

5章 5-2 問題解答

予習

1.

名称	目的	メカニズム	事例
焼入れ	a-1	a-2	a-3
焼なまし	b-1	b-2	b-3
焼ならし	c-1	c-2	c-3
焼戻し	d-1	d-2	d-3
低温焼戻し	e-1	e-2	e-3
応力除去焼鈍 (SR)	f-1	f-2	f-3
溶接後熱処理 (PWHT)	g-1	g-2	g-3
直後熱(脱水素)処理	h-1	h-2	h-3
溶体化処理	i-1	i-2	i-3
時効処理	j-1	j-2	j-3

a-1

マルテンサイト変態を起こさせて、炭素鋼や合金鋼の硬さ（強度）を増大させる。（4-3-1 節参照）

a-2

オーステナイト域温度から急冷することにより、炭素を過飽和に固溶した硬いマルテンサイト組織が生成する。マルテンサイト変態は無拡散変態である。

a-3

耐摩耗性や引張強さ、疲労強度の向上を目的とする場合に広く適用される。

b-1

必要な温度に加熱後、徐冷することにより、加工硬化による内部のひずみを取り除いたり、焼入れした組織を標準状態にもどすなど、組織を軟化させて展延性を向上させる熱処理である。目的に応じて多くの種類・方法がある。

b-2

完全焼なまし

組織をオーステナイト化温度域まで加熱保持し、徐冷して標準の組織が得られる。

応力除去焼なまし

下段の応力除去焼鈍 (SR) 参照。再結晶温度以上に加熱して再結晶を起こさせ、ひずみの無い結晶に戻すことにより残留応力が解放される。

b-3

残留応力の除去や鋳鋼品や熱間鍛造品などで結晶粒が粗大化したものを標準組織に回復さ

せる。鋳鉄においては、球状化焼なましがある。

c-1

炭素鋼、合金鋼などを所定の温度まで加熱、空冷することにより、金属組織の結晶を均一微細化し、機械的性質や切削性を向上させる。

c-2

鋳造材は、凝固速度が場所によって不均一であり、また、鍛造材あるいは圧延材は、熱間加工終了温度が場所や板厚によって異なるため、均一な組織が形成されず、過熱異常組織、炭化物の部分的凝集、結晶粒の局所的な粗大化などが発生する。焼ならしは、このような材料に対して、鋳造や鍛造後に、所定の熱処理を行い、成分や組織を均一化させるとともに、空冷によって微細な結晶粒を得る。

焼なましは鋼を軟らかくする処理で、焼入れが鋼を硬くする処理であるのに対して、焼ならしは鋼にある程度の硬さと粘り強さを与える処理であると言える。

c-3

大型の鋳造品、鍛造品は、機械的性質を改善するために、焼ならしか焼なましを必ず行う。特に大型の鍛造品は、質量効果などの点から焼入れ焼戻しを行うのが難しく、焼ならしを行う場合が多い。また、鋳造品、鍛造品の残留応力は、焼ならしにより除去できる。

d-1

焼入れあるいは溶体化処理されて不安定な組織を持つ金属を適切な温度に加熱・温度保持することで、組織の変態または析出を進行させて安定な組織に近づけ、所要の性質及び状態を与える熱処理。

d-2

鋼において、焼入れ後に靱性を高める高温焼き戻しを行うことが多く、マルテンサイトからトールサイトあるいはソルバイトと呼ばれるフェライトに微細な粒状のセメントイトが混在する組織に変態し、ある程度軟化はするが靱性の高い組織が得られる。

また、アルミニウムなどにおいては、溶体化後に強度を高める焼き戻し（時効処理）を行うことが多く、過飽和に固溶している。

d-3

トールサイトは、適度の強さと高い靱性が得られるため、機械構造用鋼に適しており、高級刃物やばね類などに適用される。

ソルバイトは、トールサイトと同じくばね類も含め、軸、高強度ボルト、軽中荷重用歯車などの機械部品全般で広く適用される。

e-1

焼入れ後の硬さをあまり低下させず、残留応力の低減と性状の安定化を行う。

e-2

マルテンサイトに過飽和に固溶されていた炭素や合金元素が吐き出され、すなわち ϵ 炭化物と呼ばれる炭化物が析出し、マルテンサイトは低炭素マルテンサイトあるいは焼戻しマ

ルテンサイトと呼ばれる組織に変わり、組織は低炭素マルテンサイトと ϵ 炭化物で構成されるようになる。これによって、マルテンサイトのひずみが低減されて安定化するとともに、靱性が向上する。

e-3

工具鋼については 5-3 節で詳細を学ぶが、二次硬化特性を持たない炭素工具鋼や冷間加工用の合金工具鋼などに適用される。切削工具、ゲージやノギスといった計測器具、自動車車体のプレス金型、軸受などで適用される。

f-1

残留応力の除去。

f-2

残留応力は、部材を加熱して均一な温度に保ちつつ徐冷した場合、加熱温度の降伏点レベルしか残らない。すなわち、焼なますことによって、残留応力を焼くなまし温度における降伏点まで低減することができる。

f-3

鍛造、鑄造、冷間加工、溶接、機械加工などの後に行われる。ひずみ取り焼なましとも呼ばれる。

g-1

応力除去焼鈍は A1 変体点以下の適当な温度に加熱保持して、残留応力を緩和する方法であるが、溶接部の場合は、残留応力の除去のみならず、材質改善がはかれるので、溶接後熱処理 (post weld heat treatment, PWHT) という用語が広く用いられる。すなわち、溶接のままでは溶接残留応力が存在するとともに、溶接時の熱履歴により、溶接金属、溶接熱影響部は硬化している場合が多いため、溶接後熱処理時に焼く戻すことにより、靱性、延性が改善される。

g-2

応力除去焼鈍、高温焼戻しに同じ。

g-3

溶接後。

h-1

高張力鋼や低合金鋼の溶接時には、低温割れと呼ばれる鋼中の水素に起因する割れが溶接終了後 48 時間程度以内に発生することがある。溶接時に予熱したり、低水素系の溶接材料を用いて溶接部の溶存水素量を低減することにより、低温割れは抑制できるが、板厚が厚い場合や、作業上、予熱温度を十分高くできない場合は、溶接終了後に後熱して保持し、水素の放出を促進させれば、割れの防止が可能となる。

h-2

低温割れは、硬さ、応力、水素の 3 要素が重なった場合に発生するため、水素の放出を促進することにより、低温割れが防止される。

h-3

高張力鋼や低合金鋼の溶接時。

i-1

金属の組織の中にある析出物を溶かし込む(固溶させる)操作で、固溶化熱処理とも呼ばれる。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接後のウェルドディケイの回復や、時効処理が必要なアルミニウム合金の固溶化処理として行われる。

i-2

オーステナイト系ステンレス鋼では、加工や溶接後にクロム炭化物やシグマ相が生成することがあるが、これらを母相に固溶させて、耐食性、延性、靱性を回復させる。

また、時効硬化性のアルミニウムなどにおいては、時効処理前に添加元素を母相に完全に固溶させるために溶体化処理を行う。例えば、アルミニウム中に銅は常温では 0.3%程度しか固溶しないが、584℃では 5.7%固溶する。したがって、584℃に加熱ご急冷すれば銅はアルミニウム中に過飽和に固溶され、その後の時効処理時に、過飽和の銅は析出物として析出し、アルミニウムの強度を向上させることができる。

i-3

加工や溶接後のオーステナイト系ステンレス鋼あるいは時効処理前のアルミニウム合金。

j-1

i-2 のとおり、加熱とそれに続く急冷によって過飽和固溶体が形成され、その後に時効熱処理を行うと、徐々に微量の金属間化合物原子の析出が起こる。このような析出を利用して材料の強度やクリープ特性を向上させることを目的とする。

j-2

金属間化合物原子の析出が起こる。

j-3

ジュラルミンは Al-Cu 系合金で、アルミニウム中に銅を過飽和に固溶させたのち、548℃以下の温度で時効処理を行うことにより、CuAl₂が析出して母相が強化されて高強度アルミニウム合金となる。

2.

「焼入れた時に表面からどれだけ深く硬い組織が得られるか」で評価する。

JIS G0561 に規格化されている。

所定寸法の丸棒試験片の全体を加熱して完全にオーステナイト化した後、片方の端部に水を吹き付けて焼入れをおこない、長手方向の硬さ分布を測定して、表面(端面)からどの程度の深さまで硬化したかを調べて、焼入性を評価する方法。

4-3-1 項 2. の *26 プラスアルファ 参照

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%BC%E5%85%A5%E3%82%8C%E6%80%A7>

3.

4-3-1 項 2. 図 4-13 参照。この曲線は、ジョミニー試験により得られる焼入れ性曲線の 1 例である。

- ① 焼入れ性がよい
- ② 焼入れ性が悪い

4.

切り欠き付き角柱試験片に、重量のあるハンマーで衝撃を与えることにより試験片を破壊し、破壊するのに要したエネルギーとその温度依存性を評価する。

JIS Z2242-2005 に規格化されている。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%94%E3%83%BC%E8%A1%9D%E6%92%83%E8%A9%A6%E9%A8%93>

<http://image.search.yahoo.co.jp/search?rkf=2&ei=UTF-8&p=%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%94%E3%83%BC%E8%A1%9D%E6%92%83%E8%A9%A6%E9%A8%93>

5.

① エネルギー遷移温度

定義：

延性破面率（※1）100%となる最低温度に対応する吸収エネルギーと、脆性破面率（※2）100%となる最高温度に対応する吸収エネルギーとの、平均吸収エネルギーに相当する温度 T。簡便な方法として、延性破面率 100%となる最低温度における吸収エネルギーの 1/2 の値に相当する温度として求めることが多い。

② 破面遷移温度

定義：

試験片の破面の外観の変化に対応する遷移温度で、特定の延性破面率となる温度又は脆性破面率となる温度 T。通常、2mmV 切欠き試験片を用いたシャルピー衝撃試験で、延性破面率 50%となる温度 T を求める

（※1）延性破面率とは、試験片の破面の全面積に対する延性破面の面積の百分率のことである。

（※2）脆性破面率とは、試験片の破面の全面積に対する脆性破面の面積の百分率のことである。

ある。

5-2 演習問題 A

5-2-A1

クロム、ニッケル、マンガン、シリコンなどの合金元素の存在により鋼中の炭素の拡散が抑制され、炭素の拡散を必要とするパーライト変態が起こりにくくなるため、遅い冷却速度でもマルテンサイトが形成されるようになるから、合金元素の添加により焼入性が向上する。逆に、焼入性を低下させる合金元素としては、アルミニウム、コバルトがあげられる。

5-2-A2

強度は変形や破壊する時の応力が指標とされる。一般に高強度材料、すなわち硬い材料は脆く、靱性は低い。応力の単位は[MPa]、[N/mm²]が用いられることが多い。靱性はねばさのことで、破壊にいたるまでのエネルギーや急激に靱性が変化する温度が指標とされることが多い。したがって、靱性は、吸収エネルギー[J]、遷移温度[°C]で定量化されている。

5-2-A3

延性は塑性的に変形する性質のことで、脆性はその逆で粘り強さがなく、衝撃荷重で破壊する性質のことである。

延性は伸びや絞りの値で定量化されており、ともに単位は[%]である。また、破断面より延性、脆性を評価することも可能で、シャルピー衝撃試験により脆性破面率を算定することもある。

5-2-A4

焼入性を増大させる元素として、炭素、マンガン、クロムが添加される。ニッケルも焼入性を向上させるが、靱性を改善させる効果の方が顕著である。

5-2-A5

高温で外力を加えられた材料が、時間の経過と共に変形して行く現象である。この変化は、原子あるいは空孔の熱拡散に起因するため、融点 T_m の 0.4 倍、すなわち約 $0.4T_m$ [K] 以上の温度になると起こるとされている。

5-2 演習問題 B

5-2-B1

クロム、ニッケル、マンガン、シリコンなどの焼入性向上合金元素の添加により、鋼中の炭素の拡散が抑制され、炭素の拡散を必要とするパーライト変態が起りにくくなるため、遅い冷却速度でもマルテンサイトが形成されるようになるから、合金元素の添加により焼入性が向上する。

5-2-B2

300 °C 付近の温度域で焼戻すと、粒界に炭化物が析出するために延性が低下する。この脆化現象を低温焼戻し脆性（500° F 脆性）といい、工具鋼などの熱処理時に注意すべきである。したがって、通常は韌性改善のために 600°C 以上で焼戻すことが多いが。焼戻しの際、約 300~500°C の間を徐冷するか、この温度域に保持すると、急冷したものと比較して韌性が大きく低下することがある（図 5-2-11）。これを焼戻し脆化あるいは 500°C 脆化と言う。脆化の発生機構としては、リン(P)、スズ(Sn)、ヒ素(As)などの不純物が焼戻しの際に旧オーステナイト粒界に沿って偏析し、粒界の結合力を弱め、衝撃力によって粒界で脆性破壊を起こす、とする説が有力である。

5-2-B3

● グラフの作成

与えられた σ_1 から σ_5 に対応する 100,000 時間におけるクリープひずみ ε_1 から ε_5 は、 $t=100000$ 時間 $=10^5$ 時間を代入すると、以下のように算出できる。

$$\sigma_1=50 : \varepsilon_1=0.18+0.8\times 10^{-6}\times 10^5=0.26$$

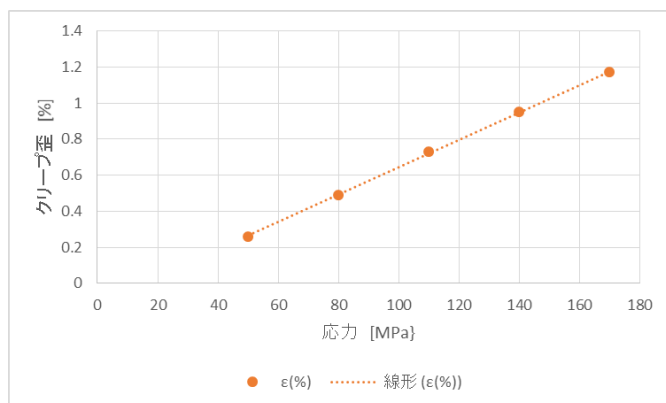
$$\sigma_2=80 : \varepsilon_2=0.20+2.9\times 10^{-6}\times 10^5=0.49$$

$$\sigma_3=110 : \varepsilon_3=0.23+5.0\times 10^{-6}\times 10^5=0.73$$

$$\sigma_4=140 : \varepsilon_4=0.28+6.7\times 10^{-6}\times 10^5=0.95$$

$$\sigma_5=170 : \varepsilon_5=0.35+8.2\times 10^{-6}\times 10^5=1.17$$

これをより以下のグラフが得られる。



●応力の算出

次に1%クリープひずみに対応する応力を求める。

グラフから、最小二乗法により近似関数を求めると、 $\sigma = 0.0076 \varepsilon - 0.116$ となり、1%クリープひずみを求めると、

$$1 = 0.0076 \varepsilon - 0.116$$

よって

$\varepsilon = 146.84$ (MPa) が得られる。

また、グラフの座標 $(\sigma_4, \varepsilon_4)$ および $(\sigma_5, \varepsilon_5)$ の2点間を内挿することにより、

$$\begin{aligned} & 140 + (\sigma_5 - \sigma_4) / (\varepsilon_5 - \varepsilon_4) \times (1 - \varepsilon_4) \\ & = 140 + (170 - 140) / (1.17 - 0.95) \times (1 - 0.95) \\ & = 146.82 \text{ (MPa) が得られる。} \end{aligned}$$

どちらの方法を用いても良い。