

基礎材料組織学 第4回

- 前回：
- ・ 応力の定義（続き）
 - ・ ひずみの定義
 - ・ 弾性変形と塑性変形
 - ・ 変形のメカニズム



- 今回：
- ・ 理想変形強度
 - ・ 金属の結晶構造
 - ・ 格子欠陥
 - ・ 転位とは

4.1 材料の理想変形強度

●理想変形強度：「原子の配列を保つながら」塑性変形を生じさせるために必要の応力を理論的に考えたもの。

・結晶中の特定の面において、その上下の原子面が一斉にずれる場合を考える

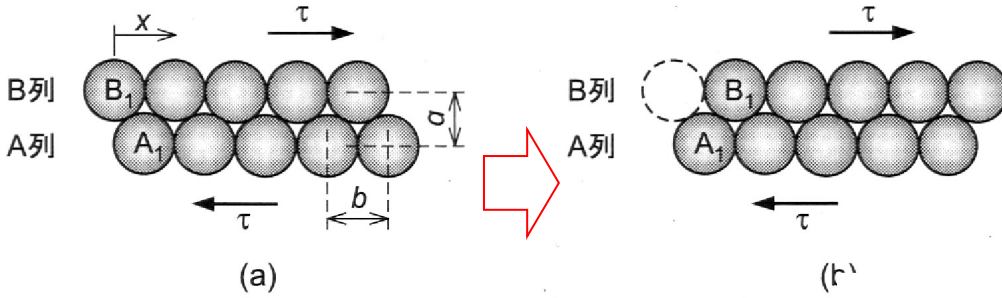


図 4.1 完全結晶における原子列のすべり

・原子の移動にはポテンシャルエネルギー P の変動を伴う。

$$P = P_0 - C \cos \frac{2\pi x}{b}$$

・荷重 $W = \frac{dP}{dx}$, せん断応力 $\tau = \frac{W}{A}$

・微小の変位 $\sin \frac{2\pi x}{b} \approx \frac{2\pi x}{b}$

・せん断ひずみ $\gamma \approx \frac{x}{a}$, かつ $\frac{b}{a} \approx 1$

∴ $\tau_{max} = \frac{G}{2\pi} \rightarrow$ 理想変形強度

$G(\text{Fe}) = 50 \times 10^3 \text{ MPa} \rightarrow \tau_{max}(\text{Fe}) = 8000 \text{ MPa}$

●理論値と実験値は数百〜数千倍異なっている。

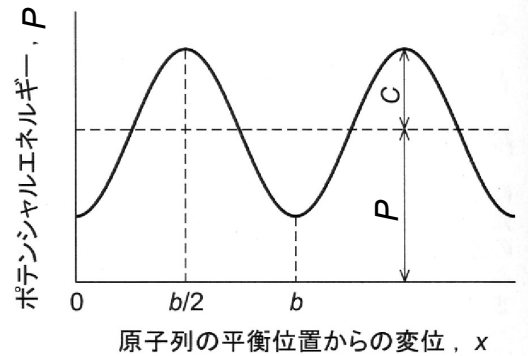


図 4.2 すべりによるポテンシャルエネルギーの変動

表 4.1 各種単結晶材料の臨界せん断応力の理論値と実験値

| 材料 | 理論値 | 実測値 | 理論値 |
|----|-------|-------|------|
| | [GPa] | [MPa] | 実測値 |
| Mg | 2.9 | 0.81 | 3600 |
| Ag | 4.4 | 0.59 | 7500 |
| Au | 4.4 | 0.90 | 4900 |
| Zn | 4.7 | 0.92 | 5100 |
| Cu | 6.3 | 0.98 | 6400 |
| Ni | 11.0 | 5.7 | 1900 |
| Fe | 12.9 | 27.5 | 470 |

・問い:なぜこのような差が生じるのか(なぜ実測値はこれほど低いのか)?

・理論の前提が現実と異なる

→ 実際の結晶には原子面配列の乱れが内在してあり(欠陥), その欠陥を介して原子は川貞欠移動できる(全てが同時ではない)

4.2 金属の結晶構造

●結晶とは? : 原子が空間的に規則正しく配列した状態。

・単位格子: 結晶内の最小単位の空間

・格子定数: 単位格子を表わす6つのパラメータ。

辺の長さ a, b, c

各軸間の角 α, β, γ

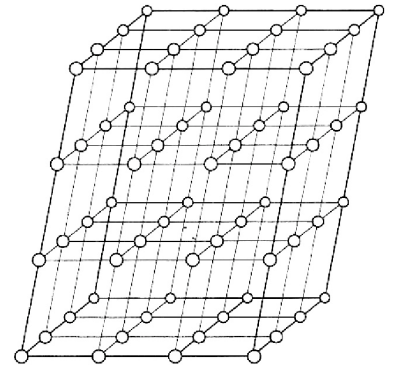
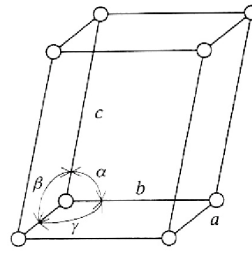


図 4.3 単位格子および結晶格子

[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

表 4.2 代表的な金属結晶構造

| 構造名 | 体心立方構造 | 面心立方構造 | 最密六方構造 |
|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 略称 | bcc | fcc | hcp |
| 配位数 | 8 | 12 | 12 |
| 最近接原子間距離 | $\frac{\sqrt{3}}{2}a$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}a$ | a |
| 原子半径 | $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ | $\frac{\sqrt{2}}{4}a$ | $\frac{a}{2}$ |
| 格子内の正味原子数 | 2 | 4 | 6 |
| 原子充填率 | 68% | 74% | 74% |
| 代表的な元素 | Fe, Cr, W | Al, Cu, Au | Mg, Ti, Co |
| 模式図 | | | |

- ・最近接原子: (固相体球として表わす) ある原子と接している別の原子
- ・最近接原子間距離: 最近接原子の中心間距離
- ・原子半径: 最近接原子間距離の $1/2$
- ・配位数: \dots の数
- ・最密方向: 最近接原子が存在している方向
- ・原子充てん率: 単位格子内で原子が占める体積の割合。

・例題: bcc 構造における原子充てん率 (=68%) を算出せよ。

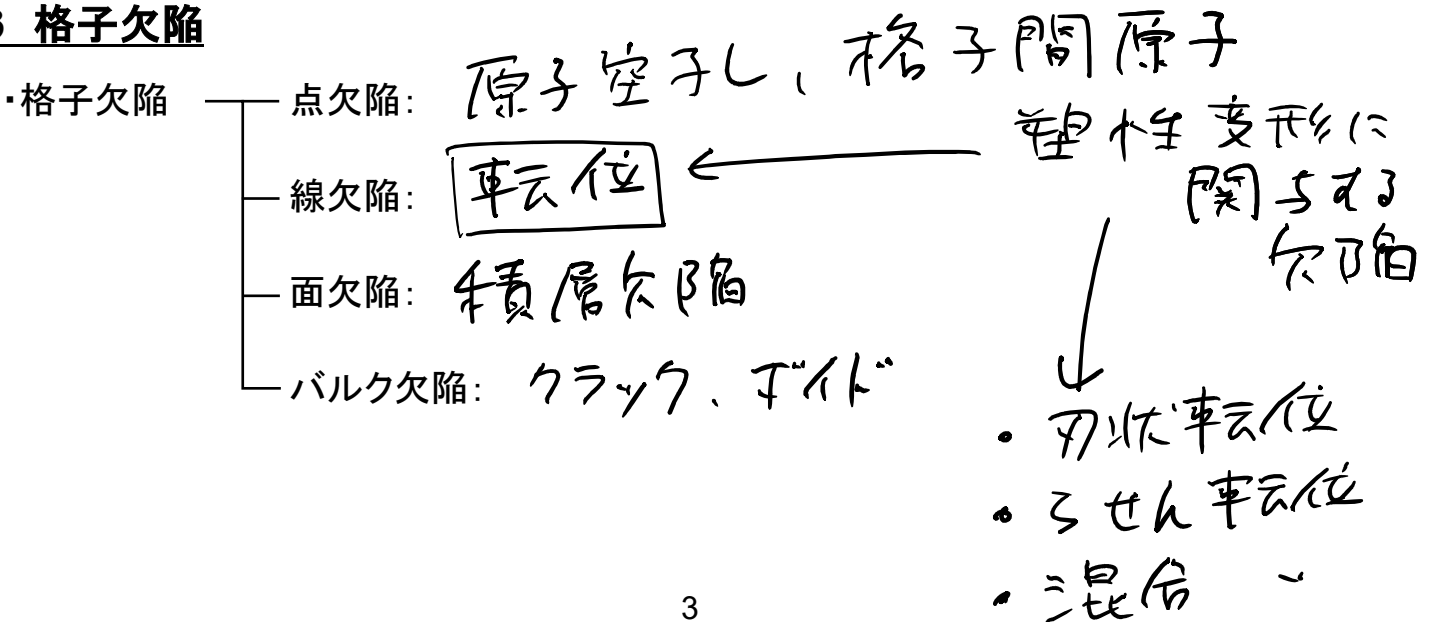
bcc の a 格子定数 $a (=b=c)$, 原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$
 正味原子数 2個

$$\text{従って } V_{\text{total}} = a^3, \quad V_{\text{atom}} = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) \times 2 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 \times 2$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{8}\pi a^3$$

$$\therefore \frac{V_{\text{atom}}}{V_{\text{total}}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{8}\pi a^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi = 0.68 \rightarrow 68\%$$

4.3 格子欠陥



4.4 転位とは:

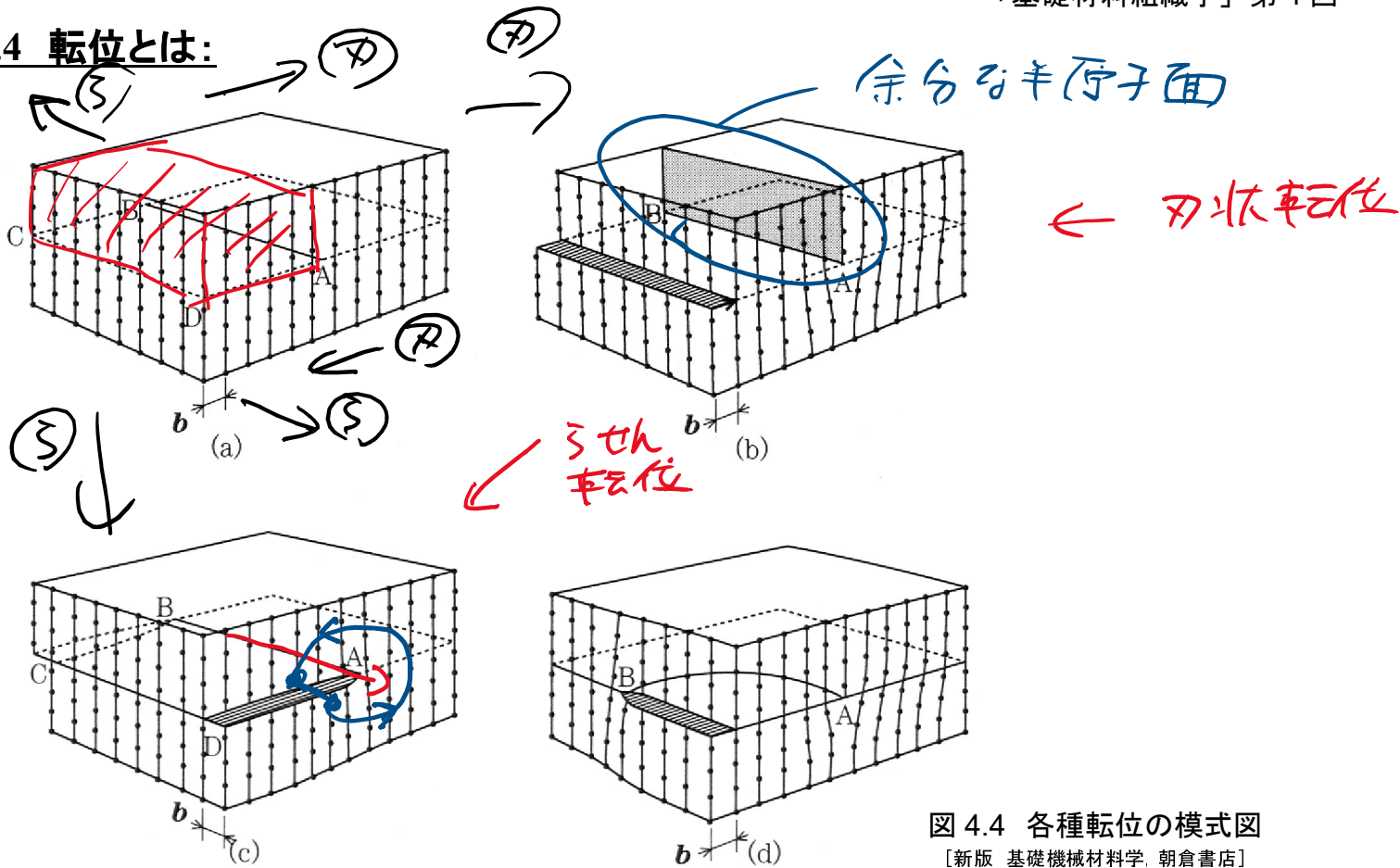


図 4.4 各種転位の模式図
[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

●上図(a) [完全結晶] 中の面 ABCD に着目→面 ABCD における上下の原子結合を切断したと仮定

→ D→A 方向に力をかけ, 面 ABCD より上部の原子全てを 1 個分ずらしたと仮定した状態: 「刃状転位」

- ・ 線 AB 上の灰色面: 原子配列が途中で途切れている, 「余分な半原子面」
- ・ それ以外では原子配列は保たれている。

→ D→C 方向に力をかけ, 面 ABCD より上部の原子全てを 1 個分ずらしたと仮定した状態: 「らせん転位」

- ・ らせん転位には「余分な半原子面」は存在しない。
- ・ 面端部 (CB 部, DA 部) では上下の原子配列が合っているが, それ以外では保たれている。

4.4 第4回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・新たな内容を理解できた, 前半は理解しやすかった, 原子配列について学んだ, 結晶構造について思い出せた, 高校での内容の理解を深められた, bcc の充填率を高校で習ったのにうまく計算できなかった, 理論値と実測値の違いを知った, 再履修なので前回の反省を活かしてやれている:20
- ・転位を復習する, 難しくなってきたので復習する, 結晶に関して復習する, 孔子欠陥を復習する, ポテンシャルエネルギーを復習する, 充填率を復習する, 小テストの有効数字の扱いを確認する:17
- ・小テストではうまく解答できた, 小テスト復習不足だった, 有効数字に注意しつつ小テストに取り組めた, 参考問題をしっかりやっていたので早く解答できた, 時間が足りなかった, そこそこできた, 最近の取り組み方(前日の復習とテスト前の勉強)で小テストが取れている, 前回の内容を復習できる問題だった, 小テストはまだ簡単なので解けるが丁寧に解答する, 有効数字に迷った, 間違えてしまった:15 ←今回の小テストは, 平均 5.7 点, 満点 10 名でした. 次ページ(解答)の「注」でも書きましたが, 多くの人が「 $v = -\frac{\epsilon'}{\epsilon}$ 」という式から出発していて, 一律減点でした.
- ・転位の部分がわかりづらかった, 転位は初めてだったので少し苦戦した, 後半になるにつれてわからなくなった, らせん転位が理解できなかった, 転位の種類を覚えるのが大変:13 ←転位の運動については次回講義でも説明するのですが, とりあえず刃状転位・らせん転位それぞれの運動についてのアニメーションもアップロードしておきます.
- ・転位の形態が面白かった, 転位が材料のせん断応力に大きな影響を与えることは理解できた, アニメーションの説明がわかりやすかった, 転位の動きは理解できた, 図やイラストでわかりやすかった, 転位の大きなイメージは掴めた:11
- ・実測値と理論値が違う理由で前提を疑うという考えは日常生活にも当てはまる, 理論値と実測値が数千倍も違うのは驚いた:2
- ・例題を通して考えられたので理解しやすかった
- ・サッカー気になったが授業に集中できた ←何とか同点でしたね, ホツとしました・・・

●質問

- ・らせん転位はズレる感じ, 刃状転位は押し潰される感じ? らせん転位でも余分な半原子面が生まれるのでは? ←HP にアップしたアニメーションを見て貰えばわかりやすいと思いますが, 刃状転位にしてもらせん転位にしても転位が通過した結果として上下の原子面にずれが生じることになります. ただ, らせん転位においては刃状転位のような余分な半原子面は存在しません.
- ・理想変形強度は現実とかなりの差があるが今後使うことはあるのか? ←強度に関する理論的取り扱いについては, 3 年次の授業でもまた出てきます.
- ・実際に材料を作る際に転位などの欠陥はどれくらい含まれるのか? ←転位に関しては「転位密度(単位堆積あたりの転位線の総長さ)」で表されますが, 材料の状態によって $10^5 \sim 10^{11} \text{ cm/cm}^3$ 程度の範囲で変化します.
- ・意図的に欠陥を含ませることもあるのか? ←あります, 分野外ですが例えば半導体においては欠陥を積極的に導入することで機能を制御するようなこともなされているようです.
- ・ミニツツペーパーの内容で得点が加算されることはあるのか? ←残念ながらないです.
- ・7/15 の補講日程について(他の科目の補講と重なった)? ←先程学情の連絡通知でも送りましたが, 補講日を 7/15(水)4 限から 7/29(水)4 限に変更しました.

4.5 第3回小テスト解答

W

ポアソン比 $\nu = 0.300$, 元の長さ $l_0 = 3.00$ m, 元の直径 $d_0 = 10.00$ mm の丸棒を垂直荷重 $W = 100.0$ N で引張り, 縦ひずみ $\varepsilon = 3.00 \times 10^{-3}$ を生じた.

Q.1 横ひずみ ε' [-] を求めよ. [4点]

A.1 ポアソン比 $\nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$ より, 横ひずみ $\varepsilon' = -\nu\varepsilon$ (注: 引張なので横ひずみは負) $= -9.00 \times 10^{-4}$ [-]

Q.2 丸棒の変形後の直径 d [mm] を求めよ. [6点]

A.2 横ひずみの定義式 $\varepsilon' = \frac{d - d_0}{d_0}$ より, $d = d_0 \varepsilon' + d_0 = -9.00 \times 10^{-4} \cdot 10.00 + 10.00$
 $= -9.00 \times 10^{-3} + 10.00$
 $= -0.00900 + 10.00$
 $= 9.991$
 $= 9.99$ mm

注: A.1 にて・横ひずみ ε' が負になる理由を説明していない

・ポアソン比の式を $\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$ と記載している 場合はいずれも減点とした.

A.2 にて, 計算方法によって答えが 9.991 mm となった場合はそれで正解とした.

参考問題

- Q.1 ヤング率 $E = 70.0 \text{ GPa}$, 元の長さ $l_0 = 100.0 \text{ mm}$ の丸棒が垂直荷重 700.0 N で引張られるとき, 生じる伸びを $\lambda = 1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 以下に抑えるためには, 直径 d を何 mm 以上にすれば良いか求めよ.