The Society of Materials Science, Japan

215 金属材料の塑性変形初期における挙動について

関工 本田和男 岡山理科大 細川智生 関工 ○山井秀明

1.緒言

材料の変形および破壊という巨視的現象は、それを構成する各結晶の微視的領域における力学的挙動と密接に関係している。材料強度の立場あるいは塑性加工の分野において、塑性変形の機構を考察することは重要であり、塑性域における応力とひずみの関係の解析や降伏曲面の決定などに多くの努力が費やされている。本報告では、多結晶体を構成する各結晶の拘束を考慮したTaylorのすべり変形モデルにより拘束条件の異なる試料表面層および内部の各結晶に作用する応力値を計算し、X線応力測定法の基礎式と関連づけてその塑性変形挙動を考察した。さらに、試料としてすべり系の異なる純アルミニウムおよび低炭素鋼板を用い、一軸引張変形における実験結果と上述の解析結果を比較検討した。

2.異方性を考慮したひずみ解析

試料内の三軸応力下にある一つの結晶を考え、図1に示すようにxyz軸を結晶の主軸に、XYZ軸を試料軸にそれぞれ一致させてとる。また、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、Z軸とのなす角をψとする。ここで、(abc), $(l_i m_i n_i)$は各方向のxyz座標系における方向余弦を表す。測定方向の垂直ひずみε_ψは、X線回折にあずかる結晶粒が試料表面層の薄層であるため、試料表面の法線方向の応力成分をすべて0と仮定して、結晶系が立方晶の場合、

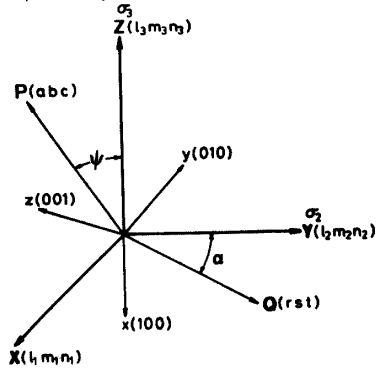

図1. 結晶内の座標系

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

ただし、$M_{ij}=a^2l_il_j+b^2m_im_j+c^2n_in_j$

で与えられる。ここで、S_{11}, S_{12}およびS_{44}は材料固有の弾性コンプライアンス定数である。

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へ適用するには、回折面の法線方向がP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、図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方向にQ(rst)を定め、Y軸とのなす角をαとすると、平均格子ひずみ$\bar{\varepsilon}_\psi$はこのαを用いて

$$\bar{\varepsilon}_\psi = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\varepsilon_\psi d\alpha \quad (2)$$

で与えられる。ここで、σ_1, σ_2およびτ_{12}とαの関係が求まれば上式より$\bar{\varepsilon}_\psi$を計算することができる。そこで、この結晶方位と各応力成分の関係を求めるために試料内にも番目の一つのすべり系を考え、xyz座標系におけるすべり面法線方向、すべり方向をそれぞれ$(p_1^{(k)}q_1^{(k)}r_1^{(k)})$, $(p_2^{(k)}q_2^{(k)}r_2^{(k)})$とし、臨界せん断応力を$\tau_c^{(k)}$とした場合、すべり方向のせん断応力$\tau^{(k)}$は、

$$\tau_c^{(k)} \geqq \tau^{(k)} = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}(l_ip_1^{(k)}+m_iq_1^{(k)}+n_ir_1^{(k)})(l_jp_2^{(k)}+m_jq_2^{(k)}+n_jr_2^{(k)})\sigma_{ij} \quad (3)$$

で表され、この時の塑性ひずみ増分$d\varepsilon_{ij}$はすべり量増分を$d\gamma^{(k)}$, すべり系の数をm個として

$$d\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\{(l_ip_1^{(k)}+m_iq_1^{(k)}+n_ir_1^{(k)})(l_jp_2^{(k)}+m_jq_2^{(k)}+n_jr_2^{(k)})+(l_jp_1^{(k)}+m_jq_1^{(k)}+n_jr_1^{(k)})(l_ip_2^{(k)}+m_iq_2^{(k)}+n_ir_2^{(k)})\}d\gamma^{(k)} \quad (4)$$

となる。(3)、(4)式は互に関係しており、すべり系が活動している時のみ$d\gamma^{(k)}>0$となりその

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

他の場合はすべて$d\gamma^{\alpha}=0$となる。これらの式より各方位におけるσ_{ij}を求めるためにTaylorは臨界せん断応力がすべてのすべり系で等しく、また各結晶粒の塑性ひずみ$d\varepsilon_{ij}$が巨視的ひずみdE_{ij}に等しいとしている。さらに、BishopとHillの単結晶に関する最大塑性仕事の原理($dW=\Sigma\Sigma\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}$を最大)あるいは最小せん断の原理($dE=\Sigma\tau_c^{\alpha}d\gamma^{\alpha}$を最小)を用いれば$\sigma_{ij}$を計算することができる。この場合、試料内部ではすべての方向に拘束を受けるため$d\varepsilon_{ij}=dE_{ij}$として$\sigma_{ij}$を求め、表面層は平面応力状態と考えられるため$d\varepsilon_{11}=dE_{11}$, $d\varepsilon_{22}=dE_{22}$, $d\varepsilon_{12}=dE_{12}$, $\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{13}=0$とし、X線回折にあずかる結晶に対し$\sigma_1$, σ_2およびτ_{12}を求め(2)式より$\overline{\varepsilon_\psi}$を計算した。

3. 結果および考察

図2はAl焼鈍材(420)面を用いた場合の一軸引張変形における$\overline{\varepsilon_\psi}$と$\sin^2\psi$の関係を示したもので、図中の実線は試料表面層に対する計算結果である。また、点線は与えられた塑性ひずみを生じるために要する応力を試料内部の全結晶粒について計算し、その平均値が全結晶粒に負荷されたような架空の状態を考え$\overline{\varepsilon_\psi}$を(2)式より求めたものである。等方性材料の場合、弾性範囲内では各結晶は応力一定の考え方にほぼ近い挙動を示し$\overline{\varepsilon_\psi}$-$\sin^2\psi$線図は直線となるのに対し、塑性変形状態では図2にみられるようにわん曲を呈し、X線を用いた実験結果も比較的よく対応している。X線応力測定法ではこの線図の傾きより応力値を算出するが、このように塑性変形した場合には直線とならず、それを無視して直線近似により得られた応力値には誤差が含まれることになる。また、その値は前述の点線で示される実際に負荷されている応力値より小さな値となる。そこで、本解析結果を用い図の実線と点線の差を$\Delta\overline{\varepsilon_\psi}$とすると、この$\Delta\overline{\varepsilon_\psi}$を補正項として試料表面層に存在する応力から試料に作用する巨視的応力を算出することも可能である。

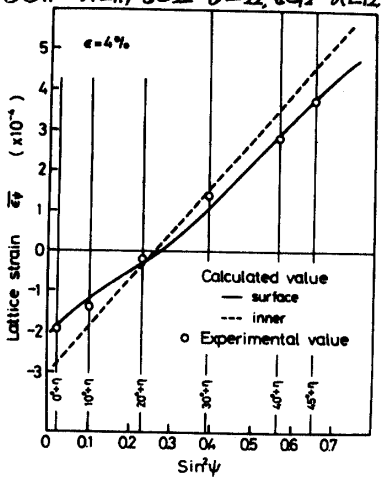

図2. $\overline{\varepsilon_\psi}$-$\sin^2\psi$線図(Al)

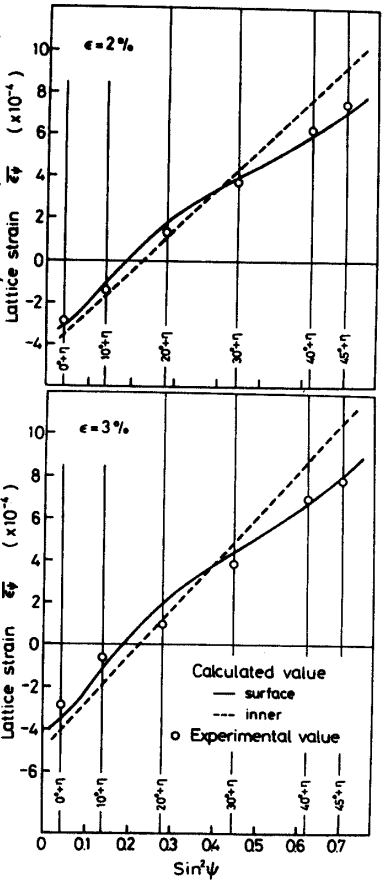

図3. $\overline{\varepsilon_\psi}$-$\sin^2\psi$線図(低炭素鋼)

図3は低炭素鋼(211)面における同様の結果を示したもので、体心立方金属に対しても前述のTaylorらの考え方を仮定して計算を行った。解析結果はAlの場合と同様$\sin^2\psi$線図のわん曲が認められ、ψの大きい範囲において内部との差が著しいことがわかる。それに対する実験結果は$\varepsilon=2\%$においてほぼ対応しており、$\varepsilon=3\%$とひずみが増加した場合に幾分ばらつきが大きくなっている。本計算では臨界せん断応力をすべてのすべり系で等しくおいたため、加工硬化の異方性の影響などが変形量の増加に伴って実験結果に現われたものと考えられる。しかし、図2、3の結果から判断して塑性変形初期におけるこれら試料の挙動はTaylorの変形モデルに比較的近いものと推察される。

NII-Electronic Library Service