

論 說

鋼の階段焼入に関する研究

(第1報その2)

(日本鐵鋼協會第27回講演大會講演. 昭. 18. 4. 於東京)

菅 野 猛*

STUDY OF THE STEPPED QUENCHING OF STEEL (I)

Takesi Sugano

SYNOPSIS:—The simplest stepped quenching is constructed on the following way: water quenching—lifting in air or water quenching—lifting in air—second water quenching. In case where the simplest stepped quenching was on carbon steel samples of cylindrical form, the change of the internal temperature within the sample was obtained both from the calculation of heat conductivity and from the experiment, and the value of constants in the calculation was determined so to coincide in both ways. Since the calculation formulae and constants thus obtained was applied to the stepped quenching of specimens of different dimensions and the result coincident with the experimental value obtained, it was presumed that the thermal change within the steel shape might be worked out only by calculation without actual measurement when heavy sections was quenched in the stepped method.

Moreover, the change of structural and hardness distribution in the section of specimens was experimentally studied and the relationship between both distributions was obtained, where the time interval of each stage of the stepped quenching was varied diversely.

Finally, it was shown that special structural and hardness distributions occurred in the stepped quenching of the carbon steel specimen may be rationally explained from the isothermal (cooling) transformation curve.

目 次

- V 階段焼入せる試験片の硬度分布マクロ組織及び顯微鏡組織
 - 1. 徑 70mm 試験片に於ける結果
 - 2. 試験片の徑を 70mm より小又は大にした時の結果
- VI 階段焼入の機構
 - 1. 試験片の冷却状況と硬度分布との關係
 - 2. 炭素鋼の等溫 (冷却) 變態曲線
 - 3. 等溫 (冷却) 變態曲線に依る試験片の硬度分布, 組織分布の説明
- VII 總 括

V 階段焼入せる試験片の硬度分布 マクロ組織及び顯微鏡組織

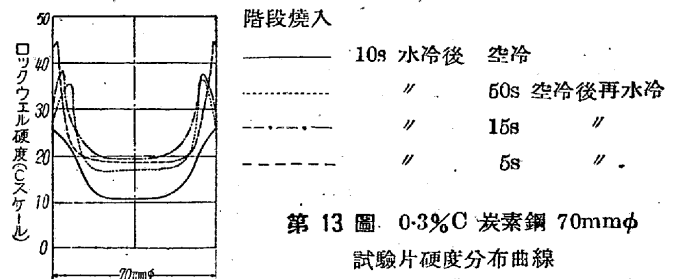
次に階段焼入せる試験片の硬度分布, マクロ組織及び顯微鏡組織等に就て説明する。

既に Burns 及び Brown⁹⁾ の論文にも報告されてゐる様に 階段焼入を行つた試験片は特別な硬度分布及び組織分布を呈する。その理由に關しては最後に説明を試みる豫定であるが、こゝには階段焼入の時間を色々變へると、硬度分布及び組織分布が如何に變るかに就て主として述べ、更に徑の異なる試験片でも、相似な冷却状態を持つ様に階段焼入を行ふと相似な硬度分布を與へる事を實驗結果に依つて説明しようと思ふ。

硬度はロックウェル硬度計の C-スケールを用ゐて測定したが、特に軟いものでは B-スケールも使用した。マクロエッチングの方法竝に顯微鏡寫眞に關しては、既に第 III 節に述べた通りであるからこゝでは省く。

1. 徑 70mm 試験片に於ける結果

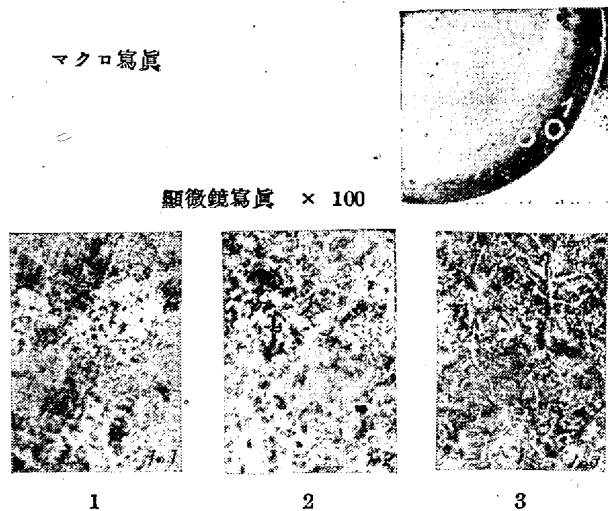
第 13 圖は第一段水冷を 10s とした時の徑 70mm, 0.3%C 炭素鋼試験片の斷面に於ける硬度分布を示してゐる。



一般に中心に對しては、對稱に極大が二つ現れてゐるのが見られる。これは Burns 及び Brown の實驗でも同様になつてゐる。極大の位置は空氣中取出の時間が長くなる程内部の方に移動して、5s 間空氣中取出の時に表面から 2mm 位の所にあつたものが、50s 間空氣中取出の場合には表面から 7~8mm の所に來てゐる。それと同時に極大の點の硬度値も、空氣中取出時間が長くなると共に下つて行く。何故にこれらの現象が起るかに就ては、最後の節で計算冷却曲線及び等溫變態曲線に依り説明する積りである。

* 住友金屬工業會社製鋼所

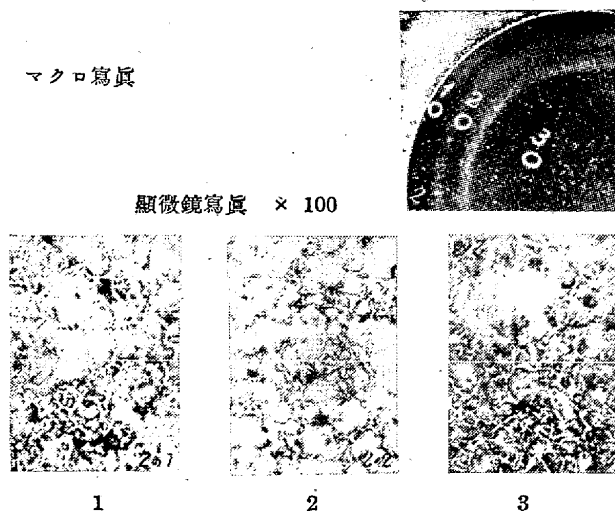
寫眞 1 から寫眞 4 迄に焼入温度 900°C 第一段水冷を 10s, 空氣中取出時間をそれぞれ 5s, 15s, 50s 及び常溫冷却迄全時間とした時の 0.3%C 炭素鋼徑 70mm 試験片斷面に於けるマクロ腐蝕寫眞及び顯微鏡寫眞 (100 倍) を示す。試験片中顯微鏡寫眞を撮つた位置は各々それぞれに相應するマクロ寫眞中に 1, 2, 3 で示してある。



寫眞 1 0.3%C, 70mm ϕ 10s 水冷 5s 空冷後水冷

先づ第一段水冷 10s—空氣中取出 5s に相應する寫眞を見るに、マクロ寫眞では餘り明瞭でないが、顯微鏡寫眞には可成よく出てゐる。一番外側の 1 の所は、ソルバイト狀を呈し、2 の硬度高き部分は腐蝕され難いマルテンサイトと、焼戻マルテンサイトの混合から成り、ついで 3 に至ればソルバイト、フェライト及び少量のマルテンサイトが共存してゐる。これらの組織分布は硬度分布曲線と同一の傾向を示すものと言へよう。

寫眞 2 は 10s 水冷—15s 空氣中取出—再水冷の場合であるがマクロ寫眞、顯微鏡寫眞何れも極めて明瞭に組織分布が現れてゐる。

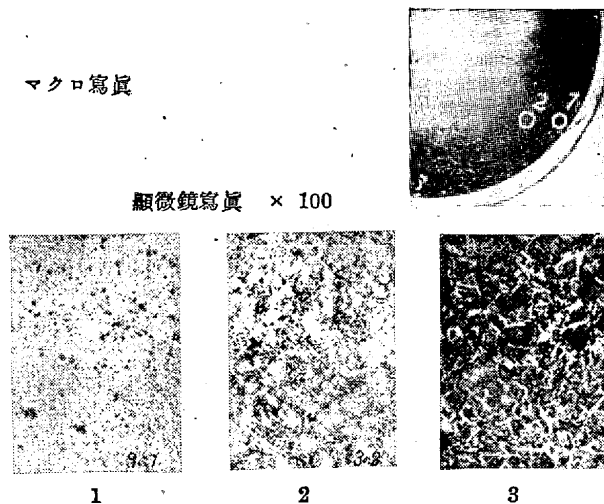


寫眞 2 0.3%C, 70mm ϕ 10s 水冷 15s 空冷後再水冷

マクロ寫眞で白い輪になつて見える部分は、顯微鏡寫眞の 2 にあたりフェライト、マルテンサイトの混合體で腐蝕され難く、且硬度も高い。この輪が試験片の中心に對して偏心的になつてゐるのは、焼入の際の冷却不均一性に基くものであらう。輪より外側の 1 の部分では、焼戻マルテンサイト、マルテンサイト、フェライトが共存して居り、輪より内側の 3 の部分では一次パーライト、

マルテンサイト、フェライトが共存して居り、何れも 2 の部分より硬度が低く、組織的に見て硬度分布曲線と一致して居る。

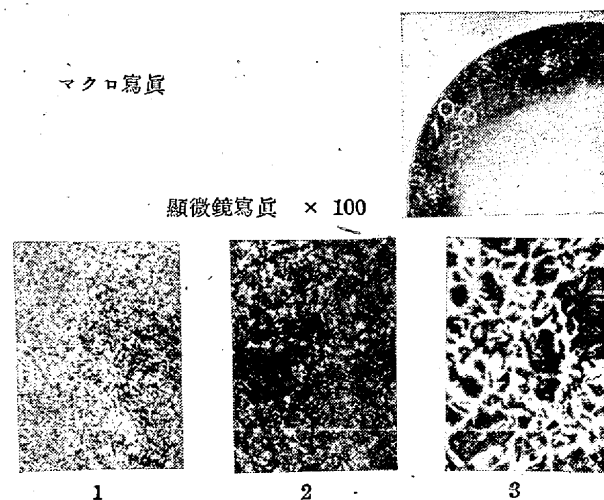
寫眞 3 は 10s 水冷—50s 空氣中取出—再水冷したもので、空氣中取出時間が長いと表面附近の焼入組織は殆ど焼戻されて、マクロ組織に於ても顯微鏡組織に於ても、前者の如く硬度極大の部分の組織の區別がはつきり出ない。



寫眞 3 0.3%C, 70mm ϕ 10s 水冷 50s 空冷後再水冷

即ち顯微鏡寫眞で見ると、最外側の 1 はソルバイト狀 (焼戻マルテンサイト) で、2 はソルバイト及びフェライトに幾分マルテンサイトが混つて居り、3 はフェライトと一次パーライトから出来てゐる。

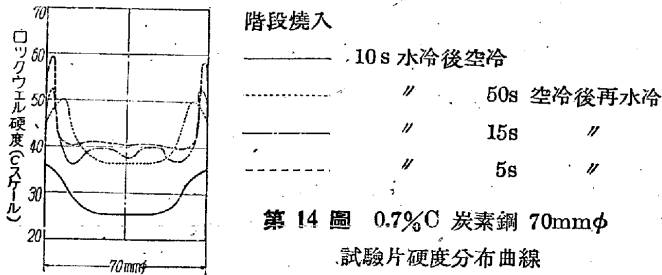
寫眞 4 は 10s 水冷—以後空氣中取出の場合で寫眞 3 に似てゐるが、この場合は硬度の極大は無く表面から中心へ近づくに従ひ、ソルバイト組織の粒が段々粗くなつて行き、中心では多量のフェライトと一次パーライトから成立つてゐる。



寫眞 4 0.3%C, 70mm ϕ 10s 水冷後空冷

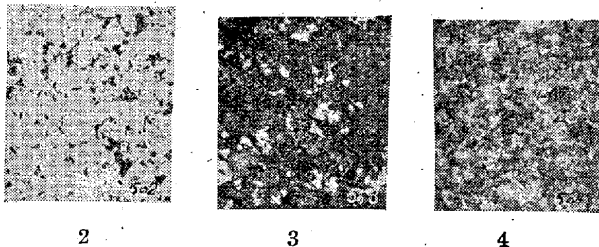
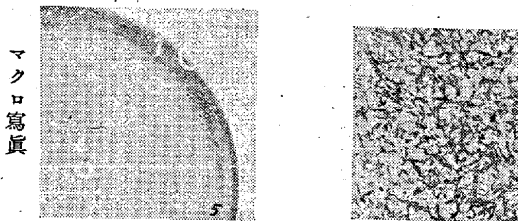
寫眞 1 から寫眞 4 迄を通觀して比較するに、中心部に於けるフェライトの量、並に粒子の大きさが後のもの程増え、且大きくなつて行く。これは空氣中取出時間の増加と共に、中心部冷却速度が減ずるためであらう。(前節及び前々節参照) 又硬度極大部分に於けるマルテンサイトの量も、空氣中取出時間が長くなるに従つて減少して行くのが見られるが、この現象は、硬度分布曲線に於ける極大の硬度値が、空氣中取出時間の増加と共に減じて行く事實と合致する。

第 14 圖は 0.7%C 炭素鋼に就て、第一段水冷を 10s とした時の径 70mm 試験片断面に於ける硬度分布曲線で、炭素含有量が 0.7% であると言ふ點以外は、第 13 圖と全く同様である。



従つて硬度分布も全體として、第 13 圖 (0.3% C) の場合より値が高くなつてゐるだけで傾向は殆ど等しい。即ち空氣中取出時間が長くなるに従つて、硬度の極大點は中心部の方へ移動し、且その値が低くなり、空氣中取出後再水冷しないものは、極大點が出来ない。試験片の中央部では、階段焼入の種類に拘らず (空氣中取出の儘の場合を除く) 略一定の硬度になつてゐるが、これは 0.3% C の時でも同様である。

寫眞 5 は 0.7% C の 70mm 試験片を 830°C より 10s 水冷—5s 空氣中取出—再水冷した時の断面に於けるマクロ組織及び顯微鏡組織で、上述の硬度分布曲線の内最高硬度の曲線に相應してゐる。



顯微鏡寫眞 × 100

寫眞 5 0.7% C, 70mmφ 10s 水冷 5s 空冷後再水冷

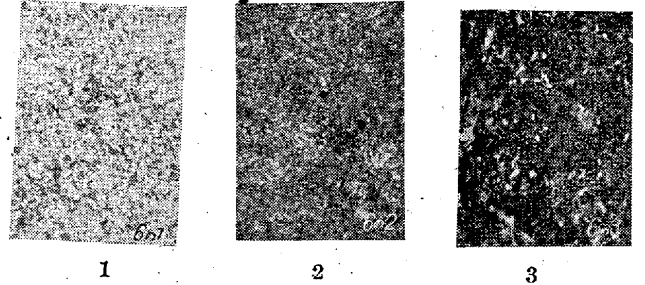
寫眞を見ると、硬度の分布と組織の分布が極めてよく一致してゐるのが判る。先づ最も表面に近い部分 1 はやゝ少量の腐蝕され難いマルテンサイトと、黒く腐蝕されてゐる針狀の焼戻マルテンサイトから成り、表面から一寸内へ入つた最高硬度の部分 2 は、大部分がマルテンサイトで、これに一次微細パーライト (ツルースタイト) が幾分混在して居る。更に内部へ入つて行くと、階段微細パーライトの量が増えてマルテンサイトの量が減つて行き、且パーライトの粒子が大きくなつて行く (3, 4 圖)。フェライトは何の部分にも殆ど見られない。マクロ組織顯微鏡組織共に組織分布の區別が 0.3% C の時より明瞭に出てゐる様である。

寫眞 6 は 0.7% C, 70mm 試験片を、830°C より 10s 水冷後空氣中取出した時の断面マクロ寫眞及び顯微鏡寫眞である。

硬度分布曲線に對應して内部に行く程粒子が粗くなつて居り、且内部では少量のフェライトが析出してゐるのが見られる。この

マクロ寫眞

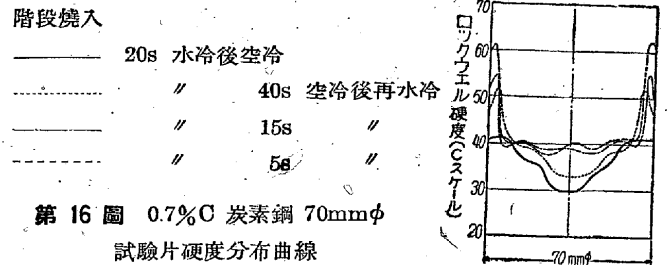
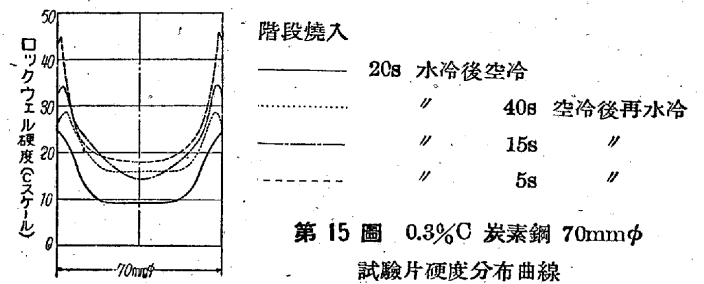
顯微鏡寫眞 × 100



寫眞 6 0.7% C, 70mmφ 10s 水冷後空冷

時はマルテンサイトは、断面の何の部分にも現れてゐない。

第 15 圖及び第 16 圖はそれぞれ 0.3% C 及び 0.7% C 炭素鋼の径 70mm 試験片につき、第一段水冷 20s なる階段焼入を行つた時の断面硬度分布圖である。



焼入前の加熱温度は、第一段水冷 10s の時と同様 0.3% C では 900°C, 0.7% C では 830°C とした。第一段水冷 20s—空氣中取出 5s—再水冷の場合に就て見るに 0.3% C の方は第一段水冷 10s—空氣中取出 5s—再水冷の時とさして變つてゐないが、0.7% C の方は前の場合に比して硬度の最高値が高くなつてゐる。第一段水冷後空氣中取出をし、再び水冷したものでは、0.3% C, 0.7% C 何れも表面から一寸内部へ入つた所に硬度の極大値が出来て居り、空氣中取出の儘のものでは、極大は出来てゐないが、これは第一段水冷 10s の場合と全く同様である。又硬度極大點は、空氣中取出の時間が長くなると共に、内側に移動して行くが、この點も前の場合と全く同様である。唯 0.3% C では第一段水冷 10s の時に比して、極大點に於ける硬度値と表面の硬度値との差が比較的小さい。換言すれば、硬度極大の山が前程鋭くない。これは更に第一段水冷 30s の場合を見ると一層判然として来る。

寫眞 7 は 0.3% C 径 70mm 試験片を、20s 水冷—5s 空氣中取出再水冷した時の、断面マクロ寫眞及び顯微鏡寫眞である。

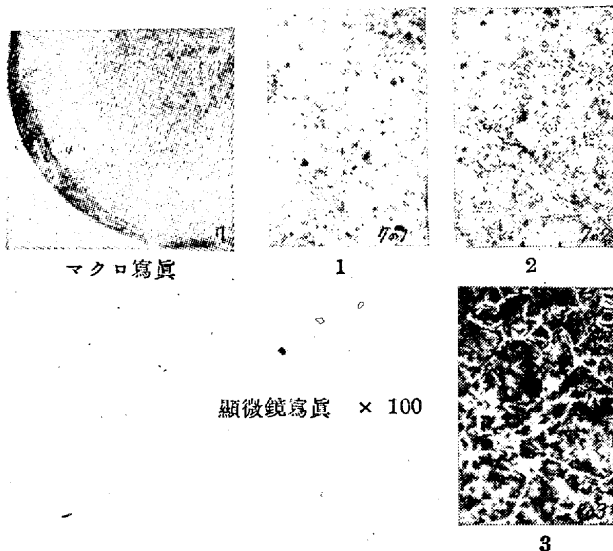


写真 7 0.3%C, 70mmφ 20s 水冷 5s 空冷後再水冷

第一段水冷 10s の時と全く同じ様に、表面では焼戻マルテンサイト、表面から少し内へ入った硬度最高の部分ではマルテンサイト、焼戻マルテンサイト、一次パーライトが共存し、更に内側へ入るとマルテンサイト、焼戻マルテンサイトは無くなって、一次パーライトの粒子が粗大になつて来ると共に、フェライトの網が現れてくる。

写真 8 は 0.7%C 径 70mm 試験片を、20s 水冷—40s 空气中取出—再水冷した場合の、断面マクロ写真及び顕微鏡写真で、表面附近は前と同じく、焼戻マルテンサイト、表面から少し内側へ入った部分では焼戻マルテンサイトにマルテンサイトが混合してゐるが、空气中取出時間が比較的長い為、焼戻マルテンサイトの量に比して焼戻されぬマルテンサイトの量が僅少である。硬度曲線で見ると、この時の硬度の極大値は、ロックウェル C52 位で、純粋のマルテンサイトが、60 以上あるのに對して、可成低くなつてゐるが、上記の顕微鏡組織とよく一致してゐる。

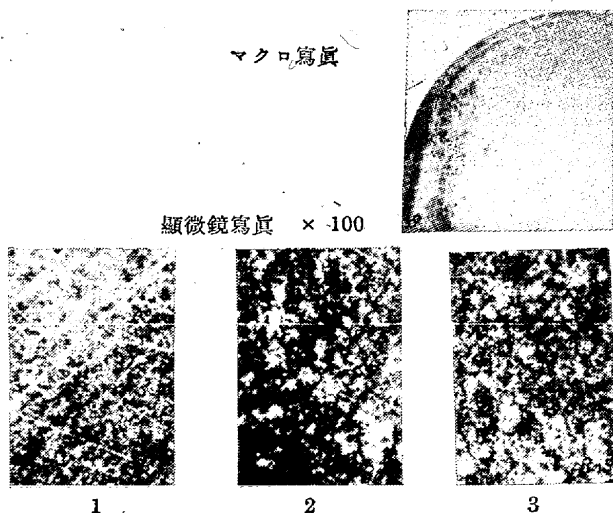
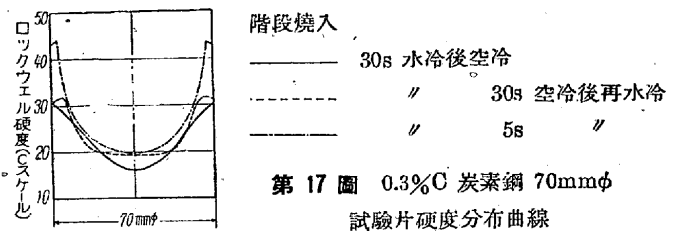
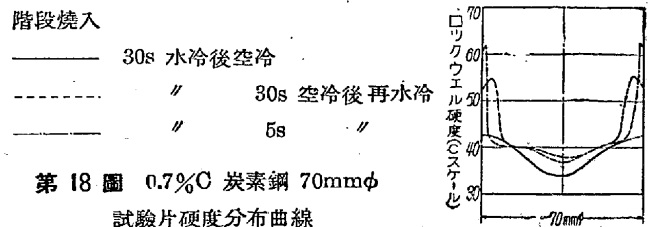


写真 8 0.7%C, 70mmφ 20s 水冷 40s 空冷後再水冷

尤もこれは今の場合だけに限らないが、顕微鏡組織は場所に依り、可成り不同があるので、ここに示した写真から直ちにマルテンサイト、焼戻マルテンサイト等の量を定量的に判定する事は出来ない。尙写真 7, 8 は何れも腐蝕の仕方が不適當だつたためか、マクロ写真では組織分布があまりはつきりしない。



第 17 圖 0.3%C 炭素鋼 70mmφ
試験片硬度分布曲線



第 18 圖 0.7%C 炭素鋼 70mmφ
試験片硬度分布曲線

第 17, 18 圖はそれぞれ 0.3%C 及び 0.7%C 炭素鋼の径 70mm 試験片に就き第一段水冷 30s なる階段焼入を行つた時の断面硬度分布図である。

空气中取出時間の増加に伴ふ硬度極大値の内側への移動とか、空气中取出後再水冷せぬもので、極大値が出ぬ等は第一段水冷が 10s 或は 20s の場合と全然同一であるが、特にこの場合で目立つのは、表面硬度値が極大値の硬度値に接近してゐる事で、換言すれば第一段水冷が 10s, 20s の時に比して硬度の山の頂上が鋭さを失つて居る事である。これは 0.3%C の方に顯著であるが、0.7%C の場合でも同様な傾向が見られる。0.3%C 試験片では既に第一段水冷 20s の場合にも、10s の時と比較して、僅かにこの傾向が看取されたが、第一段水冷 30s に至つて判然と見られる様になつた。

写真 9 は 0.7%C 径 70mm 試験片を、30s 水冷後、空气中取出したもの、断面マクロ写真及び顕微鏡写真であるが、第一段水冷を、10s, 20s とした時と全く同様であるから説明を省く。

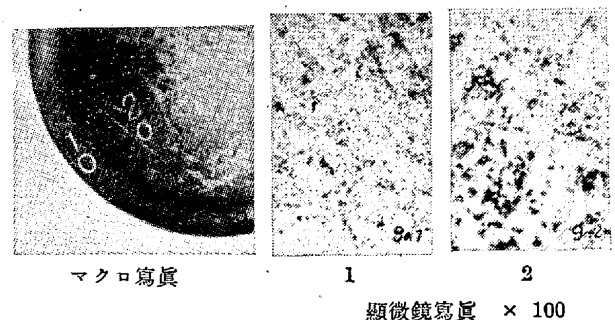


写真 9 0.7%C, 70mmφ 30s 水冷後空冷

さて以上に述べて來た事實から推測するに、第一段水冷—空气中取出—再水冷の如き操作を行ふ最も簡単な階段焼入の場合には、階段焼入各段階の時間と硬度分布との間に、次の様な關係が存在するものの如くである。

(1) 圓筒形試験片(炭素鋼)に就き、焼入温度より水冷—空气中取出—再水冷なる階段焼入を行ふと、一般に中心に對稱に表面近く硬度の極大値を生ずる。

(2) 焼入温度より水冷—空气中取出で常溫迄放冷したものでは極大値を生じない。

(3) 第一段水冷の時間は、或る程度長い方が極大値の硬度値が高くなるが、餘り長すぎると却つて極大値の硬度値が低下する。

(4) 空气中取出時間が長い程硬度の極大値は減少し、且極大値

が表面から中心部へ移動する。

(5) 第一段水冷の時間並に空気中取出時間が長い程、表面の硬度値と、極大點の硬度値が接近し、硬度曲線の極大が尖鋭さを失ふ、然してこの傾向は炭素含有量の低いものに著しい。

次に階段焼入と組織分布との間には、次の様な関係がある。

(1) 一般に階段焼入（第一段水冷-空気中取出-再水冷）した試験片の組織分布は、表面近くに於ては焼戻マルテンサイトが存在し、表面から少し内側へ入った硬度極大點附近では、マルテンサイト、焼戻マルテンサイト、一次パーライトが共存し、内部へ入るに従ひ、マルテンサイト並に焼戻マルテンサイトの量が減つて、一次パーライトの量が増し、且その粒子が粗大になつて行く。炭素含有量の少いものでは、表面から中心に近づくに従ひ、フェライトの量が増加する。

(2) 第一段水冷後空気中取出の儘のものでは、表面から中心に向つて進むに従ひ、漸次焼戻マルテンサイトから一次パーライトに移つて行くだけで、途中マルテンサイトの存在してゐる區域が無い。

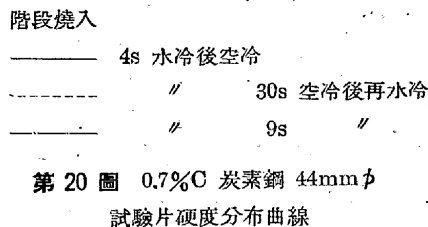
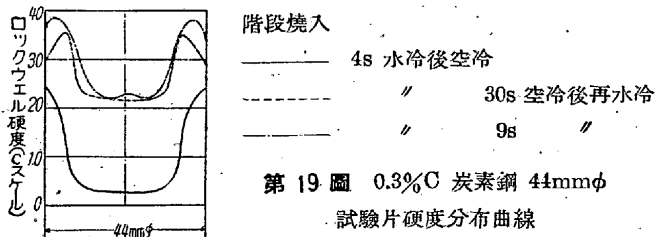
(3) 表面から少し内側へ入った部分に存在するマルテンサイトの量は、炭素含有量の多いものの方が多く（共析成分以下に於て）且空気中取出時間の少いもの程多い。

(4) 第一段水冷の時間と上述のマルテンサイトの量との関係は明瞭でないが、第一段水冷の時間が長い程、マルテンサイト存在區域が内部へ迄擴大移動する。

2. 試験片の徑を 70mm より小又は大にした時の結果

次に試験片の徑が 70mm 以外の場合に就て述べる。

第 19~22 圖迄は徑 44mm 試験片を階段焼入した時の硬度分布曲線である。各々に就て説明すれば、第 19 圖は 0.3%C 試験片に於て、第一段水冷を 4s とした場合であつて、これは前節で詳述した様に、徑 70mm 試験片に於ける第一段水冷 10s の場合に當る。第 20 圖も第 19 圖と全く同様で、唯試験片の鋼種が 0.3%C 炭素鋼から、0.7%C 炭素鋼に變つただけである。



今第 19 圖及び第 20 圖に示されてゐる、徑 44mm 試験片の階段焼入の種類を、各相應する徑 70mm 試験片の場合と對照して見るに、

徑 44mm

第一段水冷 4s 空気中取出 9s 再水冷
第一段水冷 4s 空気中取出 30s 再水冷

第一段水冷 4s -以後空気中取出

徑 70mm

第一段水冷 10s 空気中取出 15s 再水冷

第一段水冷 10s 空気中取出 50s 再水冷

第一段水冷 10s -以後空気中取出

の如くなる。従つて前節で考察した様に熱學的見地からすれば、上の如き階段焼入を行つた徑 44mm 及び 70mm の試験片は、それぞれ相似の硬度分布或は組織分布を與へる可き事が要求される。さて上の如き階段焼入に匹敵する、徑 70mm 試験片の硬度分布曲線は、第 13 圖 (0.3%C) 及び第 14 圖 (0.7%C) に示されてゐるので、それらと第 20~21 圖を比較検討して見るに (第 13~14 圖には徑 44mm 試験片の硬度分布曲線に相應するもの以外に、徑 44mm の場合にはやらなかつた、もつと空気中取出時間の短いものも含まれてゐるから注意を要する) 先づ概して兩者は相似の硬度分布を與へてゐると見てよい様である。特に階段焼入が、第一段水冷-空気中取出-再水冷の場合には、中心に對稱に表面近く、硬度の極大を生ずるが、第一段水冷-以後空気中取出の時には、硬度の極大を生じない事とか、空気中取出の時間が長い程、硬度の極大が内側へ移動する事等は、徑 70mm の時と全く同じである。唯表面及び極大點の硬度は、徑 70mm の時と必ずしも同一でなく、寧ろ幾分高目となつて居り、又極大の山は前者程尖鋭でない。就中徑 70mm の場合との著しい相違は、中心部の硬度値であつて、第一段水冷-空気中取出-再水冷の處理では、徑 44mm の方が徑 70mm より中心部で高い硬度値を與へてゐるのに對し、第一段水冷-以後空気中取出の處理では、その反對に徑 44mm の方が中心部の硬度値が下つてゐる。従つて第 19 圖或は第 20 圖に見られる如く、中心部の硬度曲線が上述の 2 種類の處理により非常に懸離れた値を示してゐる。かくの如き相似性からの多少のズレは、恐らく實驗上の困難から來るのであらうと考へられるが、中でも特に次の 2 點が主要原因をなして居るのであらうと推察される。即ち (1) 階段焼入の各段階の時間が極めて短いため、計算値通りに正確に焼入時間を定める事が不可能なこと、(2) 焼入時間に於ける表面状態の影響が、徑 70mm の時に比して徑 44mm の時には、遙に大きく利いて來ること等である。

第 21, 22 圖はそれぞれ 0.3%C, 0.7%C の徑 44mm 試験片に第一段水冷 8s なる階段焼入を行つた時の硬度分布曲線で、この圖に示してある硬度曲線に相應する階段焼入の種類を、徑 70mm の場合と比較對照して書くこととなる。

徑 44mm

第一段水冷 8s 空気中取出 9s 再水冷

第一段水冷 8s 空気中取出 25s 再水冷

第一段水冷 8s -以後空気中取出

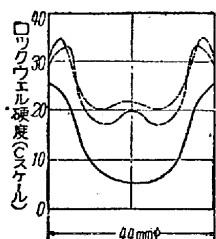
徑 70mm

第一段水冷 20s 空気中取出 15s 再水冷

第一段水冷 20s 空気中取出 40s 再水冷

第一段水冷 20s -以後空気中取出

徑 70mm 試験片で第一段水冷を 20s とした時の硬度分布曲線は、第 15 圖 (0.3%C) 第 16 圖 (0.7%C) に示してあるから、これらと第 21, 22 圖を比較して見るに、第一段水冷が、4s (徑 44mm) 及び 10s (徑 70mm) の場合と、全く同様な關係が成立つのが判る。硬度曲線の形は、互には相似形をしてゐるが、徑

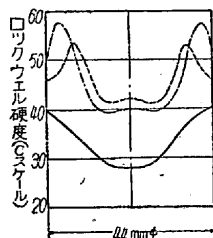


階段焼入

—— 8s 水冷後空冷
 ---- " 25s 空冷後再水冷
 " 9s "

第21圖 0.3%C 炭素鋼 44mmφ

試験片硬度分布曲線



階段焼入

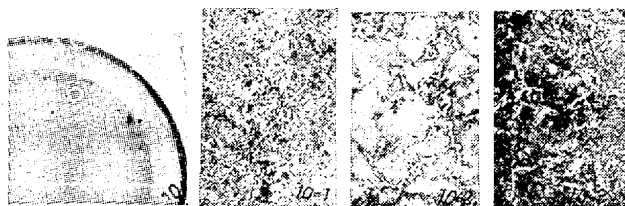
—— 8s 水冷後空冷
 ---- " 25s 空冷後再水冷
 " 9s "

第22圖 0.7%C 炭素鋼 44mmφ

試験片硬度分布曲線

44mm の方は径 70mm 程硬度の極大點が尖つて居ず、又極大點の硬度値は径 44mm の方が概して高い。

寫眞 10 は 0.3%C 径 44mm 試験片を、4s 水冷-9s 空氣中取出-再水冷した時の断面マクロ寫眞及び顯微鏡寫眞、寫眞 11 は、同材質同径の試験片を 10s 水冷-以後空氣中取出した時の断面マクロ寫眞及び顯微鏡寫眞で、何れも第 19 圖の硬度分布曲線を測定するために半割した試験片の他の半分に就き撮つた寫眞である。



マクロ寫眞

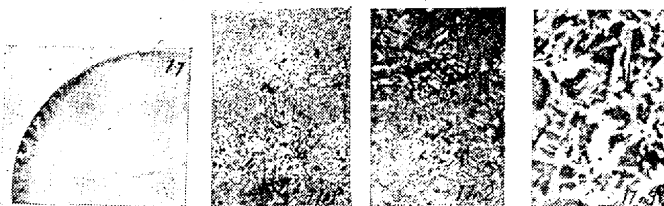
1

2

3

顯微鏡寫眞 × 100

寫眞 10 0.3%C, 44mmφ 4s 水冷-9s 空冷後再水冷



マクロ寫眞

1

2

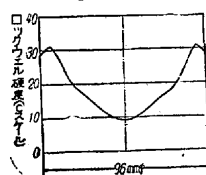
3

顯微鏡寫眞 × 100

寫眞 11 0.3%C, 44mmφ 4s 水冷後空冷

これ等の寫眞に匹敵する径 70mm 試験片の寫眞は、寫眞 2 及び寫眞 4 であつて、寫眞 10 が寫眞 2 に、寫眞 11 が寫眞 4 に相應するのであるが、それぞれ比較對照するに、マクロ寫眞に於ても顯微鏡寫眞に於ても、兩者が極めてよく一致してゐるのを發見するであらう。先づ寫眞 10 及び寫眞 2 のマクロ寫眞に就て見れば、何れもほぼ同心圓的に、表面から少し入つた部分に、腐蝕され難い白い縞が現れて居り、この部の顯微鏡寫眞は、フェライトを多少混へたマルテンサイトになつてゐる。この部分より外側の黒い所が、ツルースタイト+フェライト組織である事は、兩者全く同様である。次に第一段水冷-以後空氣中取出の方を見れば、寫眞 4 のマクロ寫眞も寫眞 11 のマクロ寫眞も等しく、外部が黒く内部が白い。そして顯微鏡寫眞の方は、兩方共表面附近がマルテ

サイト+焼戻マルテンサイト、それから少し入るとツルースタイト、中心の白い部分は、粗大なフェライト粒子+パーライトになつてゐる。以上は径 44mm の場合であつたが、次に径を 70mm より大きくした時の一例として、径 96mm の場合を述べる。實驗は 0.7%C の試験片 2 本、0.3%C の試験片 1 本に就て行つたが、0.7%C のものは、切斷の際焼戻されて、データが取れなかつたので、ここでは 0.3%C の径 96mm 試験片に就き、第一段水冷 60s-空氣中取出 45s-再水冷なる處理を施した時の硬度分布曲線 1 種類のみを説明する。第 23 圖に圖示したのがそれであつて、この階段焼入は径 70mm に於ける第一段水冷 30s-空氣中取出 30s-再水冷に匹敵する。(第 IV 節 5 參照) 後者の硬度分布曲線は第 17 圖中に破線で示してあるので、前の様にそれとこれと兩者比較して見る事にする。



階段焼入 60s 水冷後-

45s 空冷後再水冷

第23圖 0.3%C 炭素鋼 96mmφ 試験片

硬度分布曲線

硬度分布曲線の形狀は、概ね相似であり、径 96mm の場合も矢張り表面近く、極大を生じてゐるが、極大點の場所は相似の位置よりも幾分外側へ寄つて居り、極大の山は径 70mm の時より少し鋭く、且極大點に於ける硬度値は径 70mm の時に比して多少低い。又中心部の硬度は、径 70mm の時より径 96mm の時の方が可成低く極大、極小の硬度差が後者の方に著しく現れてゐる。階段焼入の時間を種々變へたら如何になるか、炭素量の異なるものでは如何と言ふ様な問題が、種々考へられるが、實驗データが一つしかないので明確な事は何れも斷言出来ない。唯以上述べて來た事からして、径の異なる試験片にそれぞれ相似な冷却状態を與へる如き階段焼入を行つた場合、硬度分布組織分布が互に如何なる關聯を持つかに就て大體次の様な事が言へると思ふ。

(1) 径の異なる試験片にそれぞれ相似な冷却状態を與へる様な階段焼入を行ふと、(第 IV 節 5 參照) 得られた硬度分布曲線も互にほぼ相似形をなす。

(2) 組織分布に就ても同様な事が言へ、相似な冷却状態を與へる様な階段焼入を行つた試験片では、相似な場所に等しい組織を得る。

(3) 但し径が小さくなる程、硬度曲線の極大は尖鋭度を失ひ、全體として硬度が高目に出る傾向がある。

(4) 径が小さくなると、硬度曲線の極大點が幾分内側へ寄る傾向がある。

(5) 径が大きくなると、極大、極小間の硬度差が多少開いてくる。

VI 階段焼入の機構

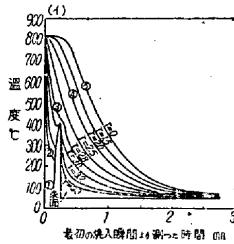
1. 試験片の冷却状況と硬度分布との關係

前節に於て階段焼入を行つた試験片では、如何なる組織分布、硬度分布が得られるかを實驗に基いて述べて來たが、次にこれらの組織分布、硬度分布を生ぜしめた機構に就き、試験片の冷却状況と關聯して考へて見ようと思ふ。

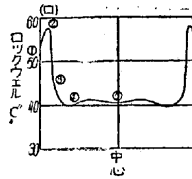
先づその前に數種の階段焼入を行つた試験片に就て、斷面の硬度分布と、斷面各點に於ける溫度變化とが如何なる關係に在るか

を見てみる事にする。

第 24 圖は 0.7% C, 徑 70mm 試験片を 10s 水冷-5s 空冷-再水冷した時の、内部各點の冷却曲線及び硬度分布を示してゐる。



内部温度變化狀況 (イ)



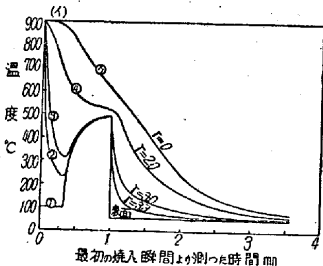
硬度分布 (ロ)

0.7% C 徑 70mm 10s 水冷後 5s 空冷後再水冷の場合

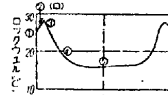
第 24 圖 試験片内部温度變化狀況と硬度分布との對照

試験片内各場所の冷却曲線と、それに相應する點の硬度とは、それぞれ 1, 2...等の番號で、兩曲線の上に印がしてある。圖(イ)に依れば、中心 ($r=0$) は一樣に温度が降つて居るが、表面は空氣中引出と同時に急速に温度が上昇し、再水冷に依つて再び水温迄下降して居る。表面と中心との間では $r=2.8\text{cm}$ の邊を境にしてそれより内側では、温度は下降の一途を辿つて居るが、それより外側では、表面と同様に温度が一旦上昇してゐる。これに對して圖(ロ)の硬度曲線は如何かと言ふに、硬度分布の極大は、丁度 2 と 3 の間にあつて、そこは冷却曲線で言へば、冷却の途中一時温度が上つてゐる場所に當る。

第 25 圖は 0.3% C, 徑 70mm 試験片を 20s 水冷-40s 空冷-再水冷した時の、試験片断面各點に於ける冷却曲線及び硬度分布曲線であるが、第 24 圖と全く同様な結果を示してゐる。



内部温度變化狀況 (イ)

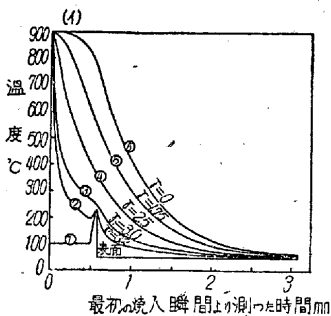


硬度分布 (ロ)

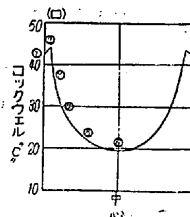
0.3% C 徑 70mm 20s 水冷後 40s 空冷後再水冷の場合

第 25 圖 試験片内部温度變化狀況と硬度分布との對照

即ち硬度の極大は試験片内の温度變化が一樣な冷却をしてゐる場所にはなくて、冷却の途中で一時温度が上昇してゐる様な場所に存在する。



内部温度變化狀況 (イ)



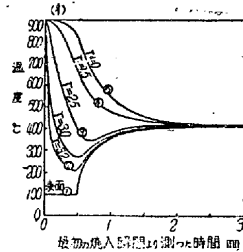
硬度分布 (ロ)

0.3% C 徑 70mm 30s 水冷後 5s 空冷後再水冷の場合

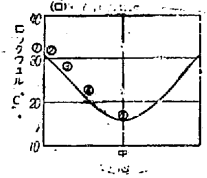
第 26 圖 試験片内部温度變化狀況と硬度分布との對照

第 26 圖は 0.3% C, 徑 70mm 試験片を 30s 水冷-5s 空冷-再水冷した場合であるが、硬度曲線と冷却曲線とを對照すれば、前の場合と全く同一結論に達する事が判るであらう。

次に第 27 圖は同じく 0.3% C, 徑 70mm 試験片を水焼入後 30s 間経つてから空氣中に引上げ放しにした場合で、前の三者と異り再水冷を行つて居ない。



内部温度變化狀況 (イ)



硬度分布 (ロ)

0.3% C 徑 70mm 30s 水冷後空冷の場合

第 27 圖 試験片と内部温度變化狀況と硬度分布との對照

從つて試験片各部の温度變化も前のものと異つてゐる。即ち圖(イ)で見る様に、中心 ($r=0$) は最初可成り急速に冷却するが、やがて試験片を空氣中に引上げた影響が現れて來て、冷却具合が緩慢になる。表面は水冷後直ちに蒸氣の温度迄急冷するが、空氣中へ引出されると共に内部の熱に依り加熱されて、温度が上昇し、長時間の後内部の冷却に伴つて再び徐々に冷却する。表面と中心の間では中心から表面へ近づくに従ひ、漸次始めの冷却が急に、後の冷却が緩になり、終に或る個所を過ぎると最初温度が下降し、後再び上昇して、表面の温度變化と同様な温度變化をする様になる。但し前の場合と異り再水冷を行つて居ないから、内外共に二度目の急冷が起る事はない。

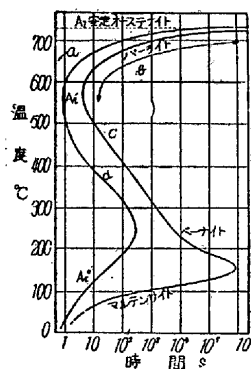
さてこの場合の硬度分布は、圖(ロ)に示してあるが、表面から中心へ行くに従ひ、硬度は減少して行つて、前三者に見る如き硬度の極大は何處にも生じてゐない。依つて以上の事實から推すに、階段焼入の際生ずる試験片断面の硬度の極大は、第一段水冷-空冷-再水冷の場合に限つて起り、(但し現在迄の實驗の範圍内では) 然も硬度の極大を生ぜしめるためには、試験片のその部分を一度焼入温度から急冷し、次に少し温度を上昇させ、後再び急冷する事が必要條件の如く想像される。第一段水冷の時間、空冷の時間等は、少し位變化させても、硬度の極大を生ぜしめ得るか否かと言ふ事には、餘り關係がない様である。

2. 炭素鋼の等温 (等速冷却) 變態曲線

上に述べた事實並に後述する組織の高倍率顯微鏡寫眞、その他から、階段焼入に依り生ずる特殊な硬度分布、組織分布は、これをオーステナイト→パーライト變態速度と變態温度との關係、即ち所謂等温變態曲線又は等速冷却變態曲線から説明され得るのであるが、その前に簡単に炭素鋼の等温 (等速冷却) 變態に就て述べようと思ふ。

既に衆知の如く、1931 年、E. S. Davenport 及び E. C. Bain がオーステナイト状態に在る鋼を、或る温度迄急速に冷却して、その温度に保持すると、一定時間の後過冷オーステナイトは變態を開始して、パーライトを析出し始めるが、全部の變態が終了する迄には、更に幾何か時間を要する事、又變態開始及び終了に要する時間は、保持温度に依り異なる事を發表した。而して變態開始

又は終了に要する時間と、保持温度との関係を片対数方眼紙に記した所、第28圖に示す様な曲線が得られた。これが所謂等温變態曲線或はその形からしてS曲線と言はれてゐるもので、その後多くの人に依り繰返し研究された結果、曲線の下方の部分に就ては未だ未解決な點もあるが、炭素鋼に關する限り、先づ第28圖の如き形を取るのに相違ない事が確められた。



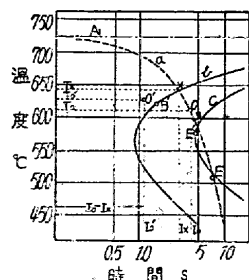
- a: 不安定オーステナイト
b: 粒子微細に且硬くなる
c: 等温變態終了曲線
d: 等温變態開始曲線

第28圖 共析鋼の等温變態曲線 (Bain)

第28圖は共析鋼に就て求められたものであつて、左側の曲線は、變態開始曲線、右側の曲線は變態終了曲線を表はす。この曲線の求め方に關しては、既に周知の事であるが、重ねて説明すれば、目的の温度に少しづつ時間を變へて保持された幾つかの試料の顯微鏡組織、等温に保つた時の膨脹計の讀みの變化、磁力計の振れの變化等から變態の開始・終了を各温度毎に求めて、これを圖上に連結する事により得られる。圖で見る如く500~600°Cの間では、變態の開始、終了が極めて短時間の内に起る。この所より上部の温度で生成する變態完了後の組織は、パーライト組織を示し、この所から下の温度で生成する組織は所謂、ベーナイト組織を示す。

この變態が迅速に開始、終了する場所を通常 Ar 點と言つてゐる。Ar 點から温度が下るに従ひ、變態の開始又は終了に要する時間が段々長くなり、200°C 附近でその時間が最大になる。この温度からもつと降ると、再び變態開始に要する時間が短くなつて行くが、その時の變態生成物は、パーナイトではなくマルテンサイト組織となる。

さてこの圖は上に述べた様に、試料を A₁ 點以上の温度から急速に任意の温度迄過冷させて、そこで保持した時の變態進行状況を示すものであつて、普通の焼入作業、焼鈍作業の如く連續的に冷却される様な場合に於ける變態の働作に就ては、何等語つてゐない。若しもこの圖から、連續的の冷却の際の變態開始或は終了が豫想出來たら、甚だ便利であるが、これに關しては未だ決定的な研究結果は現れてゐない。唯1941年、R. A. Grange 及び G. M. Kiefer⁶⁾ が、この事に關して一つの試案を提出した。それを



- a: 等速冷却曲線
b: 等温變態開始曲線
c: 等温變態終了曲線

第29圖 等温變態曲線から等速冷却曲線を求める作圖法 (Grange 及び Kiefer)

次に簡単に紹介する。

Grange 及び Kiefer に依り提案された方法と言ふのは、二つの假定を基にしてゐる。今その説明を解り易くするために、共析炭素鋼の等温變態曲線の一部を取出して(第29圖)これに就て述べる事にする。

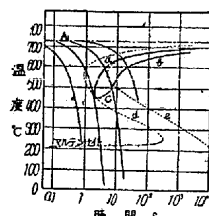
圖中太い實線は等温變態曲線、太い破線は A₁ 點からの等速冷却曲線を示す。等速冷却曲線が等温變態開始曲線と交はる點を X、X 點に相應する温度及び時間をそれぞれ T_x、I_x とし T_x より低い或る温度 T₀ に相應する曲線上の點を O、その時の時間を I₀ とする。さて二つの假定と言ふのは

(1) A₁ 點から等速冷却して、X 點(等温變態開始曲線との交點)迄來た時に於ける試料の變態進行状況は、試料を X 點と等しい温度 T_x 迄瞬間的に冷却させた時の變態進行状況とほぼ等しい。即ち實際上では、X 點に於ては未だ殆ど變態が起つてゐない。

(2) 等速冷却曲線が等温變態開始曲線と交つてから、尙引續いて同一速度で冷却させて行つた時の試験片の變態量、例へば X 點から O 點迄の間の變態量は、X 點に相應する温度 T_x と、O 點に相應する温度 T₀ との平均 T₀ の温度で、X から O 迄冷却させるに要した時間 (I₀-I_x) だけ等温變態させた時の變態量にほぼ等しい。第29圖で言へば、等速冷却曲線上 O 點に於ける變態量は、T₀ の温度で等温變態させた時の O' 點に於ける變態量に等しい。

上の第二の假定に於て、O' 點が丁度等温變態曲線上に來たとすれば、それに相應する等速冷却曲線上の點 O は、等速冷却に於ける變態開始點を意味する譯で、今の場合 B' 及び B 點がこれに當る。同様にして變態終了點は、E' 及び E で表はされる。以上の如くして等温變態曲線上の各點はそれぞれ 1:1 の對應で等速冷却曲線上に移される譯である。

從つて上の二つの假定を認めるならば、等温變態曲線から等速冷却變態曲線を求める事が可能になる。この假定に就ては、色々議論もあらうが、實際上は大體差支へ無い様である。現に Grange 及び Kiefer は Ni-Cr-Mo 鋼に就て顯微鏡試験、硬度試験等の方法に依り、種々の冷却速度で A₁ 點の上から試料を等速冷却させた時の變態開始温度、及び變態終了温度を實驗的に求めて、それから等速冷却變態曲線を作り、これと同じ鋼の等温變態曲線から、誘導作圖に依り求めた等速冷却變態曲線とを比較した結果、兩者がよく一致した事を發表してゐる。第30圖はこの方法で求めた共析鋼の等速冷却變態曲線を、等温變態曲線と同一圖上に表はしたものである。



- a: 冷却變態開始曲線
b: 冷却變態終了曲線
c: 等温變態終了曲線
d: 等温變態開始曲線

第30圖 共析鋼の等温變態曲線圖及び夫から誘導した等速冷却變態曲線圖

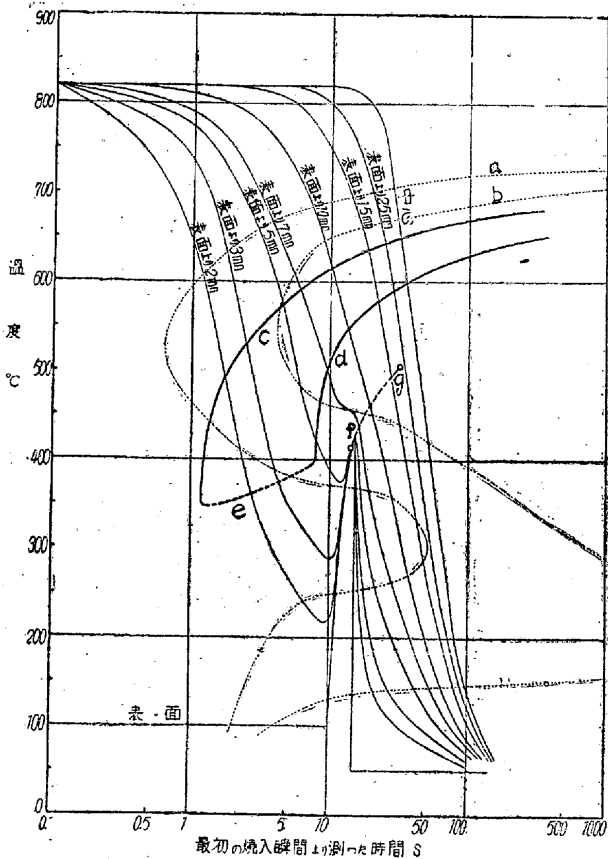
さて我々の場合は、等速冷却ではないが、Grange 及び Kiefer の方法を、もつと擴張して冷却速度が變化しつゝある様な場合にも當嵌ると考へ、試験片の各部に於ける温度變化曲線に、この方法を適用して、各々の場所で如何に變態が進行し完了するかを見る事にした。

尤も上述の事は、凡てオーステナイト→パーライト變態(又はパーナイト變態)に關してのみ成立つ事であつて、マルテンサイ

ト変態は、冷却速度に依り殆ど影響されない事が實驗的に分つて居るから、マルテンサイト変態に就ては、等温変態での結果が、その儘冷却変態にも應用出来る譯である。

3. 等温(冷却)変態曲線に依る試験片の硬度分布、組織分布の説明

第 31 圖は 0.7%C、徑 70mm 試験片を 830°C から第一段水冷 10s-空氣中取出 5s-以後再水冷した時の内部各點に於ける温度變化曲線と、この鋼の等温變態曲線並に冷却變態曲線等とを一つの圖面に重ねて書いたもので、圖中細い實線は、試験片の中心から表面迄の間 9 個所に於ける温度變化を示し、細い點線 a, b は等温變態曲線を表してゐる。



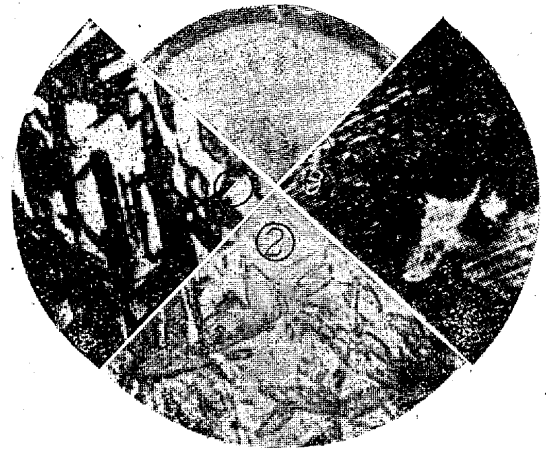
- a: 等温變態開始曲線
b: 等温變態終了曲線
c: 冷却變態開始曲線
d: 冷却變態終了曲線
e: 冷却變態停止線

10s 水冷後 5s 空氣中取出再水冷

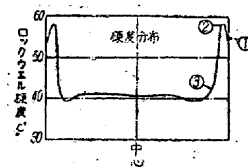
第 31 圖 等温變態(冷却變態)曲線による階段焼入機構の説明 0.7%C 炭素鋼 徑 70mm 試験片

但し炭素鋼の等温變態曲線は、炭素量の變化に依つてその形の上に著しい變化を受けないので、實際は 0.7%C の鋼であるが簡單のため、共析鋼の等温變態曲線を使用した。これでも傾向を見るだけならば十分用が足りる。次にこの温度變化曲線と等温變態曲線とに前述の Grange 及び Kiefer の方法を適用して、これからこの圖の如き温度變化を行つた場合に於ける冷却變態曲線を求めた。圖中太い實線並に破線 c, d, e を以つて示してあるのがそれである。c は變態開始線であり、d は變態終了線である。兩者の實線を結ぶ太い破線 e は、變態停止線とも稱す可きものであつて、この線はそこ迄冷却して來ると變態の進行が停止する事を示してゐる。

第 32 圖は第 31 圖に使用した試験片の、横斷面に於けるマクロ組織、高倍率顯微鏡組織、硬度分布曲線等を判り易く 1 枚の圖に整頓したもので、それぞれ組織分布及び硬度分布の對應する箇所は同じ番號の印がしてある。



マクロ組織並に顯微鏡組織



第 32 圖 0.7%C 炭素鋼を階段焼入せる時のマクロ組織、顯微鏡組織と硬度分布との關係 徑 70mm

830°C (焼入温度) 10s 水冷 5s 空氣中取出 再水冷

以下第 31 圖と第 32 圖を對照して説明を進める事にする。先づ第 32 圖でマクロ寫眞を見れば、一番外側の部分 1 は少し腐蝕されて、黒く出てゐるが、一寸内部へ入ると腐蝕され難い環狀の部分 2 に出會し、更に内側へ入ると再び腐蝕され易い部分 3 になる。硬度曲線では腐蝕され難い環狀の部分 2 が最高の硬度で、ロックウェル "C" の 60 位を示す。この三つの部分を 2000 倍の高倍率顯微鏡寫眞で見ると、一番外側の部分 2 は、黒い針狀の組織が現れて居り、これは焼戻されたマルテンサイト組織である。次の白い環狀の部分 2 は、腐蝕され難い針狀組織で、これは典型的マルテンサイト組織に外ならない。内部 3 の組織は普通のよく知られたパーライト組織なる事、寫眞で見られる通りである。これ等のマクロ組織又は高倍率顯微鏡から何が想像されるかと言ふに、0.7%C 徑 70mm 試験片へ、上記の如き階段焼入を施した際、一番外側 1 は一旦焼が入つてから再び焼戻され、少し内側へ入つた部分 2 は、焼の入つた状態の儘であり、中央部 3 は比較的緩冷されてあると言ふ事である。第一段水冷から再水冷に至る迄の間、外部から一度も熱を加へないのに、外部が焼戻されて内部に焼の入つた状態の儘が残つて居ると言ふ事は、冷却變態曲線及び等温變態曲線に依れば、この一見奇妙に見える結果が巧に説明される。

即ち第 31 圖に於て試験片の表面は焼入と同時に瞬間的に蒸氣の温度迄下り、この温度で 2s 足らず保たれる内に、等温變態開始曲線に出會つてマルテンサイトになる。所が焼入後 10s 経つと、試験片が空氣中へ引上げられるので、表面の温度は、内部の熱の

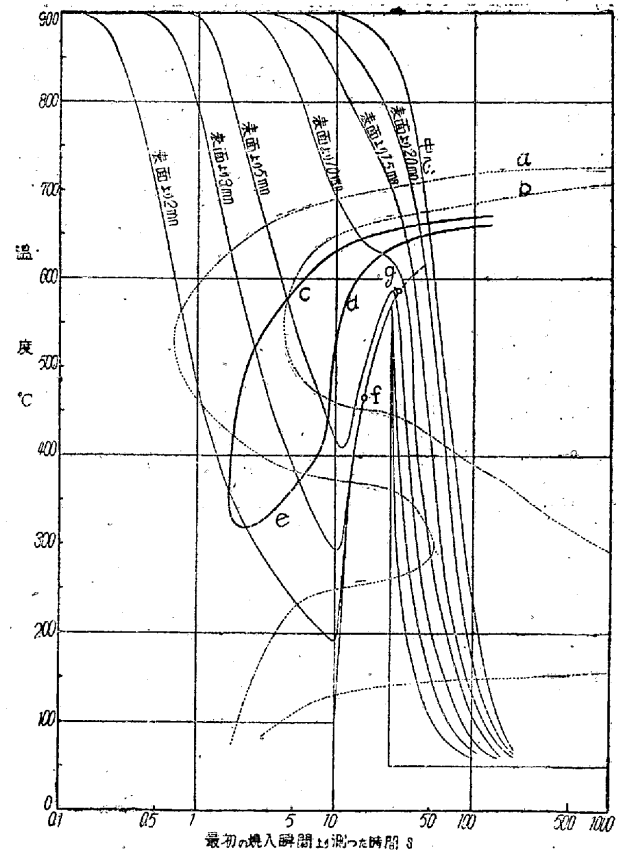
ため 420° 附近迄上昇する。従つて最初出来たマルテンサイトも焼戻されて焼戻マルテンサイトになり、第 32 圖の結果とよく一致する。表面から 2mm 位入った所でも、これとはほぼ同様で第一段水冷と共に可成り急速に温度が下つて行つて、冷却曲線が冷却變態開始曲線に交はる。従つて一部のオーステナイトは、パーライトに変態するが、やがて冷却曲線は、變態停止線を横切するために残余のオーステナイトは變態せずに、その儘冷却して行く。所が冷却曲線は、更に下方へ進んで行つて、遂に等溫變態開始曲線のマルテンサイト變態の部分に交はる。變態せずに冷却して来たオーステナイトは、ここで全部マルテンサイトになる。然るに表面の時と同様に、焼入後 10s 目に試験片が空氣中へ引上げられるので、一旦 200°C 位迄下つた温度も、再び上昇して行つて、 420°C 位になり、そこで再水冷のため再び急速に冷却する。この 420°C 位迄温度が上昇する時に、マルテンサイトが焼戻されて、焼戻マルテンサイトになるので、2mm 位の深さの所も階段焼入後の組織は表面とほぼ等しい。次に表面からもう少し入った所、例へば深さ 3mm 位の所は如何かと言へば、第一段水冷で冷却曲線が冷却變態開始曲線迄に變態停止線を横切り、そのためにオーステナイトの一部分がパーライトに変態するだけで、残りはその儘冷却して行く所迄は前の深さ 2mm 位の所と同様であるが、前と違つてこの場合は、冷却が最低 290° 位迄で終つて、それ以後は温度の上昇が起り、マルテンサイト變態を起す所迄温度が下らないので、變態停止線の所で残つたオーステナイトは、第一段水冷に於てマルテンサイトになる機會を失ふ事になる。さてこの過冷オーステナイトを、深さ 3mm の所の温度變化(上昇)曲線に沿つて温度を上げて行くと、等溫變態開始線のパーライト部分に行當るが、その際如何なる變態が起るであらうかを考へて見る。抑々前にも述べた様に、等溫變態曲線は過冷オーステナイトを等溫に保つた場合の變態狀況を示すものであつて、温度の動的變化が起りつゝある様な場合には、この曲線はその儘使へない(但しマルテンサイト變態の部分を除く)従つて今の場合過冷オーステナイトが温度の上昇と共に、實際如何なる温度で如何言ふ風に變態するか全然判らないが、假にこの様な場合にも Grange 及び Kiefer の方法が適用出来るとして、等溫變態開始及び終了線のパーライト部分と、今問題にしてゐる深さ 3mm の所の空氣中取出時に於ける温度上昇曲線とから、この温度上昇曲線上に變態の開始、終了點を求めて見る。かくして得られた變態開始點は、この温度上昇曲線に沿つて、約 430°C 位の所に来る。然るに圖から判る如く、この温度上昇曲線は 420°C 迄で止り、以後は再水冷の影響で急速に冷却するから、従つて過冷オーステナイトは、温度上昇經過中に變態開始に至らずして、再び冷却する事になる。かくして深さ 3mm 附近の組織は、初めに一部變態しただけで、残部は第一段水冷及び空氣中取出中には、依然としてオーステナイトの儘で推移する。次に再水冷に依つて、再び温度變化曲線は急速に下降し、等溫變態曲線のマルテンサイト變態の部分に交はる。この時初めて今迄變態を免れて残つて来たオーステナイト全部がマルテンサイトに變態する。即ち最後に得られた深さ 3mm 附近の組織は、大部分マルテンサイトで、極く一部にパーライトを含んだものとなり、第 32 圖のマクロ寫眞、顯微鏡寫眞、硬度曲線等とよく一致する。

最後に冷却速度のもつと遅い場所の例として、深さ 20mm 位の

所を取つて考へれば、ここでは時間的遅れのために第一段水冷後に於ける空氣中引上の影響も、表面近く程鋭敏に利いて來ず、温度の變化としては、一樣な冷却が起るのみで、第 31 圖から明かな様に、冷却曲線は冷却變態開始線及び終了線の何れにも交はるから、常溫迄冷却後に得られる組織はパーライト状であらうと想像される。第 32 圖の顯微鏡組織 3 は、その場所の組織であるが、確にパーライト組織であつて、第 31 圖の冷却曲線及び冷却變態曲線から豫想した結果と符合してゐる。以上の様にして第 32 圖に示した組織分布、硬度分布は、凡て第 31 圖から説明され、或は豫想される事が判明した。

更に今一つ、0.3%C 徑 70mm 試験片に就き、第一段水冷 10s - 空氣中取出 15s - 再水冷なる階段焼入を行つた場合の例に就て説明を加へよう。

第 33 圖はこの時の冷却曲線、等溫變態曲線及び冷却變態曲線を 1 枚の圖に収めたもので、各々記號その他に就ては全く第 31 圖と同様である。



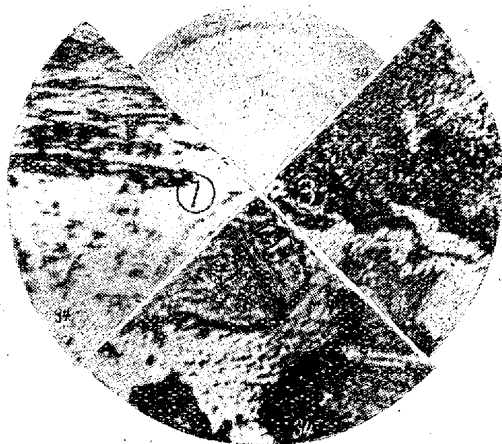
- a: 等溫變態開始曲線 d: 冷却變態終了曲線
b: 等溫變態終了曲線 e: 冷却變態停止線
c: 冷却變態開始曲線 f: 變態始 g: 變態終

10s 水冷後 15s 空冷後再水冷

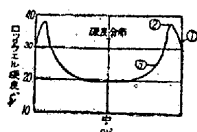
第 33 圖 等溫變態(冷却變態)曲線による階段焼入機構の説明
0.3%C 炭素鋼 徑 70mm 試験片

第 34 圖はこの試験片の硬度分布、組織分布で前の時の第 32 圖に匹敵する。

第 33 圖を見るに、前挙げた例と同じく表面及び表面から 2mm 位入った所では、冷却曲線が等溫變態曲線のマルテンサイト變態の部分に一旦交つた後、空氣中引上の影響で温度が上昇し始め、約 590° 位迄になり、後再水冷のため再び急激に冷却してゐる。従



マクロ組織並に顕微鏡組織



第 34 圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入せる時のマクロ組織顕微鏡組織と硬度分布との関係 径 70mm.

900°C(焼入温度) 10s 水焼入 15s 空气中取出 再水冷

つてオーステナイトはマルテンサイトに變態してから、再び 590°位に焼戻された結果になり、得られた組織は大部分、焼戻マルテンサイトから成立つてゐるであらうと考へられる。第 34 圖の倍率顕微鏡寫眞 1 を見れば、確に試験片の表面附近は焼戻マルテンサイトになつて居る事が判る。

次に表面から今少し深く入つた所に於ける温度變化の變態狀況も、前の例と全く同様で、第一段水冷に依り冷却曲線は冷却變態曲線に交はるが、間もなく變態停止線を通るため、オーステナイトは一部パーライト變態を起した後、残部は變態が停止して、その儘冷却して行く。然るに冷却曲線は前の例の様に、マルテンサイト變態線に交はる以前に、空气中引上の影響で温度が上昇し始める。従つて過冷オーステナイトは、マルテンサイトにならずに温度が上昇し始める譯である。然し温度上昇の途中で、變態開始點(前の場合と同様にして Kiefer 及び Grange の方法で求めたもの)を過ぎるので、不安定オーステナイトの一部は、ベーナイト狀組織に變態する。その後温度上昇曲線は、變態終了點に達する以前に最高温度に達して、再び急速に冷却し始め、マルテンサイト變態線に打突るから、残つたオーステナイトは、ここで全部マルテンサイトになる。即ち最後に得られた組織はパーライト(ベーナイト)+マルテンサイトである筈である。第 34 圖顯微鏡寫眞 2 及び硬度曲線はこれを裏書してゐる。

但しここで一つ注意を要する事があるが、それは今度の試料は、前の例と異り炭素含有量が 0.3% 程度で比較的低いためと、マルテンサイト變態線の右の極く端の方で變態が起つてゐるために、マルテンサイト組織に典型的な針狀組織が見られず、曖昧な形狀を呈して居る事である。例へば顯微鏡寫眞 2 に於ても、フェライト及びパーライト以外の腐蝕され難い部分は、マルテンサイトに違ひないが、形の上からは極めて不明瞭である。然し乍らこの寫眞の中央部を占める大粒子は、確に 1 個のオーステナイト粒子から出来たものに相違無く、その左半分は最初冷却曲線が、冷却變

態曲線と交はつた時に微細パーライトに變態したものであり、右半分は最後の急冷でマルテンサイトに變態したものである、と考へても大して無理でない様に思ふ。更に試験片の中心近くなれば、前の時と全く同様で、冷却曲線は冷却變態の開始線及び終了線を通り、得られた組織は、パーライト狀となる。第 34 圖の顯微鏡寫眞 3 が即ちこれである。

以上の如くして、階段焼入時に於ける鋼材内部各點での温度變化狀況、並に鋼材を作つて居る材質の等温變態(冷却變態)曲線が分れば、それからその鋼材の硬度分布或は組織分布が詳細に求められる事が判明した。従つて第 II 章で述べた様に、小試験片に依る實驗結果と計算式とを用ひて、大型鋼材の階段焼入時に於ける内部温度變化狀況を知る事が出来れば、更にその材質の等温變態曲線を研究室で求めて置く事に依つて、大型鋼材を切斷する事無しに、その組織分布狀況を推察する事が可能な譯である、即ち研究室に於ける小試験片での實驗結果から、大型鋼材階段焼入時の硬度分布や組織分布が豫知出来るのであつて、現場作業上極めて便利であらうと考へる次第である。

VII 總 括

先づ階段焼入の内、最も簡単な第一段水冷-空气中引上-第二段水冷、又は第一段水冷-空气中引上放しの場合に就て、熱傳導論的立場から圓筒型鋼材の内部温度變化を求める計算式を誘導し、次いで径 70mm 炭素鋼小型圓筒狀試験片に種々の階段焼入を施した場合の内部、或は表面温度變化を實測し、この測定に適合する如く計算式中の諸常數値を定めた。

かくして得られた式を、同一鋼種で異なる寸法の圓筒狀試験材に適用すれば、計算の相似性からその時の内部温度變化が理論的に求められる譯である。それを確めるため、径 70mm より大きい径の試験片、及び小さい径の試験片に就て計算、實驗双方の値を比較した所、兩者は大體一致して上述の考への正當な事を立證した。

次に階段焼入した炭素鋼(0.3% C 及び 0.7% C) 試験片の硬度分布、組織分布を測定して、階段焼入の各段階の時間を考へて、これ等と分布具合が如何に變化するかを調べた。

最後に炭素鋼の等温變態曲線圖から、Grange 及び Kiefer の方法に従つて、径 70mm 試験片を階段焼入した際の温度變化に相應する如き冷却變態曲線圖を作成し、これに依つて實測で得られたと全く同様な硬度分布、組織分布が豫想される事を説明した。

以上の結果を綜合して實用的見地から考察するに、今大型鋼材の階段焼入を行はうと言ふ様な場合、先づその材料の等温變態曲線を豫め求めて置く。次に研究室でそれと同一鋼で作つた小試験片を階段焼入した時の内部温度變化を測定し、その結果に一致する様に計算式の常數値を定める。かくの如くして準備が出来れば、後は數値計算に依り必要とする任意の大きさの鋼材の、階段焼入時に於ける内部温度變化が求められ、これと等温變態曲線とから、實際大型鋼材を焼入した際の硬度分布、組織分布が豫想され得る事になる。即ち一大型鋼材を焼入後切斷せずとも、又一大型鋼材階段焼入時の温度を測らなくとも、その硬度分布、組織分布が豫想出來て現場作業上大いに便利になる。

終りに臨みこの報告の發表に關し指示を與へられた會社當局に對し深甚なる感謝の意を表すると共に、實驗、計算の兩方に於て熱心に協力された辻弘氏に對し厚く御禮申上げる次第である。

文 獻

- *) E. S. Davenport & E. C. Bain: Trans. Am. Inst. Min. & Met. Eng. Steel. Div. Vol. 89 (1930) p. 117
- *) R. A. Grange & J. M. Kiefer: Trans. A. S. M. Vol. 29 (1941) p. 85