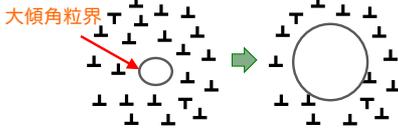


再結晶の進行

再結晶の進行には、次の2つの機構がある。

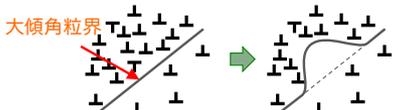
核生成・成長 (nucleation & growth)
新しい結晶粒が生成し成長する。



再結晶の駆動力は転位密度に比例する。すなわち転位密度を下げる方向に働く。このため、転位密度が増加するよう再結晶粒が縮小・消滅することは起こりにくい。従って、相変態・析出の核生成のように原子の熱ゆらぎによって生じる物ではなく、再結晶の「核」になるべき領域が加工組織の中に潜在的に存在していると考えられている。

ひずみ誘起粒界移動 (strain induced boundary migration: SIBM) (バルジング機構: bulging)

既存の粒界が移動することにより転位密度を減らす。



析出物、分散粒子は粒界移動の妨げとなる。

バルジング機構は、核生成が生じにくい低加工度の場合によく観察される。

粒成長

再結晶後の多結晶を高温に保持 → ひずみのない結晶粒が成長(粗大化)

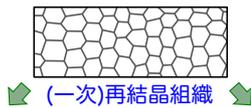
- ・ 金属、セラミックスを問わずすべての多結晶材で起こる
- ・ 粒界エネルギーの減少が粒成長の駆動力



再結晶完了(580°C, 8s) 粒成長(580°C, 15min) 粒成長(700°C, 10min)

黄銅の粒成長

(結晶)粒成長に伴う組織変化

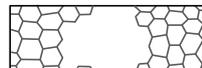


正常粒成長 (normal grain growth)



結晶粒の大きさが均一で、平均粒径が徐々に粗大化する。

異常粒成長 (abnormal grain growth)



特定の大きな再結晶粒が、小さな再結晶粒を食って異常に成長する。

→ 2次再結晶 (secondary recrystallization)

- ・ 粒成長は粒界移動によって起こる
原子が粒界を越えて短範囲拡散
粒界の移動方向と原子の運動方向は逆
- ・ 小さい結晶粒は縮小化、大きな結晶粒はより粗大化

再結晶の成長の駆動力

再結晶の段階	成長の駆動力	駆動力の大きさ
1次再結晶	転位によるひずみエネルギー	大
2次再結晶	1次再結晶粒間の粒界エネルギー	中
3次再結晶 (薄板)	自由表面エネルギー	小

結晶粒成長

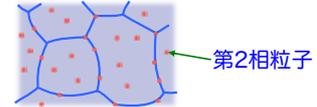
材料中に不純物原子 (溶質原子) が存在すると、しばしば不純物原子は粒界に偏析する。このような場合、再結晶組織の粒成長において粒界が移動するためには不純物原子も一緒に移動する必要があり、粒成長速度は遅くなる。これを固溶原子によるドラッグ効果という。

Zener drag

粒成長する母相中に半径 r の第2相粒子 (析出物) が分散している場合、寄り強い拘束力で粒界移動を妨げようとするピン止め力が働く。

第2相粒子の体積率を f とすると、母相の粒成長の最終粒径 R_f は以下のように予測される。

$$R_f = \frac{4r}{3f}$$



2次再結晶粒を起こさせる目的で用いられる正常結晶粒成長の抑制相を **インヒビター (inhibitor)** という

集合組織

集合組織 (texture) :

金属材料の多くは多結晶体であり、結晶粒がそれぞれの結晶方位を持つ。しばしば金属材料はその製造工程で、凝固、塑性変形、再結晶、変態などの現象を経過する際に、多かれ少なかれ特定の結晶方位が特定の方位に優先して配向する傾向がある。このように材料を構成する結晶粒が特定の方向に優先的に配向した状態を集合組織とよぶ。

生成する機構から集合組織を大別すると次のようになる。

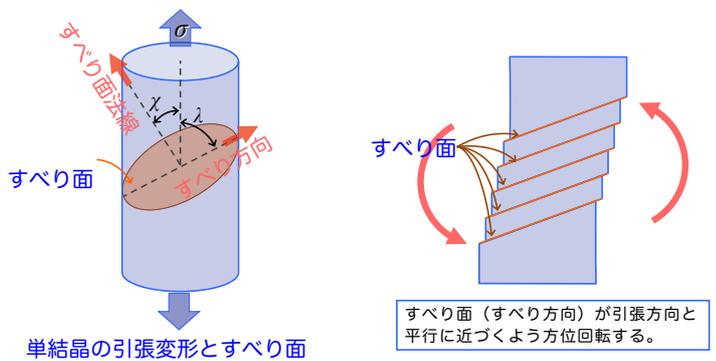
- (1) 変形集合組織
- (2) 再結晶集合組織
- (3) 変態集合組織
- (4) 成長集合組織

変形集合組織

変形集合組織 (deformed texture)

強加工した多結晶体において、変形により格子回転が生じ、結晶方位はある特定方向に配向する。

一軸引張の場合



単結晶の引張変形とすべり面

すべり方向に働くせん断応力 τ

$$\tau = \sigma \cos \lambda \sin \phi$$

シュミット因子

が最大となるすべり系が最初に活動する。

軸の拘束 (引張方向) のため格子回転

結晶構造	金属	すべり面	すべり方向
fcc	Al, Cu, Ni, ...	{111}	<110>
bcc	α Fe, Mo, Ni...	{110} {112} {123}	<111>
hcp	Mg, Ti, ...	(0001) {1011} {1010}	<1120>

集合組織の表記法

線材のように1つの軸に沿って優先方位が発達する1軸集合組織では、例えば、その長手方向の結晶方位を $\langle uvw \rangle$ のように表す。

圧延材のように2つの軸に沿って優先方位が発達するような2軸集合組織では、例えば、圧延面と圧延方向の結晶方位をそれぞれミラー指数で $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ のように表す。

繊維集合組織

繊維集合組織 (fiber texture)

線引きや押し出しによって生じる一方向集合組織



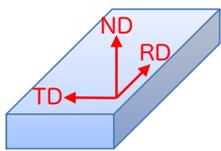
押出 (extrusion)

引抜き (drawing)
線引き (wire-drawing)

結晶構造	金 属	変形集合組織	再結晶集合組織
fcc	Al, Cu, Au, Ag Pb, Ni, 黄銅	$\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ または $\langle 112 \rangle$
bcc	α Fe, Fe-Si V, W, Mo	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$
hcp	Zn Mg, Zr, Ti	$[0001]$ $\langle 10\bar{1}0 \rangle$	— $\langle 11\bar{2}0 \rangle$

圧延集合組織

圧延集合組織 (rolling texture)
圧延による集合組織



RD : 圧延方向 (rolling direction)
ND : 圧延面法線方向 (normal direction)
TD : 板幅方向 (transverse direction)

結晶構造	金 属	変形集合組織	再結晶集合組織
fcc	Al, Cu, Ni, Fe-Ni Cu-Ni	(110) [112] (112) [111] (123) [412] (123) [634] (110) [112]	(100) [001] (123) [634] (113) [211]
bcc	α Fe, Fe-Si	(001) [110] (112) [110] (111) [112] (111) [110] (113) [110] (115) [110]	(110) [001] (100) [011] (111) [112] (100) [001] (112) [110]
hcp	Zn, Cd Ti Mg	(0001) $\pm 25^\circ$ [1120] $\pm 25^\circ$ (0001) $\pm 20 \sim 40^\circ$ [1616] (0001) [1120]	変形集合組織と 同じ

再結晶集合組織

再結晶集合組織 (recrystallization texture)
変形集合組織をもつ材料を再結晶させると形成される。
2次再結晶集合組織と区別するため1次再結晶集合組織 (primary recrystallization texture) と称されることもある。

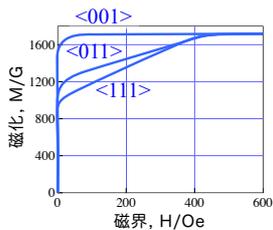
2次再結晶集合組織 (secondary recrystallization texture)
2次再結晶で得られる集合組織。

- (応用例)
- ・ケイ素鋼板 (110)[001]
→ Goss方位、Goss鋼板
- ・コンデンサー用アルミ箔 (110)[001]
- ・負荷絞り用鉄板 {111}

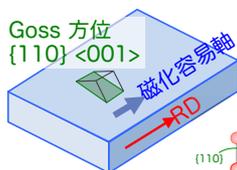
2次再結晶集合組織

結晶構造	金 属	繊維集合組織	圧延集合組織
fcc	Al Cu Cu-Zn	$\langle 211 \rangle$ または $\langle 210 \rangle$ $\langle 211 \rangle$ または $\langle 210 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ または $\langle 112 \rangle$	(100) [011] (011) [111] (210) [001] (110) [112]
bcc	Fe-Si	—	(110) [001]

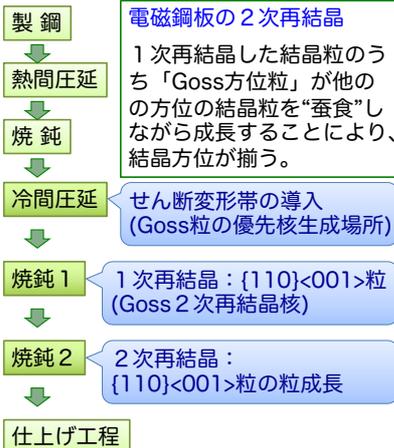
1方向性電磁鋼板 (Goss鋼板)



鉄単結晶の結晶方位と磁化曲線



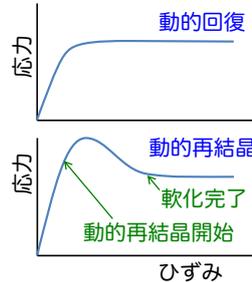
Goss方位と圧延鋼板



再結晶集合組織

変形中に回復・再結晶が生じた場合、それらを動的回復 (dynamic recovery) および動的再結晶 (dynamic recrystallization) と呼び、加工後の静的な高温保持中に起こる静的再結晶 (static recrystallization) などと区別する。

動的回復または動的再結晶が生じる場合、高温変形中の応力-ひずみ曲線は、下のような特徴的な形状を示す。



動的回復 :
加工硬化と動的回復が釣り合っている定常状態

動的再結晶 :
加工中の再結晶であるため、生じた再結晶粒がすぐにまた塑性変形を受け、粒内に加工組織(高い転位密度)を有することが特徴である。また、動的再結晶は、加工が継続している間、繰り返して生じ、定常状態に至る。

10. 金属材料の強化機構

材料の強度 (さまざまな尺度)

強度を表す指標は様々であり、材料の変形挙動の種類によって以下のように用語を使い分ける。

降伏強度、降伏強さ (yield strength)

降伏応力 (yield stress) ともいう。塑性変形を起こさずに、材料に生じさせることのできる最大応力のこと。ひずみが大きくなると、ひずみと応力との関係が比例しなくなり、応力を除去してもひずみが残る場合がある。この現象は降伏と呼ばれ、この現象が起き始める応力を降伏強さと呼ぶ。材料の種類によっては降伏現象が明確にみられないものもある。

引張強度、引張強さ (tensile strength)

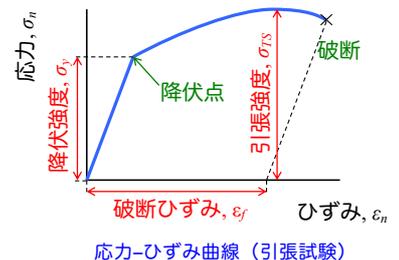
ひずみが大きくなると材料は破断するが、破断する前に材料に表れる最大の引張応力、あるいは材料が耐える最大の引張応力を引張強度 (強さ) と呼ぶ。概念的には塑性変形強度、変形抵抗と概ね一致する。

延性 (ductility)

材料が破断する直前における最大の変形量を破断ひずみ (fracture strain) と呼び、引張変形における延性の指標となる。延性の指標には伸びと絞り为代表的であるがその他の指標もある。

降伏 (yielding)

ひずみが大きくなると、ひずみと応力との関係が比例しなくなり、応力を除去してもひずみが残る現象を降伏と呼ぶ。



引張強さの大きい材料は「高強度」、小さい材料は「低強度」と表現される。

靱性 (toughness)

破壊するまでに材料に加えられる総エネルギーを破壊エネルギーと呼び、靱性という指標で表される。破壊エネルギーの大きい材料は「靱い (ねばい; tough)」と表現される。

曲げ強度、曲げ強さ、抗折力 (bending strength, flexural strength)

部材の破壊は引張りより曲げモードの負荷で破損することが多いことより多用される指標。靱性と傾向はだまかには一致する。

硬度 (hardness)

傷の付きにくい材料は「硬い (hard)」と表現され、おおむね塑性変形強度 (変形抵抗) と一致する。

- ◆ モース硬度: 標準物質と擦り合わせた傷の有無で判定
- ◆ ビッカース硬度: ダイヤモンド針を押し当てた傷の大きさで判定

構造敏感・構造鈍感

合金の性質
構造敏感な性質 (structure sensitive)
 微視的構造に依存する材料の性質のこと。熱処理などによって制御される。転位密度や配列など**ミクロな構造の不均在が性質を左右する**。
 i.e.) 加工硬化、異種原子の固溶、微細粒子の析出、結晶粒径の減少など

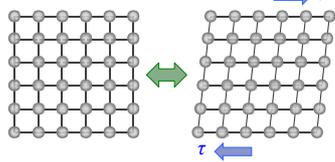
構造鈍感な性質 (structure insensitive)、**構造敏感でない性質**
 存在する原子の種類に依存する**材料固有の性質**のこと。原子の種類や結晶形に依存するが、構造には依存しない。熱処理により制御できない。
 →相が荒く(1μm以上)分散する場合には、**混合則(複合則)が成り立ち易い**。
 しかし、第2相が微細かつ高密度に分散している場合には、混合則より大きな値になることがある。

構造敏感	構造鈍感
塑性の性質	弾性の性質
力学的性質 (降伏応力、引張強さ、延性など)	(ヤング率、ポアソン比など)

弾性変形と塑性変形

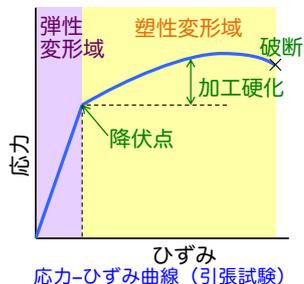
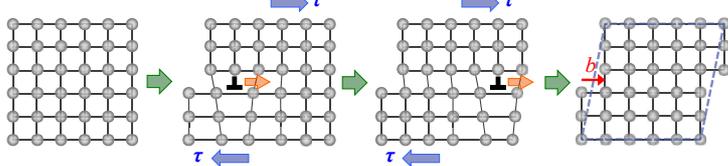
弾性変形 (elastic deformation)

可逆的な変形



塑性変形 (plastic deformation)

転位のすべり運動



金属材料の強化

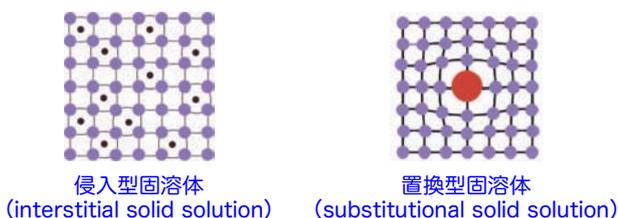
(室温における) 金属の変形機構は転位のすべり運動によるもの。
 金属材料の強化指針→すべり変形を起こしにくくする
 →いかに転位の移動を抑えるか?

- ◆ 転位をまったく含まない結晶
 ウィスカー (whisker) →理論値に近い強さ。
 微細粒のため母材と複合化して使用
- ◆ 転位の移動を抑制する。
 - 1) 固溶強化 →置換型または侵入型固溶原子の導入
 - 2) 析出強化 →主に時効熱処理により微細な第2相析出物を分散
 - 3) 分散強化 →酸化物などの粒子を分散
 - 4) 加工硬化 →塑性変形によって転位密度を高める
 - 5) 結晶粒微細化 →強化結晶粒の大きさを小さくする
 - 6) 複合強化 →異なる材料を複合化する

固溶強化

固溶強化 (solid solution strengthening)

固溶する溶質原子と転位との相互作用を利用して材料を強化する方法。
 固溶体の降伏応力は溶質原子濃度増加するにつれて増大する。
 転位の移動にあたって**溶質原子は弱い障害物**となる。



固溶強化 (つづき)

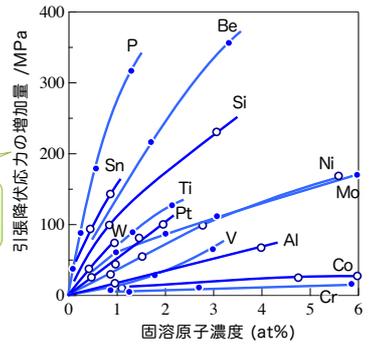
- (1) 溶質原子は転位に移動を妨げるような力を及ぼす。
- (2) 溶媒原子と溶質原子の大きさの差が大であるほど転位移動は妨げられる。

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の効果は大きい。

溶質原子周辺の格子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

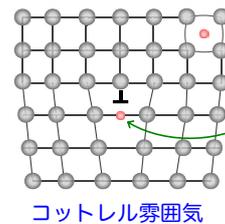


種々の溶質原子による鉄の降伏応力の変化

コトレル効果

コトレル効果 (Cottrell effect)

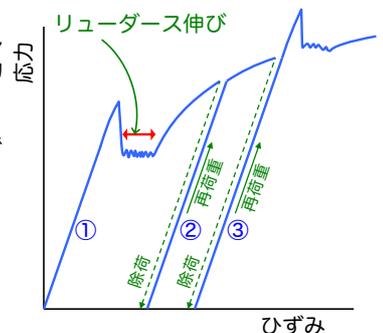
結晶内の転位の周辺の格子のひずみにより溶質原子 (不純物原子) の大きさが適当であれば、転位周辺に溶質原子が集まり格子ひずみを緩和しようとする。これをコトレル効果という。
 また、転位の周りの高濃度の溶質原子の雰囲気形成され、これを**コトレル雰囲気 (Cottrell atmosphere)** という。この雰囲気のため、**溶質原子 (不純物原子) による転位運動が固着 (ピン止め; pinning)** される。



コトレル雰囲気により安定位置となった侵入型不純物原子

軟鋼におけるひずみ時効

- ① リューダース伸びが降伏現象により現れる。転位がコトレル雰囲気により固着され、その運動が困難になることに起因する。
リューダース帯 (Lüders band)
 →**ストレッチャーストレイン**ができ、しわがよる。製品価値低下



軟鋼における降伏現象

- ② 除荷後、単時間後に応力を加えると、上降伏点消失する。
 →侵入型原子(C, N)が転位からはずれており、転位が動ける。
- ③ 除荷後、しばらく放置した後、に再荷重すると上降伏点が見える。
 →C, Nで転位が固着される。

析出強化

析出強化 (precipitation strengthening)

微細な析出物を母相に密に分散させ、転位の障害物として強化する方法。
 溶体化処理後に比較的低温で時効によって**母相中に微細な析出物を分散**させ強化させる。後述の分散強化との違いは、析出物が微細であるため障害物として弱い点にある。障害物としての弱さは、析出物の多さでカバーされる。

i. e.) Al-4%Cu 合金の時効析出
 過飽和固溶体→GP(I)→GP(II)→(θ'')→θ'→θ

時効析出の強化機構

- ・GPゾーン、整合析出物：転位が析出粒子をせん断
 →整合ひずみによる粒子近傍の内部応力によって転位運動の障害となる。
- ・非整合析出物
 →転位がオロワン機構で通り抜ける。(オロワンのバイパス機構)

析出強化 (つづき)

スピノーダル分解による強化

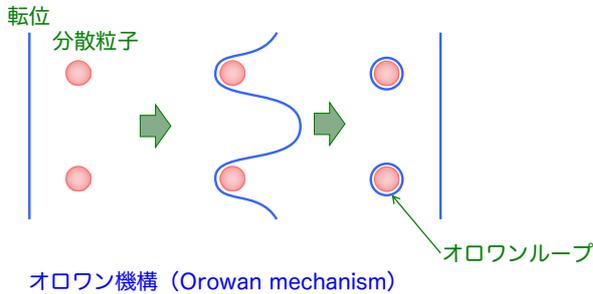
析出強化とよく似ているが、スピノーダル分解によって結晶中の溶質原子の濃度が場所の関数として周期的に変動する場合は、格子定数も周期的に変わるので、すべり面上に周期的な内部応力場が発生する。転位はこれと相互作用を起こす。

広義には析出強化の一つとされているが、析出物ではなく濃度変調が与える格子定数の変化が転位運動の障害となるため、強化機構が異なる。スピノーダル分解による強化は、微細組織における濃度変調の振幅 A に比例し、波長 λ には無関係となることが分かっている。

分散強化

分散強化 (dispersion strengthening)

材料内に母相よりも硬く塑性変形しにくい粒子を分散させ、転位運動の障害物として強化する方法。この場合、**強い障害物**として粒子は転位に切られることのない硬化な障害、絶対的なピン止め点であると考えられる。



結晶粒微細化強化

結晶粒微細化強化 (grain refinement strengthening)

微細な結晶粒からなる多結晶体ほど降伏応力が高くなる。

結晶粒界 (grain boundary) は異なる結晶方位を持つ隣接粒間の境界である。したがって一般にある結晶粒中のすべり面は粒界を挟んで連続してはおらず、通常転位は粒界を通り越えて運動することはできない。

結晶粒の微細化方法

(1) 温間、もしくは熱間で大ひずみ(真ひずみで2程度)をあたえつつ、再結晶または相変態を起こして、粒径 $d = 1 \mu\text{m}$ 程度の微細粒を生成する方法。

(2) 形状不変加工(冷間)によって、真ひずみで5程度の大ひずみをあたえ、転位密度を大きく上げ、転位セル組織を発達させて、大傾角な転位セル境界によって結晶粒を微細化する方法。

ホール・ペッチの式 (Hall-Petch relationship)

一般に、材料の降伏強度 σ_y と平均結晶粒径 d の間には、

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \frac{1}{\sqrt{d}}$$

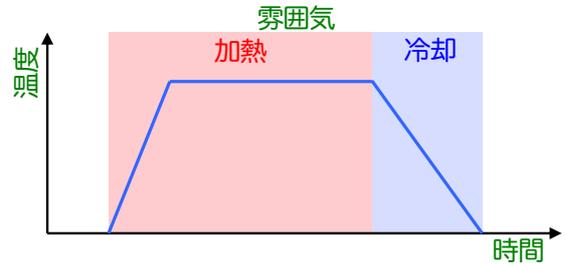
となる関係が経験的に成り立つことが知られている。**ホール・ペッチの関係は、降伏応力だけではなく、引張強度やあるひずみの時の変形応力、あるいは劈開破壊応力などについても成り立つことが多い。**また、材料の靱性も $d^{1/2}$ に比例して向上する場合がある。

1.1. 金属材料の熱処理と組織

熱処理の基本概念

熱処理 (heat treatment)

材料を加熱し、その後冷却する熱操作のこと。
熱処理の要素：温度、時間、雰囲気



金属材料の熱処理の分類

全体熱処理 (バルク熱処理)

バルク (材料内) 全体の構造・組織を変えて、必要とする特性を得る。

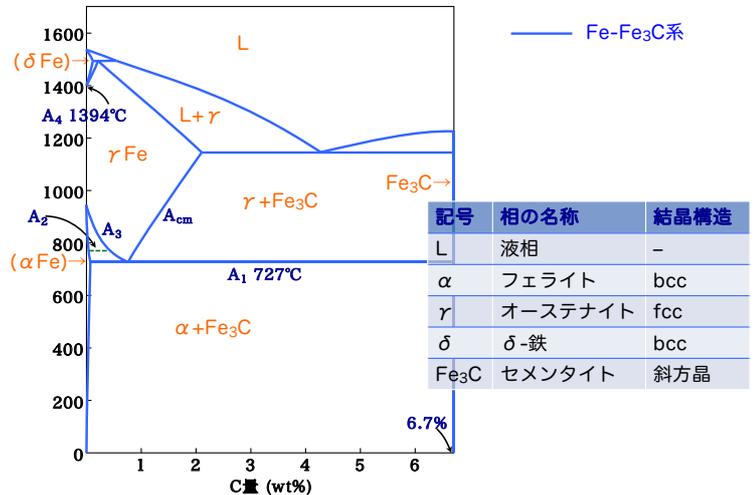
- ◆ 焼入れ、焼戻し ◆ 焼なまし ◆ 焼ならし
- ◆ 均質化処理 ◆ 溶体化処理 ◆ 時効処理 (析出強化処理)
- ◆ サブゼロ処理 ◆ オーステンパ

表面熱処理

材料の表面の構造・組織などを変えて、必要とする特性を得る。

- ◆ 浸炭 ◆ 窒化、軟窒化 ◆ 高周波焼き入れ、焼き戻し
- ◆ 拡散浸透処理 ◆ 蒸着、乾式めっき

鉄-炭素系 (Fe-Fe₃C系) 状態図



種々の熱処理：焼入れ

焼入れ (quenching, 鋼の焼き入れの場合はhardeningも用いられる)

金属を所定の高温状態から急冷させる熱処理

高温相を凍結し、過飽和固溶体などを得ることを目的とする場合は、**溶体化処理 (solution treatment)** と呼ぶ。

冷却には水、油、熱浴、空気などを用い、それらの中で保持したり、攪拌したりして冷却速度を調節する。例えば水を使う場合、「水焼入れ」ということもある。

鋼の場合

鋼を硬化させるために、変態点 (A_3 線) 以上の温度に保持した後 (オーステナイト領域まで加熱した後) に「急冷」する操作

高炭素を含有する鋼を変態点以上に加熱してオーステナイト組織の状態のものが、急冷されるとマルテンサイト組織に変化する。