基礎材料組織学　第 14 回

前回：　・鉄および鋼の概要
・鉄の変態と結晶構造
・炭素鋼の平衡状態図と組織

今回：　・共析変態
・マルテンサイト変態

14.1 共析変態（パーライト変態）

●S 点（A_1 点）直下で生じる現象：
オーステナイト（γ固溶体）から
フェライト（α固溶体）とセメンタイト
（Fe_3C）が共析する．

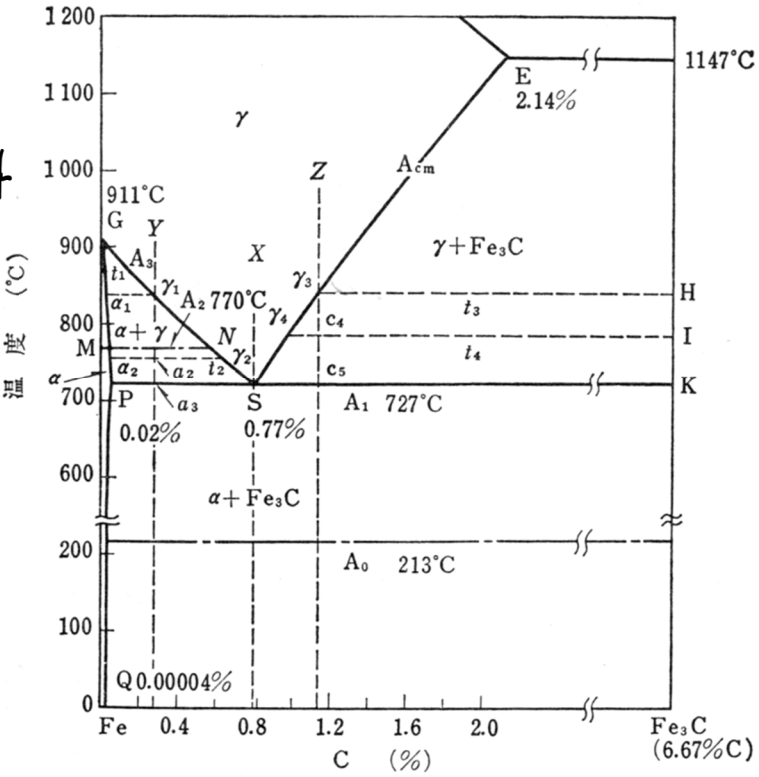


図 14.1 Fe-C 平衡状態図
［金属材料工学 改訂・SI 版，森北出版］

・「共析変態」，得られる
組織：
パーライト

●パーライトの形成メカニズム
① 共析温度を下まわる

② 元のオーステナイト粒界において
セメンタイトの核形成が開始

③ セメンタイト核形成に伴う，オーステナイト
からの C 原子拡散
（セメンタイト：6.67%C，オーステナイト：
max 2.14%C）

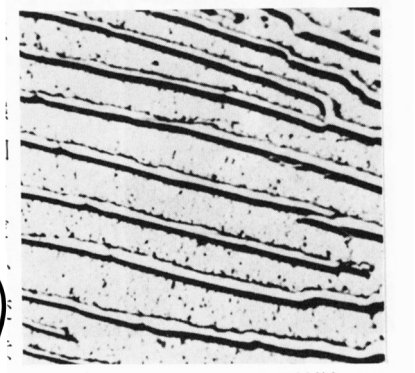


図 14.2 パーライト
［金属材料工学 改訂・SI 版，森北出版］

④ C が不足したセメンタイト核周辺の
オーステナイトがフェライトに変態

・セメンタイトの核形成：冷却速度
の増大に伴い，相対的
に促進される．

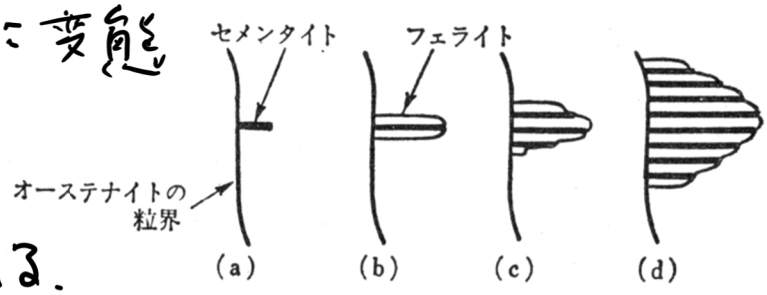


図 14.3 パーライトの形成メカニズム
［金属材料工学 改訂・SI 版，森北出版］

●冷却速度の増大：• パーライト層が薄くなる
• パーライト結晶の微細化

14.2　鋼のマルテンサイト変態

・問い：更に高い冷却速度の場合どうなるか？

→ 全く異なる変態現象が生じる.

・図 14.4 における線図の屈曲：

727℃
〃

A_{e1}：平衡状態図で示される変態温度

A_{c1}：実際の加熱時における 〃

A_{r1}：実際の冷却時における 〃

・冷却速度上昇：A_{r1}が低下していく

・油冷～水冷：200℃近辺で異なる変態が生じるようになる

⇩

「マルテンサイト変態」

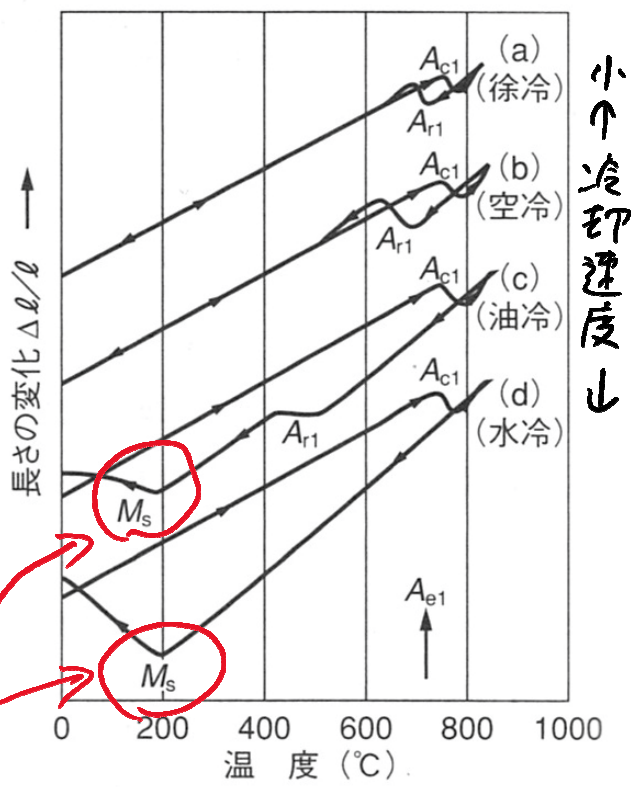


図 14.4　共析鋼における冷却速度と変態温度

［改訂　機械材料学，日本材料学会］

14.3　マルテンサイト変態のメカニズム

・平衡状態を保った冷却（徐冷）による変態

→ 原子の拡散を伴い、オーステナイト（fcc）からフェライト（bcc）やFe3Cのような完全に構造の異なる格子 or 構造となる.

・平衡状態ではない冷却（急冷）による変態

→ 原子の拡散が冷却速度に追いつかないため、原子の限定的移動による無拡散変態を生じる.

fcc → 体心正方格子（bct）

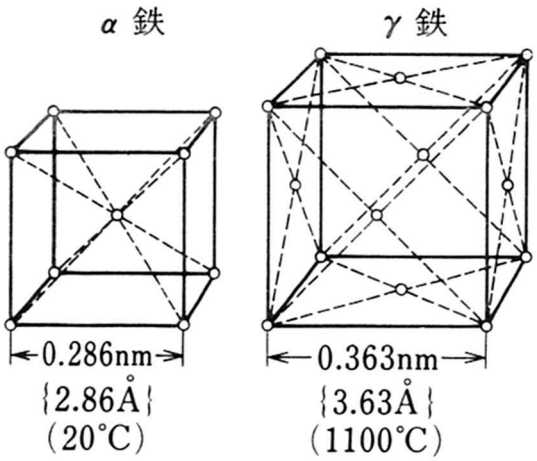


図 14.5 α鉄とγ鉄

［大学基礎 機械材料 SI 単位版, 実教出版］

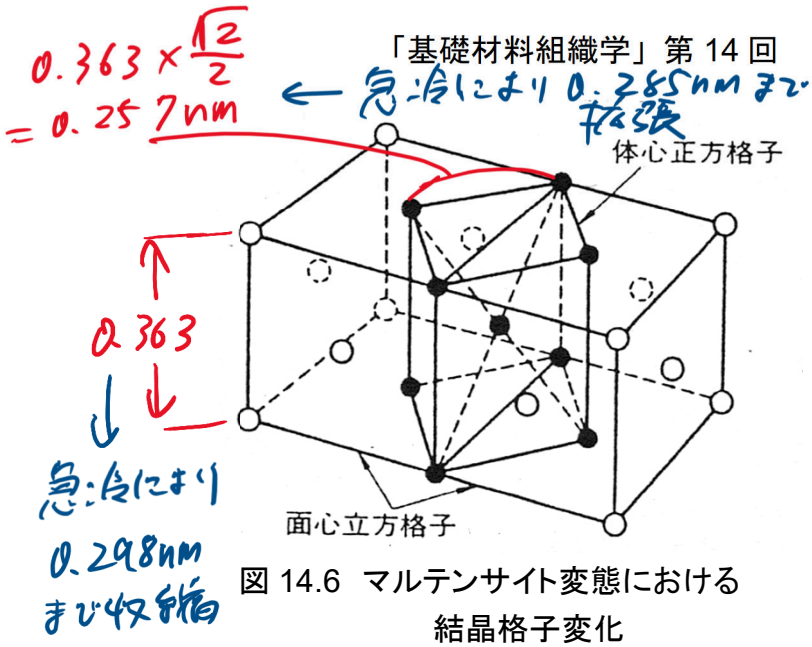


図 14.6 マルテンサイト変態における結晶格子変化

・フェライト(bcc): $a = b = c = 0.286$ nm

・オーステナイト(fcc): $a = b = c = 0.363$ nm

・マルテンサイト(bct):
$a = b = 0.285$ nm
$c = 0.298$ nm

・マルテンサイトの c 軸: fcc の c 軸から収縮しているが、bcc の c 軸より拡げられている

⇩

単位格子のスペースが拡張、C が bcc より多く固溶できる。

●マルテンサイト変態による強度向上の理由

① C の過飽和固溶による格子ひずみ (=固溶強化)

② 強制的原子移動に伴う転位密度上昇
$10^{15} \sim 10^{16}$ m^{-2} … 強い加工後の値とほぼ等しい
(=加工硬化)

③ 結晶粒の微細化

・例題：マルテンサイト変態を生じた炭素鋼（せん断弾性係数 G = 82.0 GPa, バーガースベクトル b = 0.50 nm）において転位密度 $\rho = 2.3 \times 10^{15}$ 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．

$G = 82.0\ \mathrm{GPa} = 82.0 \times 10^9\ \mathrm{N/m^2}$

$b = 0.50\ \mathrm{nm} = 0.50 \times 10^{-9}\ \mathrm{m}$

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

$= 0.50 \times 82.0 \times 10^9 \times 0.50 \times 10^{-9} \times \sqrt{2.3 \times 10^{15}}$

$= 9.83\cdots \times 10^8\ \mathrm{N/m^2}$

$9.8 \times 10^8\ \mathrm{Pa} = 9.8 \times 10^2\ \mathrm{MPa}$

14.3 マルテンサイト変態の特徴

①組織：

- 平衡状態での組織とは全く異なる針状組織を形成する．

図 14.8 マルテンサイト組織

［大学基礎 機械材料 SI 単位版，実教出版］

②機械的特性：

- 非常に強度は高いが非常にもろい（＝じん性が低い）
- 合金元素によらず，約 0.6 %C までは C 含有量に応じて強度が上昇する．

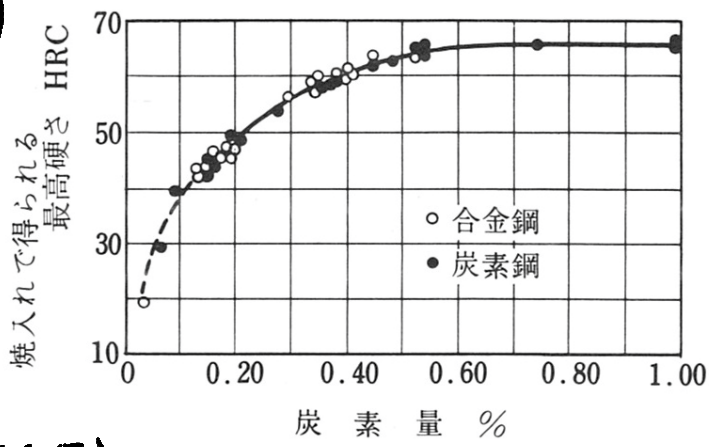


図 14.9 C%と焼入れ最高硬さの関係

［大学基礎 機械材料 SI 単位版，実教出版］

③変態点への影響：

Ms 点（マルテンサイト変態開始点）が C 含有量により変化する．

低 ← C% → 高

高 ← Ms → 低

14.4　第 14 回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

・急冷によりマルテンサイト変態が起こるのが面白い，マルテンサイト変態について理解できた，マルテンサイト変態が起こるメカニズムを理解できた，同時に 3 つも強度向上要因が起こっているのが面白い，パーライト変態のメカニズムを理解することができた，パーライトの形成メカニズムの説明がわかりやすかった，強度が高いのに脆いという特性も面白い，今までよりさらに工学を学べた，物体の強化は密度向上だけだと思っていたので格子ひずみや結晶粒微細化で強くなることに驚いた：22←色々なメカニズムが理解できると，面白くなってきますよね．

・初めて知ることが多かった，今までやったことのない内容だったので復習に努める，忘れてしまっている部分もあるので復習する，ぼんやりとは覚えているが問題を解けるレベルに至っていない，格子の内容の理解が難しかった，横文字の単語が多くなってきたので覚える：9

・次回で最後なので期末のため真剣に取り組む，期末テストに向けてしっかり復習する，テストを想定してしっかり勉強する，テストでテンパらないようにしっかり対策する，例題で単位や有効数字がまだうまくいかないところがあったのでテストまでにできるようにする：7←あと 1 週間です，頑張ってください！

・小テストできた気がする，次回のポイントをしっかり押さえて小テストの勉強をする，「共晶」と誤っていたのに気付くことができたのが嬉しい，小テストをスムーズに解けた，計算をゆっくりやっていたら紙を切るのを忘れていた，勉強以前の失態をしてしまったので気を付ける：5←今回の小テストは平均 6.2 点，満点 27 名でした．満点の人数の割に平均点が上がらなかったのは，解けた人はほぼ完璧に解け，解けなかった人は全然ダメという風に 2 極化が顕著だったからです．この段階でこの問題をきちんと解けなかった人は相当危機感を持たないと，試験でも苦戦するでしょうね．

・レポートも進める，長岡の図書館に材料力学の本がたくさんあってレポートを終わらせられた，レポートをしてみたが自分で問題を探して解くのは面白かった：3←長岡市立図書館も専門書結構ありますよね．元々新大工学部は五十嵐キャンパスが出来る前はあの場所にあったんだそうです．

・だいぶ平衡状態図にも慣れてきた，平衡状態図に関する問題や見方がはっきりしていない，状態図の読み取りが苦手なので練習する：3

・試験では図と問題文を裏表にまたがって配置するのはなるべく減らして欲しい←授業プリントは枚数をなるべく増やしたくないので配置が微妙なときがありますが，試験ではそんなことしません．

・マルテンサイト組織の写真が気持ち悪かった←気持ちはわかります．

・残りの講義も頑張る

・「体心正方格子」という言葉を間違えそうなので気を付ける

・以前ベイリーハーシュの関係で求めた値より 10 倍以上大きい応力だったので強化の程度を理解した（材

・テストに向けてラストの小テストを頑張りたい，マルテンサイト変態の冷却過程がわかった，前回休んだのでスライドの補足を頑張る，用語のテストで確実に点数を取れるようにしたい，テストが近いのでしっかりと授業を見直す，わかりやすかった，次回は遅刻をしない，電卓を忘れて大変だった，覚えることが多いので頑張る，改めてパーライト形成メカニズムを理解した←電卓忘れが定期試験の時じゃなくて良かったですね！

●質問

・以前「結晶粒の微細化はじん性と強度が共に向上する」とあったのにマルテンサイト変態ではじん性が低いのはなぜか？←微細化のみならじん性と強度のトレードオフは生じませんが，この場合は他の強化機構も複合的に作用しているからです．

・期末テストの対策は今までやってきた資料をしっかり読み直して理解を深めるのが一番良いのか？←ただ見直してもわかったような気になるだけで，いざ問題を解くとなると上手くいきません．1 番の対策は，全ての小テストや例題の計算問題を何回も解いてみて，プリントを見ながらでなくとも解けるようにしておくことです．

・高温の鋼を油冷したら発火点に達しないのか？←種類にもよりますが，焼入れ油の発火点は 300℃以上のようです．焼入れする試料は 800℃以上まで加熱されていますが，油に入れると同時に試料と接触した油は熱分解されて気化し排出されますので，その潜熱により周辺の油はそれほど温度上昇しないため，結局油の発火点には達しない，ということです．

・期末には小テストと同じ問題も出てくるのか？←似たような問題はもちろん出ます．

・レポート課題の問題でお勧めの参考書の問題はあるか？←今回のレポート課題は「問題を『自分で』探す」ものなのに，お勧めを示したら意味ないです．

・期末テストの持ち込みについて「自筆の小テストでやった問題を書いたプリント」は持ち込みかと言っていたか？←HP に上げた第 12 回の授業ファイルに記載済みです．

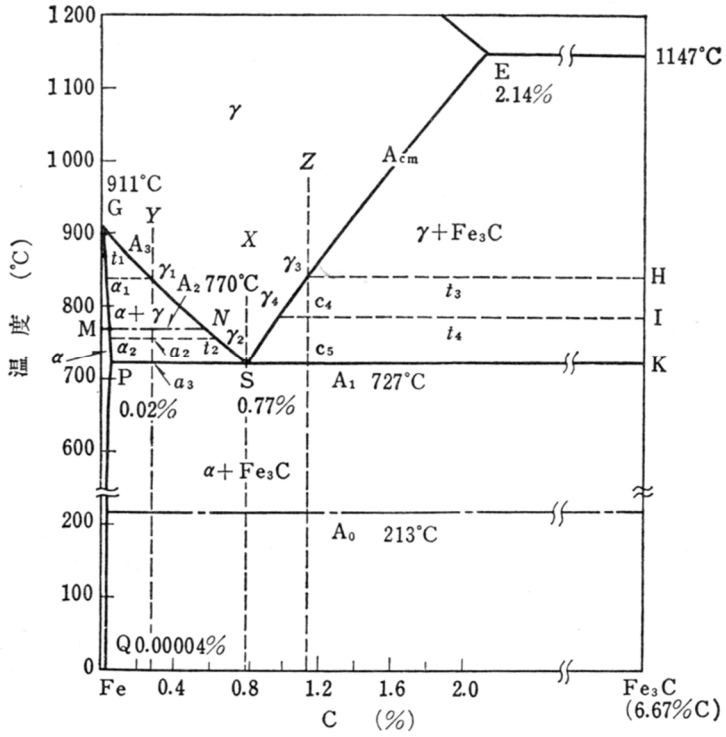
14.5　第 13 回小テスト解答

図に示す Fe-C 系平衡状態図において，X 組成（共析鋼，0.77%C）をオーステナイト領域からゆっくり冷却した場合を考える．

Q.1　温度 A_1 直下で生じる現象，およびその現象で得られる組織の名称を答えよ．［6 点］

Q.2　Q.1 で示した温度 A_1 直下で得られる組織の状態は，フェライトとセメンタイトの混合組織である．A_1 直下時のフェライトとセメンタイトの存在割合を求めよ．［4 点］

A.1　現象：共析反応／共析変態／パーライト変態　　組織の名称：パーライト

A.2　温度 A_1 直下でのフェライトの組成：P 点で示される＝0.02%C
　　〃　　セメンタイトの組成：K 点で示される＝6.67%C

∴フェライト：$\dfrac{6.67-0.77}{6.67-0.02}\times 100$ ＝88.7%，セメンタイト：11.3%