

基礎材料組織学 第8回

- 前回：
- ・ ミラー指数
 - ・ ミラー指数の一括表示
 - ・ 分解せん断応力



- 今回：
- ・ 臨界分解せん断応力
 - ・ 結晶粒微細化
 - ・ ホール・ペッチの関係式

8.1 臨界分解せん断応力

- ・分解せん断応力 $\tau = \sigma \cos \theta \cos \phi$ がある臨界値に達する → 転位の運動が可能となり、塑性変形が開始する。

単結晶の降伏応力 (θ, ϕ により変化する)

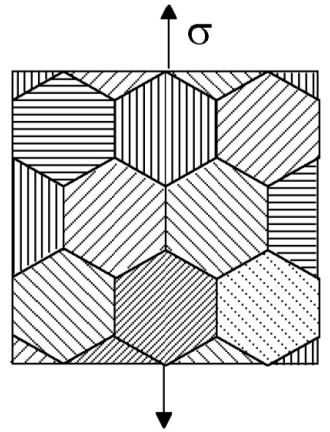
$$\tau_c = \sigma_Y \cos \theta \cos \phi$$

臨界分解
せん断応力

(θ, ϕ による一定値)

→ シュミット因子
0 ~ 0.5 の値とる
 $\theta = \phi = 45^\circ$

||
ハイルス応力 [第5回で説明] と同義,
「転位の運動に必要なせん断応力」

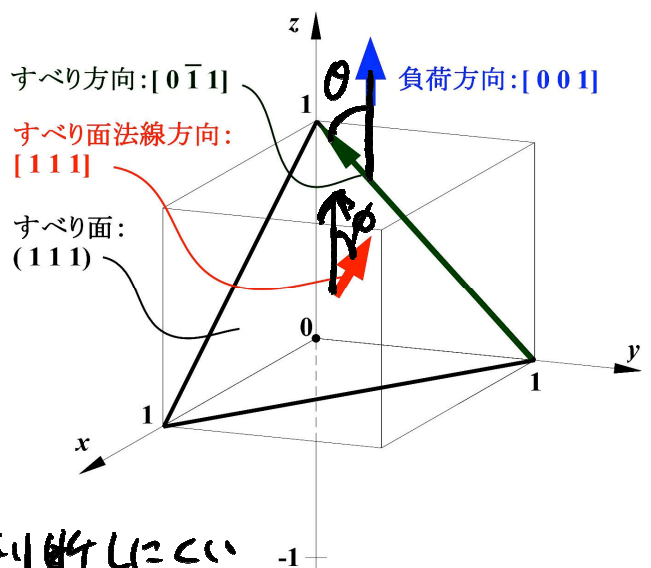


- ・例題: Al の結晶格子に $[001]$ 方向の引張応力 $\sigma = 30.0$ [MPa] がかかっている場合、すべり面 (111) , すべり方向 $[0\bar{1}1]$ における分解せん断応力を求めよ。

↓
[111]: すべり面と直交する
= すべり面の法線方向

- ・負荷方向とすべり方向の可成角 θ
→ 幾何学的関係から
 $\theta = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$

- ・負荷方向とすべり面法線方向の可成角 ϕ → 幾何学的には判断しにくい



負荷方向 $[001] \rightarrow a$, 法線方向 $[111] \rightarrow b$

a と b の可成角を内積から求める!

$$\cos \phi = \frac{|a \cdot b|}{|a||b|} = \frac{|a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \tau = \sigma \cos \theta \cos \phi$$

$$= 30.0 \times \cos \frac{\pi}{4} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$= 12.2 \text{ MPa}$$

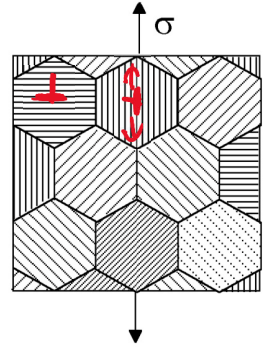
8.2 結晶粒の微細化

・これまでの転位運動の議論: 結晶内に限定(単結晶)

↓
・実際の材料: 結晶同士の境界(結晶粒界)の影響を考慮する必要がある。

・問い: すべり面を運動してきた転位が結晶粒界に達した時、どうなるか?

- 転位はそのまま運動することができない
→ 粒界の手前で停止・集積する



・応力集中の発生: 転位(原子の配列のずれ)の集積により、結晶粒界近傍で応力集中が発生

↓
結晶粒界での局所的応力上昇 → 隣接する結晶粒内での転位運動開始

(応力集中: 穴やクラックが存在する領域において、特異的に応力が高くなる現象)

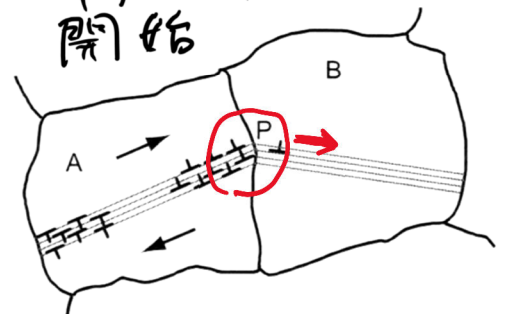


図 8.1 隣接結晶粒へのすべりの伝ば
[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

↓
・結晶粒界自体が転位の運動を妨げる効果を持つ

・ (結晶粒が小さいと、粒界に集積する転位の増加により)
容易に隣接結晶内での転位の運動が起る。

● 結晶粒微細化により

塑性変形を抑制することが可能
(強度の上昇)

「じん性」も強度とともに向上する

(じん性: 材料内部のき裂進展に対する抵抗、ねばり強さ)

8.3 ホール・ペッチの関係式

→多結晶体における降伏強度 σ_Y と
結晶粒径 d の関係

$$\sigma_Y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

σ_0 : 結晶粒内の転位を運動させるのに
必要な応力

k : 結晶粒界による強化の比例定数

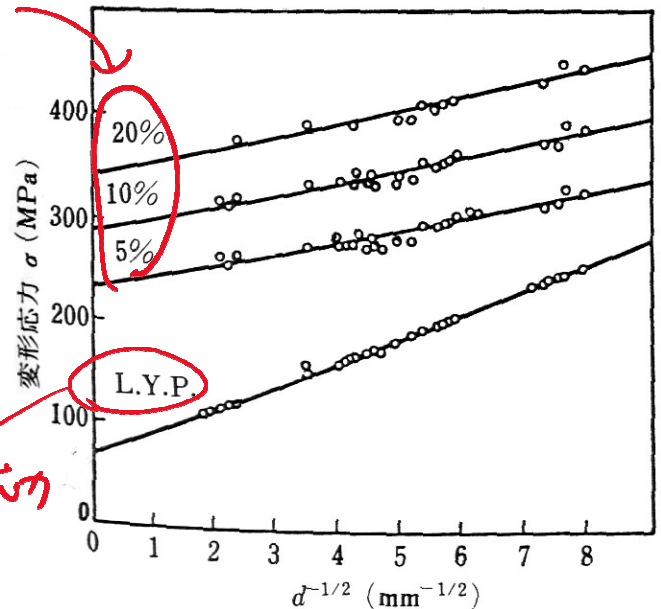


図 8.2 軟鋼における結晶粒径と変形応力の関係
[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

・ 例題: ホール・ペッチの関係式において $\sigma_Y = 13.3 \times 10^6 + \frac{2.57 \times 10^6}{\sqrt{d}}$ Pa を示す金属材料に

において, 結晶粒径 $d = 100.0 \times 10^{-3}$ mm の場合の降伏応力 σ_Y を求めよ. また $d = 16.0 \times 10^{-3}$ mm の場合も求めよ.

• $d = 100.0 \times 10^{-3} \text{ mm} = 100.0 \times 10^{-6} \text{ m}$

$$\sigma_Y = \underbrace{13.3 \times 10^6}_{13.3 \text{ MPa}} + \frac{2.57 \times 10^6}{\sqrt{100.0 \times 10^{-6}}} \frac{\text{Pa}}{\text{m}^2} = \underline{2.703 \times 10^8 \text{ N/m}^2} = \underline{270. \text{ MPa}}$$

• $d = 16.0 \times 10^{-3} \text{ mm} = 16.0 \times 10^{-6} \text{ m}$

$$\sigma_Y = 13.3 \times 10^6 + \frac{2.57 \times 10^6}{\sqrt{16.0 \times 10^{-6}}} \text{ N/m}^2 = 6.558 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = \underline{656 \text{ MPa}}$$

●結晶粒微細化方法

1) 凝固時の冷却速度を著しく高める

・個々の結晶粒成長を抑制

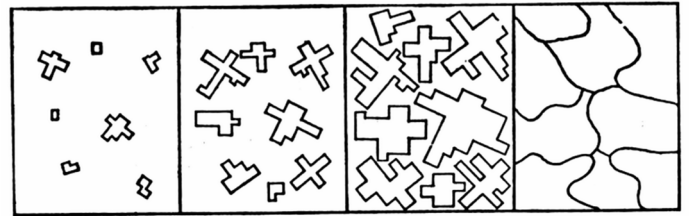


図 8.3 凝固時の結晶粒成長の模式図

[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

↓
微細な結晶組織を形成

2) 加工(塑性変形)後の熱処理

・塑性変形後、転位密度上昇

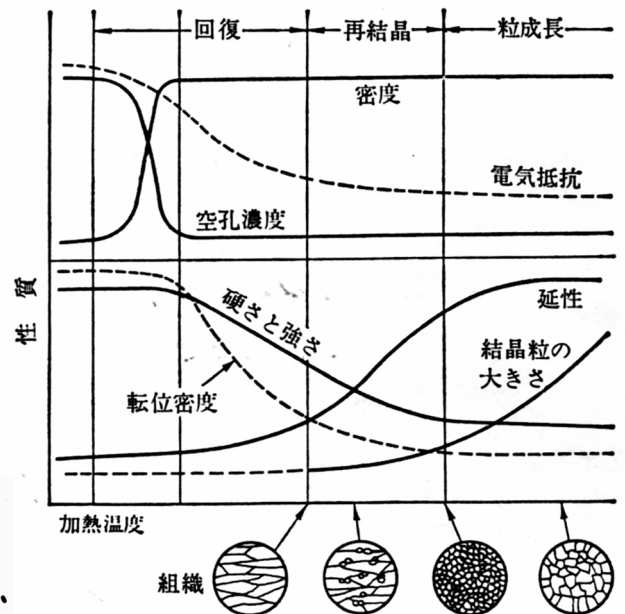
↓
格子欠陥増加により内部エネルギーが高い状態↓
熱処理により原子拡散が促進↓
拡散により格子欠陥を減らす
(エネルギー的に安定)な方向に向く↓
結晶粒の再形成 = 「再結晶」

図 8.4 再結晶に伴う組織および性質の変化

[金属材料工学 改訂・SI版, 森北出版]

3) 変態(同素変態)

結晶構造の変化

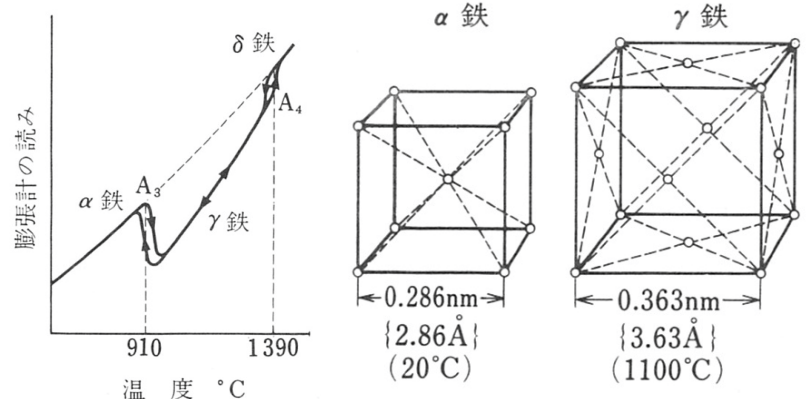
↓
新たな結晶形成を伴う

図 8.5 鉄における変態

[金属材料工学 改訂・SI版, 森北出版]

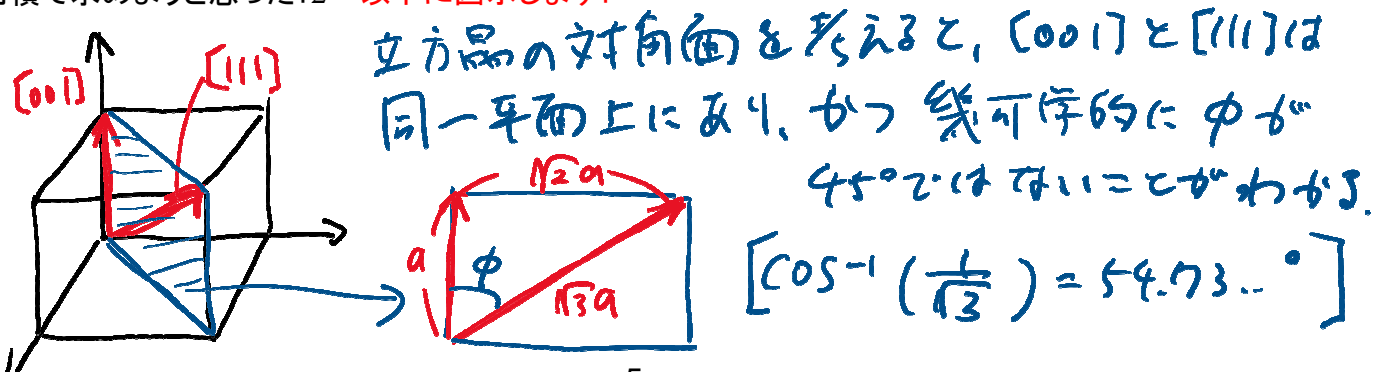


4) 微細化に効果的な元素の添加

8.4 第8回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・結晶について理解が深まった, θ と ϕ の取り方が理解できた, 結晶粒の大きさが強度に関わることがわかった, $\cos \phi$ の出し方がわかった, 応力集中による隣接結晶粒内の転位への影響が理解しやすかった, : 8
- ・引き続き頑張っていく, 例題に似た問題を探したりしてしっかり学習していく, このまま怠らずに頑張る, ミラー指数の表記にまだあまり慣れていないので何度も触れる, 結晶粒微細化の辺りを復習する: 6
- ・いつもより小テストの勉強に時間を必要とした, 小テストが授業より少し進んだ問題だったので難しかった, 今日は満点取れたと思う, 問題が理解できていた, 小テストのためミラー指数を復習したことによりミラー指数の便利さを理解できた: 5 ←今日の小テストは平均 8.1 点, 満点 22 名でした. 出席者(44 名)のうちほぼ半数が満点を取ったということは, 補講だからといって安易に休まない真面目な人はちゃんと小テストで結果を出せる, ということですね.
- ・昼の講義はあまり眠くならず集中できた, スライドがゆっくりでノートにまとめやすかった, わかりやすかった, わかりやすく面白かった: 5 ←4 限だと昼食からも時間が経っているし, 眠くなりにくそうですね.
- ・だんだん専門性が強くなってきて面白いが難しい, すべり系とせん断応力を組み合わせた問題が面白い, 結晶粒界によりじん性が向上するというのが意外だった, 高校でなんとなく知っていた再結晶の意味を知った: 4 ←「結晶粒界によりじん性が向上する」というのは, あくまで結晶粒が粗粒か微細粒かの比較の上で, ということです. 粒界が選択的に腐食されてじん性が低下するケースもあるので, 単結晶の方が総合的な特性は上です.
- ・復習の甲斐もあり現状の内容に余裕を持ってついていけている ←それはよかったです, これからも頑張ってください!
- ・発言したい意思はあるが問いが難しい ←確かに, もっと単純な問いの方がいいかもしれませんね.
- ・前回の小テストで定数 α は有効数字の考慮に入れないと思い込んでいた ←1 桁の単純な係数($\times 2$ とか, 明らかに有効数字では無いもの)なら考慮外ですが, 材料定数の場合はどちらかというと物理定数と同様の扱いをします.
- ・参考問題がなくなるので 10 分間で初見の問題を解くのは大変そう ←大事なポイントは毎回アナウンスしますので, それを踏まえて自主学習しておいてください.
- ・コメントで T シャツが上がっていたので今後注目していきたい, シャーペン忘れちゃったのでボールペンで書いた, 今日が折り返しでびっくり, これまでの小テストは自信があるのでこれから参考問題がなくてももしっかり復習する, ホールペッチの関係式を用いて応力計算ができた, 去年はあまり理解していなかったミラー指数がとてもわかりやすかった, しっかり理解できた, 内容が難しくなっているのでもしっかり復習する, ←補講でも真面目に授業に出る再履修の皆さんは, きっと今回は単位が取れます!
- ・[111]のなす角は 45 度だと思ったので違ふと知り驚いた, 角度を勘違いしうるので多少時間がかかっても内積で求めようと思った: 2 ←以下に図示します.



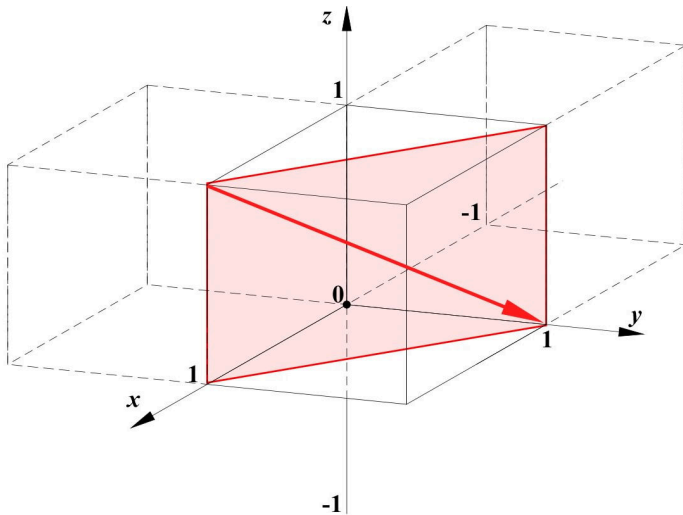
●質問

- ・転位運動は順々に起こっているのかある程度は一斉に起こっているのか？←臨界分解せん断応力に達したすべり系の結晶から転位運動が始まりますので、結晶単位では順々に転位運動が起こりますが、結晶粒内では一斉に起こっています。
- ・面の指数として(hkl)にしていたが他のアルファベットでもいいか？←逆に、なぜ変える必要があるのですか？
- ・結晶粒の図で六角形が使われていたのはなぜか？←結晶が詰まって存在しているさまを描きたかったので、それを楽に描ける六角形にしてみました・・・
- ・期末テストでは資料以外にも自分で小テストを練習した紙などは持ち込みかなのか？←もちろん、授業プリント以外でも自身で勉強・準備した資料は持ち込み可です。
- ・すべり面において分解せん断応力が起こると物質はどういうふうに変化するのか？←これまでの本講義の流れを全く理解していない(しかも2回目なのに)、ということですね。授業ファイルを何十回も見直してください。
- ・臨界分解せん断応力とパイエルス応力が同義なら値は同じになるのか？←実際の材料で生じる転位運動開始応力と、計算から求めた臨界分解せん断応力およびパイエルス応力の比較、ということになるのですが、3者がぴったり同じ値にはならないかもしれませんがかなり近い値になるはずです。
- ・すべり面法線方向はどの場面において作用するのか？←これも、すべり系のことをよく理解していないが故の質問ですね。すべり面法線方向自体が何かに作用することはもちろんないですが、これによって定義されるすべり面の方位が転位運動開始のしやすさ・しにくさに影響をする、ということをもまず理解してください。

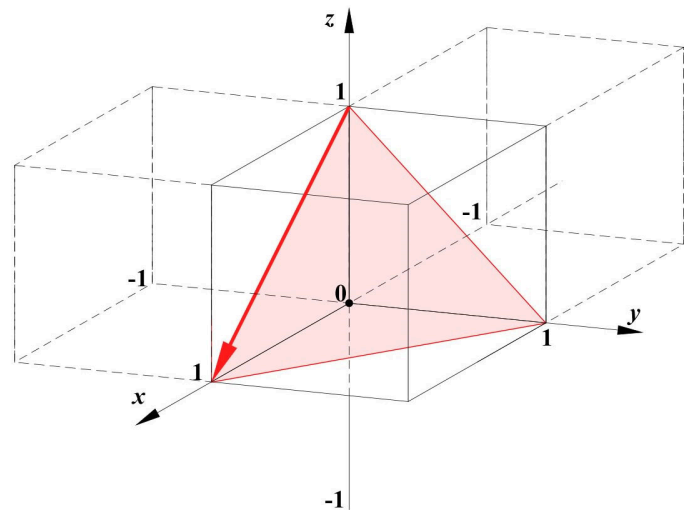
8.5 第7回小テスト解答

Q.1 以下に示すミラー指数のすべり系(面および方向)を下图に図示せよ。[各2点, 計4点]

(1) (110)面上の $[\bar{1}1\bar{1}]$ 方向



(1) (111)面上の $[10\bar{1}]$ 方向



Q.2 右図に示す面のミラー指数を求めよ。[2点]

A.2 設問の図ではZ軸との交点が不明なため、面を拡張してZ軸との交点を確認する
→ $-3/4$ であることが分かる。よって

$$(x, y, z) = \left(1, 1, -\frac{3}{4}\right)$$

$$(h, k, l) = \left(1, 1, -\frac{4}{3}\right)$$

$$(hkl) = (33\bar{4})$$

