

炭素鋼の組織観察

平成 23 年 4 月 22 日(金)

機械部品の製造では様々な熱処理が使われている。熱処理は部品の加工の前、または、後で熱を加えて材質を変化させる加工方法である。この熱処理により機械部品に様々な性質を加えることができる。熱処理の知識や技術を持つことで、機械部品の設計や選定の際に自由度が増えるとともに、より高品質な製品の製作や、または、機構の単純化などでコストダウンを図ることが可能となる。この実習では鋼の熱処理を通じて、基本的な熱処理方法と、熱処理による材質の変化を理解する。

1. 演習・実験目的

鋼は同一材料でも太さや冷却方法によって焼入れ硬さや機械的性質は大きく変化する。この現象は鋼の焼入性に起因するが、これが十分に理解されていないと機械設計に問題が生じやすい。今回の実習は 2 種類の亜共析甲鋼で焼入性の実験を行い、鉄鋼の基本的な微細組織を観察し、将来の設計や加工にどう反映させるかを体験する。

2. 鋼の熱処理

2.1. 鋼の平衡状態図

図 1 に Fe-C 系平衡状態図を示す。特徴的な変態線には名前がついている。

平衡		加熱時	冷却時	
A ₁ 線	A _{e1} 線	A _{c1} 線	A _{r1} 線	共析点と同じ温度の線。
A ₃ 線	A _{e3} 線	A _{c3} 線	A _{r3} 線	オーステナイト (A) ^{析出} ⇒ フェライト (F)。
A _{cm} 線	A _{ecm} 線	A _{rcm} 線	A _{rcm} 線	オーステナイト (A) ^{析出} ⇒ セメンタイト (C)。
共析点	A ₃ 線と A _{cm} 線が交差する点。0.765mass%C, 727°C。			

鋼の熱処理の大部分は微細組織を一旦、オーステナイト (γFe) 化し、冷却して、フェライト (αFe) とセメンタイト (Fe₃C) に変態させる処理である。

2.1.1. 微細組織と時間の関係

パーライト (P)	オーステナイトを 緩い冷却速度 で冷却したときにできる。フェライトとセメンタイトが層状に並んだ縞状の組織である (図 2(b))。
ベイナイト (Zw または B)	オーステナイトを 速く冷却 したときにできる微細組織で、保持温度が 350°C より高いときには羽毛状の上部ベイナイトが、低いときには針状の下部ベイナイトが光学顕微鏡では観察される。
マルテンサイト (Ms)	オーステナイトが 急冷 されて均一に炭素を含んだまま、フェライトに変態し、フェライト中に過飽和な炭素が含まれる状態。オーステナイトからマルテンサイトになる変態をマルテンサイト変態と呼ぶ。

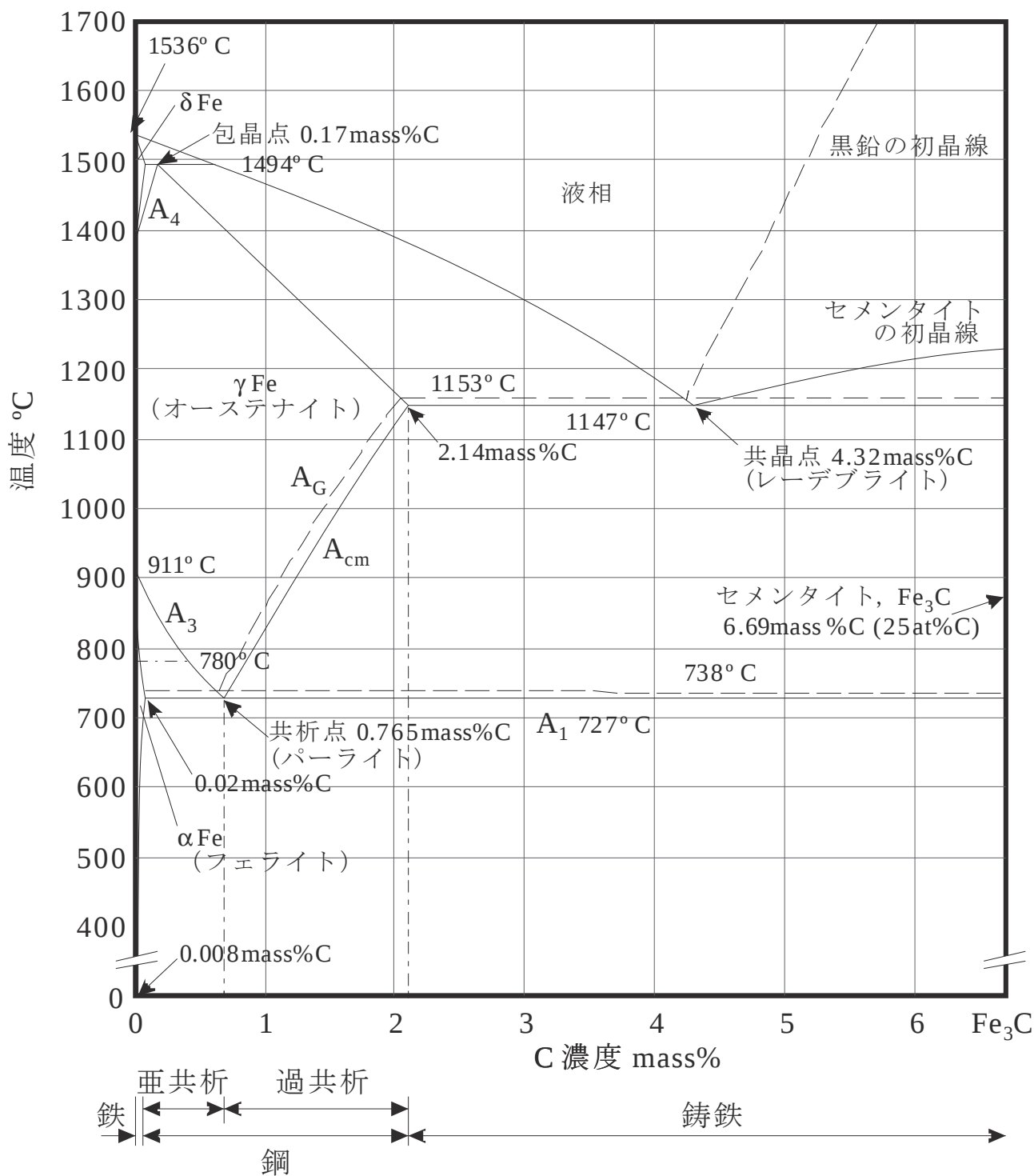


図 1 Fe-C 系平衡状態図

3.1.1. TTT 線図

鋼を一旦焼なまし温度まで熱し、非常に速く急冷し、ある一定の温度に保ったときにできる微細組織を示した図が等温変態線図または TTT 線図 (Time-Temperature-Transformation diagram) である (図 3) 図 3(b) の SKS3 の TTT 線図を例にとると、焼なまし温度 (オーステナイト化温度) から急冷して 650 $^{\circ}\text{C}$ に保ったとする。約 10s 後、オーステナイトとフェライトの混合組織 (A+F) に変態し始め、約 30s 後にはオーステナイトがパーライト (P = F+C) に変態し始めある。図中、A+F+C 混合組織とあるが、実際には、A+F+(F+C)あるいは A+F+P 混合組織である。そして、約 300s 後、オーステナイトは完全にフェ

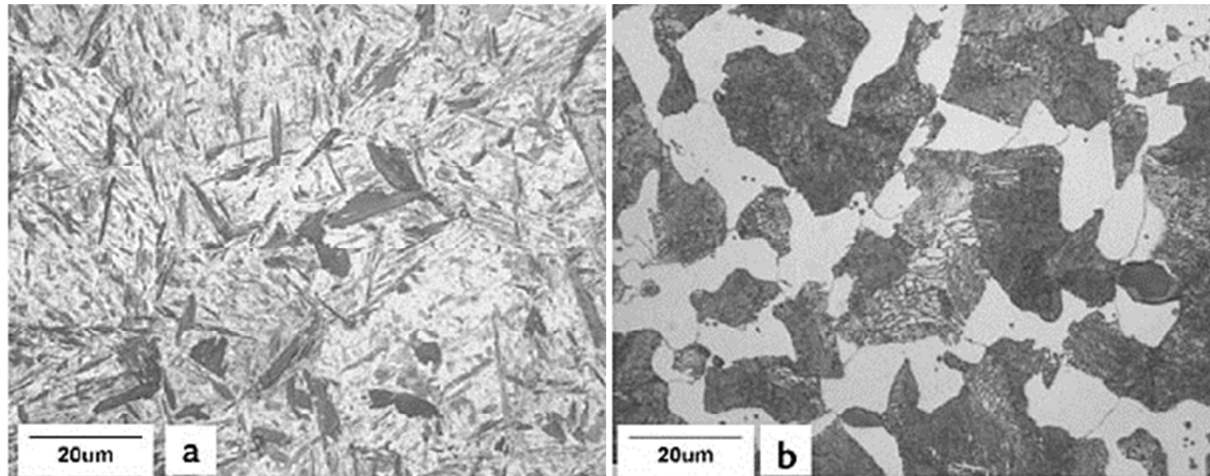


図 2 0.4wt%炭素鋼の(a) ジョミニ試験による焼き入れ後の微細組織. (b) 焼きならし後.

James Marrow, "Understanding The Jominy End Quench Test," September 7(2001)

ライトとセメンタイトに変態し終わり、フェライトとセメンタイトの混合組織になる。この組織を光学顕微鏡で観察するとフェライトの島を縞状のパーライトが囲むような形態となる。

一方、鼻の直下の 450°C で保持した際には、約 1.5s 後にオーステナイトがフェライトとセメンタイトに変態し始め、約 100s 後にこの変態は完全に終わる。その結果、上部ベイナイトが形成される。 300°C 程度で保持した場合、同様にオーステナイトがフェライトとセメンタイトに変態するが、完全に下部ベイナイトが形成される。

S 曲線の鼻を避けて、 280°C 程度まで 0.6s と非常に急速に冷却したとき、マルテンサイトが形成される。この際、 M_{90} の線の下まで一気に急冷するとほぼ全体がマルテンサイト変態する。しかし、それに伴う体積膨張によって部品にわれが生じる恐れもある。いわゆる焼割れである。焼割れ防止のために、 M_s と M_{90} の間で適当な時間保持する熱処理をマルテンパ（またはマルクエンチ）と呼ぶ。

3.1.2. CCT 線図

実際の熱処理においては所定の冷却速度で冷却される場合が多い。その際には TTT 線図よりも連続冷却変態線図または CCT 線図 (Continuous Cooling Transform diagram) を利用の方が便利である (図 3(a)) 冷却曲線の終点付近にビッカース硬さ (HV) が示してある。

3.2. 熱処理の種類と方法

熱処理は、端的に言えば、ワークを加熱し、冷却して、所定の性質に整える処理である。

加熱には炉を用いるが、大気で行う一般加熱炉、塩浴中にワークを浸す塩浴炉（ソルトバス）、不活性ガスや窒素ガスなどの気体中で加熱する雰囲気炉、真空中で加熱する真空炉、また、ガスバーナなどの炎で加熱する炎熱処理装置、変動磁場による誘導加熱を用いる高周波加熱装置などがある。

冷却方法には、炉冷、空冷、水冷、水溶液冷却、油冷、塩浴冷却（熱浴冷却）、サブゼロ処理などがある。

徐冷は加熱炉中に放置して行うことが多いが、ワークが室温に冷えるまで非常に長い時間を要する。Newton の冷却則から概算して、雰囲気温度 T_0 、表面熱伝達率 h 、適当な定数 C を用いて冷却時間 t とワーク温度 T の関係は、 $T = T_0 + C \exp(-ht)$ と表されるので、ワーク温度が雰囲気温度に近づけば近づくほど更に長い冷却時間を要する。一般的に熱処理には長い冷却時間がかかるので、発注する際には十分余裕

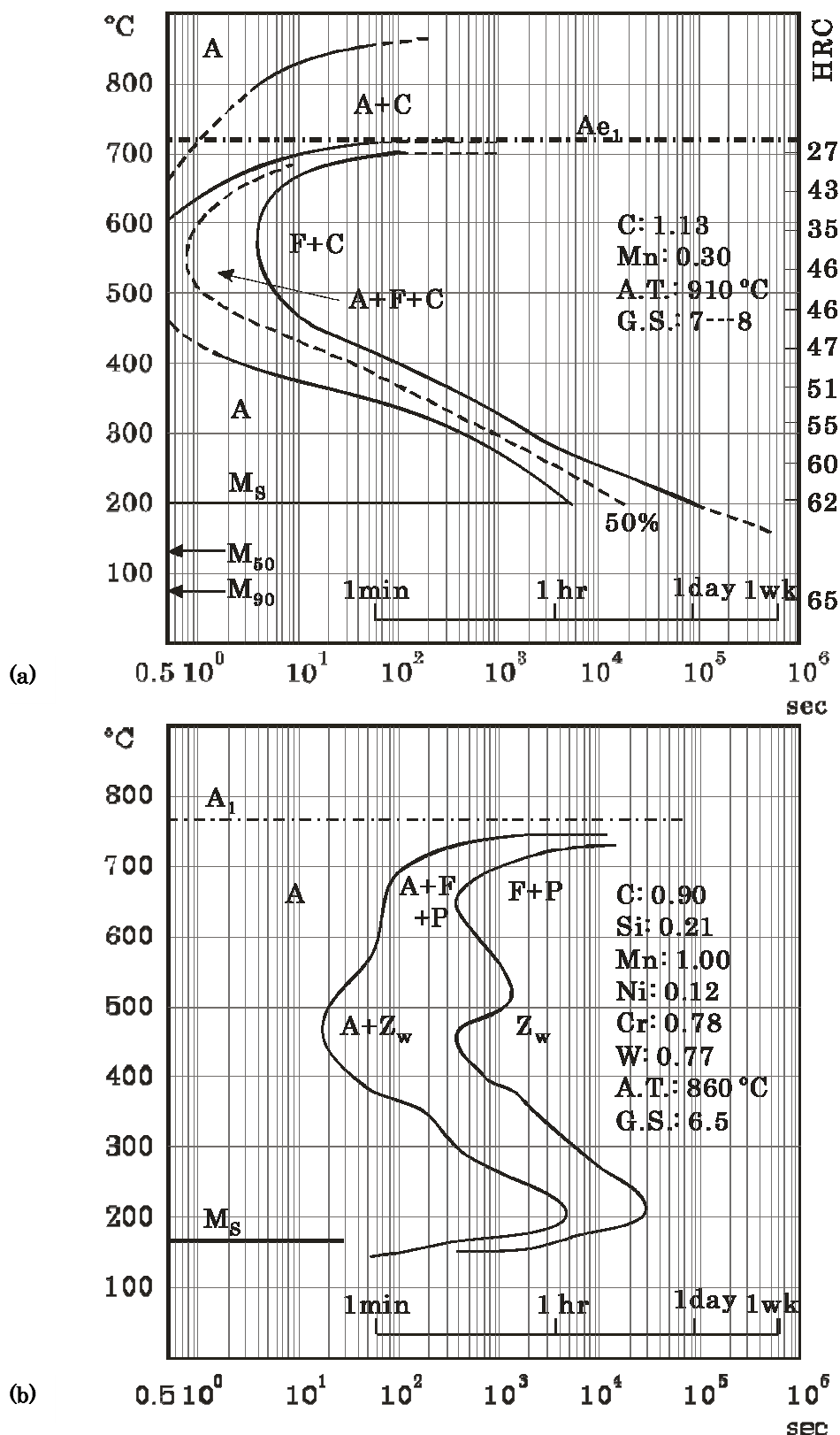


図 3 TTT 線図. (a) SK105, (b) SKS3 相当. A: オーステナイト, F: フェライト, C: セメンタイト, M_s: マルテンサイト, M₅₀: マルテンサイト 50%線, M₉₀: マルテンサイト 90%線, A.T.: オーステナイト化温度, G.S.: 結晶粒度.

のある納期を勘案する必要がある.

空冷には, 単なる大気中放冷, 衝風冷却, ガス流量冷却などがある.

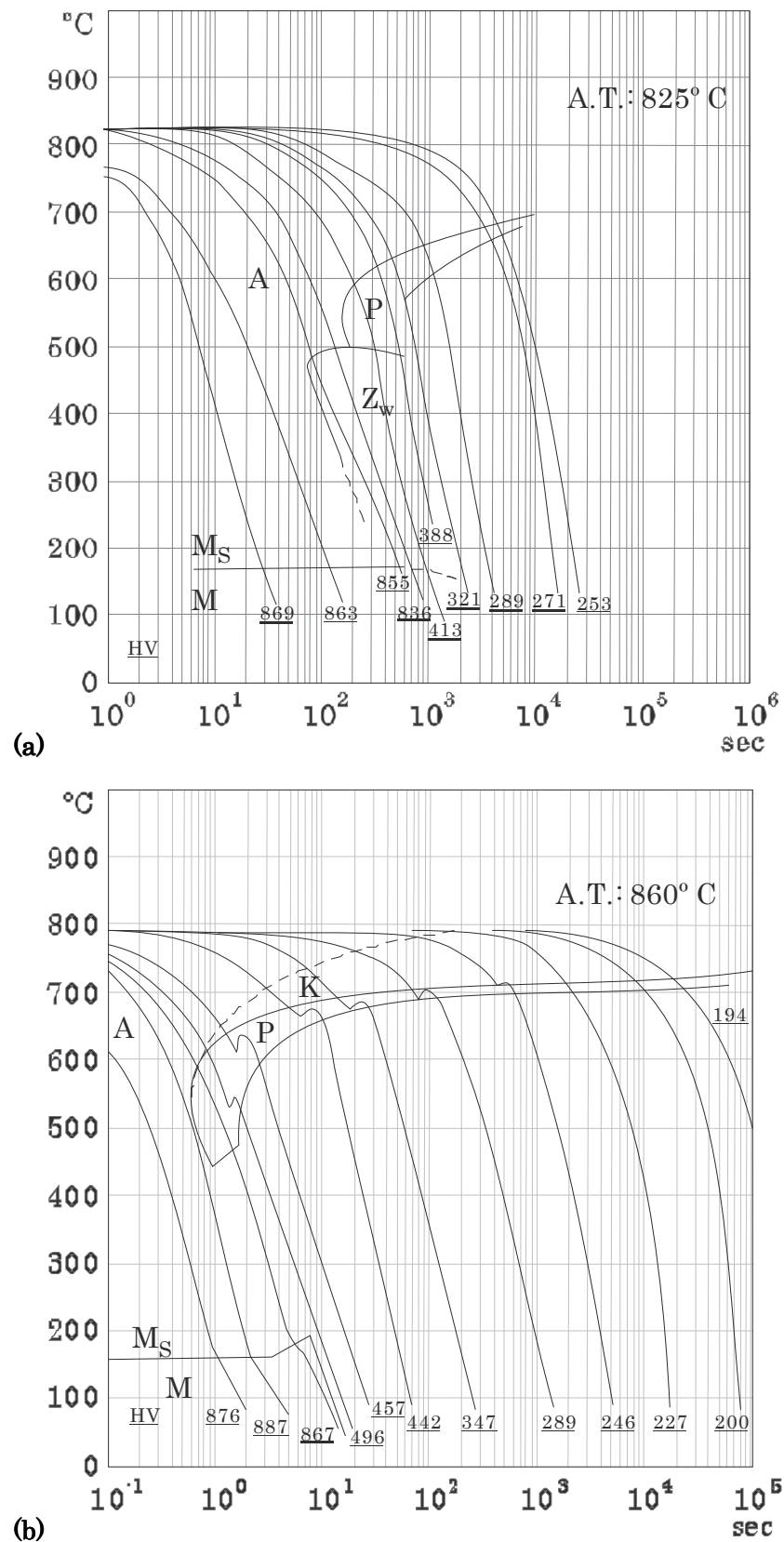


図 4 CCT 線図. (a) SK105, (b) SKS3 相当. A: オーステナイト, P: パーライト, Z_w : ベイナイトまたは中間組織, M_s : マルテンサイト, K: 金属炭化物, A.T.: オーステナイト化温度.

水冷は古来よりなされている簡便な方法である. ワークの持つ熱量により水温が 30°C 以上に上昇しないように, 冷却能維持するために十分な水量を用意する必要がある. 水冷では冷却雰囲気温度がせいぜい

表 1 種々の熱処理

名称	目的	熱履歴
焼ならし (HNR)	圧延などの加工による硬さむらや 残留応力の除去して組織を微粒 化・均質化するすること	亜共析鋼： A_3 変態点+40～60℃. 過共析鋼： A_{cm} 変態点+40～60℃. 大気中で常温まで放冷する.
焼なまし (HA) しょうどん 焼 鈍 完全焼なまし	鋼を軟化させて機械加工, 塑性加工 を容易にする.	亜共析鋼： A_3 変態点+30～50℃. 過共析鋼： A_1 変態点+30～50℃. 炉冷する.
応力除去焼なまし	鑄造, 鍛造, 冷間加工, 機械加工, 溶接後の内部応力を除去す	500～650℃で, 保持時間 1 時間程度の後, 空冷または徐冷する.
焼入れ (HQ)	マルテンサイト変態を起こして鋼 を硬化させる. 低・中炭素鋼：靱性の向上. 工具鋼, 軸受鋼などの高炭素鋼：表 面の硬化による耐摩耗性の向上.	亜共析鋼： Ac_3 変態点+30～50℃ 過共析鋼： Ac_1 変態点+30～50℃ 適当な時間保持. 水冷, 油冷などで急冷する. 冷却速度はワ ーク材質の TTT 線図または CCT 線図を参照 して, 十分速い冷却速度とする. 冷却時の焼割れに注意.
サブゼロ処理 (HSZ)	残留オーステナイトをマルテンサ イト変態させる	0℃以下の温度に保持する.
焼戻し (HT)	焼入れにより内部応力, 内部ひずみ が蓄積された鋼を再加熱して靱性 を向上させる. 一般には硬さが低 下. 高速度工具鋼 (ハイス鋼) や熱間工 具鋼では焼戻し温度が 450℃程度 以上で, 逆に, 硬さが上昇する. こ れを二次硬化と呼ぶ.	高温焼戻し： c_1 変態点以下の高温. 適当な速度で冷却 する. 低温焼戻し： 00℃程度に加熱後, 冷却.

30℃程度であるが, 種々の水溶液, 油, 塩浴 (熱浴) の使用により, 熱処理に適した温度に雰囲気温度を設定することができる.

表 1 に典型的な熱処理方法を列挙する. 図 5 にそれぞれの熱処理方法の温度履歴の概念図を典型的な亜共析鋼の TTT 線図の模式図に示す.

3.3. 熱処理と部品形状

機械部品は往々にして複雑な形状をしている. 比較的単純な平歯車においても, 歯があり, 歯と軸穴の間は若干薄肉にしてあり, 更に, 軸穴にはキー溝が掘られている場合もある. このような平歯車の焼入

れを考えてみよう。加熱時には全体が均一に高温であるが、水冷した場合、歯先と歯底では同じようには冷却されない。また、軸穴と歯車の板部の冷却状態は異なるだろう。また、歯車の表面と内部とでは当然、温度に差が生じるだろう。それは、材料中を熱が伝わる速さ（熱伝導率）が無限ではないことと、表面形状によって放熱の能力（冷却能，熱伝達率）が異なることが原因である。

3.3.1. 質量効果

熱は材料中を瞬時に伝わるわけではないので、大きなワークほど冷却されている面と、そこから離れた内部では熱処理の効果に差が生まれてしまう。これを熱処理の質量効果と呼ぶ。炭素鋼は質量効果が大きい材質であり、直径約 20mm 以下の丸棒を水焼入れした場合には、ほぼ棒の中心まで焼入れ効果が現れるが、それ以上の直径では表面から遠いほど焼入れ効果が不十分になり、中心部においてはフェライトや微細パーライトが析出して、完全なマルテンサイト組織のみにとはならない。

3.3.2. 焼入性

炭素鋼は質量効果が大きいと述べたが、質量効果の現れ方、つまり、焼入性は鋼種によって大きく異なる。JIS に規定された一端焼入れ試験方法 (JIS G 0561) による焼入れの結果を示す (図 6)。SK85¹ では表面のみが焼入れされ、硬化しているが、SKS3 では 20mm 程度まで硬化されている。

3.3.3. 形状の効果

ワーク形状によって冷え方が異なるが、球と丸棒、板では球が最も冷えやすく、冷え方の比は

球：丸棒：板 = 4：3：2

と概ね考えてよい。また、同じ部品でも部位によって冷え方が異なってくる。より複雑な形状の際は、図 7 に示すように、平面の冷却能を 1 とすると、隅角は約 1/3 になる。逆に、2 面角では平面の 3 倍、3 面角では 7 倍にもなる。このように、凹の部分は冷却されにくく、凸の部分は速く冷却される。

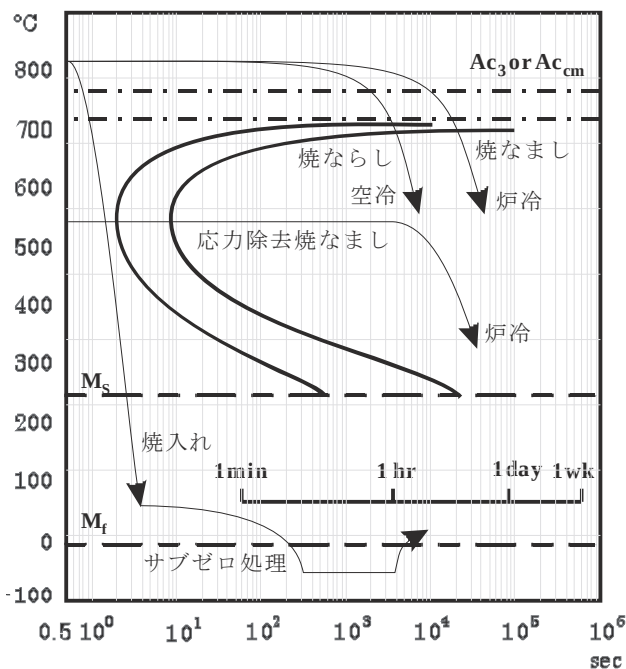


図 5 TTT 線図と熱処理の概念図

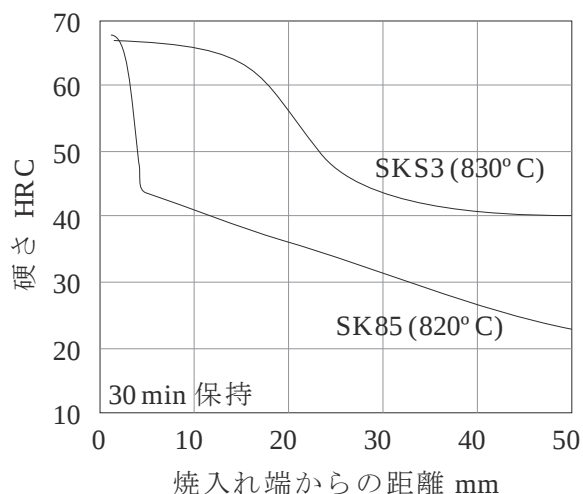


図 6 鋼の焼入性曲線

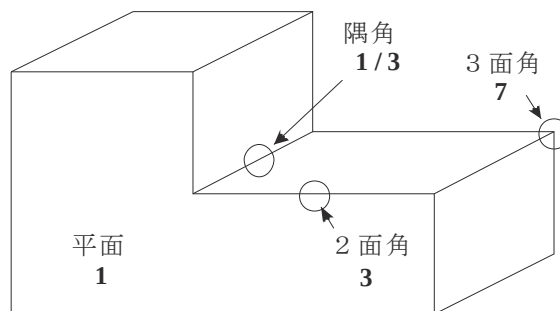


図 7 品物の部位による冷え方の違い。

¹ SK105 にあたる焼入性曲線が資料を用意できなかったため、SK85 を SK105 相当と代用した。両鋼種の差異は付録 1 を参照。