第 3 回　金属の結晶粒界，金属材料各論

材料工学専攻
准教授　安田公一

５．パイエルス応力とすべり系

第２節で，原子面ごと一挙に滑らせると，非常に大きなせん断応力が必要であるが，転位を導入すれば，小さなせん断応力で塑性変形ができることを述べた．図 22 に示したように，白い○で表された原子配列の状態から，転位がバーガーズベクトルの分だけ動いて，黒い●で表された原子配列の状態になる場合，その中間段階で，ポテンシャルエネルギーの高い状態を越える必要がある．それは，転位があること自体，エネルギー的に高い状態ではあるが，それでもやはり，白い○や黒い●の原子配列の状態は，転位としてはエネルギーの低い状態になっているからである．言わば，転位芯のエネルギーは，格子の周期性を反映して，転位の位置によって周期的に変動していると言える．これを，パイエルスポテンシャルと呼ぶ．逆に，この周期的ポテンシャルによって，転位の運動には，格子による抵抗が働いていると見ることもできる．この抵抗をパイエルス応力（パイエルス・ナバロ応力）という．エネルギー計算から，パイエルス応力は，次式のように求められている．

$$\tau_P = \frac{2G}{1-\nu}\exp\left(-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}\right) \qquad (7)$$

ここで，a はすべり面間隔，b はすべり面に平行な原子面間隔である．指数項における a と b の依存性より，パイエルス応力 τ_p は，転位の幅が大きいほど（a が大きいほど）小さくなり，結晶構造の中で，b が小さい（原子が密に詰まっている）面がすべり面になりやすく，また，バーガーズベクトルの大きさ b が小さい方向にすべりやすいことがわかる．

表２　セラミックスのすべり系

物質	結晶構造	すべり系		独立したすべり系の数		すべり系の活動開始温度/℃	
		1 次	2 次	1 次	2 次	1 次	2 次
Al_2O_3	六方	$\{0001\}\langle 11\bar{2}0\rangle$	数個	2		1200	
MgO	立方	$\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$	$\{001\}\langle 1\bar{1}0\rangle$	2	3	0	1700
β-SiC	立方	$\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$		5		>2000	
β-Si_3N_4	六方	$\{10\bar{1}0\}\langle 0001\rangle$		2		>1800	

表 2 に，セラミックスのすべり系を示す．セラミックスの場合，独立なすべり系の数が 5 個ない場合が多く，そのため，ある程度高温になって，2 次のすべり系も活動するようになって，ようやく，自由に塑性変形できるようになる．5 個のすべり系がないと自由に塑性変形できないというのは．前期の連続体力学で，任意の偏差応力テンソルを 5 つの純粋せん断応力で分解できることに起因する．

６．粒界

粒界には，格子の配列の乱れがあることから，体積拡散に比べて高速の拡散路となっていたり，あるいは，不純物元素が偏析したり，また，焼結や粒成長には粒界の移動が関与したり，超塑性現象は粒界すべりが主な原因であったりする．このように，粒界は材料の多彩な様相の源であり，それ故に，粒界・界面を制するものは材料を制するとさえ言われている．ここでは，粒界の構造モデルについて説明する．

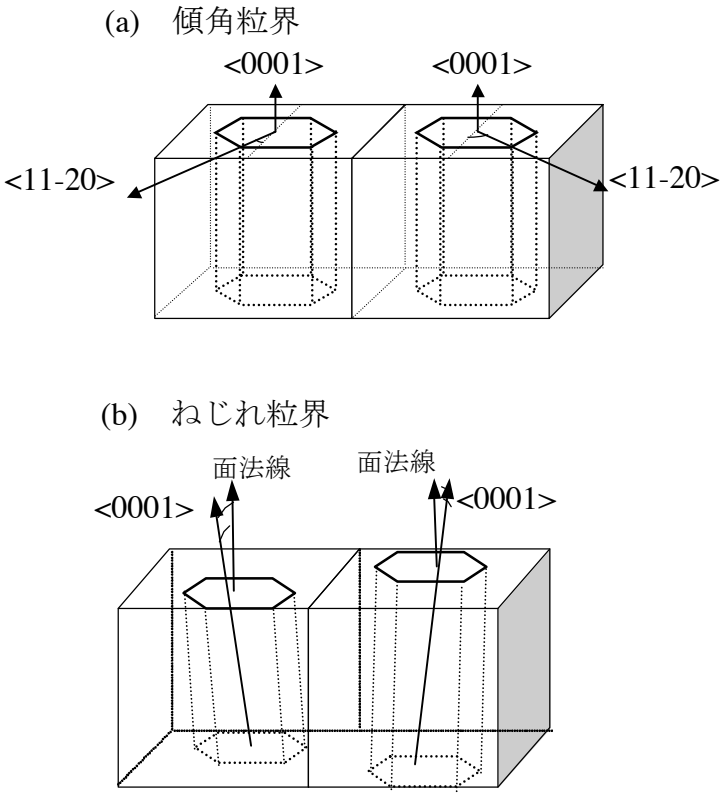

図２３　粒界の分類

粒界は，図２３に示すように，傾角粒界とねじれ粒界に分けることができる．傾角粒界では，２つの結晶を同じ方位に並べてから，粒界面に平行な結晶方位を回転軸にして，２つの結晶をお互いに逆向きに回転させてできた粒界のことである．この時，逆向きの回転角の大きさが等しい場合は，対称傾角粒界とよび，そうでない場合は，非対称傾角粒界と呼ぶ．これに対し，ねじれ粒界では，２つの結晶を同じ方位に並べてから，粒界面に垂直な結晶方位を回転軸にして，２つの結晶をお互いに逆向きに回転させてできた粒界のことである．この場合は，逆向きの回転角の大きさが等しい場合は，対称ねじれ粒界と呼び，そうでない場合は，非対称ねじれ粒界とよぶ．

傾角粒界のモデルとしては，傾角が小さい場合と大きい場合に分けることができる．小傾角粒界は，図２４に示す転位配列でモデル化されている．すなわち，転位の密度に応じて，粒界のエネルギーが増加することがわかる．大傾角粒界では，転位密度が大きくなるので，小傾角粒界のような取り扱いはできなくなる．図２５には，大計画粒界の泡モデルを示す．

ねじれ粒界については，結晶構造に応じた特定のねじれ角の時に，図２６に示すような対応粒界が現れる．対応粒界では，粒界エネルギーが他の角度のものより低く，

安定な粒界となっている.

７．金属材料各論

ここでは，鉄鋼材料と非鉄金属材料について概説する．まず，軟鋼の応力／ひずみ曲線を図２７に示す．実線は公称応力／公称ひずみ曲線，波線は真応力／公称ひずみ曲線である．図中の点 A が比例限度，点 B が弾性限度，点 C が上部降伏点，点 D が下部降伏点である．上部降伏点に達すると，引張り試験片にリューダース帯というすべり帯が走り始め，下部降伏点に達するとリューダース帯が試験片を貫通する．その後, 図２８に示すように, 点 E まで徐々にリューダース帯が試験片全域にひろかって, 点 E で試験片全体がすべり変形を経験することになる．点 D から点 E までを降伏ひずみとか，降伏伸びと呼ぶことがある.

その後，点 E から加工硬化が始まり，この辺りから公称応力と真応力が徐々に乖離していく（$\sigma_{true} = \sigma_{\mathrm{nominal}}(1+\varepsilon_{\mathrm{nominal}})$ より，$\varepsilon_{\mathrm{nominal}}$ が無視できなくなり始める）．そして，最大荷重となる点 F で試験片にくびれが発生し，くびれた部分は断面積が減少するからますます真応力が高くなるので，くびれが助長されていくことになり，真応力は急激に増加することになる．しかし，くびれた部分の真応力が大きくなるが，断面積自体が減少するので，トータルの荷重はくびれが発生すると減少することになる．そのため，公称応力／公称ひずみ線図は，くびれが発生すると右下がりになる訳である．なお，くびれの発生は，塑性不安定という呼び方をされることがある．また，公称応力／ひずみ曲線上の最大応力（図 27 の点 F)を極限強さと呼び，引張り強度として使うことが多い.

図２９には，各種金属材料の応力／ひずみ曲線を示した．参考のため，軟鋼のデータも載せてある．軟鋼以外は，明瞭な降伏点を示さないことがわかる．また，鉄鋼材料である鋳鉄は，脆性破壊に近い挙動をすることもわかる.

（１）鉄鋼材料

図３０に鉄-炭素系状態図を示す．炭素約 0.02%以下のものを工業用純鉄，約 0.02 から 2.14%のものを鋼，2.14%以上のものを鋳鉄と呼ぶ．鋼の内，合金元素として炭素のみを含むものを炭素鋼，炭素以外の合金元素を含むものを合金鋼という.

α-Fe は，727℃で最大約 0.02%の炭素を固溶できる．この α-Fe に炭素その他の元素が固溶した状態をフェライトと呼ぶ. 固溶限以上の炭素は，Fe_3C という硬い化合物（セメンタイトと呼ぶ）として共存する．γ-Fe は 2.14%まで炭素を固溶でき，γ-Fe の固溶体をオーステナイトと呼ぶ．このオーステナイトは，727℃で，フェライトとセメンタイトに共析変態し，これを A_1 変態と呼ぶ．共析変態した後の組織は，フェライト層とセメンタイト層が層状に配列したパーライトという組織になる.

以下省略