方向性けい素鋼板の塑性変形とX線応力測定*

本 田 和 男** 細 川 智 生*** 皿 井 孝 明**

Plastic Deformation and X-Ray Stress Measurement of
Grain Oriented Silicon Steel

by

Kazuo HONDA

(Faculty of Engineering, Okayama University, Okayama)

Norio HOSOKAWA

(Okayama College of Science, Okayama)

and Takaaki SARAI

(Faculty of Engineering, Okayama University, Okayama)

For the purpose of stress measurements in a particular grain of metallic materials or in a few grains of grain oriented materials, the strain conditions in individual grains were analyzed in terms of crystallography. The analytical results were examined experimentally by X-ray stress measurements which were carried out on the grain oriented silicon steel sheets being in the state of uniaxial plastic deformation.

In the case that the silicon steel sheets were stressed in parallel to the rolling direction, it was found experimentally that the stress in each grain could be regarded as constant and nearly equal to the applied stress. This tendency was also recognized in the analytical results of the stress in grains calculated on the assumptions of the Sachs' and Taylor's models, and the stress in both models agreed with those measured by the X-rays.

In the case that the tensile axis was selected coincident with the direction perpendicular to the rolling one in the plane of the sheet, the measured values indicated a large amount of scattering due to the dispersion of the stress in each grain. Although the results from the Taylor's model showed a similar tendency, the amount of scattering from this model was larger than the measured one. On the other hand, no scattering was recognized in the results from the Sachs' model. In this case, the stress of the specimen in bulk could be obtained from the averaged values of the lattice strain over several times of measurement.

(Received Aug. 25, 1980)

キー・ワード：塑性変形，X線応力測定，方向性けい素鋼板，格子ひずみ，変形モデル

1 緒 言

一般に用いられる工業材料は多結晶体であり，その変形および破壊挙動は，それを構成する個々の結晶の力学的挙動と密接に関係している。すなわち，試料の巨視的な挙動は各結晶の応力およびひずみの平均的な性質として表され，塑性変形におけるひずみ比の異方性などは集合組織と，またぜい性破壊強度の異方性は¹⁾へき開面の方位分布とそれぞれ関連づけて考察されている。さらに，材料の破壊について考える場合にも，き裂先端近傍における応力状態を正確に把握し，その

挙動を考察する必要があることから，多結晶体に含まれる個々の結晶の変形挙動あるいは特定の結晶粒における応力状態を知ることは，材料強度の各分野において非常に重要と考えられる。

このような個々の結晶の応力値を実験的に求めるためには，X線応力測定法が最も有力な方法と考えられるが，通常の測定方法では解析に必要な回折線を得ることは不可能であり，測定対象とする結晶の応力およびひずみ状態を結晶学的に解析する必要がある。また，このような微小領域の応力測定だけでなく，非常に強い優先方位をもつ材料の応力測定に際しても，任意にX線入射角を定める通常の方法では回折強度が得られず，試料を特定の方位を有する結晶群とみなし，その

* 原稿受理 昭和55年8月25日

** 正 会 員 岡山大学工学部 岡山市津島

*** 正 会 員 岡山理科大学 岡山市理大町

応力値を測定する必要がある。

そこで、本報告では多結晶体中の特定の結晶粒あるいは非常に強い優先方位をもつ多結晶材料の応力値を測定することを目的として、個々の結晶におけるX線のひずみ解析からその方法を考察した。さらに、一例として $\{110\}$ $\langle 001 \rangle$ 優先方位をもつ方向性けい素鋼板の引張塑性変形における負荷応力値を測定し、本解析方法の妥当性を実験的に検討した。

2 実験および解析方法

2.1 供試材および試験片

本実験には試料面（圧延面）が $\{110\}$ 、圧延方向が $\langle 001 \rangle$ と各結晶の方位がほぼ等しい磁心材料である方向性けい素鋼板を用い、試料面内で圧延方向およびそれと直角方向が Fig. 1 に示す試験片の引張軸方向とそれぞれ一致するように試料を切り出した。さらに、所定の形状寸法に機械加工を施し、エメリー紙による研磨の後、試験片平行部を電解研磨により最終的に仕上げ実験に供した。

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

Table I. Chemical composition of grain oriented silicon steel (wt.%).

C	Si	Mn	P	Cu
0.002	3.19	0.06	0.016	0.016

Table II. Mechanical properties of grain oriented silicon steel. R.D. is the rolling direction and T.D. is the transverse one in the plane of the sheet.

	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
R.D.	34.2	36.0	12.7
T.D.	34.9	40.1	39.2

Table I, II に試料の化学成分および圧延方向 (R.D.) と直角方向 (T.D.) の機械的性質をそれぞれ示す。

2.2 X線による格子ひずみの測定

まず、個々の結晶における変形状態を考察するために、試料内の三軸応力下にある一つの結晶に対し xyz 軸を考え、各方向を結晶の主軸に一致させてとる。 $P(abc)$ はX線回折面の法線方向すなわち格子ひずみの測定方向であり、試料表面法線方向 $Z(l_3m_3n_3)$ とのなす角を ϕ とする。また、測定方向を試料面に投影した方向を $X(l_1m_1n_1)$ とし、試料面上でそれと直角な

方向を $Y(l_2m_2n_2)$ とする XYZ 座標系を考える。ここで、各方向の括弧内の値は xyz 座標系における方向余弦である。X線回折にあずかる結晶の P 方向の垂直ひずみ ε_ϕ は、 XYZ 座標系の応力成分 σ_{ij} (X, Y, Z 方向をそれぞれ添字 1, 2, 3 で表し、 $\sigma_{ij} = \sigma_i$ ($i=j$), $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$ ($i \neq j$)) を用いて表すことができ、立方晶系に対してはその対称性から3個の弾性コンプライアンス定数 S_{11} , S_{12} および S_{44} を用いて

$$\varepsilon_\phi = \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) (M_{11}\sigma_1 + M_{22}\sigma_2 + 2M_{12}\tau_{12}) + S_{12}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} S_{44}\sigma_1 \sin^2 \phi \quad (1)$$

$$M_{ij} = a^2 l_i l_j + b^2 m_i m_j + c^2 n_i n_j$$

と与えられる。多結晶体の場合、平均格子ひずみ $\overline{\varepsilon_\phi}$ を厳密に得るには、X線回折にあずかる各結晶の ε_ϕ を(1)式より求め、その平均値を計算すればよい⁴⁾⁵⁾。しかし、各結晶の方位がほぼ等しく、それらの変形状態を同一と考えられる試料では、平均格子ひずみ $\overline{\varepsilon_\phi}$ を試料内の一結晶について求めた(1)式の ε_ϕ とほぼ等しいとみなすことができ、一つの結晶における場合と同様に、前述の各方位の幾何学的条件が満足されるときにおいてのみX線回折を生じ $\overline{\varepsilon_\phi}$ を測定することができる。

ここで、試料面上に試料の特性から決定した座標軸 R (たとえば圧延方向など) をとり、その xyz 座標系における方向余弦を (rst) とし、試料面上で R と直角な方向を T 、また、試料表面法線方向を N 、その方向余弦を (uvw) とする。なお、 N は前述の $Z(l_3m_3n_3)$ と同一の方向であり、 $l_3=u$, $m_3=v$, $n_3=w$ である。 X 軸と R 軸のなす角を φ とすると、 φ は

$$\varphi = \cos^{-1}(rl_1 + sm_1 + tn_1) \quad (2)$$

と求められ、 XYZ 座標系における応力成分 σ_1 , σ_2 および τ_{12} は RTN 座標系における応力成分 σ_R , σ_T および τ_{RT} を用いて

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_R \cos^2 \varphi + \sigma_T \sin^2 \varphi + \tau_{RT} \sin 2\varphi \\ \sigma_2 &= \sigma_R \sin^2 \varphi + \sigma_T \cos^2 \varphi - \tau_{RT} \sin 2\varphi \\ \tau_{12} &= -(\sigma_R - \sigma_T) \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{RT} \cos 2\varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と与えられる。また、 X, Y 軸の方向余弦 $(l_1m_1n_1)$ および $(l_2m_2n_2)$ は、試料表面法線方向 $N(uvw)$ と測定回折面 $P(abc)$ により決定され

$$\left. \begin{aligned} l_2 &= (vc - wb) / \sin \phi \\ m_2 &= (wa - uc) / \sin \phi \\ n_2 &= (ub - va) / \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

および

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= m_2 n_3 - m_3 n_2 \\ m_1 &= n_2 l_3 - n_3 l_2 \\ n_1 &= l_2 m_3 - l_3 m_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。ここで、(4)式中の試料表面法線方向と測定方

向のなす角 ψ は

$$\psi = \cos^{-1}(au + bv + cw) \quad (6)$$

と求められる。したがって、(5)式より(2)式の φ を、また(4)、(5)式より(1)式における M_{11} 、 M_{22} および M_{12} の各値を計算することができる。ここで、 ε_ψ は(3)式を(1)式に代入することにより

$$\varepsilon_\psi = A\sigma_R + B\sigma_T + C\tau_{RT} \quad (7)$$

ただし、 $S = S_{11} - S_{12} - 1/2 S_{44}$ として

$$A = S(\cos^2\varphi M_{11} + \sin^2\varphi M_{22} - \sin 2\varphi M_{12})$$

$$+ S_{12} + \frac{1}{2} S_{44} \cos^2\varphi \sin^2\psi$$

$$B = S(\sin^2\varphi M_{11} + \cos^2\varphi M_{22} + \sin 2\varphi M_{12})$$

$$+ S_{12} + \frac{1}{2} S_{44} \sin^2\varphi \sin^2\psi$$

$$C = S\{\sin 2\varphi(M_{11} - M_{22}) + 2 \cos 2\varphi M_{12}\}$$

$$+ \frac{1}{2} S_{44} \sin 2\varphi \sin^2\psi$$

と表され、 ε_ψ は σ_R 、 σ_T および τ_{RT} に関する線形の方程式となる。したがって、(2)、(6)式より求められる φ および ψ を測定条件として3種類以上の回折面において ε_ψ を測定することにより、(7)式から最小二乗法を用いてその応力成分を決定することができる。また、 ε_ψ の絶対値を測定することが困難な場合には(7)式を

$$\varepsilon_{\psi_i} - \varepsilon_{\psi_j} = (A_i - A_j)\sigma_R + (B_i - B_j)\sigma_T + (C_i - C_j)\tau_{RT} \quad (8)$$

として取り扱う必要があり、この場合の測定には4種類以上の回折面が必要となる。

特に、応力状態が一軸であることがわかっている場合には、 R 方向として一軸負荷方向をとると(7)式は非常に簡単な式となり

$$\varepsilon_\psi = \left\{ \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) (\cos^2\varphi M_{11} + \sin^2\varphi M_{22} - \sin 2\varphi M_{12}) + S_{12} + \frac{1}{2} S_{44} \cos^2\varphi \sin^2\psi \right\} \sigma_R \quad (9)$$

と表される。したがって、横軸に $(S_{11} - S_{12} - S_{44}/2)(\cos^2\varphi M_{11} + \sin^2\varphi M_{22} - \sin 2\varphi M_{12}) + (S_{44}/2) \cos^2\varphi \sin^2\psi$ 、縦軸に ε_ψ をとれば、両者の関係は直線となり、そのこう配 M より $\sigma = M$ として、また縦軸に回折角 2θ をとった場合には、 θ_0 を無ひずみ状態での回折角として $\sigma = -Mcot\theta_0/2$ として従来と類似の方法で応力値を算出することができる。

Table III は、方向性けい素鋼板を対象とし試料表面法線方向を $N(1/\sqrt{2} \ 1/\sqrt{2} \ 0)$ 、試料の特性からその圧延方向を $R(001)$ とした場合について、測定条件を(2)、(6)式より求めた値および(7)式の計算に必要な各値を計算したものである。ここでは、通常の数値法によるX線応力測定装置を用いる場合を考え、測定回折面を(211)および(310)面とそれぞれ等価な面とし、 ε_ψ の測定可能な各回折面について前述の値を求めた。表

Table III. Calculated results of measuring conditions in each diffraction plane for X-ray stress measurement. And also representing the values of coefficients in Eq. (7) that is used for the calculation of X-ray stress in grain oriented silicon steel sheet.

Diffraction plane	ψ (deg.)	φ (deg.)	A ($\times 10^{-5} \text{mm}^2/\text{kgf}$)	B ($\times 10^{-5} \text{mm}^2/\text{kgf}$)	C ($\times 10^{-5} \text{mm}^2/\text{kgf}$)
(211) (12 $\bar{1}$)	30.0	35.3 -144.7	-1.07	0.07	1.00
(2 $\bar{1}\bar{1}$) (121)	30.0	144.7 -35.3	-1.07	0.07	-1.00
(112) (1 $\bar{1}\bar{2}$)	54.7	0.0 180.0	4.02	-1.78	0.00
(310) (130)	26.6	90.0 -90.0	-2.77	1.06	0.00
(301) (03 $\bar{1}$)	47.9	64.8 -115.2	-1.75	1.82	1.79
(30 $\bar{1}$) (031)	47.9	115.2 -64.8	-1.75	1.82	-1.79

からわかるように、(211)および(12 $\bar{1}$)面を測定回折面を選ぶと、 A 、 B および C の値はそれぞれ等しく、これらの面において求めた ε_ψ は平面応力状態の場合には等価となる。同様に、(2 $\bar{1}\bar{1}$)と(121)、(112)と(1 $\bar{1}\bar{2}$)および(310)と(130)なども ε_ψ はそれぞれ等価となり、このような場合には表に示す6種類の回折面において異なる ε_ψ を測定することができる。また、主応力方向が圧延方向およびそれと直角方向に一致する場合には、 A および B の値のみを利用するため、さらに(211)と(2 $\bar{1}\bar{1}$)および(301)と(30 $\bar{1}$)面における ε_ψ もそれぞれ等価となる。したがって、試料を圧延方向および試料面内でそれと直角方向に一軸変形を与える場合(以下 R.D. 材および T.D. 材と記す)には、表中の(211)、(112)、(310)および(301)の各回折面において応力測定に必要な異なる ε_ψ を得ることができる。

方向性けい素鋼板のように、非常に強い優先方位をもっているが、結晶方位が完全に一致していない場合には、そのばらつきを考慮する必要がある。そこで、一軸変形時の各結晶の応力値を Sachs のすべり変形モデルにより計算すると、R.D.、T.D. 材のいずれもほぼ一定となる。一方、Taylor モデルでは両材の間で変形様式が異なり、R.D. 材では Sachs モデルと同様に各結晶の応力値はほぼ等しいが、T.D. 材ではわずかな方位の相違あるいはひずみ比の相違により応力値が大きく異なる。したがって、本解析方法の実験的検討には個々の結晶の応力値がわかっている必要があり、R.D. 材では両モデルとも各結晶の応力値が負荷応力値にほぼ等しいと考えられることを示しているが、

Fig. 2. Lattice strain of grain oriented silicon steel sheet that was stressed in parallel to the rolling direction.

T. D. 材を適用するにはさらに詳細な検討を要する。

2・3 実験装置および実験方法

本実験では、横型の小型引張試験機により、試料の圧延方向およびそれと直角方向に一軸荷重を加えた状態で、通常のX線応力測定装置を用いて格子ひずみの測定を行った。その際、Fig. 1 に示す試験片平行部のX線照射域の両側にひずみゲージを取り付け、試験片に生ずるひずみを正確に測定した。

格子ひずみの測定は、特性X線としてCrK α およびCoK α 線を用い、前述の4種類の回折面において行った。測定条件はシンチレーション計数管を4 deg/minで走査させ、X線照射域直径1 mm ϕ に対する回折線を1 secの時定数で記録紙上に描かせるもので、各回折面に対し ψ および φ の両方を満足するX線回折強度最大の位置付近において、両者の角度をわずかに変化させ5～6回の測定を行い、得られた各回折強度曲線の最大強度を示す回折角の平均値から格子ひずみ $\bar{\epsilon}_\psi$ の変化を計算した。

このようにして、本実験ではR. D. 材に対し、 $\epsilon = 1, 2$ および 3% 、また T. D. 材に対しては $\epsilon = 3\%$ の一軸引張りによる塑性変形状態において応力測定を行い、前述の解析結果に実験的検討を加えた。

3 実験結果および考察

Fig. 2 は試料の圧延方向 (R. D.) に $\epsilon = 1\%$ および 3% の一軸引張変形を与えた場合の $\bar{\epsilon}_\psi$ を示したもので、横軸には(9)式に基づいて $(S_{11}-S_{12}-S_{44}/2)(\cos^2\varphi M_{11}+\sin^2\varphi M_{22}-\sin 2\varphi M_{12}) + (S_{44}/2)\cos^2\psi \sin^2\psi$ の値をとっている。ここで、図中の実線は(9)式の応力 σ_R を巨視的な応力値 σ_R^b として計算した $\bar{\epsilon}_\psi$ であり、白丸は数個の結晶粒に対する平均格子ひずみ $\bar{\epsilon}_\psi$ の実測値である。図より、実測値は解析結果と対応し、図の横軸の値とはほぼ直線関係が得られることがわかる。

Table IV. Comparison of X-ray stress with applied stress in grain oriented silicon steel sheet that was stressed in parallel to the rolling direction.

	X-ray stress (kgf/mm ²)		Applied stress (kgf/mm ²)
	CrK α and CoK α	CrK α	
$\epsilon = 1\%$	32.8	31.5	34.4
$\epsilon = 2\%$	33.5	32.9	35.0
$\epsilon = 3\%$	35.5	36.3	35.6

このことは、 2% 変形時においてもほぼ同様の傾向であった。Table IV は、 $\bar{\epsilon}_\psi$ の実測値を最小二乗法により直線近似し、その傾きからX線の応力 σ_x を計算したもので、 σ_x は CrK α および CoK α 線による2種類の回折線から求めた値と CrK α 線のみによる値をそれぞれ示した。なお、表には各変形量における σ_R^b の実測値も併記した。表からわかるように、CrK α および CoK α 線より求めた R. D. 材のX線的な応力値はいずれの場合も負荷応力値にほぼ等しく、その差は測定誤差と同程度である。また、これらの図における $\bar{\epsilon}_\psi$ の測定値は変形前に実測した格子面間距離を基準にしたもので、このように変形前の状態を測定できる場合には、CrK α および CoK α 線による2種類の回折線を利用することができる。しかし、残留応力の測定などのように初期状態が不明の場合には、X線応力測定法の特徴から(8)式を採用する必要がある。本実験の場合、CrK α の回折線より得られる値は、2種類の回折線を用いた場合に比較して誤差は幾分か大きくなるがほぼ負荷応力値と対応している。一方、CoK α の回折線より得られる応力値は非常に誤差が大きく、 1% 変形時において 27.1 kgf/mm^2 などである。これは、CoK α 線による $\bar{\epsilon}_\psi$ に対する図の横軸間の距離が、CrK α 線の場合の約 $1/5$ と非常に小さいため誤差が大

きくなったものと考えられ、このような場合の応力測定には $\text{CoK}\alpha$ 線は適さない。したがって、1種類の特性X線により応力測定を行う場合には、使用すべきX線は結晶方位によりかなり制限を受け、測定条件を考慮して選択する必要がある。

多軸応力状態の場合には、(7)式からわかるように3個以上の $\overline{\epsilon}_\phi$ の測定が必要であるが、一軸応力に対して等価な $\overline{\epsilon}_\phi$ が測定される回折面も利用できるため、 $\text{CrK}\alpha$ および $\text{CoK}\alpha$ 線による回折線それぞれ3個の $\overline{\epsilon}_\phi$ を得ることができ、原理的には1種類の特性X線により応力測定が可能となる。しかし、測定値の数を増すことにより測定精度が向上することから、一般的には可能な限り多くの回折線を利用することが望ましい。一例として、Fig. 2 (b)に示す R. D. 材の3%変形時の測定結果から、(7)式を用いて応力成分を計算すると $\sigma_R = 34.1$, $\sigma_T = -1.4$ および $\tau_{RT} = -5.0 \text{ kgf/mm}^2$ となり、ほぼ一軸応力状態を満足していることがわかる。本実験では、測定装置の関係から図の4種類の回折面において $\overline{\epsilon}_\phi$ を求めたが、実際には6種類の $\overline{\epsilon}_\phi$ を測定することが可能であり、その場合には測定精度がさらに向上すると思われる。

本計算結果は、各結晶の方位が完全に一致した場合のものであるが、実際の試料ではいくぶんのばらつきがあると考えるのが妥当である。そこで、この方位のばらつきが ϵ_ϕ に及ぼす影響を以下のように検討した。すなわち、空間内のあらゆる結晶方位のうち試料表面法線方向が $\langle 110 \rangle$ から 5° の範囲にあり、さらに圧延方向が $\langle 001 \rangle$ より 5° 以内の結晶の応力値を Sachs⁸⁾ および Taylor⁹⁾ の塑性変形モデルを用いて計算した。R. D. 材では、いずれのモデルを用いても、各結晶の応力値 σ_R はほぼ等しく、そのばらつきは標準偏差で表して平均値 σ_R^b の約1~2%程度である。また、Taylor モデルでは各結晶の塑性ひずみを一定とするため、その応力状態は多軸となるが、 σ_T および τ_{RT} の標準偏差は σ_R^b のいずれも5%以下である。すなわち、R. D. 材ではこの程度の方位のばらつきが各結晶の変形状態に及ぼす影響は小さく、 5° の範囲内では回折にあずかる結晶の方位に関係なく実験結果と計算結果の対応が得られると考えられる。

つぎに、T. D. 材の $\epsilon = 3\%$ における同様の結果を Fig. 3 に示す。ここで、図の横軸は(7)式における σ_T の係数Bより S_{12} を除いた値とした。T. D. 材では、試験片およびX線照射位置の相違により測定値が異なり、図中の白丸で示す結果となった。R. D. 材では、このようなばらつきは比較的小さく、両材でその傾向が大きく異っている。T. D. 材に対して、R. D. 材と同様に方位のばらつきを 5° 以内として各結晶の応力値を計算すると、Sachs モデルでは R. D. 材と同様

Fig. 3. Lattice strain of grain oriented silicon steel sheet that was stressed in perpendicular to the rolling direction.

Fig. 4. Dispersion of yield stress in grain oriented silicon steel sheet that was stressed in perpendicular to the rolling direction.

にはほぼ一定で、負荷応力値にはほぼ等しく、実測値のばらつきを説明することはできない。一方、Taylor モデルによる計算結果は、その一例を Fig. 4 に示す。同図は、圧延方向を $\langle 001 \rangle$ として、試料表面法線方向を $\langle 110 \rangle$ より $0^\circ \sim 5^\circ$ まで変化させた場合の、各方位における降伏応力値を計算したもので、図の縦軸には σ_T および σ_R と臨界せん断応力 τ_c の比を、横軸には試料表面法線方向と $\langle 110 \rangle$ のなす角をそれぞれとっている。なお、 τ_{RT} は結晶方位に無関係に0である。図より、T. D. 材の応力状態は $\langle 110 \rangle$ から 2.2° 付近において大きく変化することがわかる。したがって、試料表面法線方向に $\langle 110 \rangle$ から 5° 以内のばらつきを考えた場合には、 $\sigma_T = 2\sigma_R$, $\tau_{RT} = 0$ および $\sigma_T = \tau_{RT} = 0$, $\sigma_R = -2.4\tau_c$ の二つの応力状態が計算されるこ

とになる。さらに、圧延方向が〈001〉のみでなく、前述のような結晶方位のばらつきを考え、同様の計算を 1° 間隔で行ったすべての結果から、 σ_T および σ_R のばらつきは標準偏差で σ_T^b のいずれも約80%となり、 τ_{RT} は約5%である。このように Taylor モデルでは、同一ひずみ比に対しても結晶方位のわずかな相違により応力状態が大きく異なり、それらの応力値より計算した格子ひずみの範囲を Fig. 3 に I で示す。一方、図中の実線は(7)式に $\sigma_T = \sigma_T^b$, $\sigma_R = \tau_{RT} = 0$ を代入して計算した ε_ϕ であり、これは Sachs モデルによる値と対応する。 $\overline{\varepsilon_\phi}$ の実測値は、Taylor モデルにより求めた値の分散より小さくなっているが、これは本実験に用いた試料の結晶粒径が約 1~4 mm と粗大であり、試験片の形状寸法から考えて、板厚方向には結晶粒が貫通し、また板幅方向に存在する結晶粒の数が非常に少いためと思われる。すなわち、本実験結果は試験片平行部の中央付近に存在する結晶粒から求めたものであるが、上述のことから中央部においても、隣接結晶粒との変形の異方性に基づく拘束は、結晶粒の細かい^{5,9)} 通常^{5,9)} の多結晶体に比較して小さいと考えられる。したがって、測定値のばらつきは、Taylor モデルにより定性的ではあるが説明することが可能なことから、本実験に用いた試料ではこの程度の方位のばらつきを考慮する必要がある。

このように、T.D. 材の測定値がばらつくのは、各結晶粒の応力値にばらつきがあるためと考えられ、そのような場合の各結晶粒の応力値を求めるには、同一照射域内で3個以上の ε_ϕ を測定し、(7)式からその値を算出すればよい。一方、巨視的な負荷応力値 σ_T^b を求める場合には、(7)式を平均化して考える必要があるが、 5° 程度の方位差では(7)式における A , B および C の値にそれほど大きな差はないため、(7)式は $\overline{\varepsilon_\phi} = A\overline{\sigma_R} + B\overline{\sigma_T} + C\overline{\tau_{RT}}$ と表すことができる。したがって、照射域を大きくして多くの結晶粒からの情報を測定するか、照射位置をかえた多くの結晶粒からの測定値を平均して上式を用いる必要がある。たとえば、Fig. 3 の各回折面に対し、測定値の数は少ないが、仮りにそれらの平均値を求め上式より各応力成分を計算すると、 $\overline{\sigma_T} = 30.0$, $\overline{\sigma_R} = -7.4$ および $\overline{\tau_{RT}} = 1.1 \text{ kgf/mm}^2$ となり、これらは巨視的負荷応力値 $\sigma_T^b = 36.6 \text{ kgf/mm}^2$ から考えてはほぼ妥当な値と考えられる。

4 結 言

多結晶金属材料の特定の結晶粒あるいは強度の優先方位をもつ多結晶材料の応力値を測定することを目的とし、個々の結晶のひずみ状態を結晶学的に解析した。さらに、方向性けい素鋼板の引張塑性変形を対象とし、X線回折法を用いて計算結果を実験的に検討することにより次の結果を得た。

(1) 特定の結晶粒あるいは強度の優先方位をもつ試料のX線応力測定では、結晶方位と格子ひずみの測定方向の幾何学的関係を満足する場合においてのみ回折線を得ることができる。格子ひずみ ε_ϕ は、試料の各応力成分に関する線形な方程式として表されるため、本解析方法に基づいて測定条件を決定し、3種類以上の回折面において ε_ϕ を求めることによりその応力値を算出できる。

(2) 方向性けい素鋼板の圧延方向に引張塑性変形を与えた場合、各結晶の応力値はほぼ一定で、巨視的な負荷応力値に等しいことが実験的に確認された。試料の方位解析は行っていないが、試料面および圧延方向の方位のばらつきを 5° 以内として、Sachs および Taylor の塑性変形モデルにより応力値を計算した結果は、両モデルとも同様の傾向を示し、この程度の結晶方位のばらつきはあるとしても本方法により得られる応力値とほぼ一致する。

(3) 一方、圧延方向に対し直角方向に引張る場合には、測定値にばらつきが認められる。圧延方向の場合と同様に、 5° 以内の方位のばらつきがあるとして、Taylor モデルより計算した分散の範囲内に実測値が含まれ、実験結果のばらつきを定性的に説明できることから、試料の方位のばらつきはこの程度のものと推定される。一方、Sachs モデルではこのばらつきがほとんどなく、実験結果を定性的にも説明することはできない。このような場合には、各結晶の格子ひずみの平均値を用いることにより、特定の結晶粒における場合と同様の方法で応力測定が可能である。

本研究を行うにあたり、材料の提供にご協力を賜った岡山大学工学部中田高義教授ならびに新日本製鉄(株)八幡製鉄所の関係者の方々に厚く感謝の意を表するとともに、実験に協力いただいた岡山大学大学院生、渡辺智代雄君に謝意を表します。

(昭和55年7月25日 第17回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 長島晋一, “集合組織”, p. 146 (1966) 日本金属学会
- 2) 稲垣裕輔, 栗原 極, 小指軍夫, 鉄と鋼, **61**, 991 (1975).
- 3) Barrett, C.S., “Structure of Metals”, p. 531 (1952) McGraw-Hill
- 4) 本田和男, 細川智生, 有間淳一, 常永寿伸, 材料, **18**, 1053 (1969).
- 5) 本田和男, 細川智生, 皿井孝明, 材料, **29**, 357 (1980).
- 6) 日本材料学会編, “X線材料強度学”, p. 209 (1973) 養賢堂
- 7) Sachs, G., Z. Verein. Deutsch. Ing., **72**, 734 (1928).
- 8) Taylor, G.I., J. Inst. Metals, **62**, 307 (1938).
- 9) 本田和男, 細川智生, 皿井孝明, 材料, **30**, 145 (1981).