異方性材料の弾性変形挙動について*

本 田 和 男** 細 川 智 生*** 皿 井 孝 明**

Elastic Deformation Behaviours of Anisotropic Materials

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)

Most industrial materials are usually polycrystalline and thus inherit the preferential crystallographic alignment of individual crystals, or preferred orientation and texture, from workings and heat treatments. If materials have such a texture, their physical and mechanical properties are affected not only by the anisotropy of single-crystal properties, but also by the interactions of each grain with the neighboring grains and grain boundaries. So, these anisotropic materials provide effective informations concerning the mechanism of deformation.

In the present paper, the mechanism of elastic deformation of anisotropic materials has been studied by using hot rolled steel plates having such anisotropic texture that would show more notable behaviour of deformation than in isotropic ones. The specimens were stressed stepwise in parallel as well as perpendicular to the rolling direction by using a tensile testing machine. At each stage of the stress application, X-ray beams were radiated to the center of specimen surface, and the X-ray elastic constants $\overline{\epsilon}_\phi/\sigma$ on the (211) and (310) diffraction planes were measured.

The behaviour of elastic deformation was discussed by comparing the experimental results with the analytical ones, and the effect of texture on $\overline{\epsilon}_\phi/\sigma$ was explained by this theoretical analysis of the results of (211) diffraction plane. On the other hand, from the results of (310) diffraction plane, it was concluded that the actual behaviour of elastic deformation of the anisotropic material used in this study fits comparatively closely to the uniform local stress model rather than to the uniform local strain model. And the disagreement between the uniform local stress model and the actual one remains less than the experimental errors.

(Received June 8, 1977)

キー・ワード：異方性材料，弾性異方性，変形機構，集合組織

1 緒 言

一般に用いられる工業材料は加工，熱処理などにより集合組織が形成され¹⁾，材料の諸性質に大きな影響を及ぼすことが広く知られている。金属材料は方位を異にする無数の結晶の集合体であり，結晶粒が充分小さく，その方位が無秩序に分布している場合には多結晶全体として等方的な性質をもっている。しかし，個々の結晶は異方性を有しているため，特定の方位関係にある結晶からの情報に基づくX線応力測定などにおいては，結晶の弾性異方性に起因して回折面依存性な

どの問題を生じることになる。³⁾⁻⁶⁾

集合組織を有する金属材料においては，それを構成する結晶がある規則性をもって配列するため，個々の結晶のもつ異方性および結晶粒相互の影響がその機械的性質に明確に現れるものと思われる。したがって，集合組織をもたない金属材料に比較して，これら異方性材料を用いて研究考察することは，多結晶金属材料の微視的領域における変形機構を知るための有効な手段と考えられる。

多結晶金属材料の変形機構を論ずるには，それに含まれる結晶粒相互間の拘束の状態を知ることが重要である。従来より基本的な変形モデルとして応力一定モデル⁷⁾，ひずみ一定モデル⁸⁾などが提案されており，この

* 原稿受理 昭和52年6月8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

二つのモデルを用いて異方性材料における変形機構の解析方法を確立するとともに、その妥当性について実験的に検討する必要がある。そのためには、X線回折を用いるのが最適であり、X線応力測定法における回折面依存性や集合組織を有する試料に対する $\epsilon_\phi - \sin^2\psi$ 線図のわん曲などの現象からも指摘されているように、結晶の弾性異方性および多結晶体全体としての異方性の影響を検討できると考えられる。

そこで、本報告ではX線回折にあずかる特定の方位関係を有する結晶に対し、変形機構として前述の二つのモデルを仮定し、結晶の弾性異方性と集合組織の存在を考慮したひずみ解析を行い、熱間圧延鋼板を用いた一軸引張変形による実験結果と比較検討することにより異方性材料の弾性変形挙動について考察した。

2 異方性材料におけるひずみ解析

試料内の三軸応力下にある一つの結晶を考え、Fig. 1 に示すように xyz 軸を結晶の主軸に一致させてとる。X線回折面の法線方向すなわち格子ひずみの測定方向を $P(abc)$ とし、測定方向を試料面に投影した方向を $X(l_1m_1n_1)$ 、試料面上でそれと直角な方向を $Y(l_2m_2n_2)$ 、および試料表面の法線方向を $Z(l_3m_3n_3)$ とする（ただし、測定方向と試料面が直交する場合は X 方向として試料面上の任意の方向とする）。前述の定義より格子ひずみの測定方向 P は $X-Z$ 平面上にあり、 Z 軸とのなす角を ψ とする。ここで (abc) , $(l_1m_1n_1)$ は P および X , Y , Z 方向の $x-y-z$ 座標系における方向余弦を表している。

Fig. 1. Principle relation of stress strain and orientations in crystal.

測定方向の垂直ひずみ ϵ_ϕ は、結晶の主軸に固定した $x-y-z$ 座標系におけるひずみの各成分を用いて

$$\epsilon_\phi = a^2\epsilon_x + b^2\epsilon_y + c^2\epsilon_z + bc\gamma_{yz} + ca\gamma_{zx} + ab\gamma_{xy} \quad (1)$$

$$\text{ただし } a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

で表される。このひずみの各成分は、Hookeの法則により $x-y-z$ 座標系における六つの応力成分の一次式で表され、とくに結晶系が立方晶の場合、その対称性からこれらは3個の定数のみで関係づけられる。²⁾ さらに、 $x-y-z$ および $X-Y-Z$ 座標系の間で応力成分の座標変

換を行うことにより、測定される格子ひずみ ϵ_ϕ を試料に固定した座標系での応力成分により表すことができる。すなわち、 X , Y , Z 方向をそれぞれ添字 1, 2, 3 で表すと

$$\begin{aligned} \epsilon_\phi = & \sum_i \sum_j \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) M_{ij} \sigma_{ij} + S_{12} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ & + \frac{1}{2} S_{44} (\sigma_1 \sin^2 \psi + \sigma_3 \cos^2 \psi + 2\tau_{31} \cos \psi \sin \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } \sigma_{ij} &= \sigma_i (i=j) \\ &= \tau_{ij} (i \neq j) \end{aligned}$$

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

となる。ここで、 S_{11} , S_{12} および S_{44} は立方晶系における材料固有の弾性コンプライアンス定数である。X線応力測定法の場合、回折にあずかる結晶粒は試料表面層の薄層であるため、試料表面法線方向の応力成分を $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$ と仮定すれば

$$\begin{aligned} \epsilon_\phi = & \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) (M_{11}\sigma_1 + M_{22}\sigma_2 + 2M_{12}\tau_{12}) \\ & + S_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} S_{44} \sigma_1 \sin^2 \psi \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

このような試料内の一結晶におけるひずみ解析をX線回折にあずかる多結晶体に適用するには、回折面の法線方向が $P(abc)$ 方向に一致する結晶についてその格子ひずみの平均値を求めればよい。そのためには、Fig. 1 に示されるように P 方向に垂直で Y 軸を含む面内で任意に Q 方向をとり、その $x-y-z$ 座標系における方向余弦を (rst) とし、 Y 軸とのなす角を α とする。したがって、回折面の法線方向を P 方向に固定し、この α の $0 \sim 2\pi$ の範囲について各 α の値に対する ϵ_ϕ にその結晶の存在確率 p を重みとして掛けて積分し平均値を求めれば、集合組織など結晶の方位に規則性のある場合でも各回折面における平均格子ひずみ $\overline{\epsilon_\phi}$ を計算することができる。

$$\overline{\epsilon_\phi} = \int_0^{2\pi} p \epsilon_\phi d\alpha \Big/ \int_0^{2\pi} p d\alpha \quad (4)$$

となる。

Fig. 1 に示される各方位間の幾何学的条件式において回折面の法線方向および Q 方向は固定するため、 (abc) , (rst) および ψ は既知で一定の値となり、 X , Y , Z 軸の方向余弦 $(l_i m_i n_i)$ を α の関数として解くことができる。したがって、(3)式における M_{ij} を α の関数として表すことができ、 σ_1 , σ_2 および τ_{12} と α

*1 p は全結晶に対する存在確率を表している。しかし、ここではすべての結晶についてその平均値を求めるのではなくX線回折に関与する一部の結晶について求めるため、回折に関与する結晶に対する存在確率は $p/\int p d\alpha$ で表される。また、後述の(8)式の分母は1に等しくなるが数値計算上の誤差および存在確率の代りに存在密度を用いる場合が多いため分母をつけて表している。

の関係が求まれば $\overline{\varepsilon}_\phi$ の値を(4)式より計算することができる。

そこで, 結晶方位と σ_1 , σ_2 および τ_{12} の関係を与える基本的な考え方として, Reuss および Voigt⁸⁾ により提案されている二つの変形モデルに基づいて, このひずみ解析を多結晶体へ適用する。

2・1 応力一定の考え方

Reuss は多結晶体を構成する各結晶粒に作用する応力は結晶の方位に関係なく一定で, 負荷応力に等しいとする応力一定のモデルを提案している。このモデルによると, (3)式における σ_1 , σ_2 および τ_{12} は α に無関係な定数となり(4)式の積分は簡単にでき, 次式より $\overline{\varepsilon}_\phi$ を計算することができる。

$$\overline{\varepsilon}_\phi = \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) (\overline{M}_{11} \sigma_1 + \overline{M}_{22} \sigma_2 + 2 \overline{M}_{12} \tau_{12}) + S_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} S_{44} \sigma_1 \sin^2 \psi \quad (5)$$

$$\text{ただし } \overline{M}_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} p M_{ij} d\alpha \quad (6)$$

この場合, 一軸引張変形を考え X 方向を引張軸方向にとると $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = 0$ および $\tau_{12} = 0$ となるため(5)式はさらに

$$\overline{\varepsilon}_\phi / \sigma = \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) \overline{M}_{11} + S_{12} + \frac{1}{2} S_{44} \sin^2 \psi \quad (6)$$

となる。

2・2 ひずみ一定の考え方⁸⁾

試料内の一結晶における応力とひずみの関係から, 前述の(2)式の計算方法と同様に試料に固定した座標系での応力とひずみの関係を求めると

$$\sigma_{pq} = \sum_i \sum_j \{ (C_{11} - C_{12} - 2C_{44}) M_{pqij} + C_{12} N_{pq} N_{ij} + C_{44} (N_{pi} N_{qj} + N_{pj} N_{qi}) \} \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } M_{pqij} &= l_p l_q l_i l_j + m_p m_q m_i m_j + n_p n_q n_i n_j \\ N_{ij} &= l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j = 1 \quad (i=j) \\ &= 0 \quad (i \neq j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_i \quad (i=j) \\ &= \frac{1}{2} \gamma_{ij} \quad (i \neq j) \end{aligned}$$

となる。ここで, C_{11} , C_{12} および C_{44} はその材料の結晶系における弾性定数²⁾である。これをすべての組合わせの方位について積分することにより, バルク試験片の応力とひずみの関係が得られ

$$\sigma_{pq}^b = \sum_i \sum_j \{ (C_{11} - C_{12} - 2C_{44}) \overline{M}_{pqij} + C_{12} N_{pq} N_{ij} + C_{44} (N_{pi} N_{qj} + N_{pj} N_{qi}) \} \varepsilon_{ij}^b \quad (8)$$

$$\text{ただし } \overline{M}_{pqij} = \int_S \int_0^{2\pi} p M_{pqij} d\alpha ds \quad (9)$$

($\int_S () ds$ は球面上の全面積についての積分を表す)

となる。ここでバルク試験片の応力成分 σ_{pq}^b は外部

応力として与えられるため, (8)式を解くことにより ε_{ij}^b の値が定まる。

Voigt のモデルでは, 各結晶粒のひずみ成分がその方位に関係なくすべて等しいと仮定するため(7)および(8)式において $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^b$ となる。X線応力測定は試料表面の結晶粒程度の薄層における応力測定に限られるため, 試料表面法線方向の応力成分はすべて0とし, そのひずみ成分はすべて任意であると仮定するのが妥当である¹²⁾。したがって, (7)式において $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_1^b$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_2^b$ および $\gamma_{12} = \gamma_{12}^b$ とおくことにより, σ_1 , σ_2 および τ_{12} の値を求めることができる。ここで, 一軸引張変形の場合には $\sigma_2^b = \tau_{12}^b = 0$ となるため, 前述の各応力成分を σ_1^b により表すことができ, これらを(3), (4)式に代入することによりひずみ一定の場合の $\overline{\varepsilon}_\phi$ を計算することができる。

2・3 集合組織と結晶の存在確率

集合組織を有する試料の平均格子ひずみは, 結晶の存在確率の重みつき平均値として(4)式より計算される。そのためには, 各方位における結晶の存在確率を求める必要がある。この値は, 本解析に用いた存在確率の定義から考えれば3次元極点図を確率に直すことにより直接求めることができる。しかし, 通常集合組織は試料の圧延方向に直角な断面(R.D.)および試料面(N.D.)の反転極点図あるいは正極点図により表されているため, 本研究では第一次近似として次のように結晶の存在確率 p を決定した。すなわち, 圧延方向の任意の方位における試料面の軸密度分布はその方位に依存するが, 試料面の軸密度分布(N.D.反転極点図)に比例すると仮定し, p を圧延方向の存在確率 p_R と試料面の存在確率 p_N の積として表した。したがって, XYZ 試料軸の方向余弦を α の関数として表し, 試料を圧延方向に引張る場合, X軸方向の方向余弦($l_1 m_1 n_1$)の基本ステレオ三角形形におけるそれと等価な方向を圧延方向の反転極点図上にプロットし, その方位における軸密度より p_R を, またZ軸方向($l_3 m_3 n_3$)を試料面の反転極点図上にプロット^{*2)}することにより, p_N をそれぞれ求めた。

Fig. 2 に本実験に使用した試料に存在する集合組織の状態を反転極点図により示す。このような集合組織を有する試料を圧延方向に引張った場合の応力一定, ひずみ一定モデルを仮定して求めた $\overline{\varepsilon}_\phi / \sigma$ と $\sin^2 \psi$ の関係および集合組織のない場合すなわち結晶の存在確率を一定とした場合の計算結果を Fig. 3 に示す。

これより, 異方性材料の $\overline{\varepsilon}_\phi / \sigma - \sin^2 \psi$ 線図は応力一

*2 実際の計算においては, R.D., N.D. 反転極点図をそれぞれ55分割し, 各方位における軸密度を計算機に記憶させ, X軸およびZ軸方向の方向余弦が分割されたどの方位に属するかを計算機上で判断させることにより p_R , p_N の値を求めた。

Fig. 2. Axis distribution charts representing the preferred orientation in specimen.

Fig. 3. Theoretical results of $\bar{\epsilon}_\phi/\sigma$ versus $\sin^2\psi$.

定、ひずみ一定のいずれのモデルにおいてもわん曲を示し、等方性材料の値とは異なることから集合組織の影響が同図に明確に現れていることがわかる。一方、等方性材料においてひずみ一定モデルに基づく計算結果もわん曲を示し、 $\bar{\epsilon}_\phi/\sigma - \sin^2\psi$ 線図は集合組織の存在およびその変形機構によりわん曲することがわかる。通常、X線応力測定法では $\bar{\epsilon}_\phi/\sigma - \sin^2\psi$ 線図は直線となり、その傾きは測定に用いた回折面に関係なく一定でX線の弾性定数 $(1+\nu)/E$ の値を与える。¹³⁾ しかし、 $\sin^2\psi$ 線図が直線となるのは、応力一定モデルを仮定した等方性材料の各回折面および異方性材料の (100)、¹⁰⁾⁽¹⁴⁾ (111) 面においてのみであり、その場合でもX線の弾

性定数は回折面に大きく依存する。

3 実験方法

3.1 供試材および試験片

本実験に使用した材料は鋼管用の熱間圧延板であり、その化学成分を Table I に、また圧延方向(R.D.)およびこれと直角方向(T.D.)の機械的性質を Table II に示す。これより、Fig. 4 に示される試験片の引張軸が圧延方向およびこれと直角な方向に一致するように試料を切り出し、所定の形状寸法に機械加工した。その後、試験片平行部をリン酸-クロム系溶液により電解研磨を行い、表面の加工層を約 50μ 除去し実験に供した。

Table I. Chemical composition of specimen (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.09	0.26	1.45	0.016	0.004	0.12

Table II. Mechanical properties of specimen.

	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
R. D.	30.0	54.5	49.2
T. D.	31.3	56.2	48.3

Fig. 4. Shape and dimension of specimen.

Fig. 5. Optical micrograph of specimen.

試料に存在する集合組織の状態はすでに Fig. 2 に示しており、その顕微鏡組織を Fig. 5 に示す。試料の結晶粒径は約 10μ であり、X線照射面積から考えて応力測定に充分可能なものである。

3.2 実験装置および実験方法

本実験に用いた実験装置は、Fig. 6 に示される平行ビーム法による東芝製X線応力測定装置である。また、これと併用可能な応力負荷装置として油圧ハンドポンプにより容量 1500 kg まで負荷可能な横型の小型引張試験機を製作した。機械的負荷応力はX線照射位置

Fig. 6. X-ray goniometer and loading device.

の両側に取りつけたひずみゲージより試験片に生ずるひずみを測定し、その値に弾性定数を乗じることにより算出した。なお、測定期間内での負荷応力値の変動は約 0.2 kg/mm² であり、これはX線応力測定法の測定精度から考えて誤差範囲内とみなせる値である。

負荷応力に伴う平均格子ひずみの変化率 $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ は、X線応力測定法を用いて次のように測定した。すなわち、試験片に弾性範囲内で一軸引張荷重を加え、各応力段階で試料表面法線方向に対するX線入射角 ϕ_0 の 0°, 10°, 20°, 30° および 40° において、特性X線を照射して得られる回折強度分布曲線から半幅法によりピーク位置を決定し、それぞれの入射角における回折角 2θ を求めた。さらに、回折角と負荷応力の増分の関係からそのこう配を最小二乗法により求め、次式より格子ひずみの値に換算した。

$$\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma = -\frac{\cot \theta_0}{2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d2\theta}{d\sigma} \tag{9}$$

ここで、 θ_0 は無ひずみ状態での回折角を表す。本実験ではこのような方法で各X線入射角における $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ を求め、前述の変形機構に関するモデルによるひずみ解析結果と比較検討した。

測定に用いた特性X線は CrK α 、CoK α 線であり、各試験片について (211) および (310) 面における

Table III. Conditions of X-ray diffraction technique.

Characteristic X-ray	Crk α	Cok α
Filter	V	Fe
X-ray intensity	30 (kV) 3.5 (mA)	
Irradiation area	10 $\times$ 2 (mm ²)	
Time constant	16 (sec)	
Detector	G. M.	
Scanning speed of detector	1 (deg/min)	
Chart speed	20 (mm/min)	

$\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ を求めた。Table III にX線使用条件を示す。

4 実験結果および考察

Fig. 7 (a)は試料を圧延方向 (R. D.) に引張った場合の (211) 面における $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ と $\sin^2\psi$ の関係を示したもので、図中の実線および点線は応力一定およびひずみ一定モデルに基づく計算結果をそれぞれ示し、白丸は実験値である。これより、集合組織を有する試料においては $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ - $\sin^2\psi$ 線図のわん曲がみられ、(211)面において応力一定、ひずみ一定モデルに明確な差異を生じないことがわかる。同図(b)は、同様の方法で圧延方向に対し直角方向 (T. D.) に引張った場合のもので、圧延方向の結果と比較してわん曲の様子は少し異なるがほぼ同様の傾向にあり、(b)図の $\phi_0=40^\circ$ 付近を除いていずれの場合においても両変形モデルによる $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ の値に差はなく、それに対する実験結果もよく対応している。したがって、このような回折面では変形機構の両極端と考えられるこの二つのモデルによる解析結果に差がないため、変形機構による影響を考える必要はなく集合組織のみの影響により $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ - $\sin^2\psi$ 線図のわん曲を生じたものと考えられる。また、解析結果と実験結果がよく対応していることから、集合組織を本解

Fig. 7. Relation between $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ and $\sin^2\psi$ on (211) diffraction plane.

析方法のように結晶の存在確率として取扱えばよいことがわかる。一方、 $\phi_0=40^\circ$ において両モデルによる $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ の値に差が認められ、実験点は応力一定モデルに近い値を示している。

Fig. 8 は、圧延方向に引張った場合の (310) 面における結果を示したもので、(211) 面に比較して $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ の $\sin^2\psi$ に対する傾きは大きく、わん曲を示すが極めてゆるやかであることがわかる。(310) 面においては両変形モデルによる $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ の値に差が認められ、それに対する実験結果は応力一定モデルに近い値のものとひずみ一定モデルに近いものが混在し、Fig. 8 からその変形機構が両モデルのどの程度の割合にあるかを明確に判断することは困難である。このように、(310)

Fig. 8. Experimental results measured by half value breadth method on (310) diffraction plane.

面では一つのモデルにより説明されない実験点がみられ、その原因として X 線応力測定を適用した際の回折強度分布曲線のひろがり方が考えられる。すなわち、本実験に用いた試料では (211) 面において $\text{CrK}\alpha_1$ 線と $\text{K}\alpha_2$ 線による分布曲線は分離せず (半価幅は約 1.7 度)、半価幅法によるピーク位置の決定に問題はない。³⁾しかし、(310) 面においては両者が分離するため (半価幅は約 2.5 度)、回折強度最大値の 1/2 強度の位置における $\text{CoK}\alpha_2$ 線側での分布曲線のこう配が小さくなり、半価幅法によりピーク位置を決定することには問題があると思われる。そこで、本報告では $\text{CoK}\alpha_2$ 線の影響を少なくするために回折強度分布曲線を 4 等分し、回折強度最大値の 3/4 強度の位置における中点よりピーク位置を決定する方法 (以下 3/4 幅法とする) を用いて実験結果の整理を行った。Fig. 9 (a) は (310) 面、

Fig. 9. Relation between $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ and $\sin^2\psi$ on (310) diffraction plane.

圧延方向の場合で Fig. 8 を 3/4 幅法により整理したものである。これより、実験値は両変形モデルの間にあり、 $\sin^2\psi$ の広範囲において応力一定モデルによる計算結果に近い値を示していることがわかる。同図(b)は直角方向のもので、計算結果および 3/4 幅法により整理した実験値は(a)図とほぼ同様の傾向を示し、いずれの場合においても応力一定モデルに比較的近い値となっており、このことは Fig. 7 (b) に示される (211) 面、直角方向における $\phi_0=40^\circ$ の実験結果にも一致している。

このような多結晶体の実際の変形機構を応力一定とすると、このモデルでは各結晶粒に作用する応力がすべて等しいとするため、各結晶粒はその方位により異なるひずみを生じることになり結晶粒相互間でのひずみの適合条件が満足されない。一方、ひずみ一定モデルではひずみの適合条件は満足されるが応力のつり合い条件が満たされない。したがって、これらの変形モデルでは結晶粒界においてひずみあるいは応力が不連続となる。しかし、実際の変形挙動は結晶粒相互間で応力のつり合い条件およびひずみの適合条件を満足したものであり、そこには結晶粒度および拘束状態に基因

*3 本実験に使用した X 線は $\text{CrK}\alpha$ および $\text{CoK}\alpha$ 線であり、これらの特性 X 線による回折角は Coka 線の方が大きいため、波長の異なる $\text{K}\alpha_1$ と $\text{K}\alpha_2$ 線による回折強度分布曲線は (310) 面において分離することになる。

した結晶粒界での応力分布状態などの影響が考えられる。従来から述べられているように、実際の変形機構は両モデルの間にあることがほぼ確実であり、 $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ に影響を及ぼす因子として異相の存在、集合組織の測定精度なども考えられるが、X線応力測定法の誤差範囲を考慮しても、本実験に用いた異方性材料の変形挙動は応力一定の考え方に比較的近いものと考察される。

5 結 言

本報告においては、多結晶体の変形機構として応力一定、ひずみ一定の二つのモデルを仮定した異方性材料のひずみ解析を行い、集合組織を有する熱間圧延鋼板を用いた一軸引張変形による実験結果と比較検討することにより異方性材料の弾性変形挙動を考察してきた。解析結果および本実験に用いた試料より得られた実験結果から次のことが明らかとなった。

異方性材料の $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma - \sin^2\psi$ 線図はわん曲を示し、その値は測定格子面および測定方向により異なる。また、等方性材料のひずみ一定モデルによる計算結果もわん曲を示すことから、わん曲の原因として集合組織およびその変形機構が考えられる。

本実験に用いた試料のひずみ解析より計算した $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ は、(211) 面において変形機構の両極端と考えられる応力一定、ひずみ一定モデルに明確な差を生じない。それに対する実験結果がX線応力測定法の誤差範囲内で解析結果とよく一致していることから、変形機構による影響を考慮する必要はなく、本解析方法を用いて集合組織によるわん曲を説明することができる。

一方、(310) 面においては両変形モデルに差が認められ、3/4 幅法を用いて整理した実験結果は応力一定

の考え方とよく対応している。 $\overline{\varepsilon}_\phi/\sigma$ に影響を及ぼす因子として種々のものが考えられるが、本実験に用いた試料程度の結晶粒度および集合組織を有する異方性材料は応力一定の考え方に比較的近い変形挙動を示す。

終りに、試料用材料を提供してくださった日本鋼管株式会社福山研究所の関係者の方々に謝意を表します。

(昭和52年5月24日 日本材料学会第26期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 長島晋一, “集合組織”, p. 3 (1966) 日本金属学会
- 2) Barrett, C. S., “Structure of Metals”, p. 531 (1952) McGraw-Hill
- 3) 平 修二, 阿部武治, 材料, **16**, 38 (1967).
- 4) 平 修二, 林紘三郎, 渡瀬善次郎, 材料, **17**, 1151 (1968).
- 5) 本田和男, 細川智生, 有間淳一, 常永寿伸, 材料, **18**, 1053 (1969).
- 6) 有間淳一, 細川智生, 本田和男, 材料, **18**, 1060(1969).
- 7) Reuss, A., Zeits. Ang. Math. Mech., **9**, 49 (1929).
- 8) Voigt, W., “Lehrbuch der Kristallphysik”, p. 962 (1928).
- 9) 平 修二, 林紘三郎, 材料, **18**, 1047 (1969).
- 10) Hosokawa, N., K. Honda, and J. Arima, “Mechanical Behavior of Materials”, **1**, 164 (1972) J. S. M. S.
- 11) Schmid, E., and W. Boas, “Plasticity of Crystals”, p. 14 (1950) F. A. Hughes & Co. Limited
- 12) 長島晋一, 武智 弘, 加藤 弘, 第6回X線材料強度に関するシンポジウム前刷集, p. 17 (1967) 日本材料学会
- 13) 日本材料学会編, “X線材料強度学”, p. 210 (1973) 養賢堂
- 14) 有間淳一, 細川智生, 本田和男, 材料, **19**, 1042(1970).