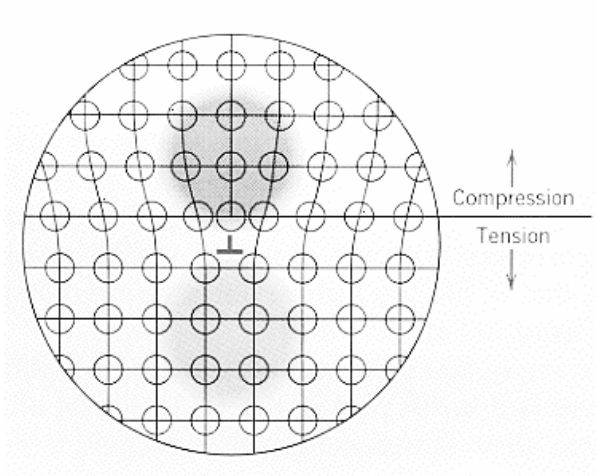
材料強度学（3）

転位の弾性論と強化機構



○　転位のまわりは**弾性ひずみ場、弾性応力場**が存在する高エネルギー状態

○　転位の存在によって生じたエネルギーの増加を**転位の自己エネルギー**と呼ぶ

○　転位の単位長さあたりのエネルギー

$E = \alpha \mu b^2$　（αは1/2〜1）ここでは、$E = \mu b^2 / 2$　とする

（ここでμは剛性率（横弾性率））

・　エネルギー的に考えれば、転位は存在可能な最小のバーガースベクトルをもつはず

・　転位が自己エネルギーをもつならば、転位は短くなりたいはず

（もし転位に他の力が加わっていなければ、曲がった転位はまっすぐになろうとするはず）

・　転位に張力が働き、伸ばしていると考える

（**転位の線張力近似**）　$T_L = \mu b^2 / 2$

○ 「転位を含む結晶に力（応力）が加わって転位が動く」ことを、
「転位に力が働いて動く」と表現
（転位とは原子配列の乱れた線欠陥であり、実体をもつものではないが、転位を実体のあるもののように見なし、それに力が加わると考える）

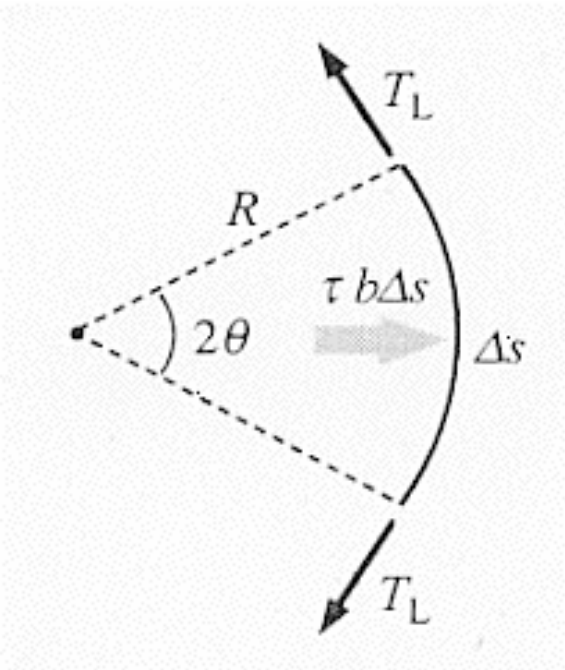
○ 単位長さの転位に働く力　　$f = \tau b$

○ 転位に働く力は常に転位線に垂直
（結晶にかかっている外部せん断応力の方向ではないことに注意）

○ 力が加わると転位は動こうとするが、転位運動を邪魔するもの（転位のピン止め点）があると、転位は障害物の間を張り出すように運動する

○ 転位には線張力があるから、張り出しの形状は外力と線張力のバランスで決まる

曲がった転位に働く力



- すべり方向へのせん断応力を τ とすると単位長さの転位に働く力は

$$f = \tau b$$

- 転位線の一部 Δs の両端の転位の線張力 T_L は

$$T_L = \mu b^2 / 2$$

- 両端での線張力の合力は、θ が小さいとき

$$2 T_L \sin\theta \qquad 2 T_L \theta$$

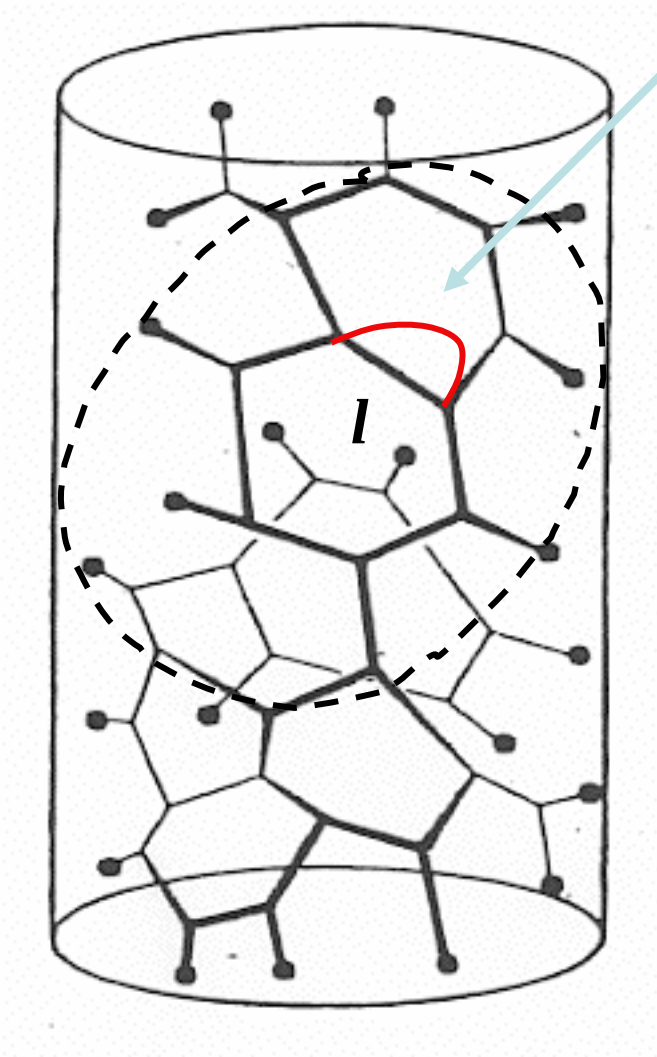
- 長さ Δs の転位部分に働く力がつり合っているから、

$$\Delta s = 2R\theta$$

- 単位長さの転位に働く力のつり合いの式は

$$\tau b = T_L / R = \mu b^2 / 2R$$

転位をさらに曲げるには、より大きな力が必要



・ 転位網をもつ結晶にせん断応力を加えると転位網のうち**主すべり面上にある転位切片**は運動しようとするが、**転位網の節は転位運動のピン止め点**になる。よって転位はこの部分で弧を描いて張り出す。

・ **円弧状のつり合いの形**をとることができる臨界条件は、曲率半径 R とピン止め間隔 l が、

$$R_{\min} = l/2$$ のとき

・ 臨界応力（上限値）は、

$$\tau_c = \mu b / 2R_{\min} = \mu b / l$$

・ τ_c を越えると転位は長距離運動開始。

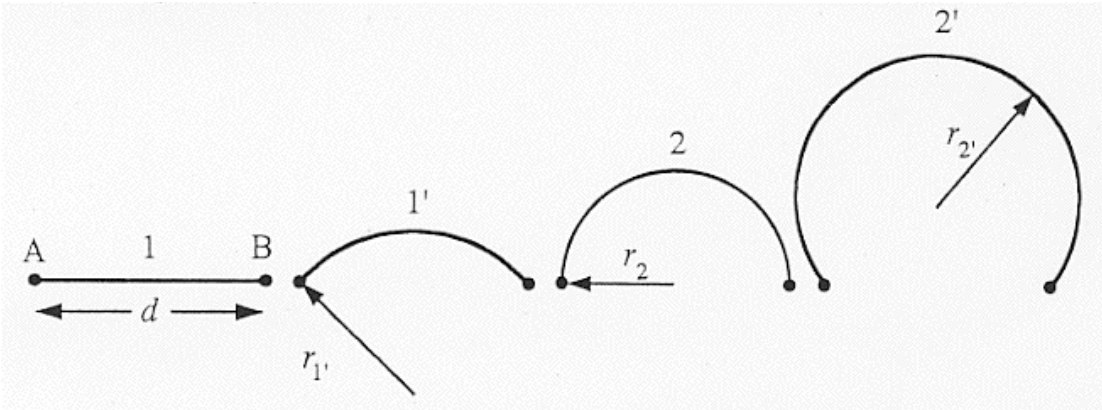
τ_c はこの結晶の降伏応力

（**臨界分解せん断応力**）

転位の張り出しをベースに
転位の増殖、析出強化、分散強化を考える

○　臨界応力を越えると1→1'→2の張り出しは可能

○　2→2'への張り出しは自動的に進行



○　2→3→4と進行

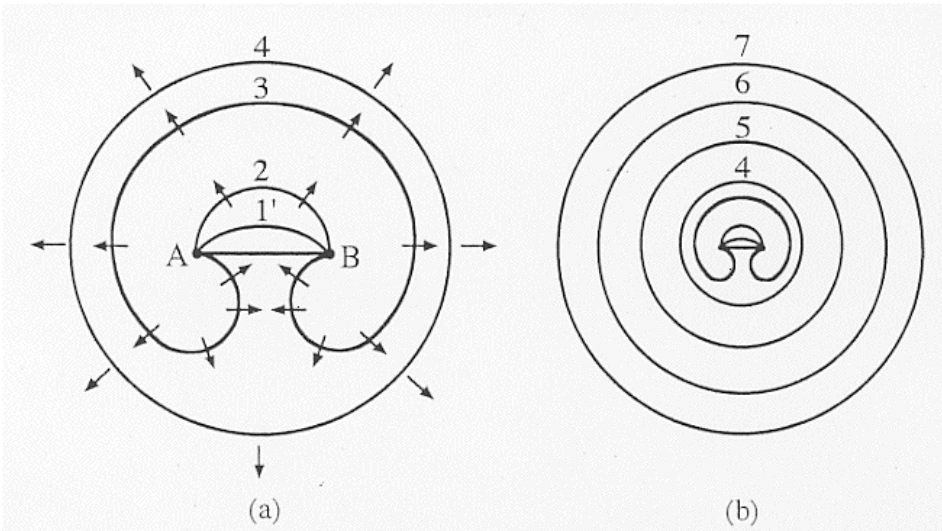
○　線分ABの転位から転位ループが誕生、転位切片ABも再生

○　転位の増殖

フランク・リードの増殖機構

フランク・リード源

$$\tau_{FR} = \mu b / d$$



塑性変形すると転位密度は増大する

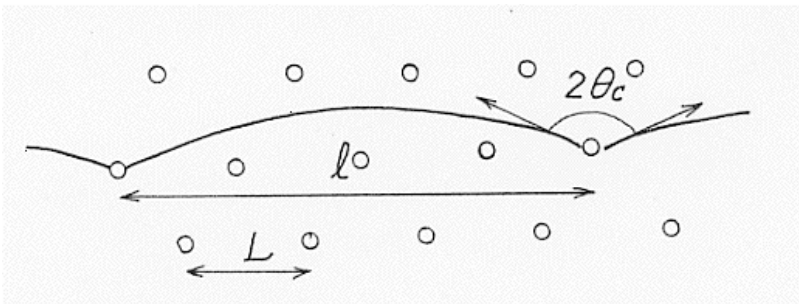
同一すべり面にたくさんの転位が増殖　→　巨視的なすべりステップ

材料の強化法：転位の長距離運動を困難にする障害物をすべり面上につくる

○ 障害物となるような溶質原子を混ぜる方法：固溶強化
○ 溶質原子濃度をCとするとすべり面上の溶質原子の間隔は
$1/\sqrt{C}$に比例
転位はこの間を張り出して運動　比較的弱い障害物

障害物のピン止め効果が弱い場合：

転位は半円形に張り出さないでも障害物から離脱可能　臨界角度θ_C



$$\tau_c = \mu b \cos\theta_c / l$$

（$\cos\theta_c < 1$、$l > L$　だから τ_cは小さい）

析出強化と分散強化

析出強化

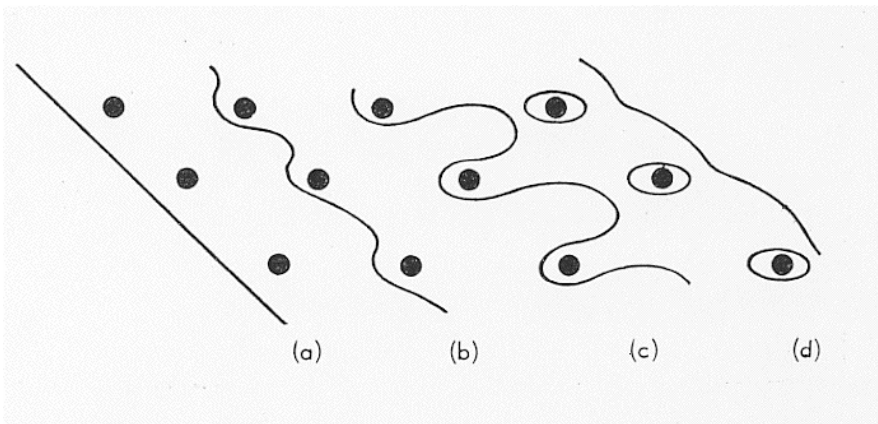
- マトリックス中に転位の障害物となる第2相を析出させて強化

- 析出物がマトリックスと整合の場合：
  整合ひずみ場は転位運動の抵抗となるが、転位によってせん断される
- 析出物がマトリックスと非整合の場合：
  転位によって容易にせん断されないので析出物のまわりに張り出す → ループを残して運動（オローワン機構）

分散強化

- 転位によってせん断されない障害物による強化法の総称

- 酸化物等の分散粒子による強化



回復、再結晶、粒成長

金属多結晶を**再結晶温度以下で塑性変形**（冷間加工）すると、
ミクロ組織や物理的･化学的･力学的特性が変化

結晶粒の形状変化
ひずみ硬化
転位密度の増加
電気伝導度
耐食性

熱処理
（焼鈍し）

→

冷間加工前
の状態

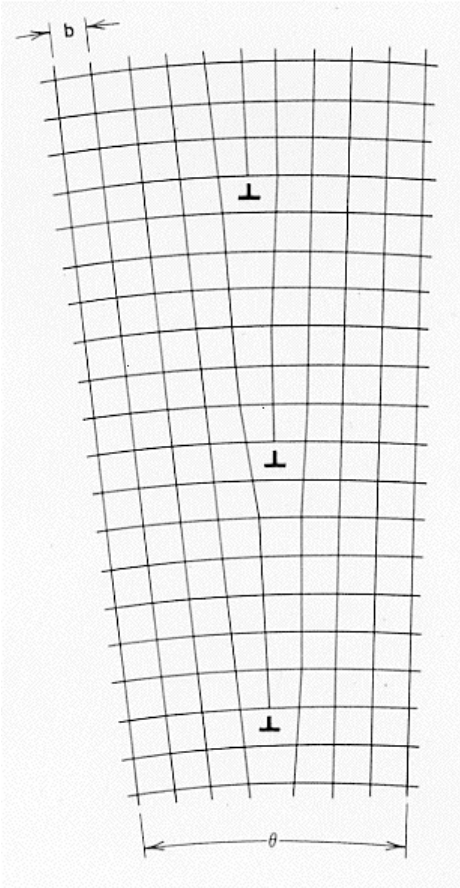
回　復
再結晶
粒成長

回　復

高温で活発になった原子拡散によって転位運動が起こり、結晶内に貯えられていたひずみエネルギーの一部が解放される

- 空孔の消滅
- 転位数の減少
  (転位間の反応、空孔の寄与)
- ひずみエネルギーの小さな転位配列の形成
  (再配列・ポリゴン化)

電気伝導性、熱伝導性も冷間加工前の状態に戻る

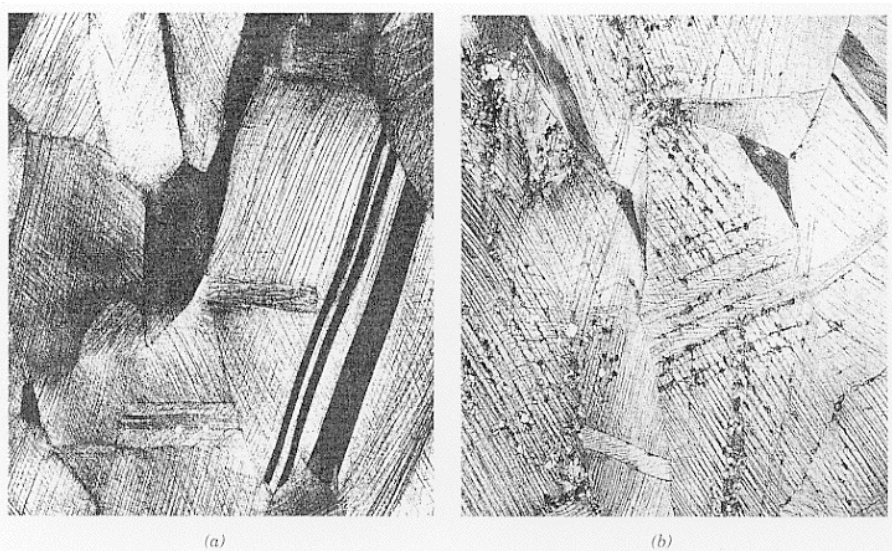


転位の再配列と小傾角粒界

再結晶

回復が終了しても結晶はまだひずみエネルギーが高い状態にある

再結晶過程：転位密度が低い新しい等軸粒（再結晶粒）が形成し、これが加工組織に置き換わっていく過程



33%CW材　　580℃で3s加熱

580℃で4s加熱　　580℃で8s加熱（再結晶完了）

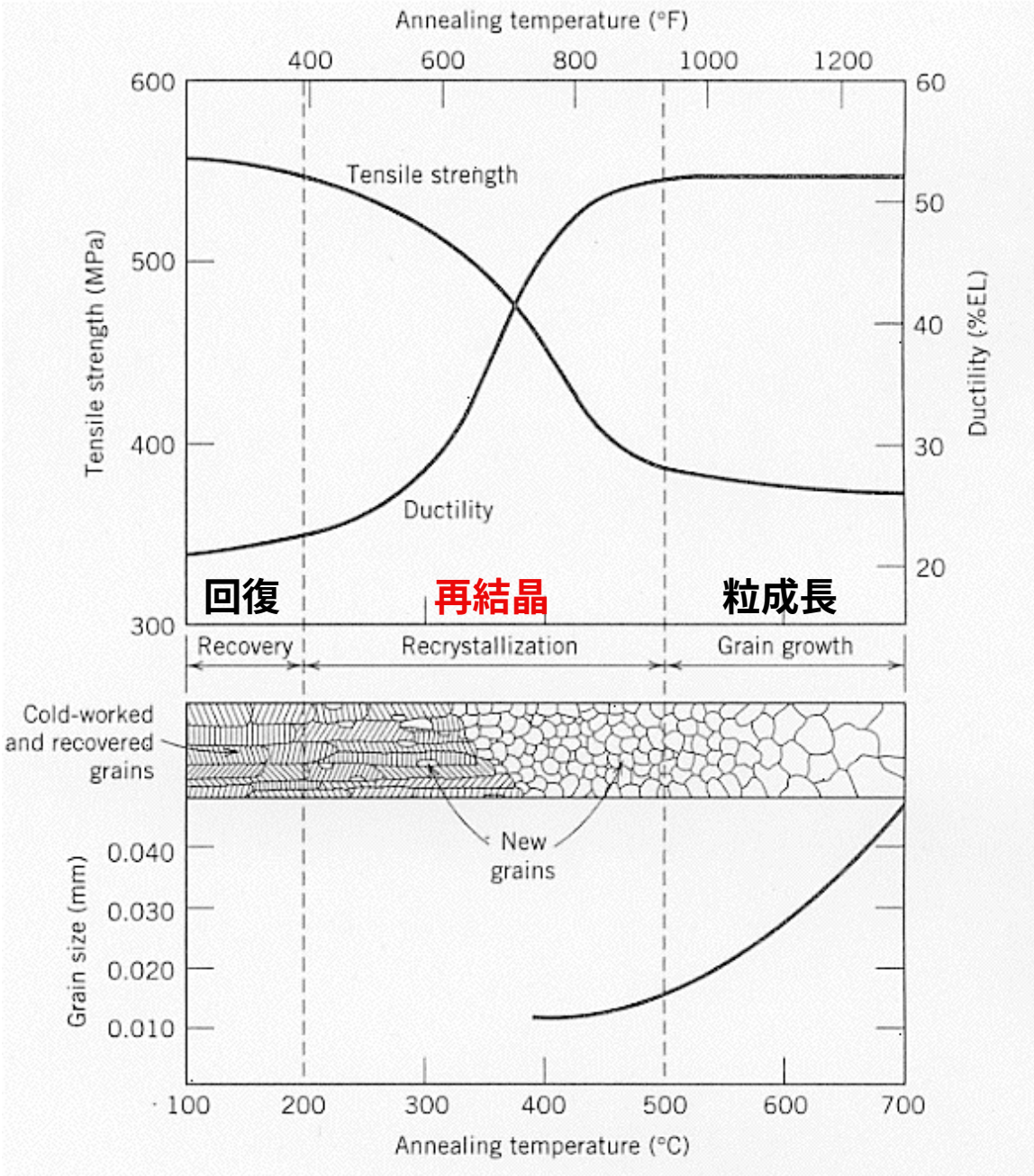
黄銅の再結晶過程

再結晶中の力学的性質の変化

軟化、強度低下
延性増加

熱処理条件（焼鈍し条件）を選ぶことにより、再結晶を制御し、力学的性質を調整することができる

再結晶は時間と温度に依存



黄銅の引張強さと延性に及ぼす焼鈍し温度の影響
（焼鈍し時間は1hで一定）

再結晶温度：再結晶を1hで完了させる温度

通常、絶対温度で表わした融点（T_m）の1/3〜1/2（冷間加工率や金属の純度に依存）

- 合金元素の添加は再結晶温度を上昇させる

  純金属：$0.3T_m$、ある実用合金：$0.7T_m$

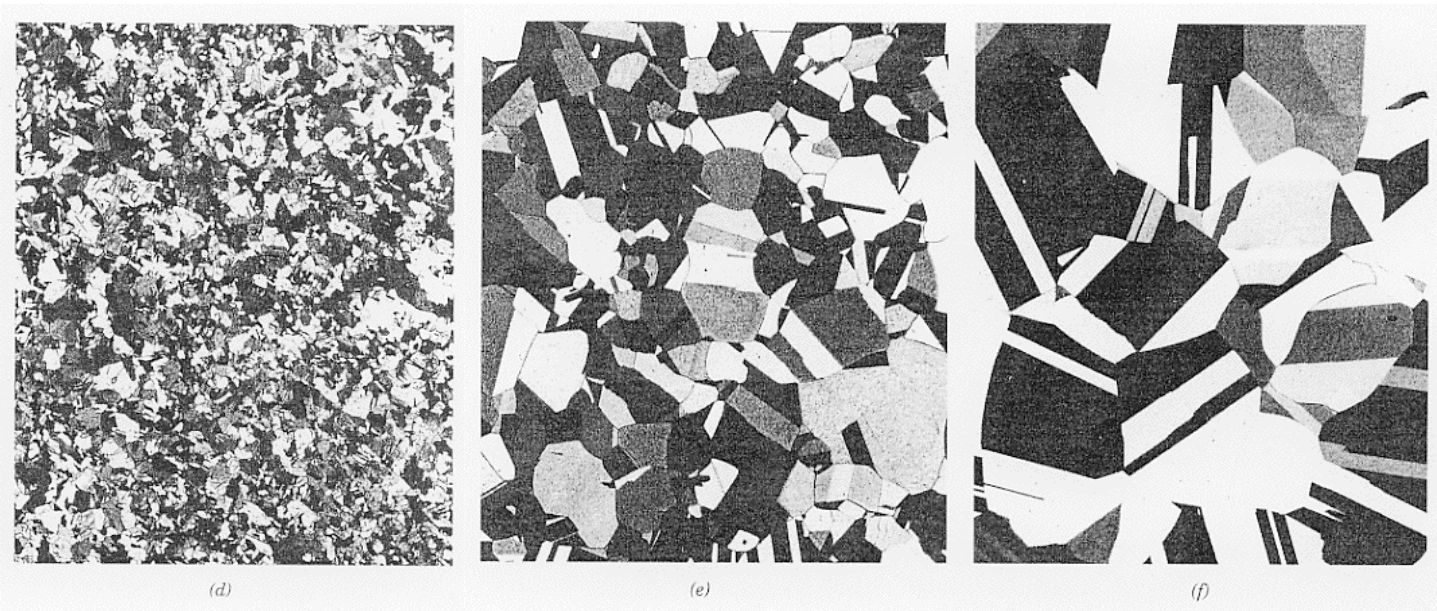
- 再結晶温度以上での塑性加工（熱間加工）では、ひずみ硬化しない　材料を大変形させたい場合

Metal	Recrystallization Temperature °C	Recrystallization Temperature °F	Melting Temperature °C	Melting Temperature °F
Lead	−4	25	327	620
Tin	−4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu–40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

粒成長

再結晶後の多結晶を高温に保持 ⇒ ひずみのない結晶粒が成長（粗大化）

- 金属、セラミックスを問わずすべての多結晶材で起こる
- 粒界エネルギーの減少が粒成長の駆動力



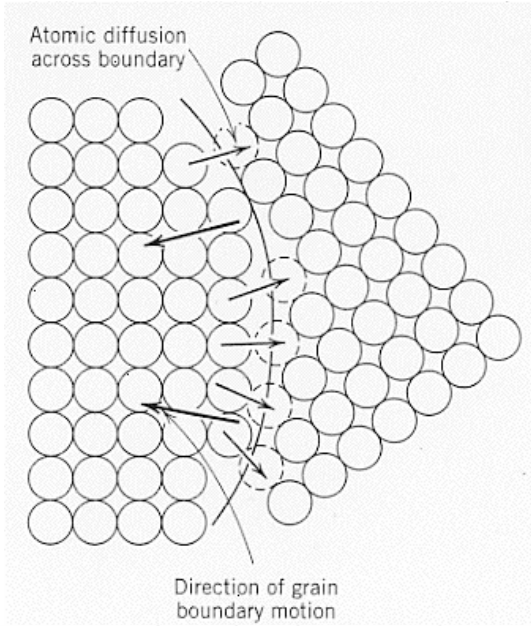
再結晶完了（580℃、8s）　粒成長（580℃、15min）　粒成長（700℃、10min）

黄銅の粒成長

- 粒成長は粒界移動によって起こる
  原子が粒界を越えて短範囲拡散
  粒界の移動方向と原子の運動方向は逆
- 小さい結晶粒は縮小化、大きな結晶粒はより粗大化
- 時間とともに平均結晶粒径 (d) は増加

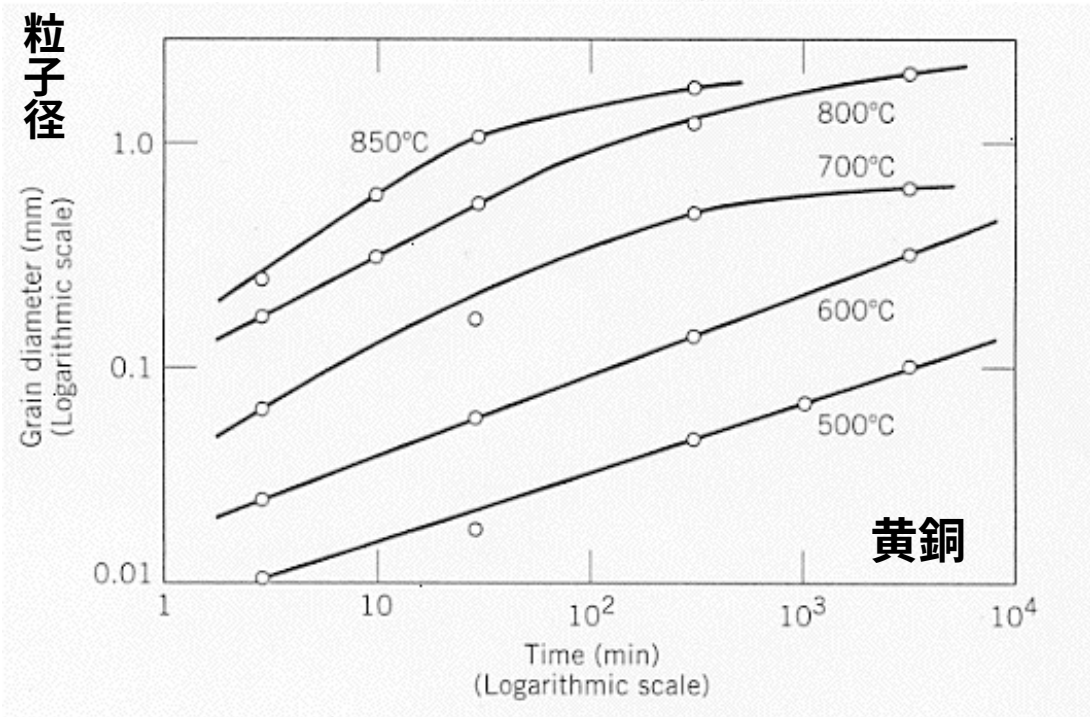
$$d^n - d_0^{\,n} = Kt$$

(d_0は$t=0$での粒径、K、nは定数 ($n \geqq 2$))



結晶粒径の時間および温度依存性

- 低温では直線関係
- 温度の上昇に伴い、粒成長速度は増加



○ 塑性変形 (冷間加工) と焼鈍しによって結晶粒径の制御が可能

まとめ

塑性変形は、微視的には外部せん断応力による転位の運動、つまりすべりによって生じる。すべりは、特定の結晶面内の特定の方向に起こる。すべり系とは、すべり面とすべり方向の組み合わせで、活動できるすべり系は材料の結晶構造で決まる。

臨界分解せん断応力とは、転位運動を開始させるために必要な最小のせん断応力のことである。単結晶の降伏強さは、臨界分解せん断応力の大きさと負荷応力の方向に対するすべり成分の方位の両方に依存する。多結晶材料では、すべりは各結晶粒において最も都合よく配向しているすべり系によって起こる。また変形中には、結晶粒界での整合性が保たれるよう結晶粒の形状が変化する。

双晶変形は、すべり変形が起こりやすくなるような結晶学的変化を随伴するという点で重要である。

材料の塑性変形のしやすさは転位運動のしやすさを意味しているから、転位運動を妨害することによって硬さや強さを増加させることができる。

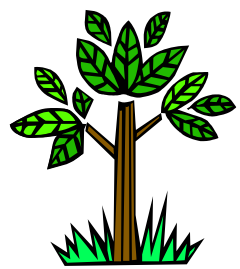
結晶粒界は転位運動の障害物である。よって多結晶材において**結晶粒を微細化**すると硬く、強くなる。**固溶体強化**の原因は、不純物と転位間の格子ひずみの相互作用である。材料が塑性変形すると転位密度が増加し、反発である転位-転位間のひずみ場の相互作用の度合いが増加する。**ひずみ硬化**は塑性変形の増加による強度の増加である。

析出強化や分散強化もまた主要な強化機構である。析出物を構成する原子の寸法がマトリックス相のそれと異なるとき、析出相のまわりには整合ひずみが生じ、転位運動の抵抗となる。しかし、これは転位によってせん断されるので、比較的弱い障害物である。析出物がマトリックスと非整合である場合には、転位によってせん断されないため、転位は析出物のまわりに張り出し、転位ループを残して運動する。これをオローワン機構と呼ぶ。

塑性変形した金属材料のミクロ組織や力学的性質は、適当な熱処理を施すことにより、変形前の状態に戻る。この間、回復、再結晶、粒成長が起こる。回復過程では、転位密度の減少や転位配列の変化が起こる。再結晶はひずみのない新たな結晶粒の生成であり、材料は軟らかく、延性的になる。粒成長は多結晶材料において平均結晶粒径を増加させ、これは粒界移動によって起こる。

演習問題

球状の第2相粒子を金属単結晶中に分散させて強化した。この材料の臨界分解せん断応力 τ_c を推定せよ。ただし隣接粒子間の平均中心間距離は50 nm、粒子の直径は10 nmである。マトリックスである金属結晶の剛性率 μ を20 GPa ,バーガースベクトルの大きさbを0.25 nmとする。

Example Problem

A metallic single crystal is strengthened by dispersed secondary particles. Estimate the critical resolved stress, τ_c. The average particle distance (from center to center) and the particle diameter are 50nm and 10nm, respectively. Use μ = 20 GPa and b = 0.25nm.