

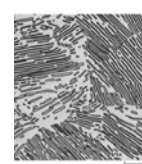
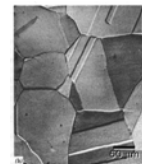
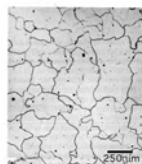
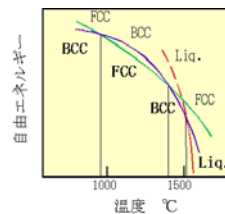
材料科学（7）

鋼の状態図と変態

東京工業大学・工学部
化学工学科 化学工学コース
プロセス設計講座 装置設計分野
久保内 昌敏

7. 鋼の状態図と変態

- 鉄の相変態
 - 純鉄の構造変化
 - フェライト
 - オーステナイト
 - δ-フェライト
 - 自由エネルギー変化
- 炭素鋼の相変態
 - Fe-C 状態図
 - 共析反応
 - パーライト

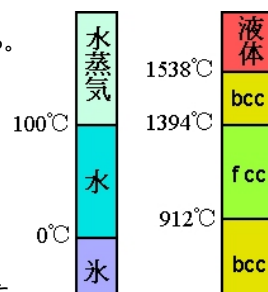


相変態

- 鉄にはbccとfccの構造がある。
 - 物質が複数の結晶構造を持つ場合、これらの構造を同質多形 (polymorphism) (同素体; allotropism) という。
 - 高温のfcc鉄から低温のbcc鉄への多形変態 (同素変態) が鋼の熱処理の基本である。
- 変態
 - ある固体物質と化学組成は等しいが、物理的性質の異なるものをその物質の変態という。結晶学では多形ともいう。
 - 結晶構造に変化のない場合で、物理的性質の変化する場合にも変態という (例; 磁気変態)。

鉄の相変態

- 純鉄の構造変化
 - 純鉄の結晶構造は図に示すように温度範囲によって3つに変化する。
 - フェライト [ferrite または α -鉄 (α -iron)]
 - 常温におけるbccの安定構造。軟らかく、延性がある。
 - オーステナイト [austenite または γ -鉄 (γ -iron)]
 - 912 と 1400 の間で安定な純鉄のfcc相である。
 - 軟らかく、かつ延性があるので、鋼の鍛造及び圧延作業に適している。
 - オーステナイトはいかなる温度でも強磁性ではない。
 - δ -鉄 (δ -iron)
 - 1440 以上で結晶構造はbccに戻る。
 - δ -鉄は温度範囲を除けば α -鉄と同じものであり、したがって、普通 δ -フェライトと呼んでいる。



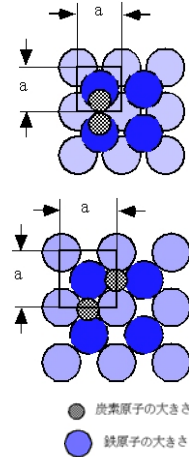
相変態と炭素の溶解度

➤ フェライト

- bccなので、原子間の間隔が小さく、小さい炭素原子でさえ容易に収容できない。
- フェライト中の炭素原子の溶解度は非常に小さい。

➤ オーステナイト

- fccの鉄の原子間隔はフェライトよりも大きいので、侵入型固溶体を作りやすい。
- 侵入できる空隙は炭素原子がかろうじて入り込める程度であり、炭素原子侵入により構造中に歪みを生じる。
- その結果、炭素の最大固溶限はわずかに2wt.%に過ぎない。

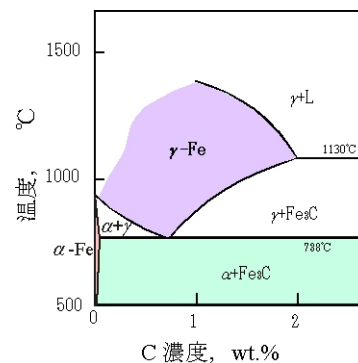


材料科学

5

炭素鋼 (carbon steel)

- 炭素濃度約2wt%以下のFe-C合金を炭素鋼 (carbon steel)と定義している。
- 鋼中の炭素は高温でのオーステナイト中に完全に固溶している
 - C以外に、SiやMnがC以上に含まれることが多いが、鉄の性質はCによって最も大きく影響される。これは微量のCでも鉄の組織が大きく変わるためである。

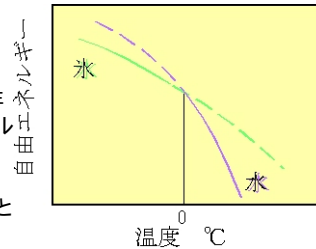


材料科学

6

自由エネルギー変化(水)

- 変態 = 安定な自由エネルギーを有する構造
 - ある反応(変態)が自然に生じるためには、生じた後の全体のエネルギー(自由エネルギー)は必ず減少する。
 - 反応に伴う自由エネルギーの減少が駆動力 (driving force) となっている。
- 水と氷の自由エネルギーが温度によって変化する様子。
 - driving force は0 以下では氷の生成に寄与し、0 以上では水の生成に寄与している。
 - しかし、0 近くでは、自由エネルギーの差が非常に小さいので、新しい相の生成に必要なエネルギーを十分に供給できない。
 - 何か核のようなもの、あるいは何らかのエネルギー(例; 過冷却)を与えなければ仮に起こるとしても非常にゆっくり生じる。

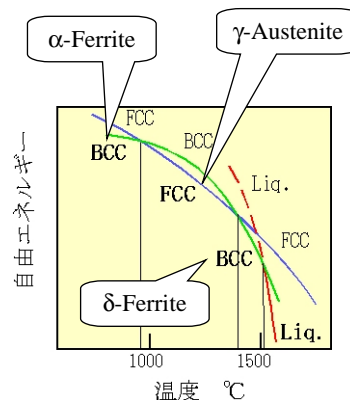
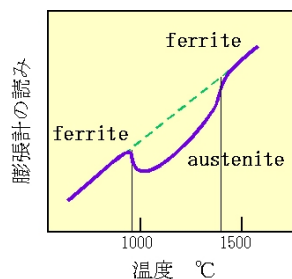


材料科学

7

自由エネルギー変化(鉄)

- これと同様のことが鉄についても言える。
- 図に示すように、912 以下および 1394 以上ではBCCの方がFCCよりも自由エネルギーが小さい。
- このような変態は種々の性質の温度変化から知ることができる。例えば、原子容や熱膨張率などである。

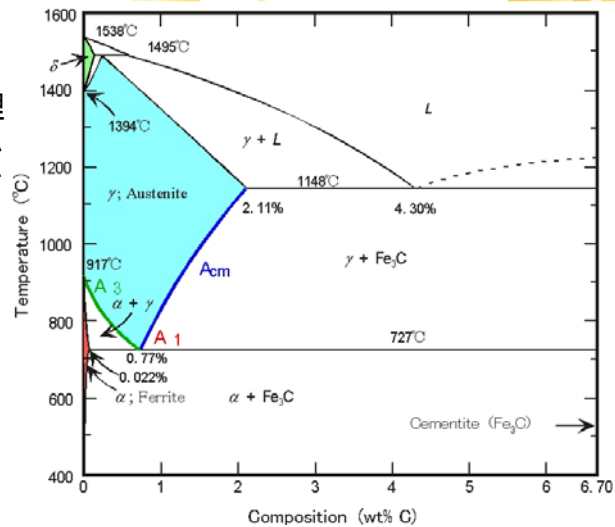


材料科学

8

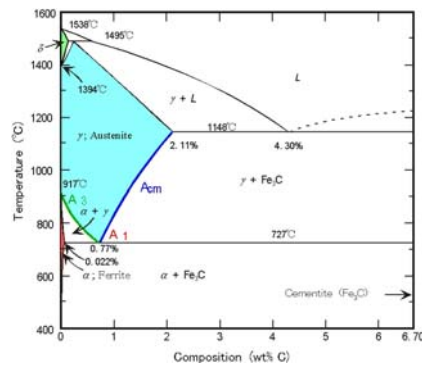
炭素鋼の相変態

- Fe-C 状態図
- 鋼の組織を理解するのに必要な部分だけ



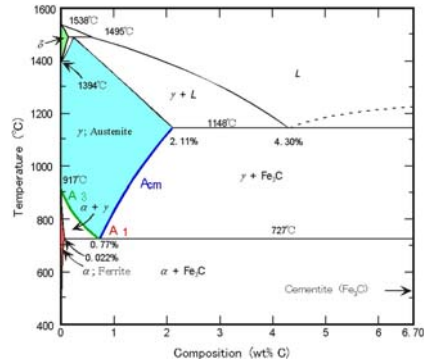
炭素鋼の相変態

- 一般にα-鉄が他の元素を固溶した状態を**フェライト (Ferrite)**という。炭素の固溶限は0.001%以下で、723 °Cでは0.025%となる
- 固溶限以上の炭素は化合物Fe₃Cを形成し、これを**セメンタイト (cementite)**という。
 - セメンタイトの化学組成はFe₃Cであるが、これは炭化鉄がFe₃Cの分子を作っているというのではなく、単に結晶格子がFeとC原子を3:1の比で含んでいることを意味する。
- CはグラファイトあるいはFe₃Cの形で固溶される
 - 鋼の熱処理ではFe₃Cが、鋳鉄では黒鉛が重要となる。



炭素鋼の相変態

- A3線
 - 冷却に際しては, γ -Fe中から α -Feが析出を始める温度
 - 加熱に際しては α -Feが完全に γ -Feに変化する温度
- Acm線
 - 冷却に際しては γ -Fe中から Fe_3C が析出を始める温度
 - 加熱に際しては Fe_3C が完全に γ -Feに溶解する温度
- セメンタイトは硬く、約210 に磁気変態点 (A0変態点) を持ち、これ以下の温度で強磁性を示す。
- γ -鉄は最大約2%まで炭素を固溶する。 γ -鉄に他の元素を固溶したものをオーステナイト (austenite) と呼ぶ。

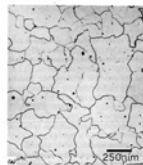


材料科学

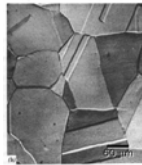
11

共析鋼とパーライト

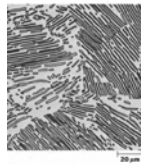
- 約0.8%の炭素を含むYなる組成のオーステナイトを冷却してくると、723 °C で γ α (0.025% C) + Fe_3C の分解反応が起きる。
- 固体から2相の固体に分解することを共析反応 (eutectoid reaction) という。
- Y組成の鋼を冷却し、室温組織を観察すると、 Fe_3C は薄板状で層状に配列しているのを、組織ではその断面が条となって見える。
- この共析組成をパーライト (pearlite) という。



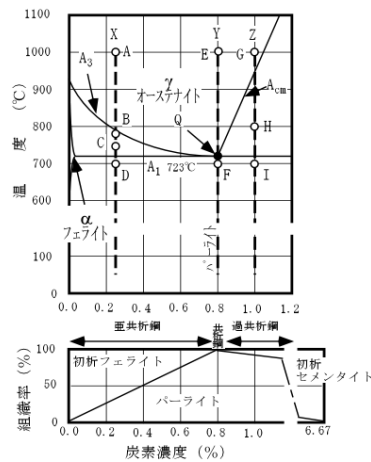
フェライト組織



オーステナイト組織



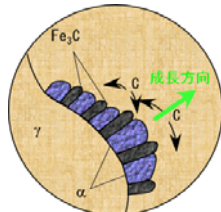
パーライト組織
材料科学



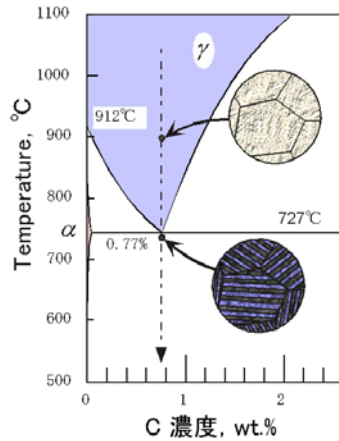
12

パーライト

- 約0.8% Cの共析組成を1000 近傍（オーステナイト領域）から冷却した場合を考える。
- オーステナイト組成は、約730 の共析温度においてパーライトに変化する。
- パーライトは上述のように縞状の形態をしている。これは、Cプアーなフェライトと、Cリッチなセメンタイトが、下図のようなメカニズムで析出時のCの拡散により影響されて縞状構造に形成される。



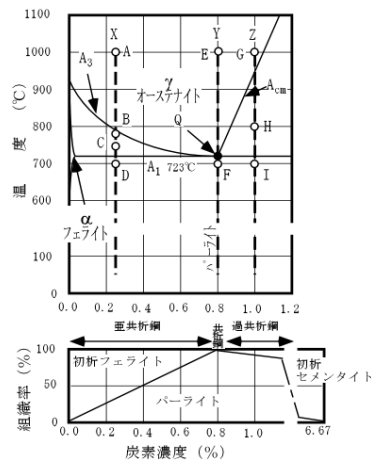
材料科学



13

亜共析鋼 / 過共析鋼

- **亜共析鋼 (hypo-eutectoid steel)**
 - 共析組成よりも低炭素の鋼を亜共析鋼という。
- **過共析鋼 (hyper-eutectoid steel)**
 - 共析組成よりも高炭素で、炭素濃度が約2%以下の鋼を過共析鋼という。
- **鑄鉄**
 - 2% 以上の炭素を含有する合金は1150°C以上で一部が溶融するので鍛錬ができない。鑄造用にのみ用いられることから、鑄鉄と呼ぶ。

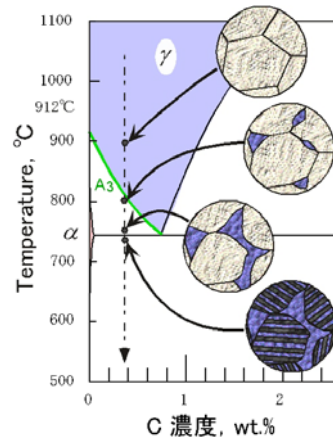


材料科学

14

亜共析鋼

- Xで示す亜共析組成となる0.25%前後のCを含有するオーステナイトを冷却する場合について考える。
- 1000°C程度から徐々に冷却してくると、 A_3 線と交わり、ここで a_1 なる組成のフェライトが析出してくる。
- 共析温度に至る温度区間では、冷却につれてフェライトの量が増し、未変態のオーステナイトの組成は A_3 線に沿って共析点に向かう。
- そして、共析温度で全てのオーステナイトは(時間をかけて)パーライトに変わる。
- 左図はこの鋼の室温における組織である。このうち白く見える部分は共析温度までの間に析出したフェライト(初析フェライト: pro-eutectoid ferrite)である。

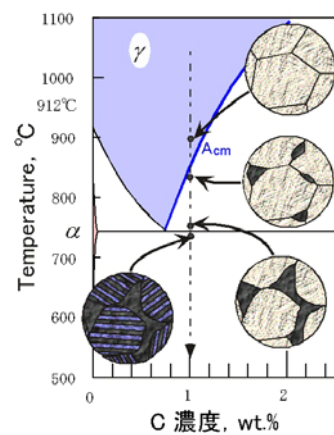


材料科学

15

過共析鋼

- Zなる組成(約1%C)のオーステナイトを冷却する場合について考える。
- A_{cm} 線で初析出するのはセメンタイトである。
- このセメンタイトは主にオーステナイトの結晶粒界に析出する。
- 未変態のオーステナイトの組成は温度降下と共に A_{cm} 線に沿って変化し、共析温度で0.8%Cとなり、この温度で残存しているオーステナイトは全てパーライトとなる。
- 室温組成であり、旧オーステナイト結晶粒界に沿って初析セメンタイト(pro-eutectoid cementite)が見られる。



材料科学

16

【演習】

- 右図を用いて, Fe 99.7%, C 0.3%の炭素鋼を1000°Cから徐冷したときの温度と組織の関係についてスケッチを示しながら説明せよ.
- このとき, 725°Cにおける炭化物とフェライトの量はいくらか? 合金100gを基準として求めよ。

