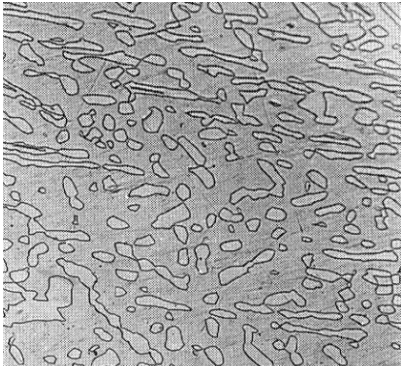


第5章 強化機構

目的 強度向上に関する基礎的事項の説明および強化機構を理解する。



5.1 強度向上に関する概念

- 5.1.1 構造敏感・構造鈍感
- 5.1.2 最弱リンク説

5.2 金属の強化機構

- 5.2.1 固溶強化
- 5.2.2 析出強化
- 5.2.3 加工硬化
- 5.2.4 組織微細化による強化

5.1 強度向上に関する概念

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

熱処理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(すべり変形)
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、熱処理により制御可能。

構造鈍感な性質

そこに存在する原子の種別に依存する材料固有の性質のこと。この性質は、熱処理により制御できない。

表5.1 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) |
| | 熱膨張係数 | |
| 熱的 | 融点, 比熱 熱伝導率等 | — |
| | その他 密度 | — |

熱処理材と非熱処理材(同一材)

- ・ヤング率は変化せずほとんど同じ.
- ・強度は大きく異なる.

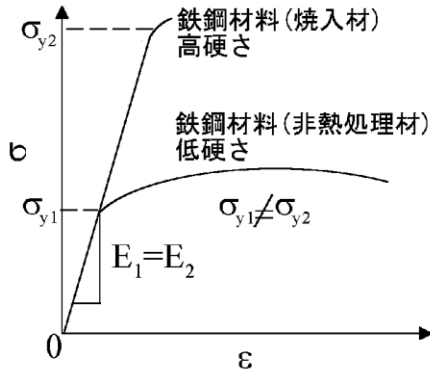


図5.1 熱処理材のヤング率と降伏応力

異種金属

- ・ヤング率は異なる.
- ・強度は同じになることもある.

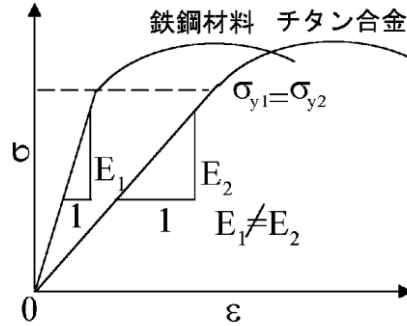


図5.2 異種金属のヤング率と降伏応力

5.1.2 最弱リンク説

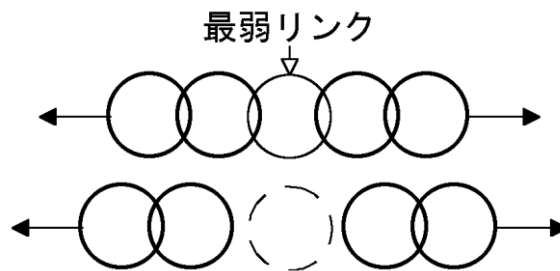


図5.3 最弱リンクと強度

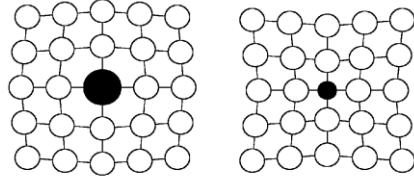
材料の強度は最弱部の強度によって決定される. 破壊が生じた際には, まず最弱部がどこであるかを探す.

5.2 金属材料の強化機構

5.2.1 固溶強化 (solid solution strengthening)

置換型固溶体

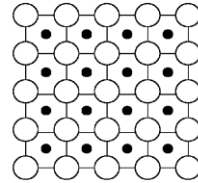
溶媒原子 (solvent atom) と溶質原子の大きさが同程度の場合に形成される。例えば、Ti 中の V など。



置換型固溶体
(substitutional solid solution)

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。



侵入型固溶体
(interstitial solid solution)

置換型固溶体における溶質原子と刃状転位の相互作用について考える。その際、原点に位置する刃状転位の応力場の式(第4章)を使用する。

図5.4 固溶体の種別

転位により、位置 (x, y) に生ずる静水圧応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{3} = -\frac{\mu b(1+\nu)}{3\pi(1-\nu)} \frac{y}{x^2 + y^2} \quad (5.1)$$

したがって、位置 (x, y) にある半径 r_0 の球表面の微小面積 ΔA には σ_m が作用するから、 ΔA に働く力は $\sigma_m \Delta A$ である。この力に逆らって球を $r_0 \epsilon$ だけ膨張させるのに必要な ΔA あたりの弾性エネルギー ΔU は次式で与えられる。

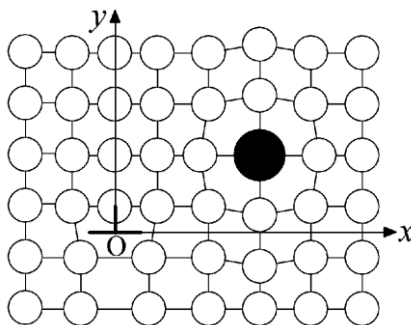


図5.5 溶質原子と刃状転位

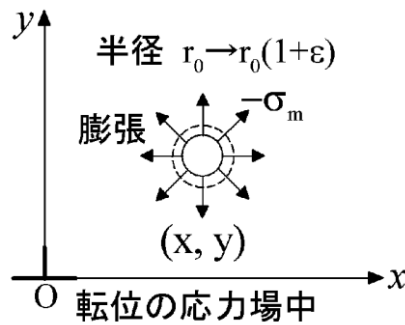


図5.6 溶質原子位置に作用する応力

$$\Delta U = -\sigma_m \Delta A r_0 \varepsilon \quad (5.2)$$

球全体で考えると,
$$U = -4\pi r_0^3 \varepsilon \sigma_m \quad (5.3)$$

式(5.3)に式(5.1)を代入すると, 溶質原子と転位の弾性相互作用エネルギーは,

$$U = \frac{4(1+\nu)}{3(1-\nu)} \mu b r_0^3 \varepsilon \frac{y}{x^2 + y^2} \quad (5.4)$$

この式を微分すると転位に作用する力が求められる. その値は,

$$F_x = \frac{dU}{dx} = -\frac{4(1+\nu)}{3(1-\nu)} \mu b r_0^3 \varepsilon \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2} \quad (5.5)$$

式(5.5)より,

- (1) 溶質原子は転位に移動を妨げるような力を及ぼす.
- (2) 溶媒原子と溶質原子の大きさの差 ε が大であるほど転位移動は妨げられる.

実際, 鉄に異種金属を固溶させると大きさの異なる原子ほど降伏応力を上昇させる効果は大きい(図5.7).

溶質原子周辺のゆがみは転位移動に対する抵抗となる.

↓
塑性変形を生じさせるためにより大きな応力が必要となる.

↓
固溶強化

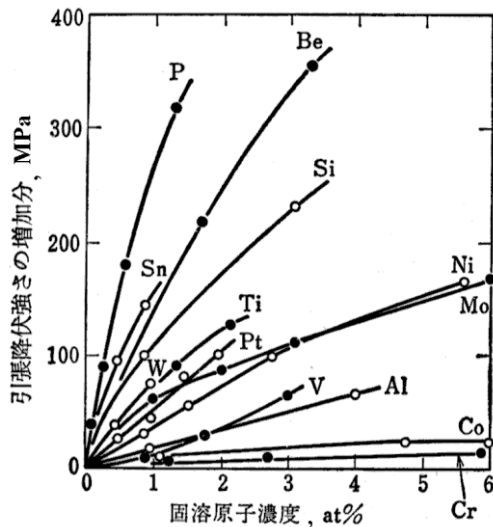


図5.7 異種原子の固溶にともなう鉄の降伏応力の変化

5.2.2 析出強化 (precipitation strengthening)

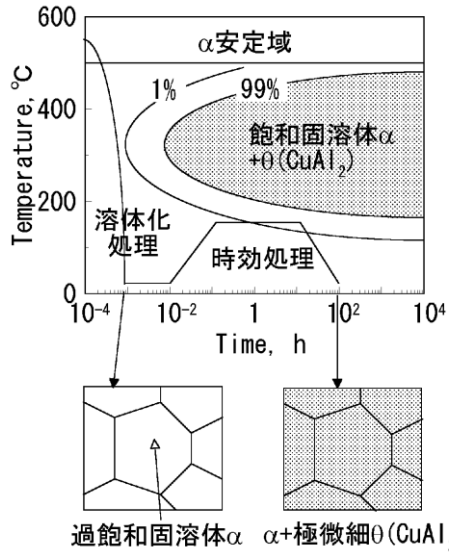


図5.8 Al-Cu系合金の溶体化処理と時効

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。

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、下図のように通過する。

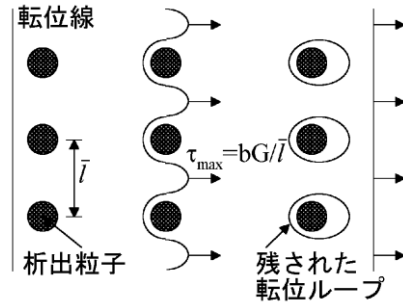


図5.9 オロワン機構の説明図

転位の増殖機構 (第4章)と同様に考えれば、転位が析出粒子間を通過するために必要なせん断応力は、析出粒子間の平均距離を \bar{l} として、

$$\tau_{\max} \approx \mu b / \bar{l} \quad (5.6)$$

- (1) 析出粒子は転位が通過できないほど硬質であることが必要。
- (2) 析出粒子間の平均距離が小さい(密に分布)ほど転位移動に対する抵抗値が上昇する。

微細析出粒子の析出が転位移動に対する抵抗となる。

↓
塑性変形を生じさせるためにより大きな応力が必要となる。↓
析出強化

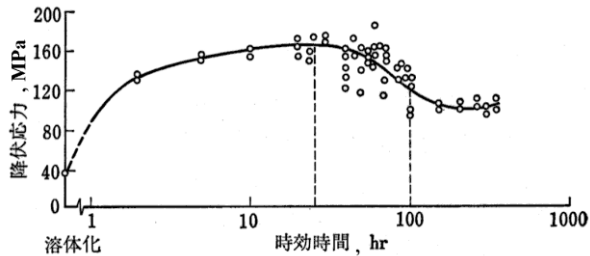


図5.10 時効曲線

図5.10に示すように時効にともない粒子が析出するにつれて、降伏応力は上昇する。その後、粒子が合体して析出粒子間の平均距離が大となるため、降伏応力は低下する傾向となる。

5.2.3 加工硬化 (work hardening)

第4章で示したように、原点 O に位置する刃状転位の応力場は、

$$\sigma_{xy} = \frac{b\mu}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (5.7)$$

また、 σ_{xy} が作用する転位に働く力(単位長さあたり)は、

$$F_x / l = \sigma_{xy} b \quad (5.8)$$

式(5.7)を式(5.8)に代入すれば、転位間の弾性相互作用力を式(5.9)のように求めることができる。

$$\frac{F_x}{l} = \frac{b^2\mu}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (5.9)$$

転位間の弾性相互作用力は、転位移動の抵抗となる。

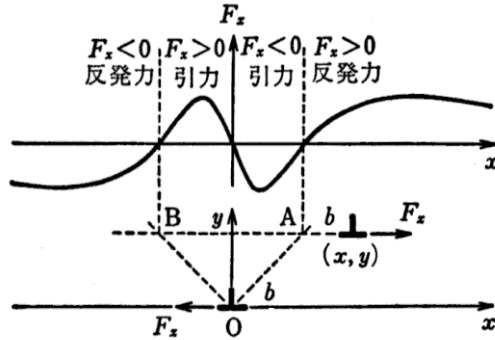


図5.11 転位間の弾性相互作用力

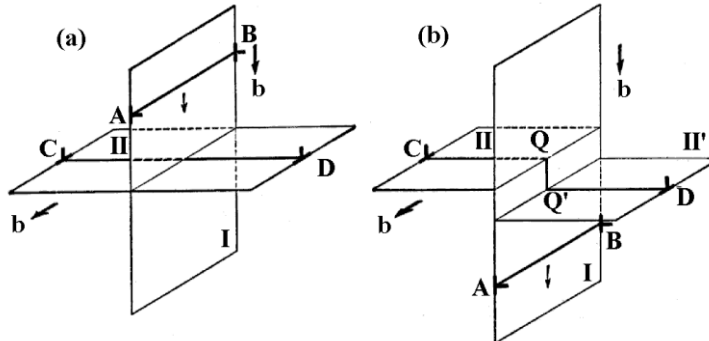


図5.12 転位の交切 (dislocation intersection)

一方、図5.12に示すように、転位同士が交切すると図中の QQ' のようなジョグ (jog) が形成される。これは転位線を線分 QQ' だけ延長することであるから、外力による仕事が必要となる。結果として、転位の交切は転位移動の抵抗となる。

実際, 図5.13に示すように, 転位密度が上昇すると, 変形応力が増大する.

塑性変形を加えて転位を増殖(転位密度を上昇)させる.

↓
 転位間の相互作用および交切のため, さらに塑性変形を進行させるためにはより大きな応力が必要となる.

↓
 加工硬化

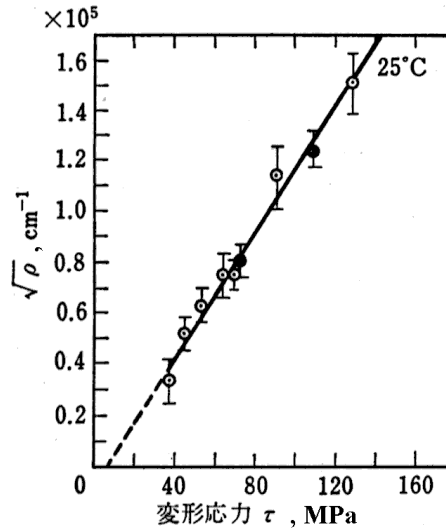


図5.13 転位密度 ρ と変形応力の関係

5.2.4 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.

↓
 隣接結晶粒に应力場が発生し, その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.

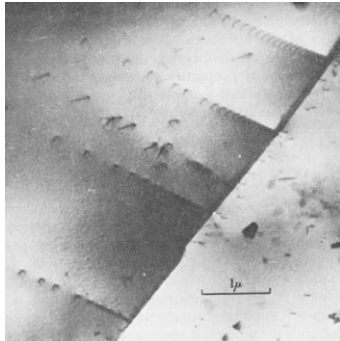


図5.14 粒界への転位の堆積

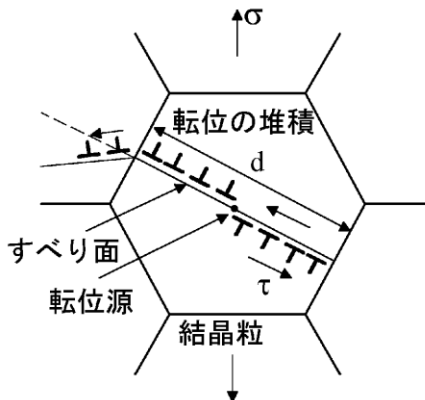


図5.15 すべりの伝播モデル

図5.16に示すように、 y 面上の位置 x_i にある転位が隣接結晶粒内の位置 x に生じさせるせん断応力は、転位の応力場の式(5.7)に $y=0$ を代入し、さらに x を相対位置 $x-x_i$ と書き直すことで、

$$\sigma_{xy}(x) = \frac{b\mu}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{x-x_i} \quad (5.10)$$

堆積転位数が n 個の時、隣接する結晶粒に発生する応力場は、

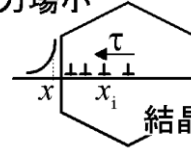
$$\sigma_{xy}(x) = \frac{b\mu}{2\pi(1-\nu)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x-x_i} \quad (5.11)$$

結晶粒径が小であるほど堆積転位数が減少する(隣接結晶粒の応力場低減)。

↓
作用応力が大でないとするりは伝播しない。

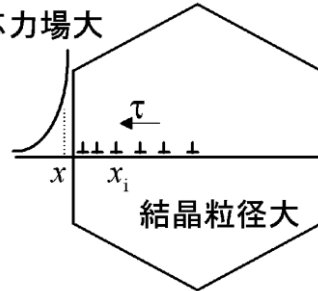
↓
組織微細化による強化

応力場小



結晶粒径小

応力場大



結晶粒径大

図5.16 転位の堆積による応力場

ホール・ペッチ(Hall-Petch)の関係

具体的には、結晶粒径 $d^{-1/2}$ と降伏応力の間、図5.17に示す直線関係が成立する。すなわち、

$$\sigma_y = \sigma_f + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (5.12)$$

ここで、 σ_f は摩擦応力であり、 k は材料定数である。

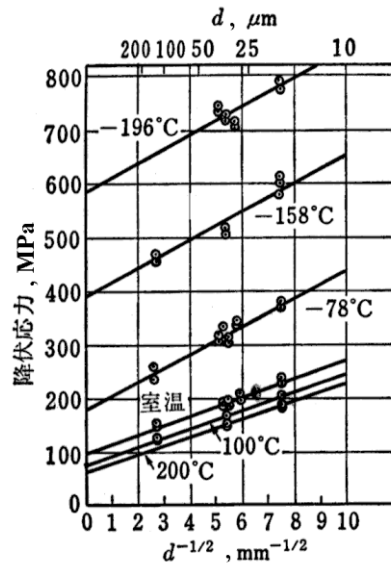


図5.17 Fe-1wt% Ni合金におけるHall-Petchの関係

結晶粒を微細化させる方法

大きな塑性変形を加えて転位密度を上昇させた後、再結晶させることで組織の微細化が可能である。

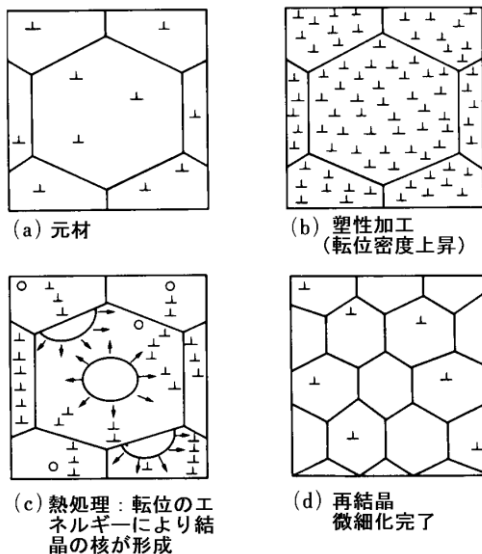


図5.18 結晶粒の微細化の方法例

ナノクリスタル

結晶粒径をナノメートルまで減少させた多結晶体. この場合, ホール・ペッチの関係は, もはや成立しない.

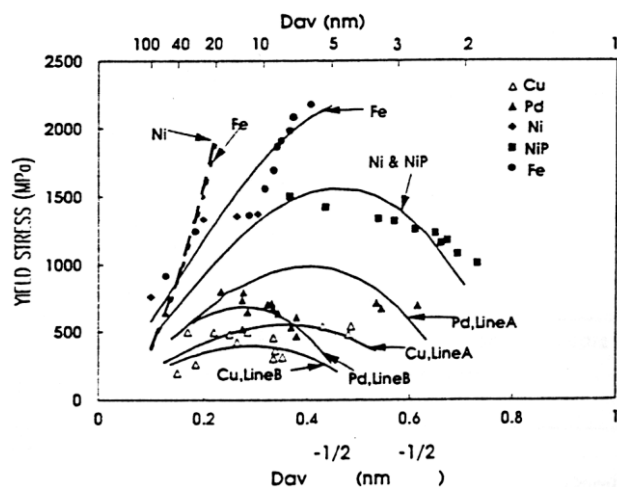


図5.19 ナノクリスタルのHall-Petchの関係

ナノクリスタルでは、粒内の転位移動が完全に阻止され、変形は粒界の原子拡散（拡散クリープ）によって生ずる。この場合、単位体積中の結晶粒界面積が大きい、すなわち結晶粒が小さくなるほど、低作用応力で変形が生ずる。

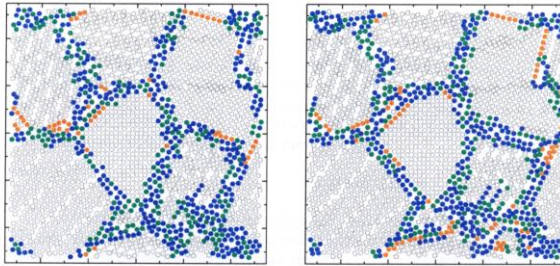


Fig. 2. Typical configuration in Ni with HA grain boundaries before and after deformation (Orange circles are hcp atoms, green (blue) circles are other 12 coordinated (non-12 coordinated) atoms, open circles are fcc atoms)

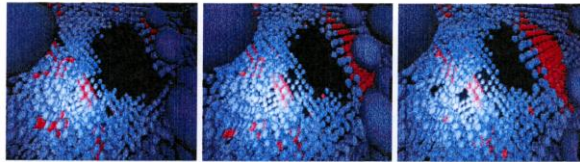


Fig. 3. The motion of a stacking fault toward the grain interior in textured (LA) Ni. (Red/blue spheres are hcp/GB atoms, while empty space indicates the removed fcc atoms)

図5.20 ナノクリスタルの変形挙動に関するシミュレーション

5章演習問題

- 問題 1 熱処理により強度を制御することはできるが、弾性定数を大きく変化させることはできない。その理由を答えよ。
- 問題 2 強化機構の名称を4つ挙げ、その内の1つについて説明せよ。
- 問題 3 アルミニウム合金（面心立方格子）中に極微細な硬質粒子が分散している。この合金の剛性率は 27 GPa で、パーガースペクトルは 0.286 nm である。次の問いに答えよ。
- (3-1) すべり面上での平均粒子間距離が $0.5 \mu\text{m}$ である時、転位が粒子間を通過するために必要なせん断応力を概算せよ。
- (3-2) 面心立方格子のテイラー因子は 3.07 である。上記のせん断応力を臨界せん断応力と考えて、合金の降伏応力を概算せよ。

5章演習問題解答

問題 1 5.1.1節参照.

問題 2 固溶強化, 析出強化, 加工硬化および組織微細化による強化.

(例)固溶強化:急冷により異種原子を過飽和に固溶させると, 異種原子が材料の各所で格子をゆがめる. このような格子のゆがみは転位移動に対する抵抗となるため, 塑性変形を生じさせるためにより大きな応力が必要となる. 結果として, 降伏応力などの強度が向上する. これを固溶強化という.

問題 3

(3-1) 転位が通過する際に必要なせん断応力は,

$$\tau_{\max} \approx \frac{\mu b}{l} = \frac{0.286 \times 10^{-9} \times 27 \times 10^9}{0.5 \times 10^{-6}} = 15.4 \text{ (MPa)}$$

(3-2) 降伏応力の概算値は,

$$\sigma_y = M \tau_{\text{CRSS}} = M \tau_{\max} = 3.07 \times 15.4 = 47.3 \text{ (MPa)}$$