

鋼の焼入れにおける逆硬化現象について*

清水 信 善**・田 村 今 男***

On the Inverse Quench-Hardening of Steel

Nobuyoshi SHIMIZU and Imao TAMURA

Synopsis:

Quenching of steels normally produces highest hardness at the surface and successively lower hardness into the center of the article. In oil quenching of bearing grade steels, however, an inverse hardness distribution (called inverse quench-hardening, hereinafter) is sometimes found. In this investigation, the inverse quench-hardening was examined. The main results are as follows

(1) The inverse quench-hardening is caused by a rapid change of cooling rate during cooling. This phenomenon is particularly liable to occur when the steels are quenched into oil having long vapor blanket cooling stage and a low characteristic temperature.

(2) This phenomenon occurs more often at the upper part than the lower part of the article treated. This is due to that the vapor blanket cooling stage is longer at the upper part than the lower part.

(3) The inverse quench-hardening is attributed to higher consumption of incubation period for perlitic transformation at the surface than at the center of the steel during vapor blanket cooling stage in quenching. In such a case, the hardening at the surface becomes difficult even by rapid cooling in the following boiling stage.

1. 緒 言

鋼材を焼入れした場合、鋼材の寸法が小さく内部でもその鋼の臨界冷却速度以上の速度で冷却される場合には、内部まで完全に硬化する。しかし、ある大きさ以上になると、表面では焼きが入って硬化するが内部では焼きが入らなくなる。そして、焼きの入った表面部はマルテンサイト組織を示し、内部にゆくにつれてトルースタイトが多くなり、硬さが低下してゆくのが普通である¹⁾²⁾。以下これを正常硬化 (Normal Quench-Hardening) 現象と呼ぶ。ところが、これと全く逆の現象が軸受鋼の油焼入において時々見受けられる。すなわち、表面部にトルースタイトまたはベイナイトが発生し、内部にゆくにつれてこれらが減少し、逆に、マルテンサイトは表面から内部にゆくにつれて多くなり、硬さも表面部が低く内部にゆくにつれて高くなる現象を示すことがある。以下これを逆硬化 (Inverse Quench-Hardening) 現象と呼ぶ。

この逆硬化によく似た現象で、表面部の硬さが低く、少し内部に入つたところで最高硬さを示す場合がある。たとえば、高周波焼入における場合は、定説はないが³⁾、残留オーステナイトが表面部に多く発生するか、または焼入れ寸前の表面温度の低下のいずれかと考えられている。浸炭窒化の場合は、 ϵ 炭窒化物が表面にできるため⁴⁾、または残留オーステナイトが表面に多く発生するため⁵⁾と考えられている。浸炭焼入の場合は、残留オーステナイトが表面に多く発生するため⁴⁾と考えられている。引上げ焼入れ⁶⁾の際におこる場合は、表面部が焼もどしマルテンサイト、中間部は焼入れのままのマルテンサイトになり、中心部がベイナイトまたはパーライトになるためと考えられている。また、極く表面層で Mn, Cr が内部酸化して表面異常層⁷⁾となり、極く表面部のみの硬さが低下する現象もある。脱炭によつても表面の硬さが低下する⁸⁾⁹⁾。

以上述べた現象は、いずれも本研究の逆硬化現象とは全く性質の異なるものである。さて、逆硬化現象に関す

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 50 年 5 月 13 日受付 (Received May 13, 1975)

** 光洋熱処理(株) (Koyo Netusyori Co., Ltd., 146 Takefuchi Yao-shi Osaka 581)

*** 京都大学工学部 工博 (Kyoto University)

る研究報告は見当たらないので、軸受鋼を使用して逆硬化現象の発生状況並びに原因について調査検討した。さらに、試片を焼入れする際の表面部と内部の冷却曲線を測定し、逆硬化になる原因について CCT 曲線を使って考察した。

2. 逆硬化現象の発生実例と原因予測

通常の焼入れ操作において見受けられる逆硬化現象の実例を Fig. 1 に示す。これは、外径 300 mm ϕ の SUJ 2 のベアリングレースをバッチ式雰囲気炉で 850°C で 70 min 間のオーステナイト化後、油焼入れした場合の逆硬化現象の様子を示したものである。すなわち、焼入れのときの油中での状態が Fig. 1 の断面図で示すような姿勢で冷却されたもので、黒い部分はトルースタイトで逆硬化現象をおこして硬さの低くなつた部分を示す。硬さ分布はベアリングレース A-B 断面を測定したものである。A側(ベアリングレースの内径側)の表面部の硬さは HRC 53 であるが、内部にゆくにつれて硬さが上昇し、表面より深さ 9.0 mm の中心部あたりでは HRC 62 となつている。また、B側(外径側)も同じように表

面部の硬さが低く、内部にゆくにつれて硬さが上昇している。

この様子を顕微鏡で表面から内部への組織変化を観察すると Photo. 1 に示すように、表面部に多くのトルースタイト(黒色部)が見られ、内部にゆくにつれて減少

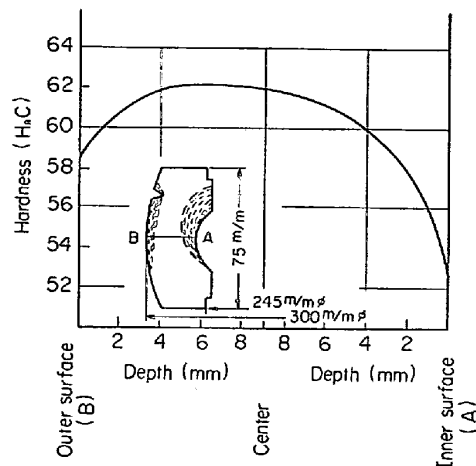


Fig. 1. An example of inverse quench-hardening observed in a bearing race (SUJ 2) quenched in oil.

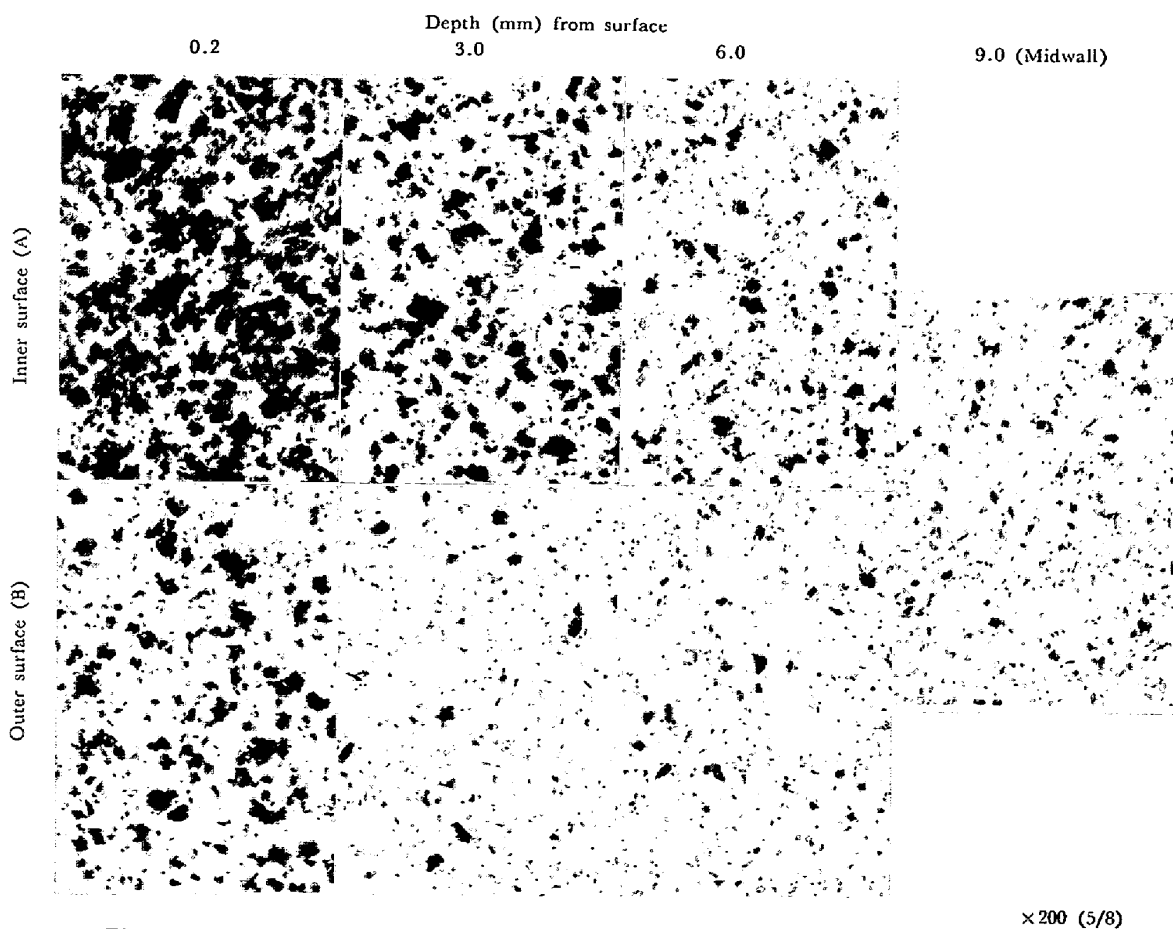
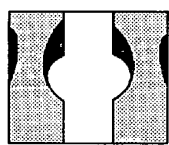
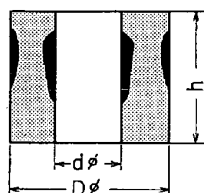


Photo. 1. Microstructural changes along the section A-B in the bearing race shown in Fig. 1. Etched in 5% nital.

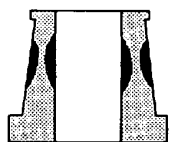
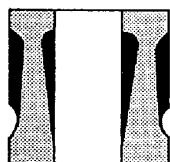


Photo. 2. Microstructure of inverse quench-hardened area in Fig. 1.

Bearing race



D: Outside diameter
d: Inside diameter
h: Width



Bearing roller

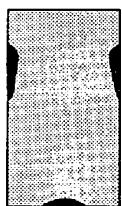
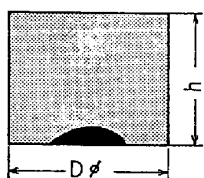


Fig. 2. Inverse quench-hardening in typical bearing races and rollers. (darkend areas are not fully hardened)

している。逆に、マルテンサイト(白色部)は表面部が少なく内部にゆくにつれて増加している。この黒色部を電子顕微鏡(レプリカ法)で観察すると、Photo. 2 に示すように、トルースタイトであることが確認された。

次に、焼入れ性を支配する化学成分 (C, Mn, Cr) について、発光分光分析によつて表面から内部への成分量

の変化を分析したが、異常は全く認められなかった。さらに、表面異常層⁷⁾としてみられる極く表面部での Mn, Cr の濃縮現象も EPMA で調べた結果認められなかった。

次に、逆硬化現象がどのような箇所に発生するかを、代表的な形状のベアリングレースおよびローラーについて示すと、Fig. 2 のようである。これらは焼入れに際して、焼入剤の中でこの図の上下方向そのままの姿勢で冷却された。この断面図で黒色部は硬度が低くなっている部分で、逆硬化している状態を示す。

この図から、逆硬化現象は油焼入れされる場合の鋼材の比較的上方部分に発生しやすく、また、円柱状のものは底部の中央あたりにも発生しやすいことがわかる。

これらの発生状況から、その原因は焼入の際の油の蒸気膜によるものと推定される。すなわち、液体の冷却過程は、一般にニュートンの冷却の法則に従うような単純なものではなく、およそ3つの段階(蒸気膜, 沸騰, 対流)¹⁰⁾によつて冷却される。逆硬化現象は、硬化のために急冷を必要とする温度範囲が蒸気膜により徐冷されるために起こると考えられる。

したがつて、蒸気膜段階の種々異なる油を使い、また蒸気膜段階と同じような作用をさせるため、焼入れの初期段階で種々な時間空冷を行なった後、種々な冷却剤にて急冷し逆硬化現象の発生状況を調べることにした。

3. 実験方法

供試材は球状化焼なましをした種々の大きさの SUJ 2 棒材を使用した。その主要化学成分を Table 1 に示す。なお、いずれの試片も P, S は 0.025% 以下であった。

焼入れは Fig. 3 に示す方法で行なった。すなわち、脱炭を防止するために木炭中でオーステナイト化 (各種サイズの試片の中心部の温度が 840°C に達してから 20 min 間その温度に保持する) 後、直ちに各種冷却剤に焼入れするか (Process I), または、しばらくの間空冷した

Table 1. Chemical compositions of specimens.
(wt %)

Element	C	Si	Mn	Cr
Specimens				
10 mm ϕ × 40 mm	1.01	0.24	0.41	1.46
15 mm ϕ × 40 mm	0.97	0.25	0.42	1.46
18 mm ϕ × 40 mm	0.98	0.26	0.40	1.41
20 mm ϕ × 40, 60 mm	1.02	0.24	0.36	1.36
25 mm ϕ × 50 mm	0.95	0.27	0.37	1.37
30 mm ϕ × 60 mm	0.96	0.27	0.38	1.35
36 mm ϕ × 80 mm	0.97	0.26	0.40	1.39

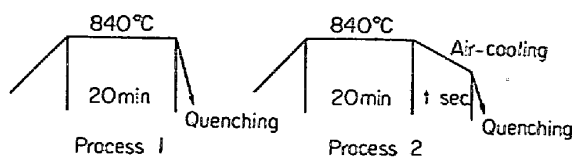


Fig. 3 . Programms of heat treatment.

Table 2. Nature of quenching oil.

	High speed quenching oil	#70 oil	Spindle oil
Viscosity (Red wood 50°C Sec)	71.0	72.5	33.3
Flash point (°C)	190	192	126
Amount of Residual carbom (wt %)	0.25	0.03	Tr
Characteristic temperature (°C)	600	500	400

後各種冷却剤中に焼入れした (Process 2). 焼入れ冷却剤中では, 試片の長さの方向が垂直になるように保持した. 必要に応じて, 焼入れ時の試片の表面部および中心部の冷却曲線をとるため, 外径 1.6 mm ϕ の SUS 310 の保護シース熱電対を試片の表面部および中心部に接着して, ペン書きオシログラフ U125M 日本電子科学 (株) 製に記録させた.

冷却剤としては, 蒸気膜段階の長さの違う 3 種類の油 (迅速焼入れ油, 70オイル, スピンドル油) と 5% 食塩水を使用した. 使用した焼入れ油の冷却特性は, Fig. 4 に JIS-K2526 によって測定したそれぞれの冷却曲線を示す. また, 主な特性は Table 2 に示す.

焼入れ後の硬度分布をロックウェル C スケールで測定し, 金属顕微鏡で組織を観察し, また必要に応じて電子

顕微鏡 (レプリカ) によつて組織を確認した.

なお, 冷却剤の冷却性能を知るための冷却曲線の測定には阪大式⁷⁾を採用した. すなわち, 直径 10 mm ϕ で長さ 30 mm の銀棒の中央部の表面の冷却曲線をとつた. また, 銀棒の長さを変えた場合に, 冷却曲線がどのように変化するかも調査した.

4. 実験結果

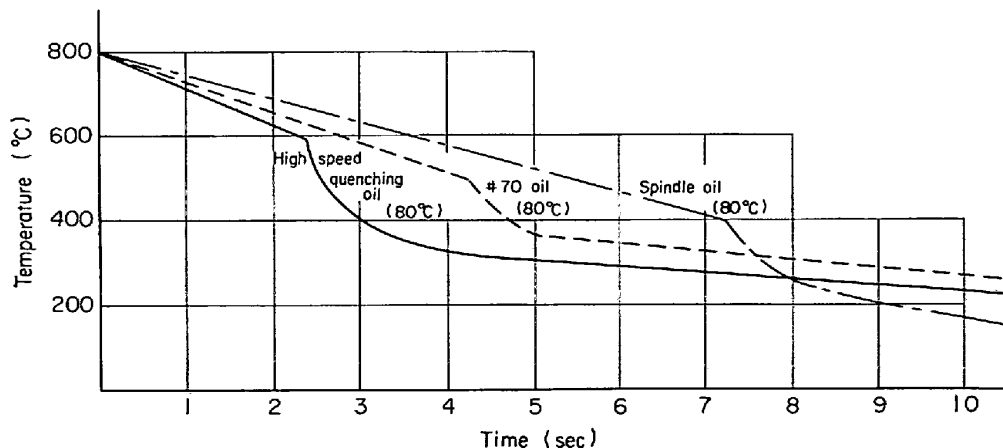
4.1 冷却剤の相違による硬化挙動の変化

試片は 18 mm ϕ $\times$ 40 mm を使用し, 焼入れは Fig. 3 に示す方法で行なった. すなわち, オーステナイト化後直ちに焼入れするか, またはしばらく空冷した後に焼入れした. 冷却剤は, いずれも静止状態で使用した. また, 5% 食塩水のみ 25°C でほかの冷却剤は 80°C で行なつた.

焼入れ後にそれぞれ試片の中央部を横に切断し, 表面より内部への硬度分布 (HrC で示す) を調べると Fig. 5 に示すようになる. 図中の硬化挙動を示した曲線上の $\bigcirc$ 内に示した数字は, オーステナイト化後からの空冷時間 (sec) を示したものである (すなわち, Fig. 3 で示した t に相当する). $\bigcirc$ 内に示した数字が 0 となつているものは, オーステナイト化後, 直に焼入れしたものである.

Fig. 5 に示す硬化挙動曲線からわかるように, 蒸気膜段階の長いスピンドル油に焼入れた場合は, 空冷期間の有無および長短にかかわらず, いずれの場合にも逆硬化現象が認められる. そのほかの冷却剤に焼入れした場合には, 空冷時間が 40 sec 程度までは逆硬化現象は認められないが, 50 sec をこえるといずれも逆硬化現象が認められる.

これらの様子を顕微鏡にて組織観察すると, 逆硬化現

Fig. 4. Cooling curves at surface of silver cylindrical specimen of 10 mm ϕ $\times$ 30 mm quenched from 800°C into several coolants (measured by method of JIS-K 2526).

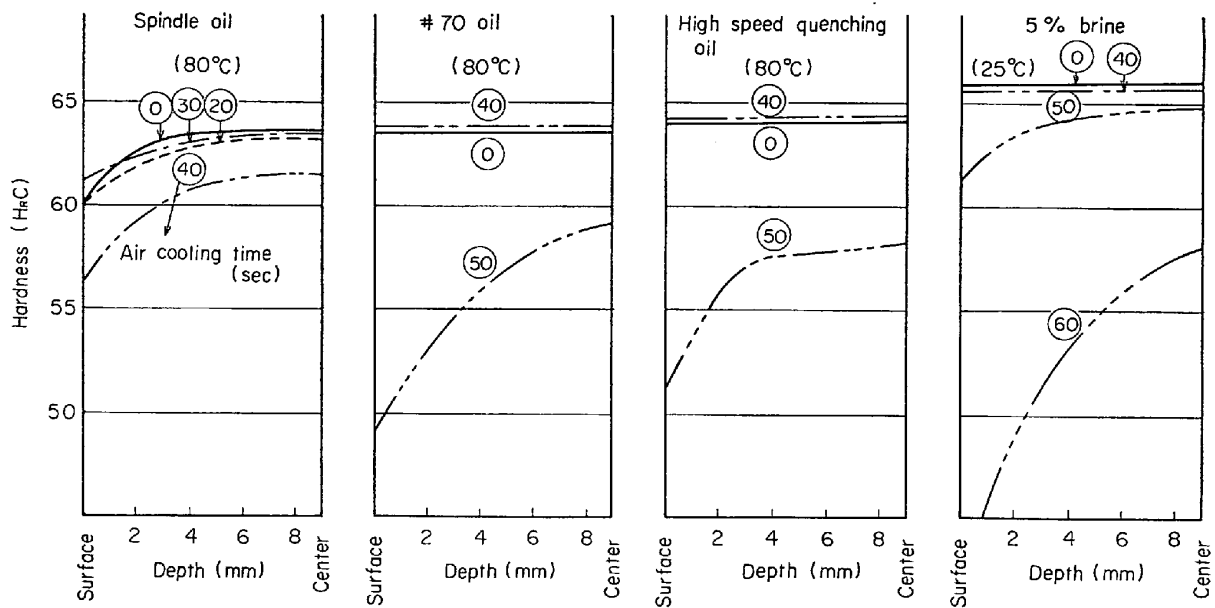


Fig. 5. Hardness distribution in 18mmφ specimens quenched into several coolants directly or after air-cooling for various periods from austenitizing temperature of 840°C.

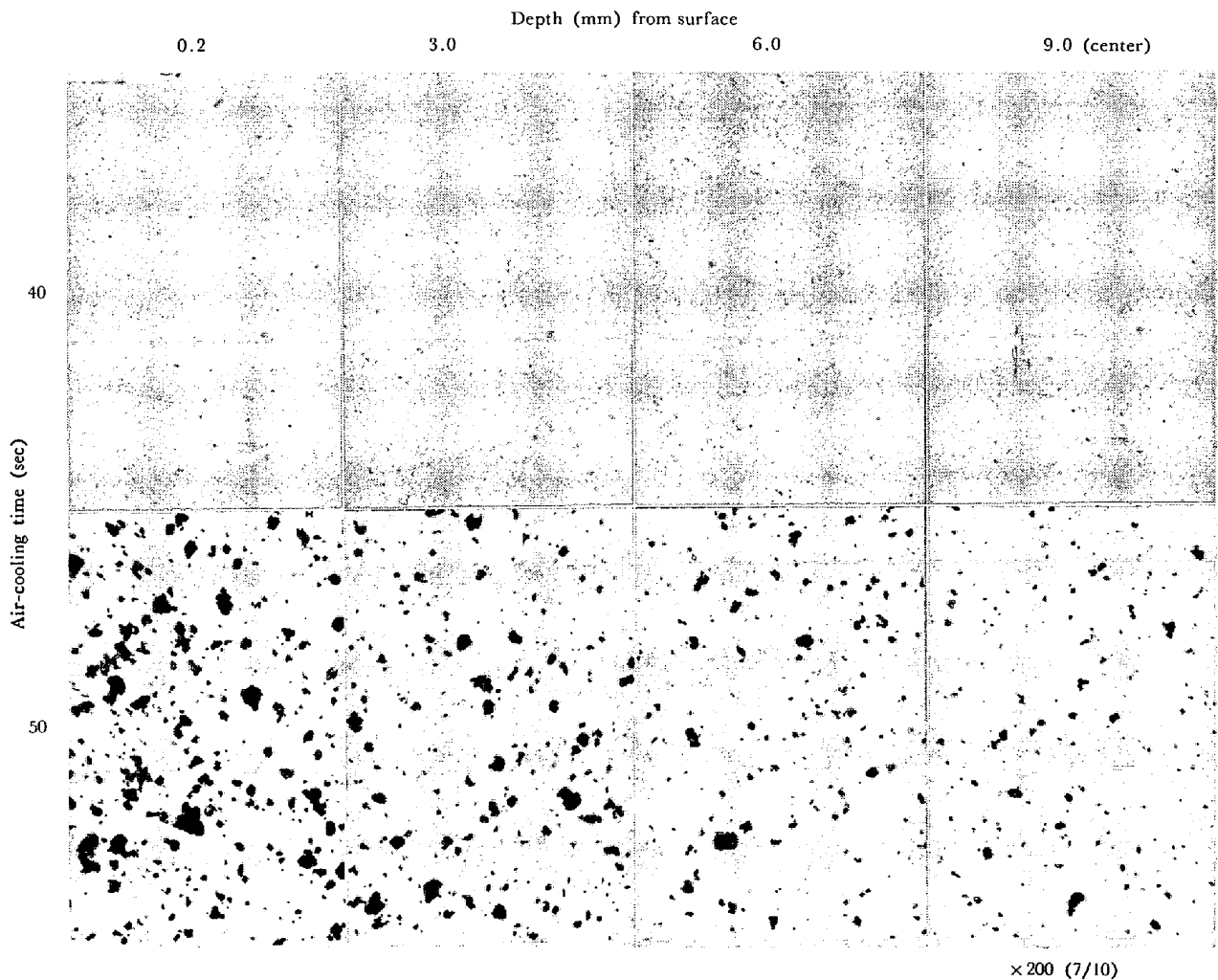


Photo. 3. Microstructural changes from surface to center in the specimens quenched into 5% brine after air-cooled for 40 and 50 seconds from austenitizing temperature of 840°C. Etched in 5% nital.

象の認められない場合 (冷却剤が 70 オイル, 迅速焼入れ油 5% 食塩水でオーステナイト化後の空冷時間がほぼ 40 sec 未満の場合) は, 表面部および内部ともにトルースタイトやベイナイトはほとんど認められず, 表面部も内部もともにマルテンサイト組織で硬さも一定している。しかし, 逆硬化現象の認められる場合は, 表面部にトルースタイトまたはベイナイトが認められ, 内部にゆくにつれてこれらが減少し, 逆に表面から内部にゆくに

つれマルテンサイトが増加している。この様子の一例を Photo. 3 に示す。

4.2 試片の大きささと硬化現象

試片の直径を種々変えて, オーステナイト化した後の空冷時間を種々変えて焼入れすると, どのような硬化挙動を示すかについて実験した。すなわち, 試片はそれぞれ, 10 mm ϕ $\times$ 40 mm, 15 mm ϕ $\times$ 40 mm, 20 mm ϕ $\times$ 40 mm, 25 mm ϕ $\times$ 50 mm, 30 mm ϕ $\times$ 60 mm, 36 mm ϕ $\times$ 80 mm を使用し (化学成分は Table 1 に示す), 焼入れのための冷却剤は 5% 食塩水を使用した。熱処理方法は, Fig. 3 の Process 2 に示す方法で行なった。試片の直径が大きくなるほど試片の長さを長くしたのは焼入れの際に試片の両端面からの冷却が, 試片の長さの中央部に影響を与えないようにするためである。

焼入れ後にそれぞれの試片の長さの中央部を横に切断して, 表面より内部への硬度分布 (HrC で測定) を調べると Fig. 6 に示すようになる。硬度分布曲線上の○内に示してある数字は, オーステナイト化後の空冷時間 (sec) を示すものである。

Fig. 6 に示すように, たとえば, 試片 15 mm ϕ についてみると, オーステナイト化後の空冷時間が 30 sec 位までは, 表面部も内部もほぼ同じ硬さの HrC 65.5 を示している。空冷時間が 40 sec になると表面の硬さは HrC 60 であるが, 内部にゆくにつれ硬さが上昇し中心部では HrC 65.5 になり, 逆硬化現象を示すようになる。そして, 空冷時間が 80 sec 位になると表面も内部も同じ硬さの HrC 24.5 を示す。このように, 各試片ともに空冷時間の短いときは, 表面部も内部もほぼ同じ硬さであるが, 空冷時間が長くなると表面部の硬さが低く内部にゆくにつれて高くなる逆硬化現象があらわれてくる。逆硬化現象を起し始める空冷時間は, 試片の直径が大きくなるにつれ長くなっている。また, 試片の直径が 25 mm ϕ , 30 mm ϕ になると表面よりある深さのところまでは逆硬化になつてはいるが, 中心部の近くになると硬さがほぼ一定値を示すようになる。

さらに, 直径が大きくなり 36 mm ϕ になると, 空冷時間が 80 sec 位までは表面の硬さが HrC 64 で中心の硬さが HrC 61 の正常硬化現象を示しているが, 空冷時間が 100 sec になると表面の A で示す点の硬さは HrC 47.5, 表面より深さ 8 mm の B で示す点の硬さは HrC 60, 中心部の C で示す点の硬さは HrC 56 を示す。すなわち, A 点から B 点までは逆硬化で, B 点から C 点までは正常硬化を示す硬度分布となつてはいる。また, 逆硬化と正常硬化の境界にあたる位置 (すなわち, 硬度分布で硬さのもつとも高い位置) は, 空冷時間が長くなるほ

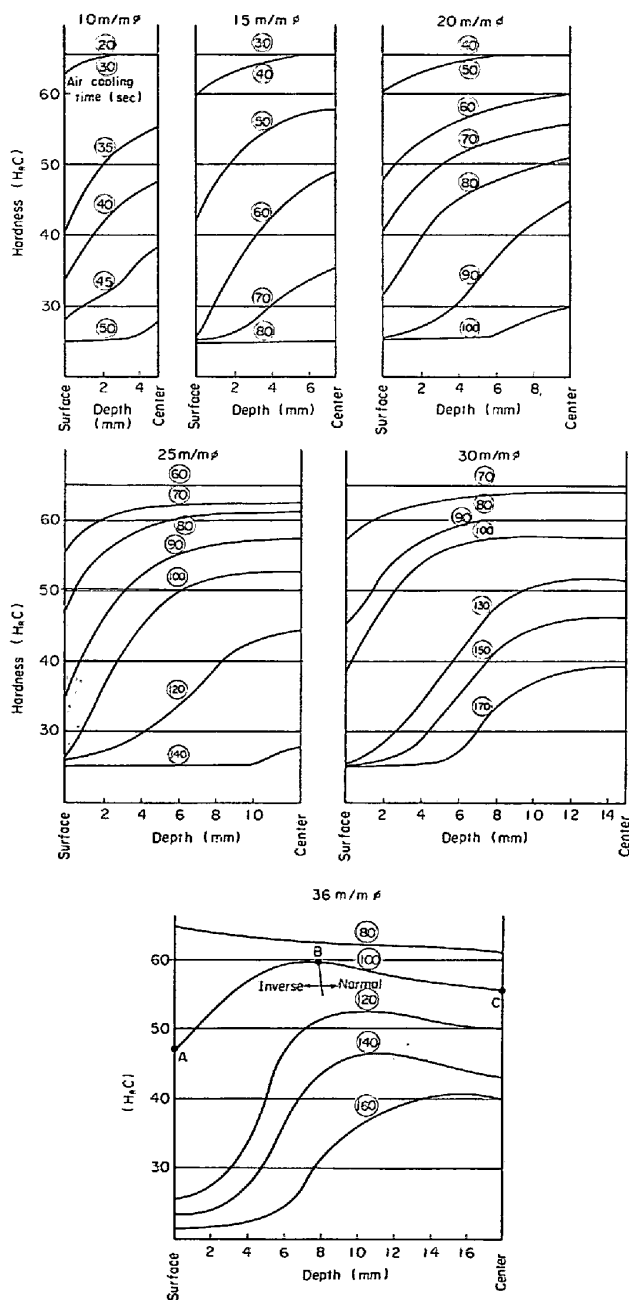


Fig. 6. Various patterns of hardness distribution in specimens of various diameters quenched into 5% brine after air cooling for various periods from austenitizing temperature of 840°C.

ど中心部に近づいている。

次に、これら逆硬化現象になった部分を顕微鏡で組織を観察すると、いずれの場合も表面部に多くのトルースタイトが認められ、内部にゆくにつれてトルースタイトは減少し逆にマルテンサイトが多くなっている、また、試片が 36 mm ϕ のときのように逆硬化と正常硬化を示す場合は、逆硬化と正常硬化の境界にあたるところが、トルースタイトの発生量がほかの箇所より少い。

4.3 測定位置と硬化現象

逆硬化現象の発生しやすい箇所は、Fig. 2 で示したように、焼入れの際の試片の上方部分であつた。そこで、試片の硬さの測定位置を変えた場合の硬度分布について調べた。すなわち、試片は 20 mm ϕ $\times$ 60 mm を使用し焼入れ冷却剤はスピンドル油と 70 オイル (いずれも油温 80°C で静止状態) を使用した。

熱処理条件は Fig. 3 の Process I に示すように、840°C で 20 min 間のオーステナイト化後、直ちに焼入れした。焼入冷却剤中では試片の長さの方向が垂直になるように保持した。焼入れ後、試片の下端からそれぞれ 15, 25, 35, 45 mm の箇所を横に切断して、それぞれ表面から内部への硬度分布を測定した結果、Fig. 7 に示すようになった。いずれの場合にも、下端からの測定位置が上方にゆくにつれて、硬さが低下している。スピンドル油に焼入れした場合は、いずれの箇所も逆硬化になっているが、70 オイルに焼入れした場合は、表面部にわずかな逆硬化が認められ内部では正常硬化になっている。これらの様子を金属顕微鏡および電子顕微鏡 (レプリカ) で組織観察すると、試片の下端より上方にゆくにつれて、

ベイナイトの発生量が多くなり、逆にマルテンサイトは少なくなつていた。

4.4 長さを変えた場合の銀棒による冷却曲線

前節の実験結果において、試片の下端から上方にゆくにつれて硬さが低下していることから、焼入れの際の冷却度が下端から上方にゆくにつれて遅くなっているものと推定されるため、銀棒を使ってこの様子を冷却曲線から調べた。

焼入れ冷却剤の冷却性能試験方法については、一般に JIS-K 2526 (阪大式)¹⁰⁾ によつて行なわれている。この

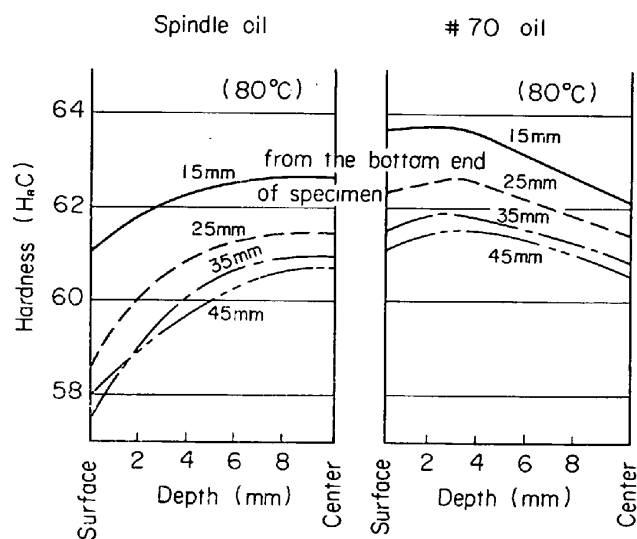


Fig. 7. Hardness distribution at various positions from the bottom end of specimen (20 mm ϕ $\times$ 60 mm) quenched from austenitizing temperature of 840°C.

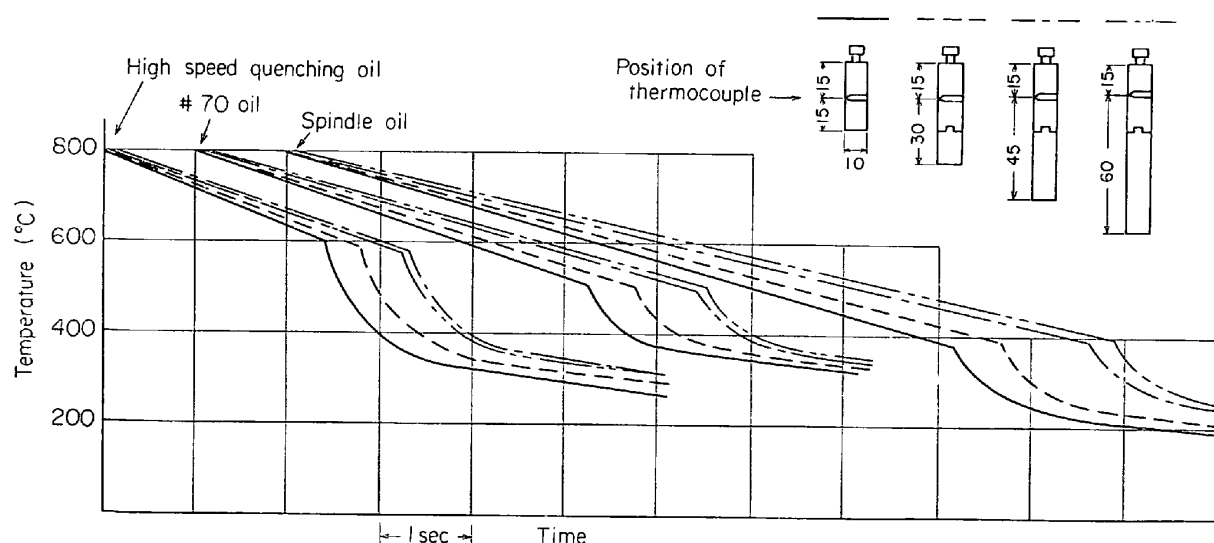


Fig. 8. Cooling curves at the surface of 10 mm ϕ silver cylindrical specimens at various distances from the bottom end quenched from 800°C into several coolants.

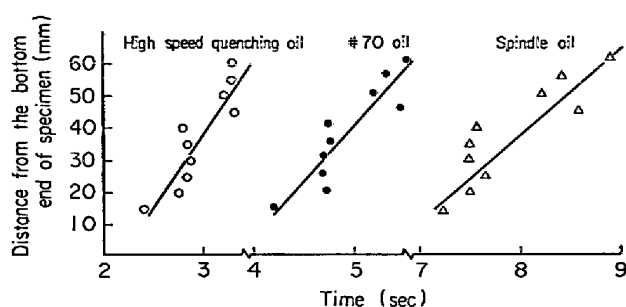


Fig. 9. Time holding vapor blanket during cooling process at various distances from the bottom end of 10 mm ϕ silver cylindrical specimens quenched from 800°C into several coolants.

銀棒の下端に同一直径でそれぞれ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 mm の長さの銀棒を継いで、種々な冷却剤の冷却曲線の変化を調べると、Fig. 8 および Fig. 9 に示す結果が得られた。下端に継いだ銀棒の長さが長くなるほど、いずれの冷却剤においても蒸気膜段階が長くなっている。沸騰段階および対流段階での冷却においては、この実験では顕著な差異は認められなかった。また上記のように銀棒を接続する方法でなく、同じ直径の種々長さの異なる銀棒で、熱電対の位置を種々変えて冷却曲線の変化を調べた結果も、Fig. 8 および Fig. 9 に示す場合と同じ結果を示した。

5. 考 察

5.1 逆硬化現象の発生原因

逆硬化現象の発生原因は、焼入れ時の冷却過程における初期のおそい冷却によるもので、特に油焼入れの場合は蒸気膜段階の長い油を使用した場合に発生しやすい。蒸気膜段階の短い油でも、焼入れの初期段階で空冷などのような蒸気膜段階と同じ作用をさせると逆硬化現象が起こる。このことは、Fig. 5 に示した実験結果から明らかである。また、食塩水のように蒸気膜段階のほとんどない場合でも、焼入れの初期段階で空冷すれば逆硬化現象が起こる。このことは Fig. 6 に示した実験結果から明らかである。

5.2 逆硬化現象の発生しやすい箇所

逆硬化現象の発生しやすい箇所の実例は、Fig. 2 に示したように焼入れ剤中での被焼入材の上方部分に発生しやすい。その理由は、上方部分の方が蒸気膜段階が長くなるからである。このことは、Fig. 8, 9 で示した実験結果から明らかである。また、Fig. 8, 9 に示した実験結果は冷却剤中で試片の下端から上方にゆくにつれて蒸気膜段階が長くなっている。このことは、田村^{10)~12)}らが冷却状況を高速カメラで撮影し、蒸気膜の消失が試片

の上方にゆくにつれて遅れていることを示した結果と一致している。

このように、試片の上部で蒸気膜段階が長くなる現象は、試片の上部の方は下部であたためられた油が上昇するため、上部の方が下部より脱熱が少なく、その分だけ上部の蒸気膜が安定になるためと考えられる。

一方、田村らは¹³⁾種々直径の異なる銀棒を用いて冷却曲線を測定した結果について報告している。これによると、直径が大きくなるにつれて、表面部の冷却では特性温度には変化がないが、蒸気膜段階が長くなっている。この報告と Fig. 8, 9 に示した結果から、試片の表面部の蒸気膜段階の冷却においては、見掛け上は円柱状の試片を冷却しても、実質的には円錐台状のものを直径の小さい方を下方向にして冷却したのと同じ結果であると考えられる。

したがって、焼入れにおいても試片の上方部分の方が下方部分より直径の大きい（または、肉厚の大きい）ものを焼入れしたものと考えた結果と同じになる。すなわち、試片の下方から上方にゆくにつれて冷却速度が遅くなり焼きがはいりにくくなる。このことは、Fig. 7 に示した実験結果からも明らかである。

5.3 逆硬化現象と CCT 曲線との関係

5.3.1 逆硬化現象のみの場合

逆硬化現象の起こる原因を CCT 曲線を使って考察する。たとえば、試片 18 mm ϕ × 40 mm の SUJ 2 の棒材を 840°C で 20 min のオーステナイト化後、直ちにスピンドル油に焼入れした場合と、50 sec 間空冷した後に

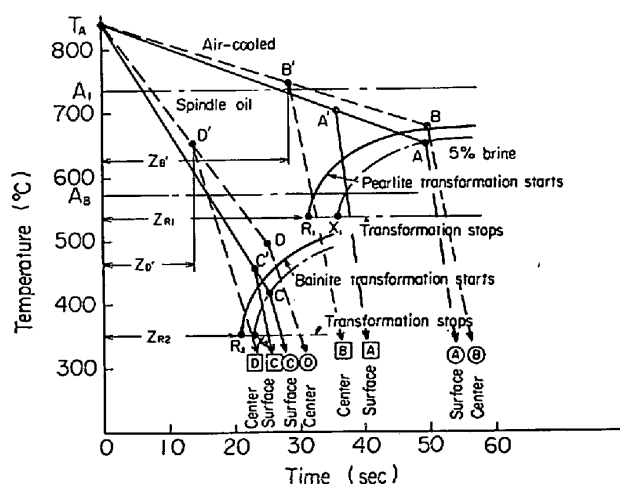


Fig. 10. Relation between CCT curve and cooling curves in the specimens (a) Immediately quenched into spindle oil from austenitizing temperature, and (b) Quenched into 5% brine after air-cooled for 50 sec from austenitizing temperature.

食塩水に焼入れした場合について考える。これらの結果は Fig. 5 に示すようにどちらも逆硬化現象を示す。

これらの焼入れしたときの試片の表面部と中心部の冷却曲線を 1.6 mm ϕ SUS 310 保護シース熱電対で測定すると、ほぼ Fig. 10 に示すような結果になる。すなわち、スピンドル油に焼入れした場合について説明するとオーステナイト化後 T_A から、最初蒸気膜段階の冷却で表面部は T_A から C まで中心部は T_A から D まで冷却され、続く沸騰段階で表面部は C $\rightarrow$ ㉔に中心部は D $\rightarrow$ ㉕にそれぞれ冷却される。

食塩水に焼入れした場合は、最初の空冷段階で表面部は T_A から A まで中心部は T_A から B までそれぞれ冷却され、続く食塩水中での冷却で表面部は A $\rightarrow$ ㉔に中心部は B $\rightarrow$ ㉕にそれぞれ冷却される。

また、Fig. 10 には今までに報告されている^{14)~16)}SUJ 2 材の CCT 曲線のほぼ平均の曲線を示した（ただし、考察を容易にするため図の時間軸は対数目盛でなく等間隔の目盛にした）。

いま、逆硬化現象が起こる原因を Fig. 10 に示す CCT 曲線を使って考察してみる。すなわち、いま、食塩水に焼入れした場合について考えてみると、表面部の冷却は $T_A \rightarrow A \rightarrow$ ㉔ で示す曲線で、中心部の冷却は $T_A \rightarrow B \rightarrow$ ㉕ で示す曲線となる。これらはいずれも T_A からの冷却途中 A 点および B 点でその後の冷却速度が急変している。このように冷却速度が冷却途中で変化すると、通常の CCT 曲線で示す変態挙動とは異なった変態挙動を示すため、通常の CCT 曲線をそのまま使用できない。この点については、著者らが前報¹⁷⁾において述べた冷却速度が冷却途中で変化しても通常の CCT 曲線から作図的に変態挙動を求める方法を用いて考察する。

すなわち、この方法を用いると、 $T_A \rightarrow A \rightarrow$ ㉔ および $T_A \rightarrow B \rightarrow$ ㉕ の冷却曲線によるパーライト変態において、通常の CCT 曲線で示す実質的な変態はそれぞれ $T_A \rightarrow A' \rightarrow$ ㉔ および $T_A \rightarrow B' \rightarrow$ ㉕ の冷却曲線で示す変態挙動をしたことになる。すなわち、表面部は T_A から A まで冷却されたとき、すでにいくらかのパーライト変態を起こしている。 T_A から A までに変態したパーライト量と同じ変態量の変態中止線上の点 X_1 から垂直線を引いて $T_A \rightarrow A$ 線と交った点を A' とする。 A' から A $\rightarrow$ ㉔ 線に平行線を引くと $A' \rightarrow$ ㉔ で示す線となる。また、中心部においては、 T_A から B まで冷却されたときパーライトの潜伏期をいくらか消費している。その潜伏期の消費量は $Z_{B'}/Z_{R_1}$ である。すなわち、 T_A からの臨界冷却速度で冷却したときのパーライト変態開始点を R_1 とし、 T_A から R_1 までの経過時間を Z_{R_1} とし、 T_A から B' ま

での経過時間を $Z_{B'}$ とする。潜伏期の消費において Z_{R_1} を 1 とすれば、 $Z_{B'}/Z_{R_1}$ は T_A から B まで冷却されたときの潜伏期の消費量に当たる（ T_A から B まで冷却されるとき潜伏期の消費は A_1 変態点を通してから開始され、その消費の仕方は等温変態開始曲線から計算で求められる。したがって B' 点は計算で求められるが、この方法については前報¹⁷⁾を参照されたい）。ここでは、A 点で少しパーライト変態を起こしている場合について考察したが、A 点で潜伏期の消費が B 点より多い場合も上述と同じ考察ができる。

次に、スピンドル油に焼入れした場合についてみるとこの場合も前述と同じように $T_A \rightarrow C \rightarrow$ ㉔ および $T_A \rightarrow D \rightarrow$ ㉕ の冷却曲線によるベイナイト変態において、通常の CCT 曲線で示す実質的な変態はそれぞれ $T_A \rightarrow C' \rightarrow$ ㉔ および $T_A \rightarrow D' \rightarrow$ ㉕ の冷却曲線で示す変態挙動をしたことになる。

連続冷却途中で冷却速度が急変した場合のベイナイト変態挙動も前述のパーライトの変態挙動と同じ考えをすれば説明がつく。ただし、ベイナイト変態の潜伏期の消費が開始されるのは、冷却途中の温度 A_B を通過してからであると推定される（このことの詳細は次報にゆずる）。

以上の説明からもわかるように、食塩水に焼入れた場合の試片の実際の冷却（見掛上の冷却）は、表面部は $T_A \rightarrow A \rightarrow$ ㉔ 曲線で中心部は $T_A \rightarrow B \rightarrow$ ㉕ 曲線で示され、CCT 曲線上で中心部の方が表面部より長時間側（右側）を通過している。しかし、CCT 曲線を用いた実質上の変態挙動は、表面部は $T_A \rightarrow A' \rightarrow$ ㉔ 曲線で中心部は

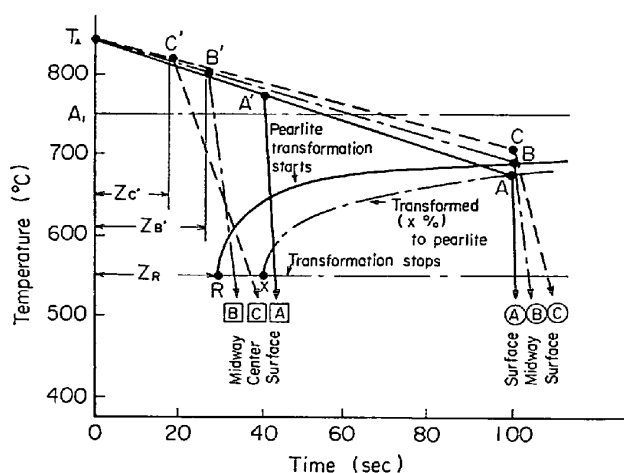


Fig. 11. Relation between CCT curve and cooling curves in the specimens quenched into 5% brine after air-cooled for 100 sec from austenitizing temperature.

$T_A \rightarrow B' \rightarrow \bar{B}$ 曲線で示され、CCT 曲線上で中心部の方が表面部より短時間側(左側)を通過している。したがって、中心部の硬さが表面部より高い逆硬化現象となることが理解できる。またスピンドル油に焼入れた場合も上述と全く同じように理解できる。

5.3.2 逆硬化現象と正常硬化現象が同時に起こる場合

試片 $36\text{ mm } \phi \times 80\text{ mm}$ の SUJ 2 の棒材を 840°C で 20 min のオーステナイト化後、100sec 間空冷してから食塩水に焼入した場合は Fig. 7 に示すように、中間部の硬さが最高値を示し、次に中心部で表面部が最低の硬さとなつてゐる。

この場合の現象を CCT 曲線を用いて考察すると、Fig. 11 で示すようになる。すなわち、試片の見掛上の冷却は、表面部は $T_A \rightarrow A \rightarrow \textcircled{A}$ 、中間部は $T_A \rightarrow B \rightarrow \textcircled{B}$ 、中心部は $T_A \rightarrow C \rightarrow \textcircled{C}$ で示す曲線である。しかし、CCT 曲線を用いて変態挙動を知る場合は、表面部は $T_A \rightarrow A' \rightarrow \textcircled{A'}$ 、中間部は $T_A \rightarrow B' \rightarrow \textcircled{B'}$ 、中心部は $T_A \rightarrow C' \rightarrow \textcircled{C'}$ で示す冷却曲線となる。したがって、CCT 曲線上では中間部が最も短時間側を通過しており、中心部が中間で表面部が最も長時間側を通過している。以上のことから、表面部から中間部まで逆硬化現象を示し中間部から中心部まで正常硬化現象を示すことが理解できる。

なお、 A' 点は T_A から A までに冷却されたときのパーライト変態量と同じ変態量の変態中止線上の垂直線にある。 B' 点は T_A から B まで冷却されたとき消費した潜伏期が $Z_{B'}/Z_R$ の関係の位置にある。 C' 点は T_A から C まで冷却されたとき消費した潜伏期が $Z_{C'}/Z_R$ の関係の位置にある。これらの A' 、 B' 、 C' の求め方については前報¹⁷⁾を参照されたい。

逆硬化現象は、表面の硬さが低下して耐摩耗性が低下するので、これを防止するよう努めねばならない。逆硬化現象の防止については種々の方法を考案しているが、たとえば、焼入冷却剤に超音波を与えながら焼入れすると、蒸気膜段階が短くなり逆硬化現象が起りにくくなる¹⁸⁾。

6. 結 論

逆硬化現象について研究した結果、次のことが明らかになった。

(1) この逆硬化現象は冷却途中で冷却速度が急に速くなるために起こり、特に、蒸気膜の長い、特性温度の低い油に焼入れた場合に起こりやすい。

(2) この逆硬化現象の発生しやすい箇所は、焼入れ剤中での試片の上方部分である。それは上方部分の蒸気膜段階が下方部分より長くなるためである。

(3) この逆硬化現象の起こるのは、焼入れのときの蒸気膜段階で、試片の中心部より表面部の方が潜伏期の消費量が多くなり、あるいは、表面部のみすでに少しパーライトまたはベイナイト変態を起こして沸騰段階の冷却に変わるためである。すなわち、CCT 曲線上において見掛上の表面部の冷却曲線は中心部より短時間側(左側)を通過するが、実質的にはこれと逆になる。

終りに、本研究を行なうにあたり研究に協力していただいた日本グリース(株)取締役技術部長岡田氏並びに副主任研究員福原氏に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) M. A. GROSSMAN, M. ASIMOW, and S. F. URBAN: Hardenability of Alloy Steels (1939), p. 12 [ASM]
- 2) M. A. GROSSMANN: Elements of Hardenability, (1952) [ASM]
Principles of Heat Treatment, (1955) [ASM]
- 3) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 5 版(1969), p. 105
- 4) 日本熱処理技術協会編: 表面熱処理(1970), p. 62 [日刊工業]
- 5) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 5 版 (1969), p. 96 [丸善]
- 6) 大和久: 金属熱処理技術便覧(1961), p. 145 [日刊工業]
- 7) 市原: 熱処理 7 (1967), p. 289, 熱処理 9 (1969), p. 184
- 8) 電気製鋼研究会編: 特殊鋼便覧(1969) 1 版 10 p. 17~25 [理工学社]
- 9) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 5 版(1969), p. 125 [丸善]
- 10) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, B15(1951), p. 538
- 11) 大同製鋼(株): 熱処理, 1 (1961) 6, 口絵
- 12) 藤原, 門脇, 竹内: 電気製鋼, 33 (1962) 3, p. 205
- 13) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, 20 (1956) 3, p. 124
- 14) Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Max Plank Inst. Eisenforsch, p. II-225E
- 15) 多賀谷, 田村, 赤松: 日本金属学会誌, 21 (1957) 3, p. 145
- 16) Metal Progress: Sept. (1966), p. 88
- 17) 清水, 田村: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2375
および鉄と鋼, 59 (1973) 11, S 665
- 18) 特許出願中, No. 48-70355