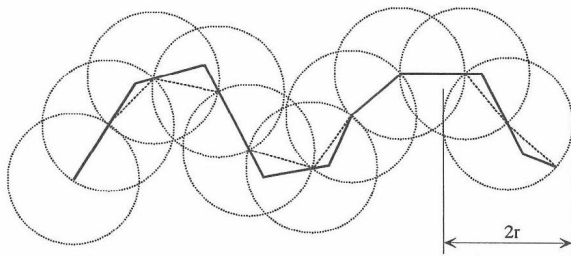


Fig. 6. Illustration on concept of measurement of fractal dimension by the yardstick method.

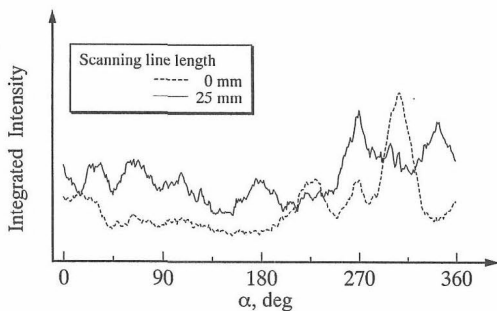


Fig. 7. Linear data sampled for yardstick fractal analysis.

実際には、対象とする積分強度分布の形態について、半径 r の尺度で近似した円の総数 $N(r)$ を測定し、両対数線図上にプロットする。このとき、両者の間に直線関係が成り立っていれば、この図形はフラクタル特性を有していることになる。本研究では、最小自乗近似によって式 (12) に示される負の傾き ($-D$) を求め、これよりフラクタル次元 D を算出した。

なお、回折環画像が有する一次元フラクタル用データとして半価幅、半価幅時の回折強度などのパラメータを使用することも可能である。しかし本研究では、予め行った予備実験の結果より回折環全周の積分強度の有用性を確認したので以下これについてのみ述べる。

3.3 実験結果および考察

Fig. 8 に線上揺動距離と応力値のバラツキとの関係を示す。図の横軸は線上揺動距離、縦軸は各 5 回測定の実験値を示し、エラーバーは 68.3% の信頼限界区間を表す。この応力測定結果から、揺動の長さを十分に得ることによって応力値が収束し、信頼区間の小さい安定した傾向が得られることが分かる。

一方、2D-FFT 法を用いてフラクタル解析した結果を Fig. 9 に示す。この結果から、揺動距離の増加に伴って

回折環形状が改善するにつれて、フラクタル次元値の収束は確認できるが、平均的な次元は一定値を示しており、回折環形状と本方法によるフラクタル次元値との相関は確認できない。このとき、抽出した斑点状の回折環画像と連続的な回折環画像とを比較すると、その変化の領域は画像の一部であり、画像全体のほんの数%に過ぎない。そのため回折環形状の変化を捉えにくく、フラクタル次元には反映されないと考えられる。また、解析された次元値の変化量が大きいことも問題点である。次に、Yardstick 法による結果を Fig. 10 に示す。なお、図中の値は、応力解析と同条件のソフトウェア揺動（前後 10 度ずつ）¹⁸⁾ を行った積分強度データを用いて、解析した結果である。この結果、全体的に回折環形状の変化とともに次元も変化していると言える。また、応力値の結果 (Fig. 8) と非常に類似した傾向を示している。したがって、回折環形状の変化をうまく捉えられるフラクタル解析法として Yardstick 法が適切であると考えられる。また、フラクタル解析に用いる線形データとしては、回折環全周の積分強度が有効であることも確認できた。

Yardstick 法による結果から、線上揺動距離の増加に伴い、フラクタル次元値は約 $D = 1.07$ で収束していることがわかる。 D の値が 1.05 を下回っている範囲において

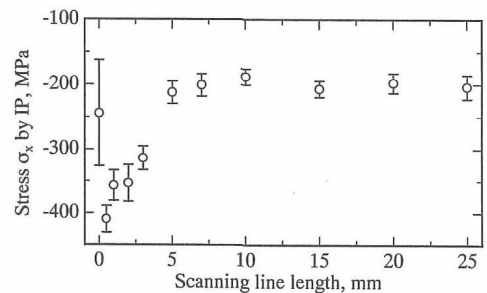


Fig. 8. Plots of stress σ_x vs. scanning line length.

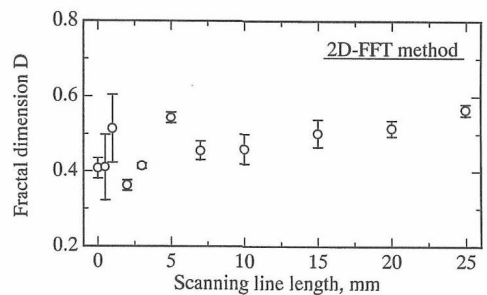


Fig. 9. Results of fractal analysis by 2D-FFT method.

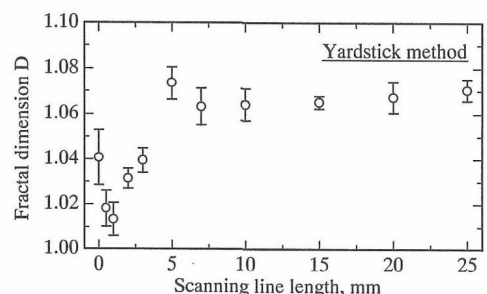


Fig. 10. Results of fractal analysis by yardstick method.

は、応力値のバラツキも大きいことから、IP測定に必要な回折環の状態をフラクタル次元で表す場合、 D は1.05以上と考えられる。また、このような D 値に対応する最小線上揺動距離は、本試験片の場合には約4.5mmと推察できる。

なお、同様の検討を平均結晶粒径が10, 50, 100 μm の試験片についても行った結果、上記と同様な結果が得られており、本方法が他の結晶粒径にも有効であることを確認している。

4 粗大結晶粒材料の残留応力分布の測定

4.1 測定方法

本測定では8 \times 8mm²の正方形領域をCT再構成領域(X線照射域)として、応力分布の測定を行った。このとき、プロジェクションのライン間隔(ΔX)を1mmとした場合、そのライン数(X_n)は次式より12本である。なお、式中の S_n は再構成領域の一辺の長さを表す。

$$X_n = \sqrt{2} \frac{S_n}{\Delta X} \quad (13)$$

また、この場合のライン長さ(線上揺動長さ $l(X, \theta)$)は中心位置からの距離 X および θ 角によって異なり、 θ 角が45度もしくは135度のときに $X = \pm 0.5\text{mm}$ で最大(10.31mm)、同様に $X = \pm 5.5\text{mm}$ で最小(0.50mm)となる。しかしながら、前節の最小線上揺動距離の実験結果から、約4.5mm以下の線上揺動の測定では精度良い応力値が得られず、CT測定には不十分であることが予測される。そのため、揺動距離が不足する再構成領域両端の1もしくは2本のプロジェクションデータについては、その代用として、測定可能なデータ(揺動長さが5mm以上のデータ)の平均値を用いてその方向のプロジェクションデータとした。したがって、CT再構成計算過程の都合上、本来はライン数を12本とする必要があるが、ライン数は全て8本として測定を行うこととした。また、任意角度 θ 方向数は、Table IIIに示すように15度間隔で全12方向とした。

なお、本実験における試験片は平均結晶粒径が約200 μm のもの(寸法および熱処理条件は前節と同様)を使用し、再構成領域以外の部分はビニールテープでマス

キングを施した。X線発生装置を始め、使用した装置および光学系は、前節の線上揺動実験の際と全て同様である。また、本測定に必要な任意 θ 方向の斜め移動については、X軸およびZ軸の両軸に設定された2個のオプトマイクを交互に駆動することによって可能とした。

以上の方法で測定を行い、得られた回折環から $\cos\alpha$ 法を用いて各線上の平均応力値を算出した。次に、求めた応力値に線上揺動距離 $l(X, \theta)$ を乗じることにより、各 θ 方向のプロジェクションを求めた。このようにして得られたプロジェクションから、CT理論を用いて残留応力分布の再構成を行った。

4.2 測定結果

ここで、 θ 方向が0, 45, 90, 135度のときの平均応力分布をFig. 12に示す。図の横軸は中心位置からの距離 X 、縦軸は各ライン上の平均応力値 $\sigma_x^{IP}(X, \theta)$ を表す。その結果、いずれの θ 角度においても多少のバラツキはあるものの、その応力値は約-150MPaであった。さらに、これらの平均応力分布を基礎データとして、揺動距離を乗ずることにより求めたプロジェクションをFig. 13に示す。これらのプロジェクションの傾向として、下に凸の分布形状を示していることが分かる。実際の応力分布は、Fig. 12で示されるように、応力値がほぼ等しいが、各プロジェクションはその応力値に線上揺動した長さを乗じため、異なった分布形状となる。つまり、 θ が0度および90度の場合のライン長さは全て等しいが(8mm)、その他の θ 角度においては、 $X = 0\text{mm}$ を中心に直線的に減少する。したがって、今回のようなほぼ一様な負の応力分布を示すプロジェクションにおいては、下に凸の分布形状を示すこととなる。

以上のプロジェクションを全12方向について求め、CT理論によって応力分布の再構成を行った。その結果をFig. 14に示す。測定領域内の応力値は約-150MPaで一定値を示した。この値は、あらかじめ通常の応力測定法($\sin^2\psi$ 法)において4 \times 6mmスリットを用いて測定した値とほぼ同値であった。また、本実験で使用した試験片表面は、局所的な機械加工などの表面処理を施していないため、残留応力分布はほぼ一定であると推測される。これらのことから、本測定によって得られた残留応力分布は概ね妥当なものであると言える。

以上の結果、結晶粒径が200 μm 程度で均一な圧縮残留応力を有する材料の表面における2次元的な残留応力分布が、IPおよび $\cos\alpha$ 法による複数の線測定データのCT解析を経て再構成可能であることが実証された。よって前報の結果と併せて考えると、粗大結晶粒材料上の不均一な応力分布の測定が本法によって可能となる見通しが得られた。

なお、本方法の今後の適用先として、微細な結晶粒からなる材料に細束X線を使用して線測定を行うことにより、微小部の応力分布測定法としても利用できる可能性があるものと考えられる。

5 結 言

本研究では、試料平面揺動法を用いて測定した複数の線上の平均応力から、コンピュータトモグラフィの理論によって、粗大結晶粒材料表面の2次元的な残留応力分布を求める方法について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 最小線上揺動距離(精度良い応力値を得るため

Table III. Conditions of X-ray computerized tomography.

Number of X-line	8 ($\Delta X=1\text{mm}$)
Number of θ angle	12 ($\Delta\theta=15\text{deg}$)
θ angle, deg	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 105, 120, 135, 150, 165

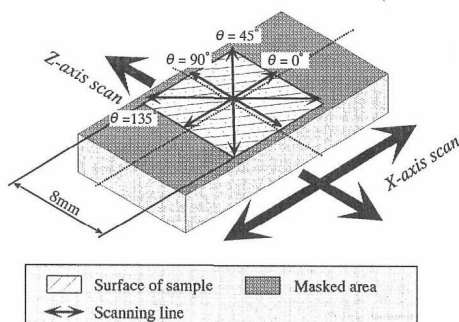


Fig. 11. Irradiated area of specimen and locations of X-ray measurement.

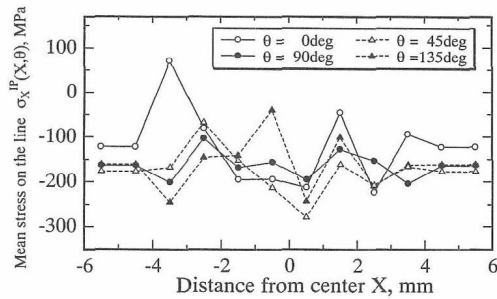


Fig. 12. Mean stresses on the lines obtained by the present method ($\theta = 0, 45, 90, 135 \text{ deg}$)

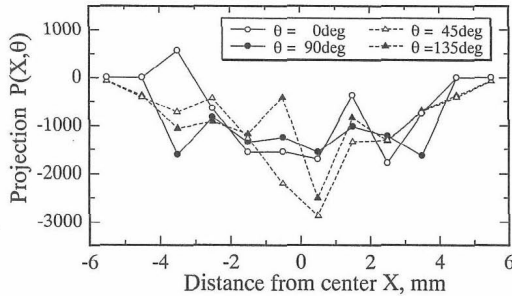


Fig. 13. Projection $p(X, \theta)$ obtained by the present method ($\theta = 0, 45, 90, 135 \text{ deg}$)

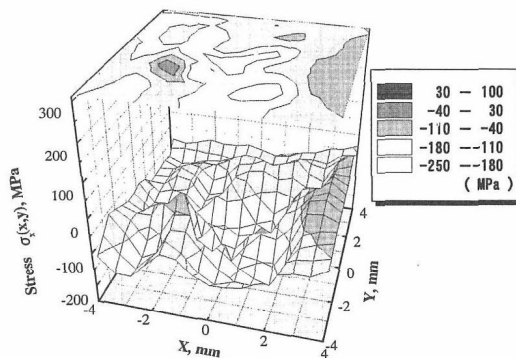


Fig. 14. Distribution of residual stress $\sigma_x(x, y)$ in surface of specimen obtained by the present method.

に最低限必要な揺動長さ)を決定するために、回折環形状をフラクタル次元で評価した。その結果、Yardstick法を用いることにより、回折環形状とフラクタル次元との相関関係および応力値のパラッキとの相関関係が明確に確認できた。また、揺動距離の増加に伴い、フラクタル次元値 D が約 1.07 で収束していることから、 $D = 1.07$ を示すような回折環の状態であれば、精度良い応力値が算出可能である。

(2) 均一な圧縮残留応力を持った平均粒径 $200\mu\text{m}$ の試料を用いて、CT理論による残留応力分布の測定を行った結果、本測定方法が有効であることが確認できた。よって、更に粗大な結晶粒を有する材料においても、最

小線上揺動距離以上のライン長さが確保できる再構成領域を用いれば、本方法によって残留応力分布測定が可能であると考えられる。

最後に、本研究に対して献身的に協力された金沢大学大学院学生・安川昇一氏(現在 リガク電機株)に謝意を表す。

参考文献

- 1) M. Sonoda, M. Takano, J. Miyahara and H. Kato, Radiography, **148**, 833 (1983).
- 2) 雨宮慶幸, 神谷信夫, 宮原諄二, 応用物理, **55**, 957 (1986).
- 3) Y. Amemiya, N. Kamiya and Y. Satow, Nucl. Instr. and Meth., A, **246**, 572 (1986).
- 4) 平 修二, 田中啓介, 山崎利春, 材料, **27**, 251 (1978).
- 5) 吉岡靖夫, 新開 毅, 大谷真一, 日本材料学会第 26 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.122 (1989).
- 6) 吉岡靖夫, 大谷真一, 新開 毅, 非破壊検査, **39**, 666 (1990).
- 7) 吉岡靖夫, 大谷真一, 長谷川賢一, 笹野睦雄, 日本材料学会第 27 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.98 (1990).
- 8) 吉岡靖夫, 新開 毅, 大谷真一, 日本非破壊検査協会第 22 回応力ひずみ測定シンポジウム, p.95 (1990).
- 9) 吉岡靖夫, 大谷真一, 篠原充裕, 門間輝聡, 日本材料学会第 28 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.1 (1992).
- 10) Y. Yosioka, S. Ohya, K. Hasegawa and M. Sasano, Residual Stress 3, p.985 (1992).
- 11) 吉岡靖夫, 大谷真一, 古川勝久, 日本材料学会第 29 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.167 (1993).
- 12) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 材料, **44**, 1138 (1995).
- 13) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 日本機械学会論文集, A-**61**, 394 (1995).
- 14) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 日本機械学会論文集, A-**62**, 2741 (1996).
- 15) 佐々木敏彦, 後藤時政, 田畑裕之, 広瀬幸雄, 材料, **46**, 756 (1997).
- 16) 後藤時政, 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 長嶋晋一, 日本機械学会論文集, A-**64**, 1120 (1998).
- 17) 後藤時政, 佐々木敏彦, 丸山公一, 広瀬幸雄, 材料, **47**, 1770 (1998).
- 18) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 安川昇一, 日本機械学会論文集, A-**63**, 533 (1997).
- 19) A. M. Cormack, J. Appl. Phys., **34**, 2722 (1963).
- 20) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 日本機械学会論文集, A-**63**, 2196 (1997).
- 21) 黒瀬雅司, 津田政明, 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 吉岡靖夫, 材料, **43**, 1489 (1994).
- 22) 津田政明, 広瀬幸雄, 黒瀬雅司, 松岡三郎, 黒部利次, 田中啓介, 材料, **40**, 1066 (1991).