



第5章 鉄鋼材料

目的 鉄鋼材料における基本的事項を理解するとともに、各種鉄鋼材料の特徴を把握する。

- 1. 鉄鋼材料の組織と熱処理
 - 1.1 平衡状態図と相
 - 1.2 微視組織
 - 1.3 回復と再結晶
 - 1.4 マルテンサイト変態
 - 1.5 残留応力
 - 1.6 焼戻し
 - 1.7 焼ならしと焼なまし

- 2. 鉄鋼材料の種別
 - 2.1 圧延鋼材・高張力鋼
 - 2.2 機械構造用合金鋼
 - 2.3 工具鋼・軸受鋼・ばね鋼
 - 2.4 ステンレス鋼
 - 2.5 耐熱鋼
 - 2.6 鑄鉄

演習問題



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.1 平衡状態図と相

炭素鋼(Fe-C系合金)については、既に膨大な知識の集約がなされている。

図1にFe-C系の平衡状態図を示す。この図に記号で示されている各相の詳細を表1に示す。

2節で説明するように、現在までに多種多様な鉄系合金が開発されている。ただし、一般に見かける鉄鋼材料の多くは、0.77%未満の炭素を含む軟鋼である。

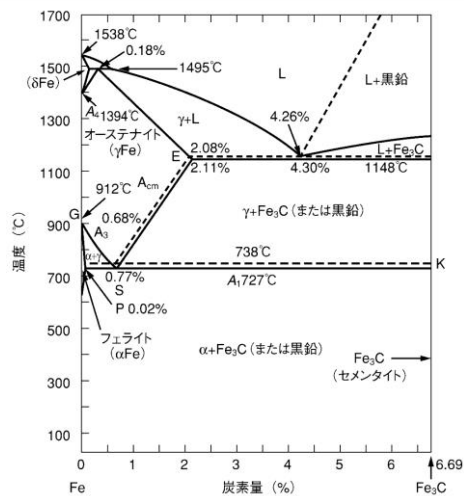


図1 Fe-C系平衡状態図



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

表1 Fe-C系の相

名称	記号	結晶構造	性質・状態等
液相	L	—	Fe中にCが溶解した液相.
フェライト	α	bcc	Cをランダムに固溶した侵入型固溶体. 727 °Cで最大固溶限0.022%. 純鉄では912°C以下で安定.
オーステナイト	γ	fcc	Cをランダムに固溶した侵入型固溶体. 1147 °Cで最大固溶限2.14 mass%. 純鉄では912~1391 °Cで安定.
δ -Fe	δ	bcc	Cをランダムに固溶した侵入型固溶体. 1490 °Cで最大固溶限0.08%. 純鉄では1391~1536 °Cで安定.
パーライト	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	—	α 相と Fe_3C が積層された共析複合組織.
セメンタイト	Fe_3C	—	FeとCの化合物. Cを6.7%含む. 硬くて脆い.
マルテンサイト	α'	bct	γ 域からの急冷時に無拡散変態により形成される準安定相.



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.2 微視組織

図2は、図1の拡大図と組織変化の模式図である。

図3は、パーライト組織の説明図である。

炭素含有量の増加にともない組織形態は変化する。

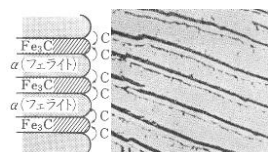


図3 パーライト組織

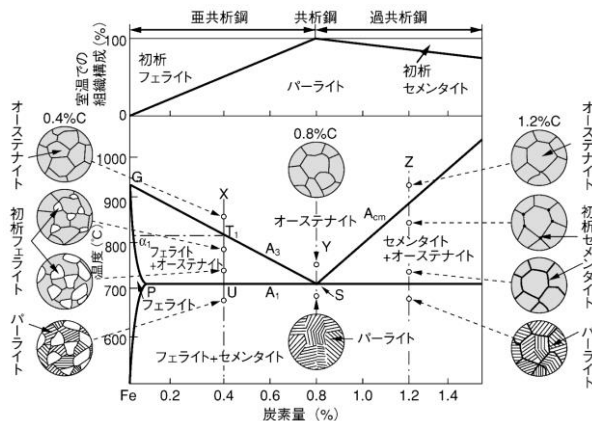


図2 Fe-C系平衡状態図(重要部分)



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

亜共析鋼(0.77%C未満)
 フェライトとパーライトの2相組織であり、炭素含有量の増加とともにパーライトの量が増える(図(a), (b)). 軟鋼とも呼ばれる。

共析鋼(0.77%C)
 全てパーライトと呼ばれる共析複合組織(図(c)).

過共析鋼(0.77%C超)
 パーライトとセメンタイトの2相組織であり、炭素含有量の増加と共にセメンタイトの量が増える(図(d)).

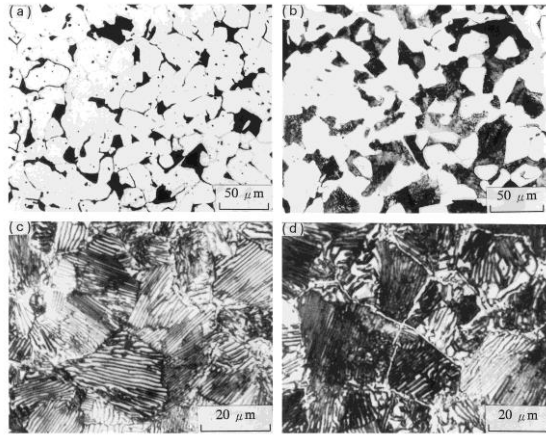


図4 Fe-C系の微視組織:(a)0.17%C, (b)0.30%C, (c)0.77%C, (d)1.1%C



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.3 回復と再結晶

金属に冷間加工を加えると、多数の転位や格子欠陥が導入され、加工硬化が生じる。

回復 $0.4T_M$ (T_M 融点) 未満の温度域で加熱すると、転位の合体・消滅が生じ、同時に転位の再配列が生じる。

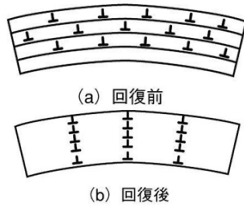


図6 回復前後の転位配列

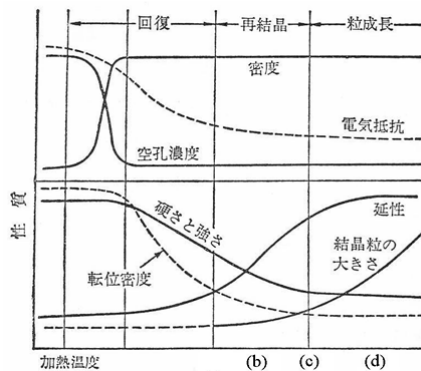


図5 回復・再結晶時の諸性質の



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

再結晶 $0.4 \sim 0.5T_M$ の温度域で加熱すると、転位密度が高い領域や結晶粒界に新たな核が生成する一方、格子欠陥は消滅していく。その結果、金属はひずみのない状態になる。図7(b), (c)に再結晶時の組織変化を示す。なお、図7(b)~(d)は、図5の記号位置に対応している。

低温焼なまし 金属を冷間加工すると加工硬化が生じ、さらなる加工が困難となる。また内部に残留応力が発生し、予想外の破壊を引き起こすことがある。これらを防ぐため、低温焼なましを施す。

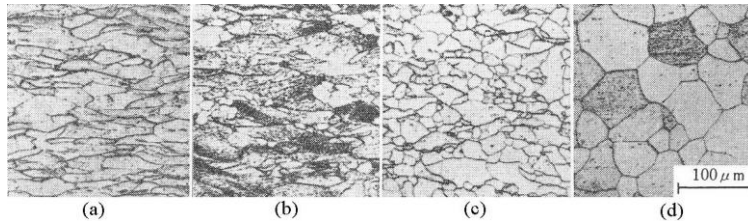


図7 組織形態の変化: (a) 60%冷間加工材, (b) 550 °C, 1 h, (c) 600 °C, 1 h, (d) 700 °C, 1 h



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.4 マルテンサイト変態

純鉄は、912 °C以上の高温でfcc(オーステナイト, γ 相), それより低温側でbcc(フェライト, α 相)となる。しかし、これは平衡状態の場合であり、冷却速度が高い場合、異なる変態が生ずる。

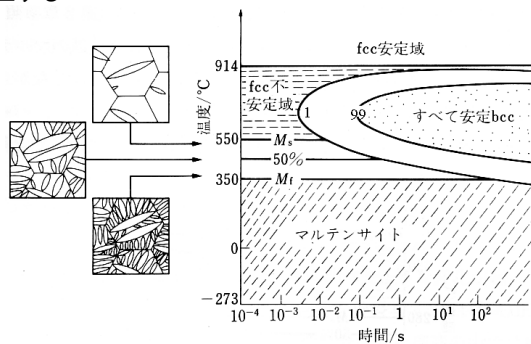


図8 純鉄のTTT線図とマルテンサイト変態



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

以下は純鉄の場合であるが、軟鋼等でも定性的に同じである。

fcc安定域から徐冷した場合
TTT線図のノーズ上側を通過し、低温側で安定なbcc構造へ拡散変態する(図(a)).

fcc安定域から急冷した場合
ノーズの左側を通過し、温度が低下しても不安定なfccのままとなる。しかし、500°C以下まで温度が低下すると、無拡散でせん断型変態が開始され、350°Cで終了する。このマルテンサイト変態と呼ばれる現象により、格子欠陥を多数含むbcc構造のマルテンサイト(α' 相)が形成される(図(b)).

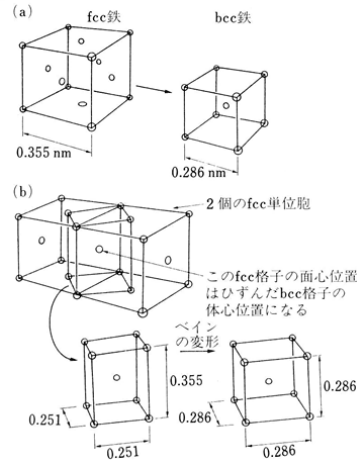


図9 変態時の格子変化: (a) 拡散変態, (b) マルテンサイト変態



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

炭素含有量(共析鋼)が多くなると、

・拡散変態の場合、炭素を拡散させてパーライトを生成するため、ノーズは右(長時間側)へシフトし、マルテンサイト変態は容易になる(図10).

・炭素含有量の増加にともない、マルテンサイト変態の開始・終了温度は低下する。そのため、室温までの冷却では、マルテンサイト変態は終了せず、オーステナイトが残留することがある。

・炭素は拡散せずに、Fe原子の隙間に入り込む(図11).

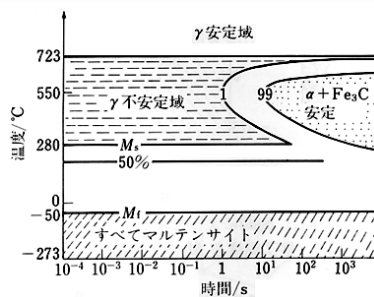


図10 共析鋼のTTT線図とマルテンサイト変態

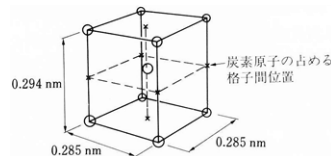


図11 マルテンサイトと炭素位置



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

マルテンサイト変態の特徴

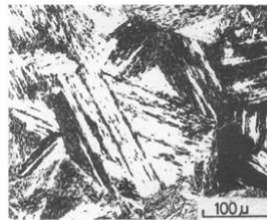
- ① 無拡散変態である。膨張する。 → 残留応力の発生
- ② ラス状あるいは針状の微細組織となる。 → 組織微細化による強化
- ③ 炭素が過飽和に固溶される。 → 固溶強化
- ④ 転位(格子欠陥)密度が上昇する。 → 加工硬化

焼入れ

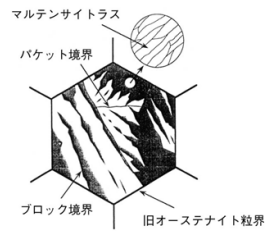
鉄鋼材料のマルテンサイト変態を目的とする加熱・急冷処理

マルテンサイト変態は、短時間に上記3つの強化機構が発現し、強度向上をもたらす。

一方、残留応力(1.5節)が発生したり延性の低下が生ずるため、通常焼戻しを行う(1.6節)。



(a) 光学顕微鏡組織 (2%ニタール腐食)



(b) 説明図

図12 マルテンサイトの組織(0.2%C)



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.5 残留応力

ずぶ焼入れ時には、表面は早期に冷却されて内部より先にマルテンサイト変態を開始する。

表面はマルテンサイト変態にともない膨張する。そのひずみは内部の塑性変形により吸収される。

表面がマルテンサイトとなった後、遅れて内部がマルテンサイト変態を開始して膨張する。表面は既に硬化しており、このひずみを吸収することはできない。

冷却後、表面は内部により引張られ、また内部は表面の拘束により圧縮される。結果として、表面に引張りの残留応力が発生する(右図)。

このような引張り残留応力は、表面からの破壊を容易にするため有害である。

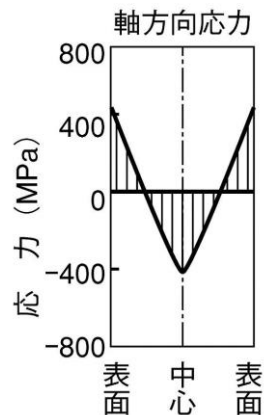


図13 ずぶ焼入れ時に発生する残留応力



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.6 焼戻し

焼入れ後、

- ・150～200℃(低温焼戻し)
- ・400～600℃(高温焼戻し)

で再加熱する熱処理のこと。

焼戻しにより、過飽和に固溶した炭素が炭化物として微細に析出し、延性が回復する。

低温焼戻しの場合には、析出強化のため、強度は維持される。

焼戻しの目的

- ① 硬さを減じ、延性を回復する。
- ② 組織および機械的性質を安定化させる。
- ③ 残留応力を軽減する。

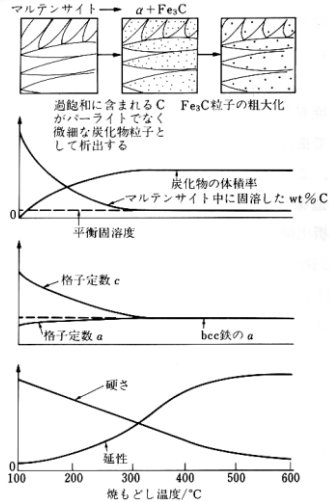


図14 焼戻し時の変化



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

焼戻しぜい性

300℃付近の温度域で焼戻すと、粒界に炭化物が析出するため、延性が低下する。そのため、この温度域は通常使用されない(図15)。

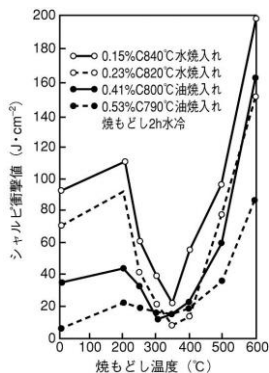


図15 焼戻温度とじん性

2次硬化

機械構造用合金鋼や工具鋼には多量の合金元素が添加されており、通常の焼入れではオーステナイトが残留する。550℃付近で焼戻しを行うと、微細析出物の生成と、残留オーステナイトのマルテンサイト変態により、硬さの上昇や形状変化を引起す(図16)。

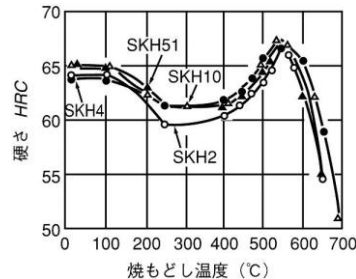


図16 工具鋼での焼戻温度と硬さの関係



1. 鉄鋼材料の組織と熱処理

1.7 焼ならしと焼なまし

焼ならし

オーステナイト域から空冷し、組織微細化・硬化させる熱処理である。TTT線図の上側に達する温度を低下させて核生成を容易にし、組織を微細化させる。

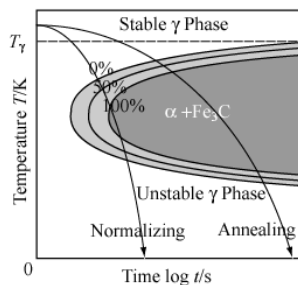


図17 TTT線図に基づく焼ならしおよび焼なましの説明

焼きなまし

オーステナイト域から炉冷し、組織粗大化・軟化させる熱処理である。TTT線図の上側に達する温度を上昇させ、これにより組織成長を促進させる。

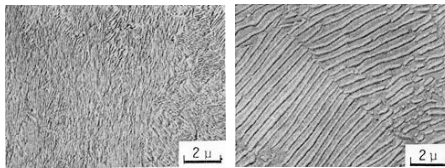


図18 焼ならし時のパーライト組織の変化 (左:焼なまし, 右:焼ならし)



2. 鉄鋼材料の種別

2.1 圧延鋼材・高張力鋼

表2に構造用鋼・高張力鋼の用途や特徴などをまとめて示す。

この種の鋼材は大量使用および溶接を前提とするため、価格は比較的安い。

表2 圧延鋼材・高張力鋼

名称	用途	記号	種別	特徴
一般構造用圧延鋼材	建築、橋梁、車両などの一般用途	SS	SS330,400,490,540 (数字は引張強さ)	・引張強さのみ規定
溶接構造用圧延鋼材	橋梁、船舶、石油貯槽などの大型溶接構造物	SM	SM400,490,510,540,560 (数字は引張強さ)	・C量<0.2% ・Mn, Siで固溶強化
高張力鋼 (通称ハイテン, 概ね490MPa以上の強度)	橋梁、船舶、石油貯槽など大型溶接構造物で軽量化を目指す場合	HT	HT500,600,700,800,1000	・C量<0.15% ・Mn, Siで固溶強化 ・組織微細化



2. 鉄鋼材料の種別

溶接部の状態

右図に示すように、溶接部の両側には熱影響部 HAZ (heat affecting zone) が形成される。この部分は、溶接時の熱影響によりマルテンサイト変態が生じ、硬さが上昇した領域である。

HAZでは、延性低下および残留応力の発生といった強度的な問題が生ずる。

SMおよびHT材の特徴

SM材およびHT材では炭素含有量を減らし、焼入性を低下させてある。一方、強度を補うために、炭素に代えてMnおよびSiを添加することで固溶強化をしてある。

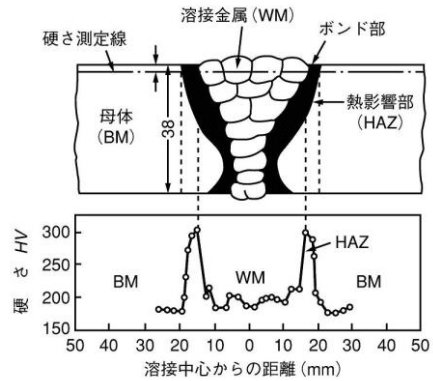


図19 溶接部の様相と硬さ分布



2. 鉄鋼材料の種別

用途例



図20 圧延鋼材・高張力鋼の使用例



2. 鉄鋼材料の種別

2.2 機械構造用合金鋼

表3に、機械構造用合金鋼の特徴などをまとめて示す。
用途は自動車、航空機など各種機械の部品類であり、機械加工後焼入れ・焼戻しにより強じん化して使用することが多い。

表3 機械構造用合金鋼

名称	記号	種別	特徴
炭素鋼	SC	S15C, 25, 35, 45など (数字はC量×100%)	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な機械構造用鋼 C含有量により強度が変化 S25C以上では焼入れ・焼戻し可能
クロム鋼	SCr	SCr415, 435, 440など (数字下2桁はC×100%)	<ul style="list-style-type: none"> Cr 1%の添加により焼入性が改善されている。 焼入れ焼戻し後に使用、窒化用としても使用
クロムモリブデン鋼	SCM	SCM415, 435など (数字下2桁はC量×100%)	<ul style="list-style-type: none"> Cr 1%の添加に加え、Mo 0.25%の添加によりさらに焼入性が改善されている 焼入れ・焼戻し後に使用
ニッケルクロムモリブデン鋼	SNCM	SNCM220, 240, 439, 630など (数字下2桁はC量×100%)	<ul style="list-style-type: none"> Ni 0.5~3.5%, Cr 0.2~0.7%, Mo 0.2~0.7%の添加により高いじん性が実現されている 焼入れ・焼戻し後に使用

※SCr415, SCM415, SNCM220など低炭素のものは浸炭焼入れ用



2. 鉄鋼材料の種別

機械構造用合金鋼の特徴

①炭素鋼では、直径・板厚15 mm以上の丸棒や板材では内部まで冷却できないため、十分に焼入れできない。しかし、Cr, MoあるいはNiを添加した合金鋼では焼入性が改善され、大型製品の焼入れが可能である。焼戻し際には均質な組織が得られる。

②合金鋼の場合、油冷や空冷といったおだやかな冷却でも焼入れ可能であり、残留応力が低減される。

③合金元素と鉄から成る炭化物は、安定かつ高硬さを有する。炭化物は析出強化をもたらすだけでなく、オーステナイト域での結晶粒粗大化を抑制し、かつマ(右上へ続く)

マルテンサイト組織が微細となり、延性を維持しつつ高強度化(強じん化)をもたらす。同時に耐摩耗性を向上させる。

④ 比較的価格は高い。



図21 機械構造用合金の使用例



2. 鉄鋼材料の種別

2.3 工具鋼・軸受鋼・ばね鋼

表4に示すように、工具鋼，軸受鋼，ばね鋼など，専用の用途を規定された鋼種が存在する。

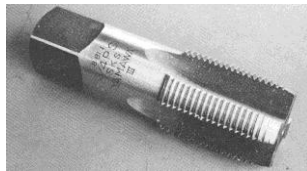
表4 工具鋼・軸受鋼・ばね鋼

名称	用途	記号	種別	特徴
炭素工具鋼	ゲージ，刃物，パイ ト，針などの小物	SK	SK1～7(数字が小さいほ どC量が多い)	・高C濃度(0.6～1.5 wt%) ・焼入れ・焼戻し後使用
合金工具鋼	切削工具，耐衝撃 工具，冷間金型，熱 間金型など	SKS SKD SKH	使用用途に応じて多種	・高C濃度 ・用途に応じてSi, Mn, Cr, W, Mo, Vが 添加される ・焼入れ・焼戻し後使用
軸受鋼	軸受 (コロ，鋼球など)	SUJ	SUJ1～4など(数字が多 いほどCrが多い)	・高C濃度+高Cr(0.9～1.1 wt%) ・焼入れ・焼戻し後使用 ・高点動疲労強度 ・材質管理が最も厳しい
ばね鋼	熱処理ばね(大型板 ばねなど)，加工ば ね(ピアノ線など)	SUP	SUP6～10など	・加工ばね：高Si+Mn(固溶強化) ・熱間ばね：高Mn+Cr(焼入性) ・高弾性限



2. 鉄鋼材料の種別

用途例



SK



SUP



SUJ



図22 工具鋼・軸受鋼・ばね鋼の使用例



2. 鉄鋼材料の種別

2.4 ステンレス鋼

鉄の表面酸化層(赤さび)は時間と共に内部へ進み、腐食が進行する。

鉄にCrを添加すると酸化層は不動態化し、耐食性は著しく改善する(右図)。さらにNiを添加すると、非酸化性(酸素を奪う)環境においても、良好な耐食性を示す。

以上のように、Cr(11%以上)あるいはCrとNiを添加させることにより、緻密な不動態皮膜を形成させた鋼がステンレス鋼である。

具体的には、以下の3種類に大別される。

- ①フェライト系ステンレス鋼
- ②マルテンサイト系ステンレス鋼
- ③オーステナイト系ステンレス鋼

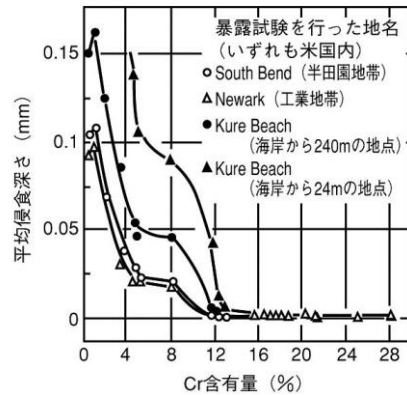


図23 Fe-Cr合金の暴露試験結果(8年)



2. 鉄鋼材料の種別

SUS304・SU316とSUS304L・SUS316Lの相違

オーステナイト系ステンレスでは、基本的にC量0.08%と極力低く抑えられている。特に「L」記号が付与された材料では0.03%未満に制限されている。CはCrと炭化物を生成しやすいため、実質的なCr量を減らす。そのため、原子力発電所の圧力容器などでは、SUS304LやSUS 316Lが使用される(Lがつくだけで耐食性は数十倍!!)。

表5 ステンレス鋼

名称	用途	記号	種別	特徴
フェライト系	建築内装, 家庭用器具, 化学プラント, 食品業機器	SUS	SUS430, 447J1など (J1は日本独自開発を意味する)	<ul style="list-style-type: none"> 耐食性を重視して高Cr濃度(SUS447J1で30%) 加工性は比較的低 延性・ぜい性遷移が生じる
マルテンサイト系	刃物, 医療機器, タービンブレード等の耐熱性機械部品		SUS403, 420J2など	<ul style="list-style-type: none"> C量0.15~0.75%+Cr量12~18% 耐食性は比較的低 硬さが高く耐摩耗性に優れる 強度+耐食性
オーステナイト系	化学食品工業, 熱交換器, ガスタービン		SUS304, 304L, 316, 316Lなど (Lは低炭素を意味する)	<ul style="list-style-type: none"> SUS304が基本(Cr量18%+Ni量8%, 18-8ステンレス) 溶接性良好, 非磁性, 万能型 塩化物水溶液中で応力腐食割れ

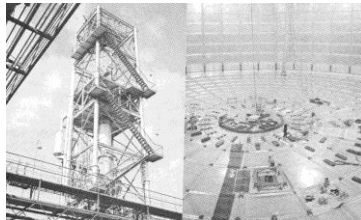
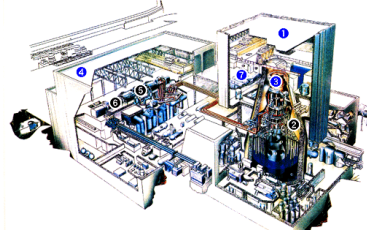


2. 鉄鋼材料の種別

用途例



食器



化学プラント・LPGタンク内側



原子炉容器・配管等

図24 ステンレス鋼の使用例



2. 鉄鋼材料の種別

2.5 耐熱鋼 (JIS名称: SUH)

この鋼種では酸化防止のため、CrやNiが添加される。鉄鋼材料の降伏応力や引張強さは450°C以上で低下し、同時にクリープ強度が重要となる。

- ①固溶強化 Moの添加
- ②析出強化 Cの添加による炭化物の生成
- ③粒界強化 粒界に粗大炭化物を生成

クリープ

材料に一定荷重を加えて高温(融点の30%以上)に保持した際に、ひずみが増加する現象を言う。

定常クリープでは、転位の運動が重要となる。高温における転位移動を拘束するためには、右に示すような強化が必要となる。

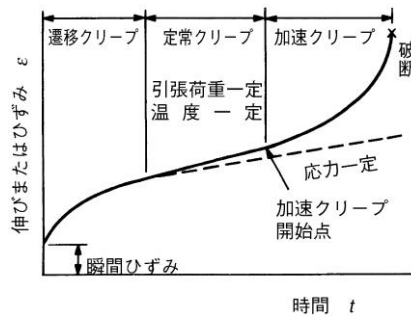


図25 クリープ曲線



2. 鉄鋼材料の種別

超合金

ガスタービン等では燃焼温度が高いほど効率が高まる。そのため、各種の材料の開発や性能改善が現在でも進められている。しかし、750°C以上の温度で使用される材料については、もはや経験と努力に頼る必要がある。

ガスタービンやジェットエンジン等に使用される超合金の種別としては、

- ① Fe基, Ni-Fe基耐熱合金: A-286, Discaloy, V-57
Ni 25%, Cr 15%+Ti, Al添加, Ni₃(Al, Ti)の析出強化
- ② Co基耐熱合金: HS-21, 45, S-816, WI-52
Co基+Cr 25%+Ni
- ③ Ni基耐熱合金(現在主流): Nimonic75~120, Hastelloy X, Nimonic115, Udmet700, Astroy, IN-100, B-1900, MAR-M246
Ni基+Co, Crの素地, Mo+Wで強化, NiとAl, Ti, Nb, Taなどとの金属間化合物により析出強化



2. 鉄鋼材料の種別

耐熱性向上を目指す場合、優れた腐食性および耐クリープ性を有する材料の開発だけでは不十分である。実際、近年におけるブレードの実用温度の向上は、

- ・ 組織制御(多結晶→柱状組織→単結晶)
- ・ 融点の高いNi基合金の溶射
- ・ 冷却方法の工夫

によってもたらされている。

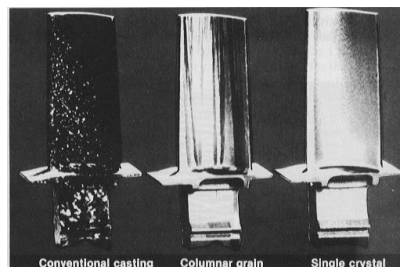
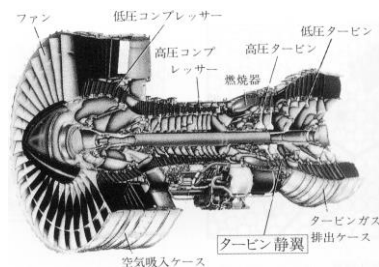


図26 ジェットエンジンの模式図とタービンブレードの組織変遷



2. 鉄鋼材料の種別

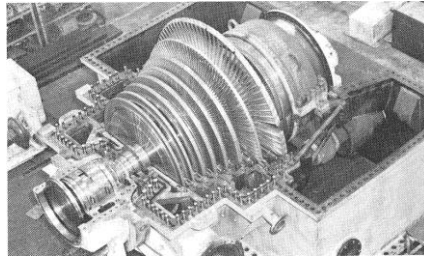
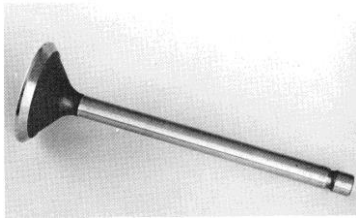


図27 耐熱合金・超合金の使用部品・製品



2. 鉄鋼材料の種別

2.6 鋳鉄

鋳鉄 C2.5~4.0%, Si1.0~3.0%, Mn0.2~1.0%を含む鉄合金.

ねずみ鋳鉄

- ・JIS規格では、引張強さに応じてFC100~350がある.
- ・フェライト素地+片状黒鉛, パーライト素地+片状黒鉛からなる組織(図28上)を有する.
- ・安価で後述の特徴を全て併せ持つ.

球状黒鉛鋳鉄

- ・JIS規格では、引張強さに応じてFD370~800があり、高強度・高延性である.
- ・Mgの少量添加により、黒鉛を球状化させた組織(図27下)を有する.

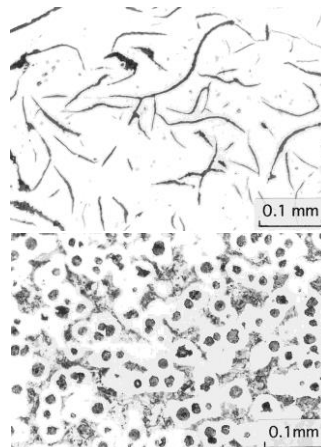


図28 ねずみ鋳鉄(上)と球状黒鉛鋳鉄(下)の組織



2. 鉄鋼材料の種別

鋳鉄の特徴

- ① 鋳造性が非常に高く、凝固や冷却中の収縮が小さい。
- ② 黒鉛が潤滑作用を持つため、耐摩耗性および被切削性が高い。
- ③ 第2相界面で塑性流動が生ずるため、減衰能が高い(特にねずみ鋳鉄)。
- ④ 500°Cまでの高温特性が良好である。
- ⑤ 水に対する耐食性が高く、また電氣的腐食に強い。
- ⑥ 安価である。

○例えば、エンジンプロックなどの複雑な形状でさらに機械加工を必要とし、加えて高温特性、耐摩耗性および制振性を要求される機械部品はすべて鋳造品である。



図29 鋳鉄製品の例



演習問題

問題 1 純鉄、0.45%の炭素を含む亜共析鋼 (S45C) および共析鋼をオーステナイト域から徐冷した。Fe-C系平衡状態図(図2)に基づいて、以下の問題に答えなさい。

- (1) 純鉄と共析鋼の組織変化を説明しなさい。
- (2) S45Cの組織変化を説明しなさい。

問題 2 右図は共析鋼のTTT線図である。図に示す(a)～(c)の経路で冷却した場合、どのような組織になるか、熱処理の名称とともに答えなさい。

問題 3 次の製品には、どのような鉄鋼材料の使用が望ましいか、理由と共に答えなさい。

- (1) 化学プラントにおける配管
- (2) 船舶における構造部材
- (3) 自動車のエンジンプロック

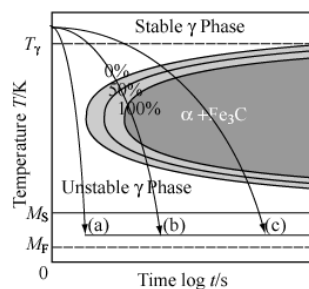


図30 共析鋼のTTT線図



演習問題解答

問題 1

- (1) 純鉄は、 912°C よりも温度が低下するとオーステナイトからフェライトへ変態する。
共析鋼は、 727°C よりも温度が低下するとオーステナイトからパーライトへ変態する。
- (2) S45Cは、A3変態線よりも温度が低下すると初析フェライトが析出し、 727°C (A1変態線)よりも温度が下がると残っていたオーステナイトがパーライトに変態する。結局、室温では初析フェライトとパーライトの2相組織になる。

問題 2

- (a) マルテンサイト+残留オーステナイト(焼入れ)
- (b) 微細パーライト(焼ならし)
- (c) 粗大パーライト(焼なまし)

問題 3

- (1) 一般に耐食性が必要とされるのでステンレス鋼
- (2) 溶接を前提とし、大量に使用されるので溶接構造用圧延鋼や高張力鋼
- (3) 複雑形状で耐食性や防振性が求められ、さらに安価であるため鋳鉄