



第2章 力学的挙動

目的 金属材料の力学的挙動および強化機構について理解する。

- | | | |
|--------------|----------------------|------------|
| 1. 応力とひずみ | 1.1 材料の取扱 | 1.2 応力・ひずみ |
| | 1.3 フックの法則 | 1.4 ポアソン比 |
| | 1.5 静水圧 | |
| 2. 応力-ひずみ曲線 | 2.1 公称応力/ひずみと真応力/ひずみ | |
| | 2.2 応力-ひずみ曲線 | |
| | 2.3 機械的性質 | |
| 3. 弾性変形と塑性変形 | 3.1 弾性変形 | 3.2 塑性変形 |
| | 3.3 すべり系 | 3.4 すべりと転位 |
| 4. 金属材料の強化 | 4.1 構造鈍感・敏感 | |
| | 4.2 固溶強化 | |
| | 4.3 析出強化 | |
| | 4.4 加工硬化 | |
| | 4.5 組織微細化による強化 | |

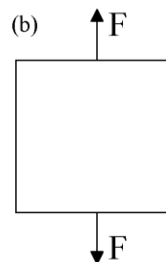
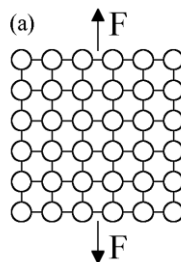
演習問題



1. 応力とひずみ

1.1 材料の取扱

固体を微視的に捕らえ、原子間の結合を通じて力が伝達されると考える。



固体を巨視的に捕らえ、連続体中を力が伝達されると考える。

図1 材料の取扱: (a)原子レベル, (b)連続体

この授業では、両者の考え方を適宜使用する。



1. 応力とひずみ

1.2 応力 (stress)



図2 垂直応力

垂直応力 (normal stress) σ

力 F の作用下で、面 (断面積 A) に垂直に生じる応力 (図2)

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

せん断応力 (shear stress) τ

力 F の作用下で、面 (断面積 A) に平行に生じる応力 (図3)

$$\tau = F/A \quad (2)$$

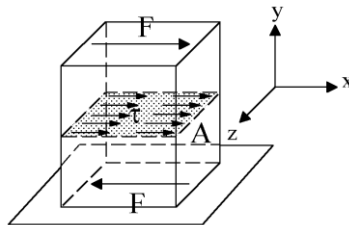


図3 せん断応力

応力の表記法

x 面の x 方向の応力: σ_{xx} , あるいは σ_x

y 面の x 方向の応力: τ_{yx} , あるいは σ_{yx}

※面の方位: 面の法線方向が面の方位



1. 応力とひずみ

1.3 ひずみ (strain)

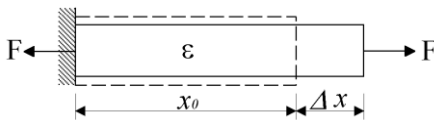


図4 垂直ひずみ

垂直ひずみ (normal strain) ϵ

基準長さ x_0 の方向と微小変形 Δx の方向が同一のひずみ (図4)

$$\epsilon = \Delta x/x_0 \quad (3)$$

せん断ひずみ (shear strain) γ

基準長さ y_0 の方向と微小変形 Δx の方向が垂直となるひずみ (図5)

$$\gamma = \Delta x/y_0 = \tan \theta \quad (4)$$

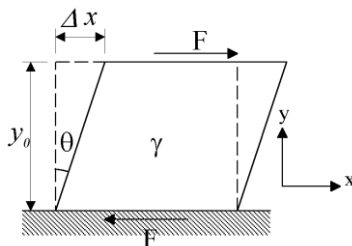


図5 せん断ひずみ

ひずみの表記法

基準方向 x , 変形方向 x : ϵ_{xx} , あるいは ϵ_x

基準方向 y , 変形方向 x : γ_{yx} , あるいは ϵ_{yx}



1. 応力とひずみ

1.4 フックの法則 (Hook's law)

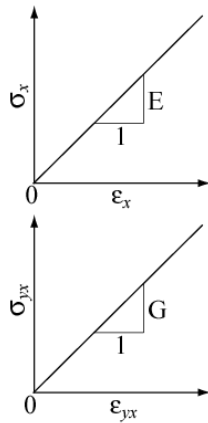


図6 フックの法則

フックの法則

弾性変形時に成立するひずみと応力の線形関係

$$\sigma_x = E\epsilon_x, \quad \sigma_{yx} = G\epsilon_{yx} \quad (5)$$

ヤング率 (Young's modulus) E

垂直ひずみと垂直応力の比例定数

剛性率 (shear modulus) G (μ)

せん断ひずみとせん断応力の比例定数



1. 応力とひずみ

1.5 ポアソン比 (Poisson's ratio)

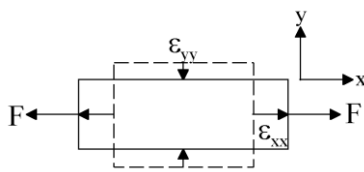


図7 ポアソン比

ポアソン比 ν

直行する2方向の垂直ひずみの比

$$\nu = \epsilon_{yy} / \epsilon_{xx} \quad (6)$$

弾性変形時 $\nu \approx 0.3$

塑性変形時 $\nu = 0.5$ (体積一定)

1.6 静水圧 (hydrostatic pressure)

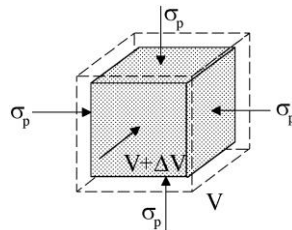


図8 静水圧状態

体積ひずみ (volume strain) ϵ_V

$$\epsilon_V = \Delta V / V \quad (7)$$

体積弾性率 (normal strain) K

$$K = \sigma_p / \epsilon_V \quad (8)$$



2. 応力-ひずみ曲線

2.1 公称応力/ひずみと真応力/ひずみ

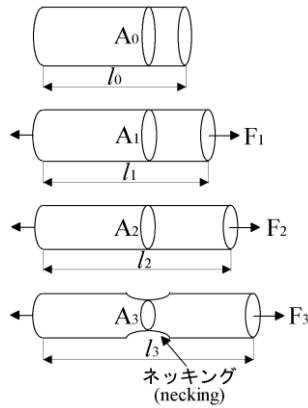


図9 一軸方向引張の下での変形

公称応力 (nominal stress) σ_n

初期断面積を基準とした応力

$$\sigma_n = F_i / A_0 \quad (9)$$

真応力 (true stress) σ_t

瞬間の面積 A_i を基準とした応力

$$\sigma_t = F_i / A_i \quad (10)$$

公称ひずみ (nominal strain) ε_n

初期長さを基準としたひずみ

$$\varepsilon_n = \Delta l / l_0 = (l_i - l_0) / l_0 \quad (11)$$

真ひずみ (true strain) ε_t

瞬間の変形の積算により求めたひずみ

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^{l_i} \frac{1}{l} dl = \log_e(l_i / l_0) \quad (12)$$



2. 応力-ひずみ曲線

公称ひずみと真ひずみの相違

$$\varepsilon_n = \frac{l_2 - l_0}{l_0} \neq \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \log_e \left(\frac{l_2}{l_0} \right) \\ &= \log_e \left(\frac{l_2}{l_1} \right) + \log_e \left(\frac{l_1}{l_0} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

公称ひずみと真ひずみの関係

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \log_e \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \log_e \left(\frac{l_i - l_0}{l_0} + 1 \right) \\ &= \log_e(\varepsilon_n + 1) \end{aligned} \quad (15)$$

公称応力と真応力の関係

弾性域 (ひずみが小さい場合)

$$\sigma_n \approx \sigma_t, \varepsilon_n \approx \varepsilon_t \quad (16)$$

塑性域 (ひずみが大きい場合)

$$\sigma_n \neq \sigma_t, \varepsilon_n \neq \varepsilon_t \quad (17)$$

塑性域では体積一定で変形するので,

$$A_0 l_0 = A_i l_i \quad (18)$$

式(18)より,

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{l_i}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} + 1 = \varepsilon_n + 1 \quad (19)$$

よって,

$$\sigma_t = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_i A_0}{A_0 A_i} = \sigma_n (\varepsilon_n + 1) \quad (20)$$



2. 応力-ひずみ曲線

2.2 応力-ひずみ曲線 (stress-strain curve)

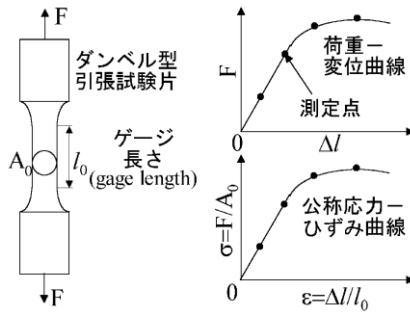


図10 公称応力-ひずみ曲線の求め方

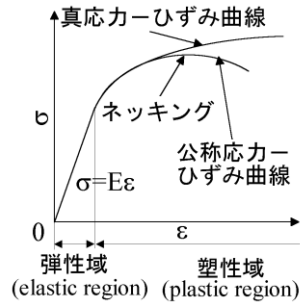


図11 応力-ひずみ曲線

○ネッキングまでの真応力-ひずみ曲線は、式(15)と式(20)を用いれば、公称応力-ひずみ曲線から得られる。



2. 応力-ひずみ曲線

2.3 機械的性質 (mechanical properties)

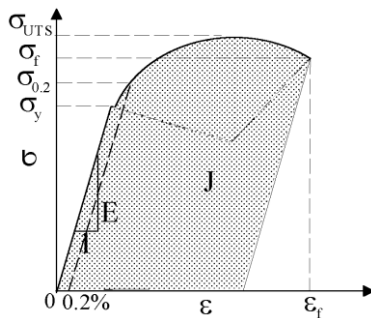


図12 機械的性質

引張り試験により、応力-ひずみ曲線を得れば、材料の機械的性質(力学的性質)が明らかとなる。

E	ヤング率
σ_y	降伏強度 (yield strength)
$\sigma_{0.2}$	0.2%耐力 (0.2% off-set stress)
$\sigma_{UTS}, \sigma_{TS}$	引張強度 (tensile strength)
σ_f	破断強度 (fracture strength)
ϵ_f	伸び, 破断ひずみ (elongation, fracture strain)
ϕ	絞り (reduction of area) $\phi = (A_0 - A_f)/A_0$ A_0 : 初期断面積, A_f : 破断時の断面積
J	じん性 (toughness)
n	加工硬化指数 (work hardening exponent)



3. 弾性変形と塑性変形

3.1 弾性変形 (elastic deformation)

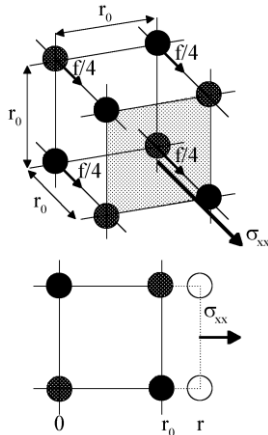


図13 引張力を受ける単結晶

図13に示すように、力は原子間の結合を通じて伝達される。材料力学で学ぶ「内力（応力）」は、物理的に言えば、原子間の結合を通じて伝達される上記の力のことである。

外力により原子間の結合が切断されなければ、除荷後に原子間距離は元に戻る。すなわち、変形は可逆的である。

その際、変形が小さければ、外力と変形の関係が線形則で近似できる。これがフックの法則である。



3. 弾性変形と塑性変形

3.2 塑性変形 (plastic deformation)

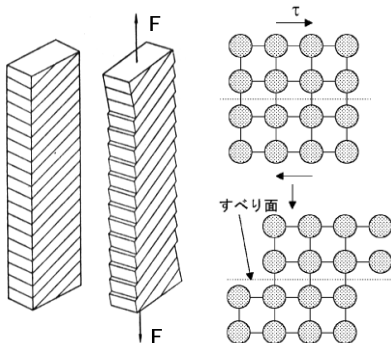
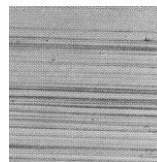


図14 すべり変形 図15 すべりの原子モデル



← 図16 金属の表面で観察されたすべり線 (slip lines)

塑性変形は、一般に「すべり」により生じる。

すべり

特定の面に作用するせん断応力により、上下の原子群が相対的に移動するために生ずる塑性変形のこと。原子群の移動後、再度、原子が結合するため、変形は不可逆的となる。すべりの発生後、表面にはすべり線(図15)が観察される。



3. 弾性変形と塑性変形

3.3 すべり系 (slip system)

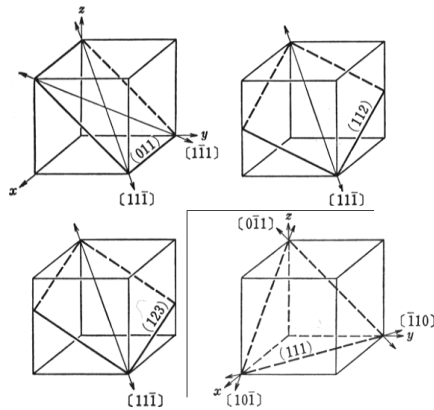


図17 すべり系(体心立方格子:左側と上, 面心立方格子:右下)

すべりは特定の結晶学的面で, 特定の方向に生じる.

すべり系

すべり面 (slip plane) とすべり方向 (slip direction) の組合せのこと.

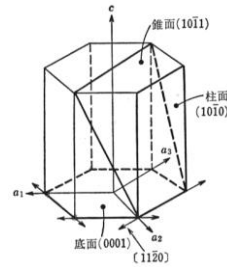


図18 すべり系(六方最密格子)



3. 弾性変形と塑性変形

表1 すべり系

Structure	Materials(Example)	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Ssystem
BCC	α -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	{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}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$



3. 弾性変形と塑性変形

3.4 すべりと転位 (dislocation)

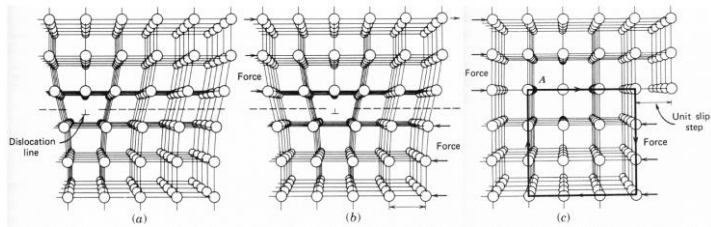


図19 転位(刃状転位)の移動

転位

図19のような格子欠陥を「転位」と呼ぶ。

すべりと転位の関係

刃状転位が右へ移動して表面に達するとすべり段 (slip step) が形成される。図15のように原子群が一度に移動するより低いせん断応力で転位の移動は生じる(図20)。

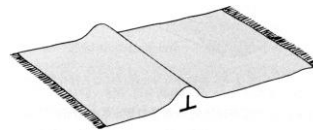


図20 カーペットのたわみの移動との類似性



4. 金属材料の強化機構

4.1 構造鈍感・構造敏感 (structure-sensitive/insensitive)

熱処理等により微視的構造を変化

- ・異種元素の固溶
- ・微細粒子の析出
- ・転位密度の増加
- ・結晶粒径の減少

↓
転位移動(すべり)に対する抵抗上昇

↓
塑性的性質が変化
(強度向上, 延性低下)

構造敏感な性質

微視的構造に依存する材料の性質のこと。この性質は、熱処理による微視組織の変化により制御可能である。

構造鈍感な性質

材料を構成する原子の種別に依存する固有の性質のこと。この性質は、熱処理により制御できない。

表2 構造鈍感・敏感な性質

性質	構造鈍感	構造敏感
力学的	弾性的性質 (ヤング率, ポアソン比等)	塑性的性質 (降伏応力, 引張強さ 延性等)
熱的	熱膨張係数 融点, 比熱 熱伝導率等	—
その他	密度	—



4. 金属材料の強化機構

熱処理材と非熱処理材の比較 (元材は同一)

- ・一般に熱処理によりヤング率は変化しない.
- ・その一方で、強度や延性は異なる.

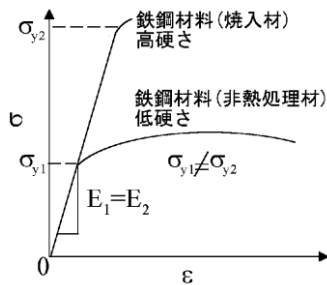


図21 熱処理材のヤング率と降伏強度

異なる金属間での比較

- ・ヤング率は材料に依存して異なる.
- ・ただし、強度などが偶然、同じになることはある.

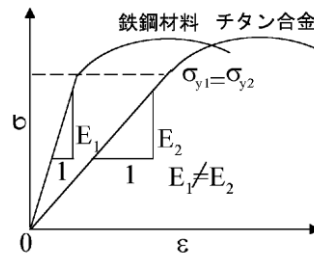
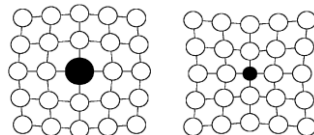


図22 異種金属のヤング率と降伏応力

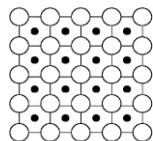


4. 金属材料の強化機構

4.2 固溶強化 (solid solution strengthening)
置換型固溶体 異種元素を混ぜて合金化した際に、溶媒原子 (solvent atom) と溶質原子の大きさが同程度の場合に形成される。例えばTi 中のAlやV など。



置換型固溶体
(substitutional solid solution)



侵入型固溶体
(interstitial solid solution)

図23 固溶体の種別

侵入型固溶体 溶媒原子と溶質原子の大きさが著しく異なる場合に形成される。例えば、Fe 中の C など。

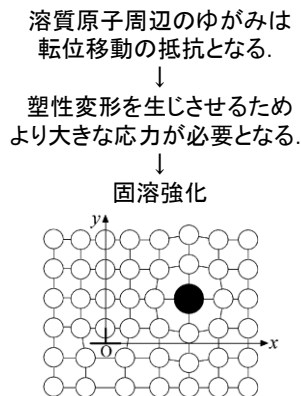


図24 溶質原子と刃状転位



4. 金属材料の強化機構

4.3 析出強化 (precipitation strengthening)

微細粒子の析出

溶体化処理により過飽和固溶体を生成後、比較的低温で時効して多数の極微細な硬質粒子を析出させる。ジュラルミン (AlとCuの合金) がその代表例。

微細析出粒子の析出が転位移動の抵抗となる。

↓
塑性変形を生じさせるためより大きな応力が必要となる。

↓
析出強化

オロワン機構 (Orowan mechanism)

転位が析出粒子 (precipitate) を切断できない場合でも、図25のように通過することができる。

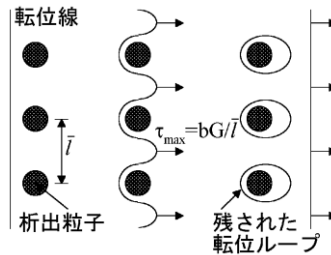


図25 オロワン機構の説明図



4. 金属材料の強化機構

4.4 加工硬化 (work hardening)

塑性変形を加えるなどにより転位を増殖させ、転位密度を上昇させる。

↓
転位間の相互作用やからみ合いのため、塑性変形を進行させるためにより大きな応力が必要となる。

↓
加工硬化

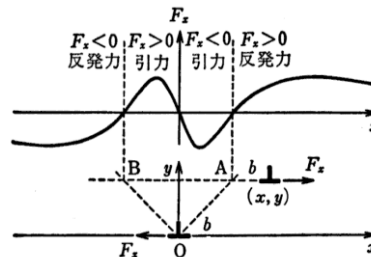


図26 転位間の弾性相互作用力



4. 金属材料の強化機構

4.5 組織微細化による強化

隣接結晶粒の結晶方位が異なるため
転位は結晶粒界に堆積 (pile-up) する。

↓
隣接結晶粒に応力場が発生し、
粒界近傍で転位が生成・移動する。

↓
隣接結晶粒にすべりが伝播する。

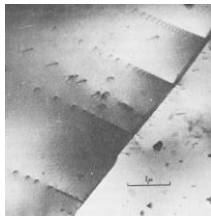


図27 粒界への転位の堆積

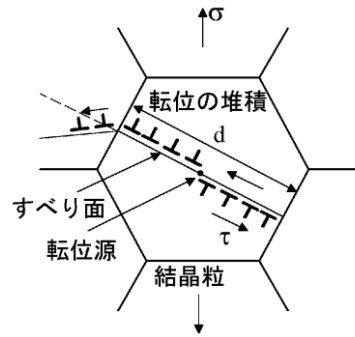


図28 すべりの伝播モデル



4. 金属材料の強化機構

結晶粒径が小さいほど
堆積転位数が減少する
(隣接結晶粒の応力場は弱まる)。

↓
作用応力を高めないと
すべりは伝播しない
(つまり、降伏強度が高められる)。

↓
組織微細化による強化

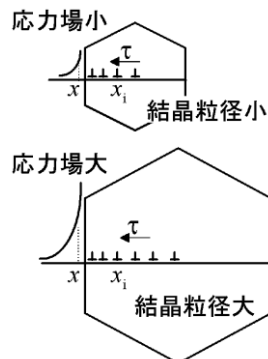


図29 転位の堆積による応力場



演習問題

問題 1 S45C(0.45%の炭素を含む鉄鋼)を丸棒試験片に加工し、これを用いて引張試験を行った。試験部の直径は14 mm、試験部の長さは50 mmであった。現在、試験片は弾性変形している。引張試験機の表示によれば、試験力は50 kNであり、試験部の長さは50.077 mmである。

- (1) 試験片に生じている公称応力を求めなさい。
- (2) 試験片に生じている公称ひずみを求めなさい。
- (3) 材料のヤング率を求めなさい。

問題 2 せん断応力の作用の下で、刃状転位が移動する様子を図に示しなさい。

問題 3 金属の強化機構の名称を4つ挙げなさい。また、その内の1つについて説明しなさい。



演習問題解答

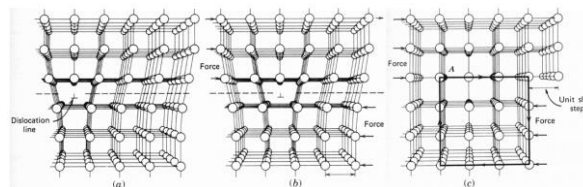
問題 1

(1) 公称応力は、
$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} = \frac{50 \times 10^3 (\text{N})}{3.14(7 \times 10^{-3} (\text{m}))^2} = 325 \times 10^6 (\text{Pa}) = 325 (\text{MPa})$$

(2) 公称ひずみは、
$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{50.077 - 50 (\text{mm})}{50 (\text{mm})} = 1.54 \times 10^{-3}$$

(3) ヤング率は、
$$E = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} = \frac{325 \times 10^6 (\text{Pa})}{1.54 \times 10^{-3}} = 211 \times 10^9 (\text{Pa}) = 211 (\text{GPa})$$

問題 2 下の図の通り。※奥行き方向の原子は記載しなくてもよい。





演習問題解答

問題 3 強化機構の名称: 固溶強化, 析出強化, 加工硬化, 組織微細化による強化.

説明例

固溶強化: 異種原子を固溶させると, 異種原子が材料の各所で結晶格子をゆがめる. このような結晶格子のゆがみは転位移動に対する抵抗となる. そのため, 塑性変形を生じさせるにはより大きな応力が必要となる. 結果として強度が向上する.