

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?

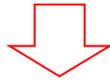
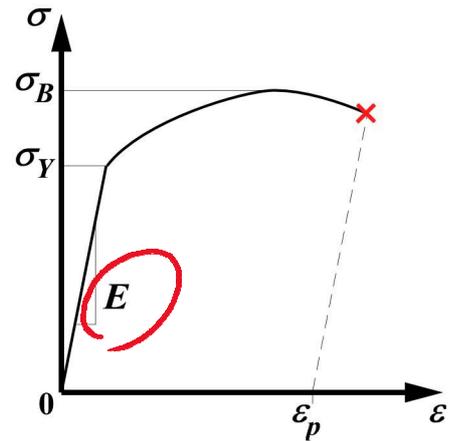
変化する: 変

◎降伏応力は変化するか?

同じくらい

→ 変わらない (弾性特性)

→ 変わった (塑性特性)

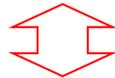


・弾性特性(ヤング率, せん断弾性係数, ポアソン比, etc...)

→ 材料の種類(元素)自体に依存する, 材料固有の性質

→ 〃の微細組織(結晶構造, 合金化による他の原子の混合, 等)にはほとんど影響を受けない

「構造鈍感性」

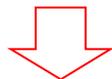


塑性特性(降伏応力, 耐力, 引張強さ, etc...)

→ 材料の微細組織の状態に依存する。
(〃 に顕著な影響を受ける)

「構造敏感」

(いわゆる「強度」)

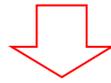


● 材料の微細組織を様々な手法で制御することにより, 材料の強度向上が可能となる。

・材料の強度: 塑性変形のしにくさを表す指標

・塑性変形: 転位の運動に伴う原子の移動

・微細組織の制御: ... に着目、2つの方向性



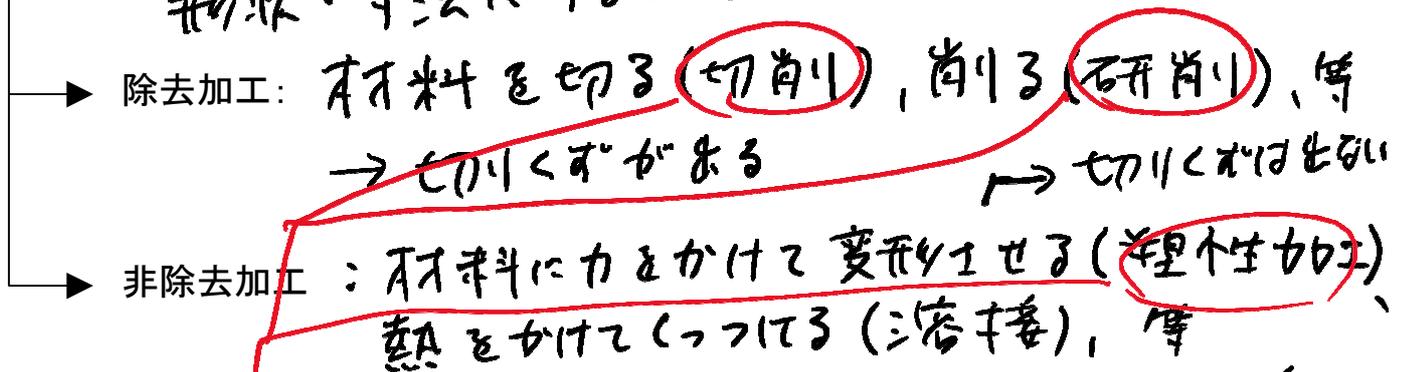
- ① 転位の存在を極力排除する - 完全結晶化
- ② 転位の運動を妨害する様な組織形成

- ・加工強化(加工硬化) ・結晶粒微細化
- ・固溶強化 ・析出強化

6.2 加工強化(硬化)とベイリー・ハーシュの関係

● 「加工」とは? : 原料や材料に力を加えること

・材料加工: 材料に力やその他の作用を加えて、所定の形状・寸法にすること。



・材料加工により塑性変形進行 → 転位の運動に伴う転位の伸張や増殖 = 転位密度の上昇

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

↓

$1 / \text{cm}^2, \text{cm}^{-2}$ 2

●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小さくなるため、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：

ベイリー-ハッシュの関係

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

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

(原子間距離)

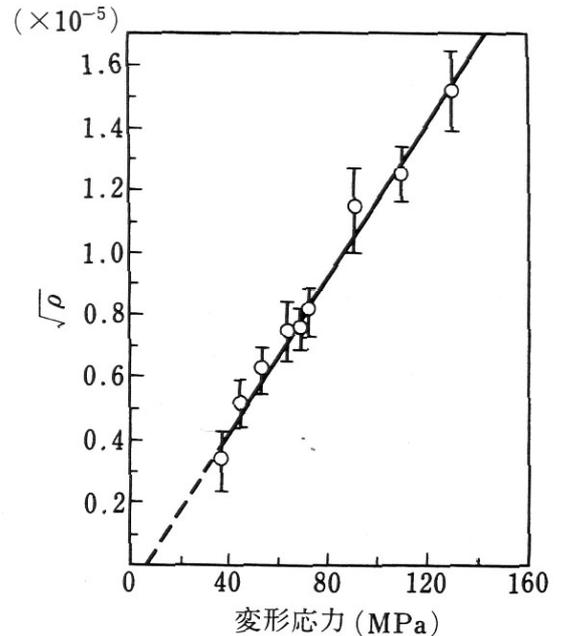


図 6.1 転位密度と変形応力の関係
[新版 基礎機械材料学, 朝倉書店]

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。

$$G = 45.0 \text{ GPa} = 45.0 \times 10^9 \text{ Pa} = 45.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$b = 0.256 \text{ nm} = 0.256 \times 10^{-9} \text{ m}, \quad \rho = 7.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$$

$$\begin{aligned} \therefore \tau &= 0.50 \times 45.0 \times 10^9 \times 0.256 \times 10^{-9} \times \sqrt{7.8 \times 10^{13}} \\ &= 50.87 \dots \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= \underline{\underline{51 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

6.3 すべり系

- 転位の運動：結晶構造に固有の、特定の結晶面上でのみ生じる。
「すべり面」

・問い：転位の運動の方向も特定の方向＝「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？

→ 最も原子間距離が短い方向。
(= 最近接原子が存在する方向)

結晶構造により決まる

- すべり系：結晶構造により決まる、特定のすべり面とすべり方向の組み合わせ

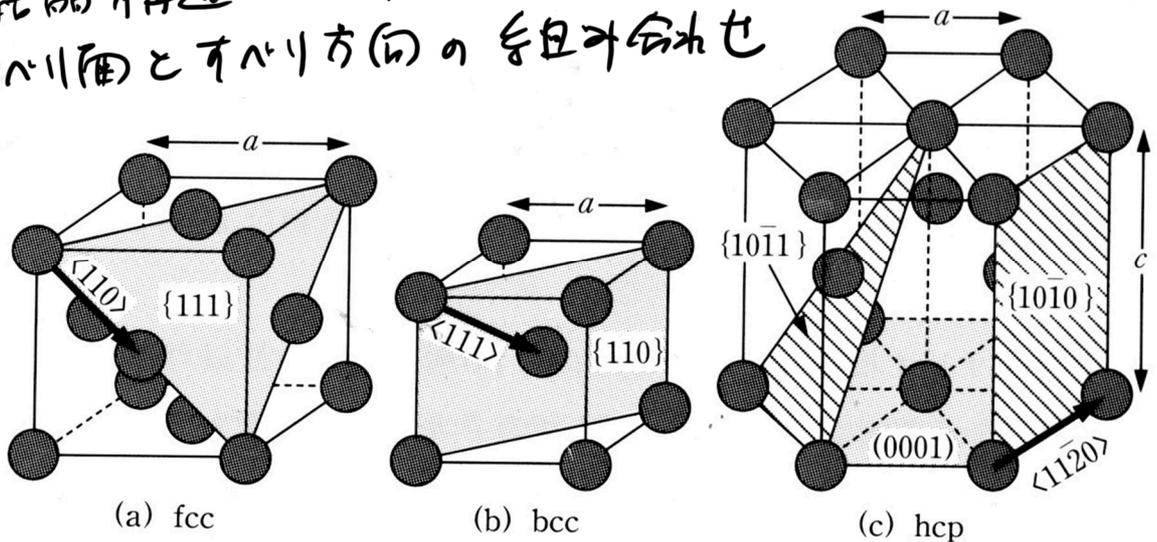


図 6.2 各結晶構造のすべり系の例

[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 System
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, γ-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、すべり方向を一言で表すための方法：
「ミラー指数」

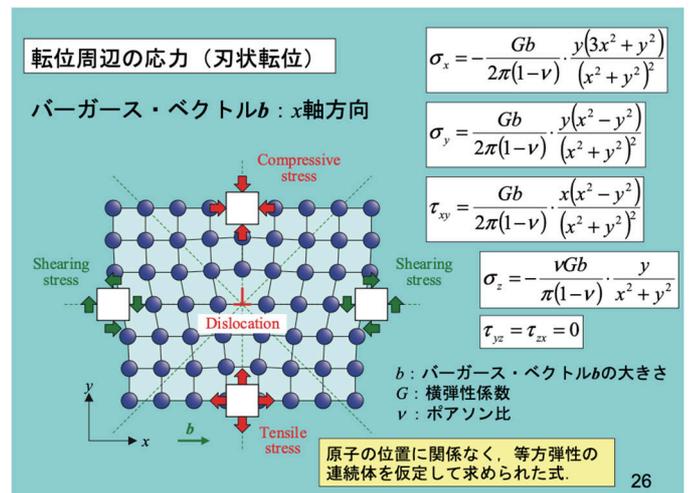
6.4 第6回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・説明がまとまっていて分かりやすかった, 材料の強度やすべり系に関する話がためになった, 授業の合間に例題があるので理解が深まった, 塑性変形の要素についての解説がわかりやすかった, ヤング率について理解できた, 材料の強度は塑性変形のしにくさであることがわかった, 弾性特性と塑性特性の違いや加工について理解できた, 加工強化のメカニズムについてわかった, 加工硬化とベイリーハーシュの関係について理解できた, 塑性変形に関する視野が広がった:21
- ・穴埋め問題は知識の定着や確認になる, 小テスト全然解けなかったので web ページを活用する, 参考問題があるのを自分の不注意で知らなかった, HP を見て計画的に学習する, 小テストで転位の内容を整理できた, 比較的スムーズに解けた, 穴埋め形式の小テストもあるのかと感じた, HP を毎回見て勉強していたが参考問題を見忘れていた, 小テスト頑張る, 単語を暗記するだけだったので簡単だった, 計算以外にも語句理解が必要:12←今回の小テストは, 平均 8.3 点, 満点 32 名でした. 満点じゃなかった人もほぼ 7~9 点は取れていましたので良かったと思います.
- ・4~6 回の内容はかなり強く結びついているので復習をしっかりするモチベーションにつながる, 接頭語について復習する, 授業が難しくなってきたので復習する, ベイリーハーシュの関係の定数が何を表すのかを復習する, 昨年もすべり面苦戦したのでしっかり復習する, 昨年はミラー指数の理解が曖昧だったのでしっかり理解する:9
- ・単位が合っているのかをしっかりと注意する, 単位の調整に慣れなければいけない, 計算時の単位変換や有効数字に関しては自信を持ってできるようになってきた, この講義を通して少しずつ単位への注意ができ始めている:6←計算における単位への注意はこの科目に限らず科学技術計算で必須ですから, なるべく早く慣れられるといいですね.
- ・転位の相互作用により硬化がなされることに驚いた, ステンレスの加工の動画で力技で変形させていることに驚いた, 絞りの動画をずっと見ていられる, 熱処理によってヤング率が変わらないことに驚いた, 本来結晶の乱れである転位が多ければ多いほど変形応力が大きくなるのが面白い:5←講義内容について驚いたり興味を持ってもらえると, こちらとしても嬉しいです.
- ・鉄鋼を熱処理するとヤング率は変わるのに降伏応力が変わらない理由を知った←まるっきり逆に理解しているようです...ミニッツペーパーにはわざと逆に書いてみた(本当は理解している), ならいいのですが.
- ・小テストで思ったより点が取れていないかもしれないので授業内での意見を求める機会を増やしてほしい←点が取れていないと思ったら, まずは自分で出来ることから始めるてみては?いきなり人に頼ります?
- ・今日は遅刻してしまったが次回からは絶対しない←遅刻は, 自分で自分の首を絞めているだけですから.
- ・前回より例題が多く友達とたくさん話せて良かった←他の学年だともっとわちゃわちゃ話してますよ.
- ・たまに読めない文字があった←極力雑な字にならないよう気をつけます.
- ・少し寒いのでクーラーの温度を上げてほしい←今日は当初 24 度設定で, 途中で 25 度に上げました. 次回からは当初温度を 25 度にします. それ以上あげると多分「暑い」という意見が出てきますし, また部屋の中の位置によっても感じ方が違う(風が直接当たる/当たらない, 等)ので, 申し訳ないですがそれでも寒い場合は位置を変えるか, 軽く羽織るものを用意してください.
- ・今日から7月だがまだまだ暑くなるのだろうか←もう夏ですよ. 梅雨は空けたのかな?暑さはこれからが本番でしょう.
- ・新たに学ぶ用語が多くなってきて大変
- ・転位やすべり方向が難しかった

●質問

- すべり方向が1つの原子に対して複数ある時どうなるのか？←いい質問です，もちろん通常は複数あります．その中で，転位の駆動力としてのせん断応力が最も高い方向において転位の運動が優先的に進行します．その辺は数回後の「分解せん断応力」という内容で説明します．
- なぜ合金化しても弾性変形に対して影響を受けないのか？←合金化といっても，添加される合金成分は通常多くても20%程度までであれば，メインの元素の弾性特性が反映されることになります．一方，特殊な合金(Ni-Cu合金)のようにお互いが100%溶け合うようなものであれば，割合が逆転すると相手元素の弾性特性が強調されるようになります．
- 構造敏「感」性ではないのか？(敏「盛」性になっている)←ご指摘ありがとうございます，完全な書き間違いです……「感」が正しいです．
- 計算において 10^6 や 10^9 は必ずMやGに変換しなくてはいけないのか？←必ずではありませんが，一般的に使われている単位(MPaやGPa)は無条件に変換したほうがいいです．
- 転位の運動を妨害するような組織とは具体的にどのようなものなのか？←今日説明した「強化方法」の加工硬化以外については，第8回以降で具体的に説明します．
- 転位の多さ少なさで金属素材の販売値は変わるのか？←「販売値」とは価格のことでしょうか．転位が多い(=強度が高い)状態で売れる場合も，転位が少ない(=加工がしやすい)場合もあり，その素材の用途によるので，一概に転位の多少だけで値段は決まらないと思います．
- ベーリー・ハーシュの関係でなぜ弾性特性が出てくるのか？←これは私は正直気にしたことがありませんでした(ベイリー・ハーシュの関係は実験結果から求められた経験式であり，理論的根拠がないため)．以下は私の個人的理解ですが，加工硬化を生じる原因は転位の相互作用であり，またそれは転位自体が応力場を有することに起因します．その応力場は，原子配置に基づく弾性計算により想定され，そこでもGとbが含まれます(下図参照)ので，それがベイリー・ハーシュの関係の立式の際にも考慮されたのではないかと今のところ考えています．
- 塑性加工の動画を視聴した，時加工後の材料は元より耐久性が低くなってそうだと感じたが，溶接と塑性加工はどちらが優れているのか？←「耐久性」という語にどのような意味を持たせているのか分かりませんが，単純に「強度」という意味なら当然加工硬化が生じているはずなので向上しているはずですが，もちろん溶接でもいくつかの部品を組み合わせると同様の形状を作ることは可能でしょうが，塑性加工により継ぎ目のない形状を1工程で形成できることは非常に大きなメリットとなります．
- 計算する数値に $\sqrt{\quad}$ がついていると単位や次元にも $1/2$ 乗が残るのか？←もちろんです．例えば破壊力学の分野で用いられる「応力拡大係数」というパラメータ($K = \sigma\sqrt{\pi a}$, a:き裂長さ)の単位は「 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 」となります．
- はじめの問いの図で σ_Y 以上で曲線になっているのは弾性特性→塑性特性に変化したのか？←逆に聞きたいのですが，第3回講義のP.3は見た覚えがないですか？
- せん断変形応力の単位は N/m^2 なのか？← $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right] [\text{m}] \left[\left(\frac{1}{\text{m}^2}\right)^{1/2}\right]$ なので $[\text{N}/\text{m}^2]$ です．
- 熱処理によって酸化した場合も弾性特性は変わらないのか？←酸化したとしても通常表面に限定されま



すので、体積のほとんどが酸化物に変わるような熱処理は行われません。そもそも、酸化の影響が懸念される場合は酸化が生じない雰囲気(還元 or 真空)で熱処理されます。

- ・転位密度の単位は cm/cm^3 とあったが $/\text{cm}^2$ とは違うのか ← 同じです。
- ・鉄鋼材料に熱処理をすると降伏強度は上がる(=強度が上がる)のか? ← 今日の冒頭でそう説明したはずですが、聞いていなかったですか?

◎以下の質問は一人がまとめて書いてくれました。正直、「授業内容をもう少し理解してくれていれば、しなくて済む質問だよな…」と思わざるを得ないものも含まれています(この人だけじゃなく、ここまでの質問内容にもそれは当てはまりますが)。

- ・10.0 や 1.00 の中央の 0 は 1~9 の数字でも意味のある 0 (1~9 の数字に挟まれた 0 or 小数以下の右端の 0) でもないが何に分類されるのか? ← これは説明が不十分でした、意味のある 0 の定義の 1 つめは「1~9 の数字もしくは意味のある 0 に挟まれた 0」とするべきでした。
- ・原子半径は最近接原子間距離の半分だがなぜ直径の $1/2$ という表し方ではないのか? ← もちろん、半径なので直径の半分と表現してもいいです。ただこの場合は、立方晶格子の格子定数として a が与えられた条件に基づき記述しているので、格子定数 a から幾何学的に求めた最近接原子間距離 → 原子半径という順序で定義した、ということだけです。
- ・パイエルス応力の式は煩雑だが数学的に意味はあるのか? ← 数学的な意味と煩雑さを関連づけるのは考え方としておかしいと思います(煩雑な式はすべて数学的な意味を疑ってかかる?)。
- ・ポテンシャルエネルギー P ($P = P_0 - \cos \frac{2\pi x}{b}$) について、グラフから式を立てたいが方法は? ← 本学の大学生レベルならちょっと考えれば出来ると思いますので、今後は自分でまず考えてみてください。今回は以下に記します。

① 周期 2π の \cos 関数 ($\cos x$) を周期 b の \cos 関数 ($\cos \frac{2\pi x}{b}$) に変換する

② 変換後の \cos 関数に負号 $[-]$ をつける(グラフの上下が反転する)

③ P 軸方向に P_0 を足す(振幅全体が P 方向に P_0 分上昇する) → 完成

- ・「余分な半原子面」が言葉だけだとわかりにくいイラストだとどんな感じになるか? ← 余分な半原子面のイラストや動画は授業内で散々示してきていますが、1 つも見ただ覚えませんか?
- ・フックの法則はバネ以外の弾性体にも適用していいのか? ← 「バネにしか適用できない」と説明した覚えはないです。一般的な形状の材料にももちろん適用可能です。
- ・理想変形強度はなぜ $G/2\pi$ の形なのか? ← 導出された式に対して「なぜこの形なのか」と聞く人を初めて見ました。「導出された結果としてこの形になった」という返答しかありません。なお、この講義内でこれからも色々な式を示していきますが、時間の関係上今後も詳細な導出を全ての式においては行いません。

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]

- a) 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。
- b) 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。
- c) [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。
- d) 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(格子でも可)B (2箇所) 塑性C すべりD 理想変形E 転位線F 方向G 大きさH 力(応力, 応力場でも可)I 増殖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]