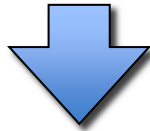


基礎材料組織学 第 6 回

- 前回：
- ・ 転位の運動と特徴
 - ・ パイエルス応力



- 今回：
- ・ 金属材料の強化機構
 - ・ 加工強化（硬化）とベイリー・ハーシュの関係
 - ・ すべり系

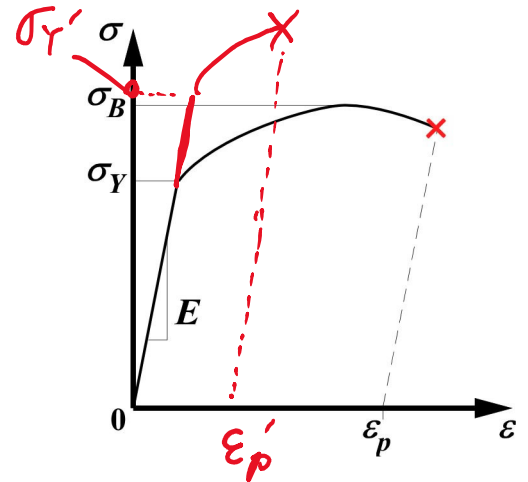
6.1 金属材料の強化機構

・問い: 鉄鋼材料を熱処理(例: 焼入れ)することにより

◎ヤング率は変化するか? → 変化しない

◎降伏応力は変化するか? → 変化する

塑性ひずみ $\epsilon_p \rightarrow$ 減少する



・弾性特性(ヤング率, せん断弾性係数, ポアソン比, etc...)

→ 材料の種類(元素)自体に依存, 材料固有の値
→ 微細組織にほとんど影響を受けない
→ 「構造鈍感性」

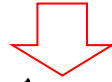
・塑性特性(降伏応力, 耐力, 引張強さ, etc...)

→ 材料の微細組織に依存, 顕著な影響を受ける
→ 「構造敏感性」

いわゆる「強度」

● 材料の微細組織を様々な方法で制御することにより, 材料の強度向上が図れる。

- ・材料の強度: $\propto$ 塑性変形のしにくさ
- ・塑性変形: $\propto$ 転位の運動に伴う原子の移動力
- ・微細組織の制御: 転位に着目する必要がある。



- ① 転位の存在を排除する... 完全結晶化
- ② 転位の運動を妨害するような組織

- ・加工硬化 (硬化)
- ・結晶粒微細化
- ・固溶硬化
- ・析出硬化

6.2 加工強化(硬化)とベイリー・ハーシュの関係

- 「加工」とは?: 原料を加工するものに力を加えること。

- ・材料加工: 材料に力その他の作用を加えて所定の形状・寸法にすること。

→ 除去加工: 材料を切る (切削), 削る (研削), 等
→ 切りくずが出る

→ 非除去加工: 材料に力をかけて変形させる (塑性加工),
熱をかけてつめる (溶接), 等

- ・材料加工により塑性変形進行 → 転位の運動に伴う / 伸長・弯曲・増殖 → 転位密度の上昇

・加工前: $10^5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ $\longleftrightarrow$ ・加工後: $10^9 \sim 11 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$

●加工強化（硬化）の基本的メカニズム：転位同士の相互作用の影響が転位密度の上昇により下さくなり、結果として転位が運動しにくくなる。

●単結晶のせん断変形応力と転位密度の関係：

「バiley-Hirschの関係」

$$\tau = \alpha G b \sqrt{\rho}$$

α : 0.5程度の定数

G : せん断弾性係数

b : バーガースベクトル
(大抵1のみ)

ρ : 転位密度

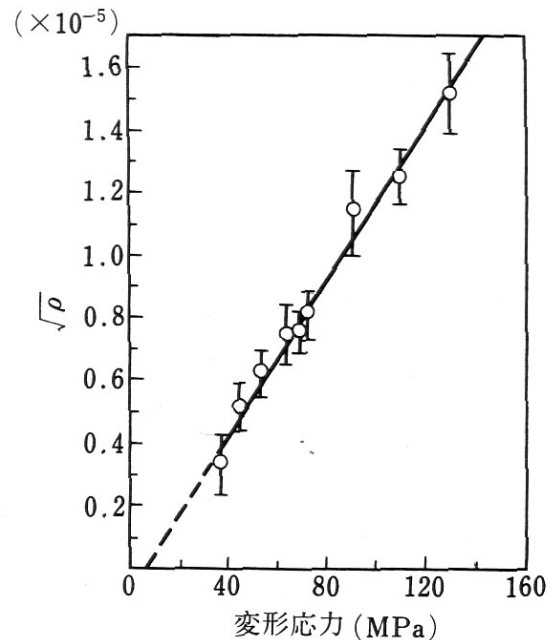


図 6.1 転位密度と変形応力の関係
[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

例題：単位体積中の銅（せん断弾性係数 $G = 45.0 \text{ GPa}$, バーガースベクトル $b = 0.256 \text{ nm}$ ）

において転位密度 $\rho = 7.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ であった。この時のせん断変形応力 τ を求めよ。ここ

で材料定数 $\alpha = 0.50$ とする。

$$G = 45.0 \text{ GPa} = 45.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2, \quad b = 0.256 \text{ nm} = 0.256 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\rho = 7.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}, \quad \alpha = 0.50$$

$$\begin{aligned} \therefore \tau &= 0.50 \times 45.0 \times 10^9 \times 0.256 \times 10^{-9} \times \sqrt{7.8 \times 10^{13}} \\ &= 50.87 \dots \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= \underline{51.17 \text{ MPa}} \end{aligned}$$

6.3 すべり系

- 転位の運動：結晶構造で固有の、特定の結晶面にてのみ起る。
 「すべり面」
 ↓
 原子の充填が最も密な面

・問い：転位の運動の方向も特定の方法＝「すべり方向」でのみ生じる。すべり方向はどのような特徴を持っているか？

A、原子間距離が最も短い方向
 = 最近接原子が存在する方向

- すべり系：「すべり面上のすべり方向」の組み合わせを指して「すべり系」と呼ぶ。

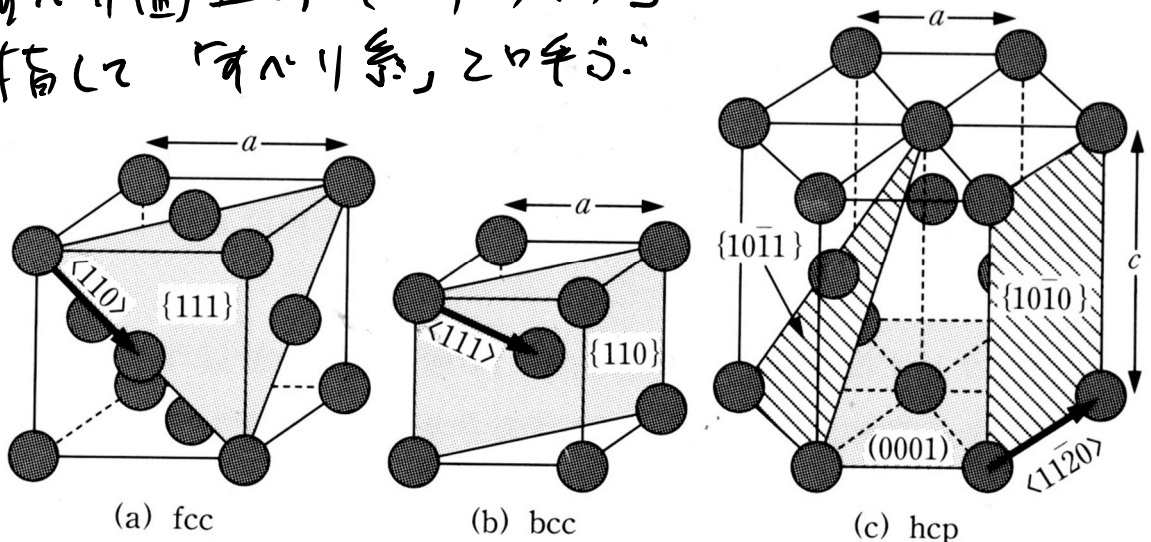


図 6.2 各結晶構造のすべり系の例

[入門 転位論, 裳華房]

表 6.1 各結晶構造のすべり系

[入門 転位論, 裳華房]

Structure	Materials(Example)	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Sysytem
BCC	a-Fe, W, Mo	{011}	$\langle 11\bar{1} \rangle$	$6 \times 2 = 12$
		{112}	$\langle 11\bar{1} \rangle$	$12 \times 1 = 12$
		{123}	$\langle 11\bar{1} \rangle$	$24 \times 1 = 24$
FCC	Al, Cu, g-Fe	{111}	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$4 \times 3 = 12$
HCP	Cd, Mg Ti, Be, Mg Ti, Be	(0001)	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$
		{10\bar{1}0}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$
		{10\bar{1}1}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$

- すべり面・すべり方向を表すために定められた方法
 ミラー指数

6.4 第6回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・単位を揃えるのが苦手だったので練習する, 参考問題がない分復習に力を入れる, 前回内容がまだはつきりしていないので勉強する, すべり面や方向についてイメージできていないので復習する, 転位密度の計算をしっかりと復習する, 授業が終わった当日にも復習の時間を取る, 用語の細かい説明などもしっかり覚えたい, 前回以前の知識の理解が重要になると感じた, すべり系についてよくすべってるヤツと復習する:16←最後のコメントは・・・(^); あと, 参考問題についてですが私の勘違いでした, 次回(第5回小テスト)とその次(第6回小テスト)までは参考問題あり, 第7回小テストから参考問題なしです.
- ・微細組織の制御法が多数あって面白いと感じた, 塑性変形が転位の移動によって生じることを理解した, 転位の運動がすべり面上のみで起きることがわかった, 転位の重要性をとて感じた, 転位で材料の強度やその強化法が説明できると知った, 加工硬化のメカニズムと同じ理由で強度が高まると理解した, 滑り方向がなぜ結晶構造に依存するのかがわかった, 今回の授業内容で頭の中が整理された, :13
- ・小テストは計算問題ではなかったのので解きやすかった, 小テストで漢字を間違えてしまった, 滞りなく解けた, 対策をしていたから早く答えられた, ある程度できた気がする, 復習があまりできなかったのでも小テストでミスした, もちろん満点を取れた:9←今回の小テストは, 平均 8.7 点, 満点 28 名でした. 今までの小テストの中で最良の結果で, 5 点以下の人が 3 名しかいませんでした. ちなみに「もちろん満点を取れた」の人も 5 点でした.
- ・例題の計算を有効数字を意識しながらできた, ベイリーハースシュの関係の理解が深まった, 自力で解けたのでよかった, 単位を合わせるのが難しかった, 例題で有効数字を間違えた:8
- ・加工の種類について理解できた, 材料の特性と加工について結びつけられた, 加工についてが少し難しかった, 非除去加工の動画に驚いた:7
- ・熱処理してもヤング率が変わらないことに驚いた, 意外だった, 弾性特性や塑性特性について興味深く感じた:4
- ・内容が難しくなってきた遅れ気味, 内容がより専門化してきた初めて聞くワードや概念も出てきた:2←それや専門科目ですので. 知ってることばかり聞いてても面白くないでしょう.
- ・hcp のすべり系の表し方が fcc や bcc と違って難しそう←軸が 4 つありますので. ただ時間の関係上, ミラー指数の話は立方晶系(bcc と fcc)に限定します.
- ・ジェットエンジンのブレード部品は単結晶部品が使われていたと思う←よく知ってますね! その通り, 耐熱性や高温強度特性が高いため, ガスタービンやジェットエンジンの部品で使われますが, 製造コストがめちゃめちゃかかります.
- ・次回からのミラー指数が気になる←再履修の人がこのコメント書いてちゃまずいでしょ w

●質問

- ・復習をするときに重要なことは? ←まずは小テストや例題について見直し, 次解くときには完璧に解けるように, 曖昧な箇所を完全につぶしておくことです.
- ・弾性特性が熱処理しても変化しない理由は? ←弾性特性が原子間の結合状態に由来するからです. 例えば炭素鋼(Fe と C の化合物)は bcc ですが, さらに Cr や Ni を加えるとステンレス鋼になり結晶構造としては fcc に変えることができます(=微細組織の変化). しかし, 隣接する Fe 原子同士の結合が変わるわけではないので, ただの炭素鋼とステンレス鋼のヤング率は同程度です
- ・hcp の Cd はなぜ表に 1 つしかないのか? ←この質問の意味がちょっとわかりません・・・他の元素も全て 1 つずつしか記載されていませんが, よかったら次回のミニツツペーパーにより詳しく書いてください.

- ・材料加工の目的は変形させることと転位密度を上げることのどちらが主なのか？←授業中にも話したと思いますが、もちろん材料加工の主目的は「材料を所定の形状・寸法にすること」です。
- ・塑性変形後の転位密度に幅があるのは材料に由来するのか？←材料にも関係します(加工硬化しやすい材料としにくい材料があります)が、それとともに加工の程度にも幅があるからです。
- ・完全結晶化がどういった理由で現実的に可能ではないのか？←基本的に金属材料は一旦熔融してから必要な添加元素等を加えたのちに冷却・凝固させて組織を形成させますが、その過程でどうしても欠陥が導入されてしまうからです。完全結晶化のため様々な工夫がされてきましたが、ごくわずかな体積のレベルなら完全結晶体を形成できても、我々が一般的に使用可能なレベルの体積では欠陥を完全に排除することは達成されていません。
- ・非除去加工の動画で上から力をかけていたのにどうやってあの形状にしたのか？どのくらいの力をかけていたのか？←オス型(凸形状の型)とメス型(凹形状の型)を組み合わせ、材料(薄板)を挟み込んで加工するので、力をかける方向とかは関係ないです。力の大きさは当然材料種別や加工条件(板厚や品物の大きさ)によって変わりますが、一般的には数t~数十tにも達します。
- ・除去加工と非除去加工でどちらがより精度が高いのか？←どちらも加工条件によって変化はしますが、除去加工の方がより高精度加工が可能です。
- ・転位をなくしてしまうと強度は上がるかもしれないが加工はできなくなるのでは？←ご指摘の通り、かなり加工が困難になることは間違いないですね。
- ・焼入れの加熱時間や温度によって強度は変化するのか？←焼入れに関しては、「最低何度以上まで上げなくてはいけない」とか「何秒以内に何度まで下げなくてはいけない」という条件が決まっており、それをクリアしていないと「焼入れ不良」という現象が生じ本来の焼入れ組織の強度に達しません。
- ・本プログラムはなぜ生物系の授業が多いのか？←そうでしょうか？「工業生化学」「生体分子工学」「生物材料工学」の3科目だけのような気がします。
- ・bcc・fcc・hcpは何の略なのか？←"Body-Centered Cubic", "Face-Centered Cubic", "Hexagonal Close-Packed"です。
- ・3ページの例題の単位は整合しているのか？←以下の通りです。

$$\begin{aligned}
 & N/m^2 \cdot m \cdot \sqrt{m^{-2}} \\
 &= N/m^2 \cdot m \cdot m^{-1} \\
 &= \underline{N/m^2}
 \end{aligned}$$

6.5 第 5 回小テスト解答

Q. 転位と金属材料の強化機構について述べた以下の文章において、空欄 [A] ~ [J] に当てはまる語句を答えよ。[F と G は順不同、各 1 点]

- 転位は結晶中の [A] 欠陥の一種である。せん断応力による原子の移動 (= [B] 変形) において、[C] 面上の原子が全て同時に移動するのではなく、転位の運動を介した原子の逐次的移動が生じる。
- 転位を介した原子の逐次的移動により、通常の金属材料では [D] 強度の数百～数千分の一の応力で [B] 変形が進行する。
- [E] とは転位による原子配列の乱れの中心であり、原子が既に移動した部分とまだ移動していない部分の境界を示す。またバーガースベクトルとは、転位の運動によって生じる原子の移動の [F] と [G] を表すベクトルである。
- 転位の特徴として、①周辺と [H] の作用が働く、②運動に伴い伸縮や [I] をする、③転位同士の [J] が働く、といった点が挙げられる。

解答欄

A 線(「格子」も可)

C すべり

E 転位線

G 大きさ(F と順不同)

I 増殖(「湾曲」も可)

B (2 箇所) 塑性

D 理想変形

F 方向(G と順不同)

H 力(「応力」「応力場」も可)

J 相互作用

参考問題

完全焼なましした銅に対して圧延加工を行った結果、せん断変形応力が圧延前の 175.0 MPa から 350.0 MPa に上昇した。ここで銅のせん断弾性係数 $G = 45.0$ GPa, バーガスベクトル $b = 0.256$ nm, 材料定数 $\alpha = 0.50$ とする。

- Q.1 ベイリー・ハーシュの関係から圧延加工前の転位密度 ρ_{before} と加工後の転位密度 ρ_{after} をそれぞれ求めよ。[各 3 点]
- Q.2 この加工による転位密度の増加分 $\Delta\rho$ を求めよ。[4 点]