

鋼の階段焼入に関する研究 第2報 その1

(日本鐵鋼協會第30回講演大會講演 昭18.10.於大阪)

菅 野 猛*

I 緒 言

先に第1報に於て階段焼入の最簡單な場合、即ち第一段水冷-空
氣中引上-再水冷、或は第一段水冷-空氣中引上の場合に就て、試験
片内部の溫度變化狀況を實驗的並びに理論的に求めて兩者を比較す
るにより、一般の大型鋼材を階段焼入した時の内部溫度變化を理論
的に求める方法を示し、更に内部溫度變化が判ればその材質の等溫
變態曲線を實測して置くことにより、一々切斷せずとも鋼材内部の
組織分布、硬度分布迄推測し得る事を、實例に依り示した。

本報に於ては更に進んでかゝる階段焼入を行へば、内部應力がど
の程度軽減されるか、或は階段焼入は果して焼割防止に有效なるや
否やを確める爲、階段焼入した炭素鋼試験片の殘留應力に関する二
三の測定結果に就て述べやうと思ふ。

II 殘留應力測定法

實驗に使用した試験片の材料は0.3% Cの炭素鋼で、又寸法は前
報と一致させる爲70mmφ×150mmのもの又は44mmφ×150
mmのものを用いた。

階段焼入實驗装置及び實驗方法は第1報で説明したのと全く同一
なる故こゝでは説明を省く。

階段焼入の終つた試験片は表面のスケールが取れる程度に研磨仕
上を行ひ殘留應力測定用に供した。

殘留應力の測定はG. Sachsの穿孔法に依つた。次にこの方法を
概説する。試験片としては圓筒形物を選び、その内部應力は軸對
稱で且軸方向には一樣であるとする。この試験片の中央に軸方向に
一樣な徑の孔を穿けると、試験片の内部應力に基く平衡状態が無孔
の場合と異つて来る爲、試験片の平均の長さ及び平均の外徑は少し
變化する。次に孔の徑を少し擱げて試験片の材質を一部削り取ると
前同様の理由に依り、試験片の平均長さ及び平均外徑は再び幾分變
化する。斯様な操作を順次繰返して行つて試験片の平均長さ及び平
均外徑の初めからの變化を測つて行き、孔の面積と平均長さ及び平
均外徑の變化との關係を求める。今回回目かの穿孔後平均長さ及び
平均外徑が夫々最初に比較し Δl 及び Δd だけ變化したとすれば、
平均長さ及び平均外徑の變化の割合は夫々

$$\nu = \Delta d/d \quad \lambda = \Delta l/l \quad \dots \dots \dots (1)$$

となる。さて今 ν 及びポアソン比 μ に依り新に θ, Δ を

$$\theta = \nu + \mu \lambda \quad \Delta = \lambda + \mu \nu \quad \dots \dots \dots (2)$$

なる式に依り定義するとSachs等の計算に依り θ, Δ と内部應力
との間には次の關係が成立つ事が判つてゐる

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[(f_0 - f) \frac{d\Delta}{df} - \Delta \right] \\ t &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[(f_0 - f) \frac{d\theta}{df} - \frac{f_0 + f}{2f} \theta \right] \\ r &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{f_0 - f}{2f} \cdot \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

(尙この式では張力の向きを(+))とつてある)但し s, t, r は

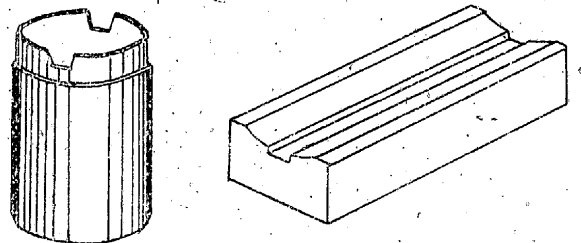
* 住友金屬工業株式會社製鋼所

夫々軸方向、切線方向、動徑方向の主應力を示し、Eは彈性係數、
 f_0 は圓筒の最初の斷面積、fは孔の斷面積を示す、現在は

$$E = 20,900 \text{ kg/mm}^2 \quad \mu = 0.25$$

なる値を採用し、且試験片の徑は70mm(又は44mm)としたの
で $f_0 = 3850 \text{ mm}^2$ (又は 1520 mm^2)となつた。測定は最初研磨仕
上した物に就て外徑及び長さをマイクロメーターに依り數個所で測
つた後、軸方向に徑7mmの孔を穿け前同様に外徑と長さを測り、
引續き孔徑が40mmになる迄毎回厚さ2mm宛孔を削りその都
度外徑及び長さを測り、孔徑が40mmに達すると以後は削る厚さ
を1mm宛に減じ最後に試験片の厚さが1mmになる迄同様の操
作を繰返した。斯して得られた20~23個の測定値から ν, λ 及び
 θ, Δ を求め、次にこれとfとの關係を示す圖を作り、更にこれか
ら圖上微分により $\frac{d\theta}{df}, \frac{d\Delta}{df}$ を求め(3)式を用ひ内部應力を計算し
た。

この測定はマイクロメーターを用ひ1/1000mm迄讀む爲マイク
ロメーターの取附け方が眞直でなかつたり、測定位置が一定でなかつ
たりすると、その爲の誤差の方が寸法の變化よりも大きく出て測
定不可能になる恐れがある。乃で我々は第1圖に示す様な測定臺を
考案して上述の誤差が起るのを防いだ。



第1圖 Sachs法に依る殘留應力測定に際し試験片の寸法
變化をマイクロメーターで測定する爲の試験臺

即ち第1圖左方は外徑を測る爲の臺で、この筒中に試験片を入れ
臺の溝部に試験片の目印が一致する様位置を加減してからこの溝に
マイクロメーターのアンビルを嵌めて外徑を測る。そうすれば何時
も試験片の同一位置で而も正確に直徑方向に外徑が測定出来る理で
ある。又圖の右方は長さを測る爲の臺で、この臺上に試験片を水平
に置き、試験片の目印と溝が一致する様位置を調整してから、前同
様に溝中にマイクロメーターのアンビルを嵌めて、長さを測定すれ
ば何時も同一位置で且軸に對して嚴密に平行に測り得る。

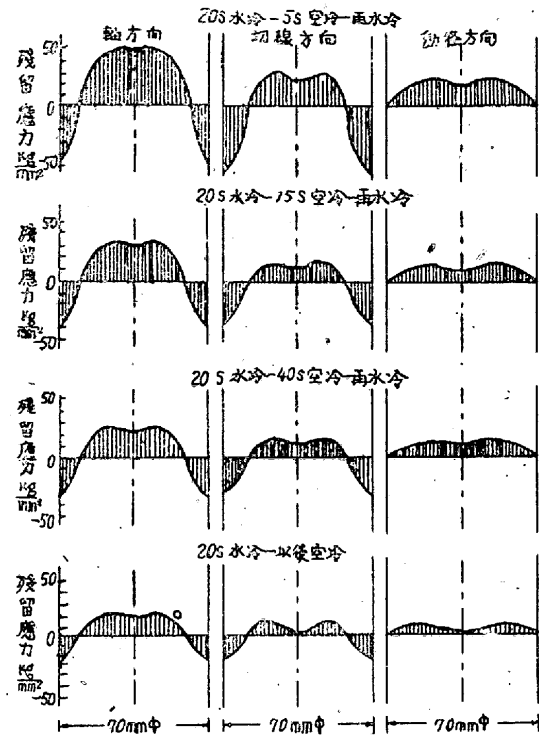
III 階段焼入を施した試験片の殘留 應力分布

現在實驗した階段焼入の種類は第1表の如くである。

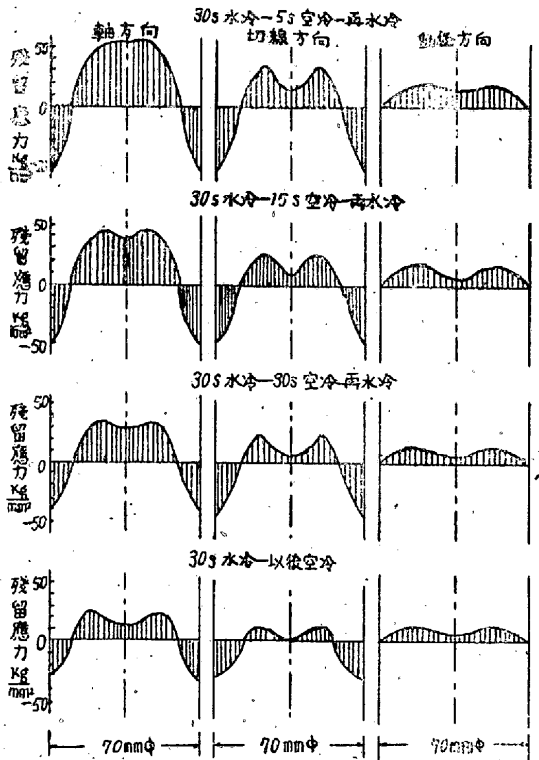
第2圖に第一段水冷10sの場合の殘留應力分布を示す圖を見る
に、空冷時間5sの場合が各應力共値が最大で、空冷時間無限大即
ち第一段水冷以後空冷の時が最小である。但し空冷時間15sのも
のに比し、より空冷時間を長くした50sの物の方が大きい應力値
を持つ點が、聊か異様に感ぜられるが、これに關しては後述する。
又圖に於て空冷時間5sのものでは應力曲線の中央に凹みが生じて

第1表 實驗した階段焼入の種類

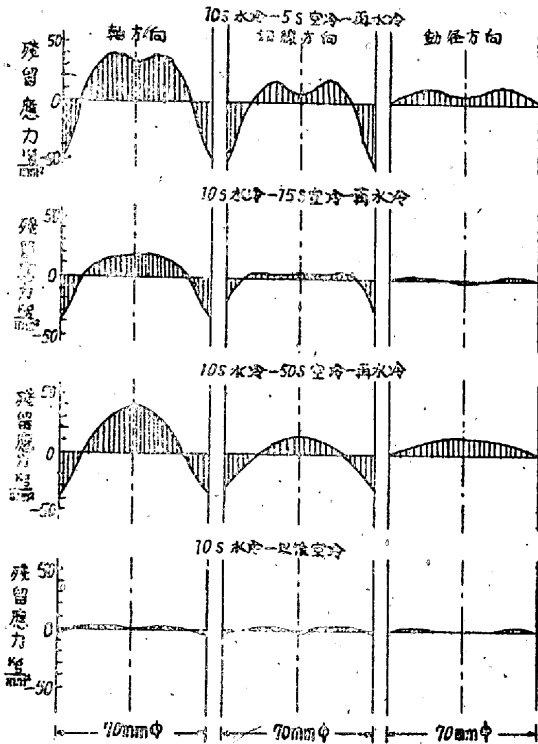
第1 段水冷	10s	—	空氣中取出	5s	—	再水冷
"	10s	—	"	15s	—	"
"	10s	—	"	50s	—	"
"	10s	—	以後空氣中取出放し			
第1 段水冷	20s	—	空氣中取出	5s	—	再水冷
"	20s	—	"	15s	—	"
"	20s	—	"	40s	—	"
"	20s	—	以後空氣中取出放し			
第1 段水冷	30s	—	空氣中取出	5s	—	再水冷
"	30s	—	"	15s	—	"
"	30s	—	"	30s	—	"
"	30s	—	以後空氣中取出放し			
第1 段水冷	1mn	—	空氣中取出	5s	—	再水冷
"	1mn	—	"	1mn	—	"
"	1mn	—	以後空氣中取出放し			



第3圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留應力分布—第一段水冷 20s の場合



第4圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留應力分布—第一段水冷 30s の場合



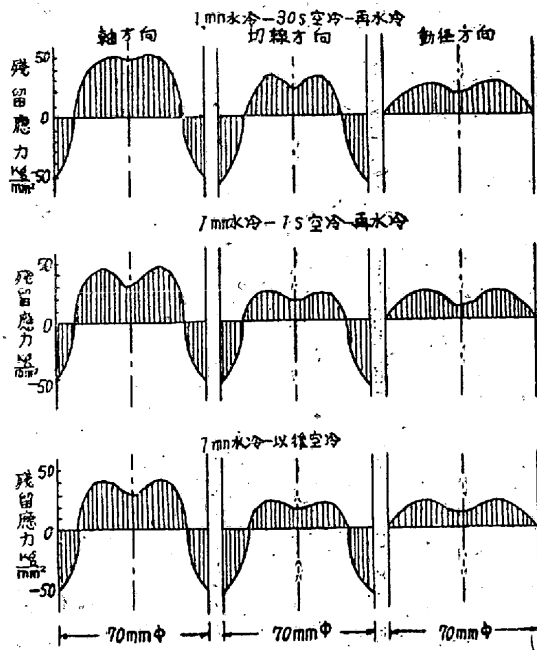
第2圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留應力分布—第一段水冷 10s の場合

あるが、空冷時間 50s では完全な山型となつて居り、空冷時間 15s では前二者の中間状態の様な形をしてゐる。これ等に関しては第2報その2で説明を試みる積りである。

第3~4圖は夫々第一段水冷を 20s 及び 30s とした時の残留應力分布曲線である。圖を見ると第一段水冷が 20s の時でも 30s の時でも同様に、空氣中引上時間が長くなる程残留應力の値が全般的に下つて行く事が判る。又空冷時間 5s の場合は中心に現れる應力の谷が極めて小さく、空冷時間の増大と共に應力の谷が深くなり行くのも、第一段水冷 20s 及び 30s 兩者に共通現象である。尙第一段水冷後引上の儘で再水冷せぬ場合、水冷時間 10s では殆ど残留應力が零であつたが、水冷時間が 30s になると相當大きい應力が残つてゐるのが見られる。

第5圖は第一段水冷 1mn の場合であるが、第一段水冷時間も

1mn 位の長さになると空氣中引上時間の影響も殆ど無くなつて、30s 空冷でも 1mn 空冷でも以後空冷でも、應力の値に餘り變化が出てゐない。これは、この位の鋼だと水に 1mn 程度漬けて置くことに依り、略實用上差支へない程度に冷却が完了する事を意味するものであらう。

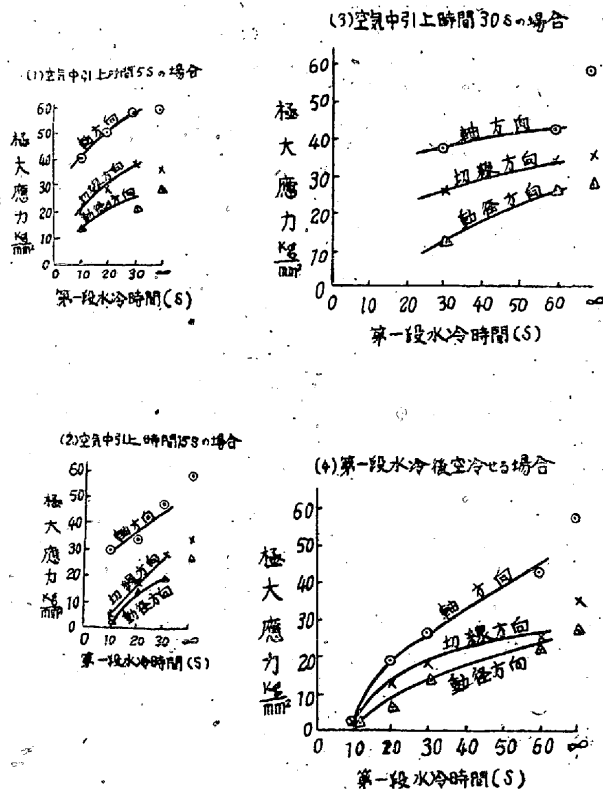


第5圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留
 応力分布—第一段水冷 1 mm の場合

IV 階段焼入各段階の時間と残留
 応力との関係

上述の結果を更に纏めて、階段焼入に於ける各段階の時間が残留
 応力の上に及ぼす影響に就き次に述べる。

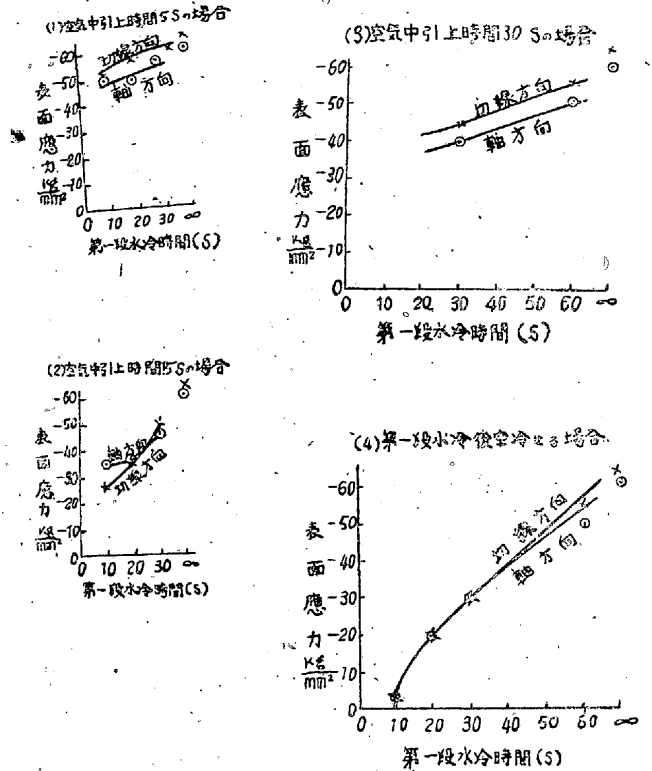
第6圖は三つの残留主応力の極大値が第一段水冷時間に依り如何
 に變化するかを、空气中引上時間別に見たもので、孰れの場合も第
 一段水冷時間が長くなると共に応力の極大値は増大してゐる。圖中
 第一段水冷時間が無限大といふのは、水焼入し放しの場合で極限に



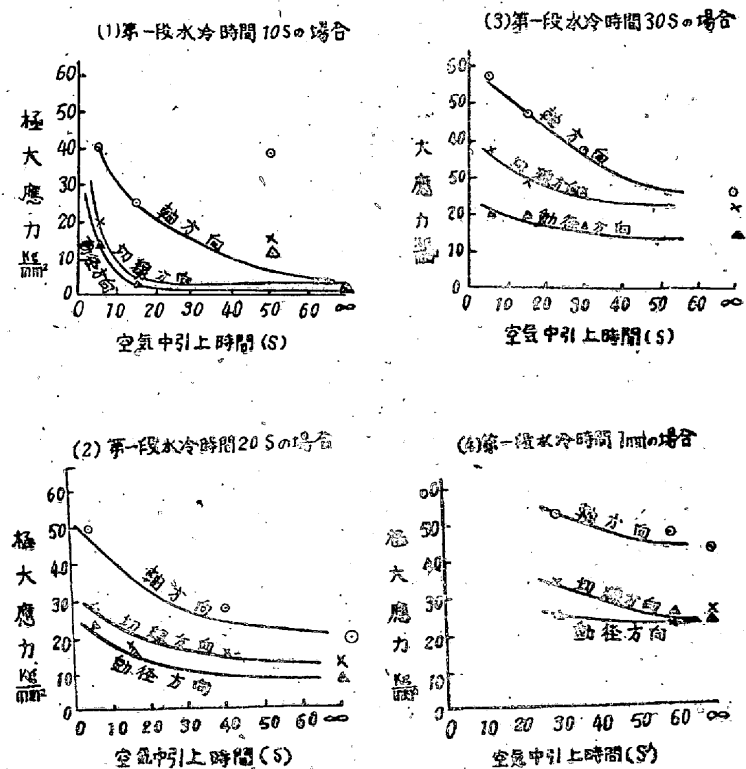
第6圖 0.3% C 炭素鋼 70 mmφ 試験片を階段焼入
 した時の第一段水冷時間と極大応力との関係

相當する。

第7圖は同じく表面応力と第一段水冷時間との關係を空气中引上
 時間別に見たものであるが、第一段水冷時間が長びくと共に応力の
 値が増す事は前同様である。但しこの場合動徑方向の主応力は表面
 で値が零になるので、切線方向並に軸方向の2 應力に就てのみ示し
 てある。



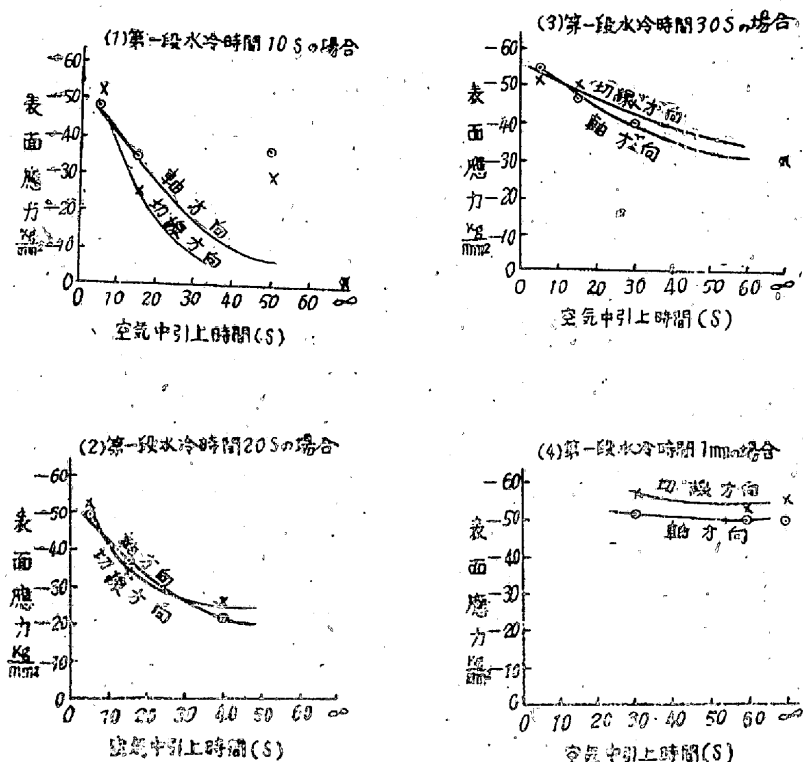
第7圖 0.3% C 炭素鋼 70 mmφ 試験片を階段焼入
 した時の第一段水冷時間と表面応力との關係



第8圖 0.3% C 炭素鋼 70 mmφ 試験片を階段焼
 入した時の空气中引上時間と極大応力との關係

第8圖は見方を變へて空氣中引上時間と残留應力極大値との間の關係を第一段水冷時間別に示したもので、圖を見ると判る様に第一段水冷時間が10s, 20s, ……と長びくに隨ひ、應力の曲線は上方へ漸動して、應力極大値が全般的に上昇してゐる事を示す。又曲線は空氣中引上時間の増加と共に熱れも零に對し漸次的に下降してゐるが第一段水冷時間の短いもの程曲線の下降が急で、第一段水冷時間の長いもの例へば1mm 水冷といふ様なものでは曲線の傾斜が比較的緩である。これは第一段水冷時間が短ければ、空氣中引上の効果が大き、短時間の空冷でも應力を著しく回復させるに對し、第一段水冷時間が長いと空氣中へ引上げても試験片冷却速度を緩和させる程度が少い爲、空氣中引上による残留應力回復の効果が減殺される事を示すに他ならない。尙圖の横軸の目盛で∞とあるのは、第一段水冷後空冷し放しの場合で空冷の極限に相當する。

又第一段水冷10sの圖で空氣中引上時間50sの所に限り異常な値を示してゐるが、これに就ては第2報その2で説明する。



第9圖 0.3% C 炭素鋼 70mmφ 試験片を階段焼入した時の空氣中引上時間と表面應力との關係

第9圖は第8圖と同じ事を表面應力に就て見たもので、圖を見れば判る如く表面應力に於ても極大應力に就て述べたのと同じ事が當嵌る様である。特にこの場合は極大應力の時より一層その傾向が明瞭に現れて居り、第一段水冷時間1mmのものなど應力の曲線が横軸に略平行で、水冷時間が1mmにもなると空氣中引上に會つて残留應力を回復させるものが殆ど無い事を示す。尙第一段水冷10sの圖で空氣中引上時間50sの所の値が第8圖の場合と同様異常を示してゐるが、これに就ては纏めて後述する。

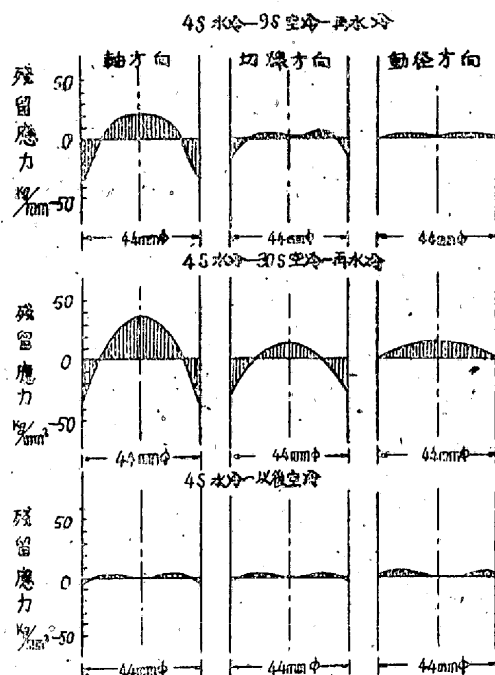
V 試験片の寸法の影響

以上は凡て70mmφ 試験片に關する結果であつたが次に試験片の徑を變へた場合を考へて見る。第1報その1に於て熱傳導論的計算及び實驗から徑の異なる圓筒狀試験片(長さが徑に比し相當長いものとする)を階段焼入する場合、互に相似な冷却状態を與へる爲に必要條件として、次の結果を得た(但し著しく大きさが異なる場合は

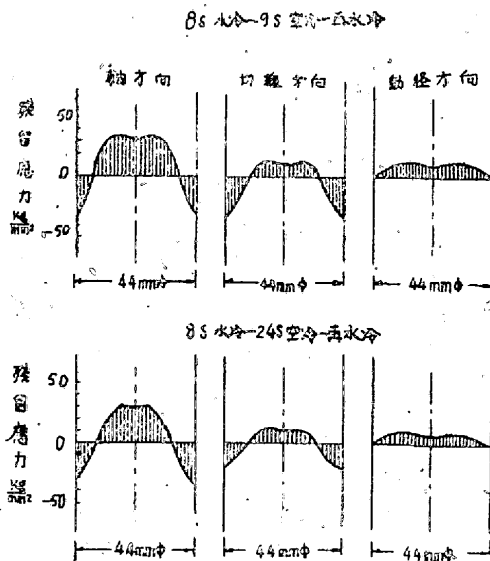
除く) 即ち第一段水冷時間 $t_1 \propto D^2$ 、空氣中引上時間 $t_2 \propto D$ (但しDは直徑)。こうすれば試験片各點に於ける冷却具合は凡て相似にし得る。今徑44mm 試験片の場合を取り、上の條件をこの場合に適用し70mmの徑を44mmにした場合相似な冷却状態を與へる爲に必要な第一段水冷時間及び空冷時間の關係を求めると第2表の様になる。即ち第一段水冷時間10sは4sに、20sは8sに、又空冷時間15sは9sに、50sは30sにといふ様にすればよい譯である。

70mmφ		44mmφ	
第一段水冷時間	空冷時間	第一段水冷時間	空冷時間
10s	15s	4s	9s
20s	30s	8s	18s
30s	45s	12s	27s
40s	60s	16s	36s
50s	75s	20s	45s
60s	90s	24s	54s
70s	105s	28s	63s
80s	120s	32s	72s
90s	135s	36s	81s
100s	150s	40s	90s

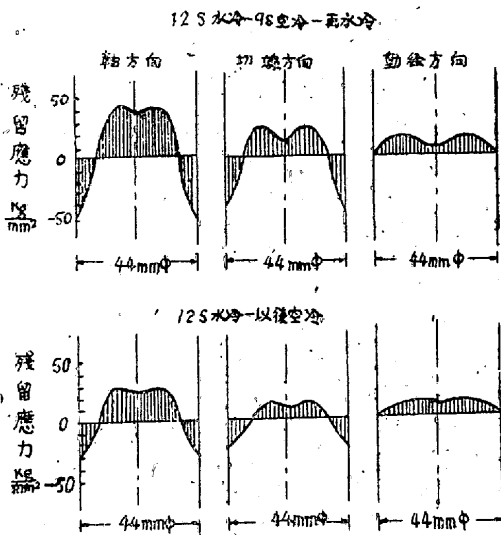
第10~12圖に44mmφ 試験片(0.3% C 炭素鋼)を階段焼入した時の残留應力分布を示す。第10圖は第一段水冷4sの場合で70mmφに於ける10sの場合に匹敵する。第11圖は第一段水冷



第10圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留應力分布—第一段水冷4sの場合



第11圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留應力分布—第一段水冷8sの場合

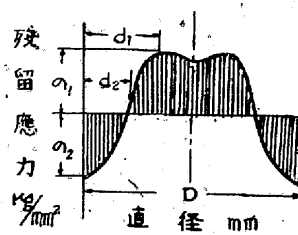


第12圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留
 応力分布—第一段水冷 12s の場合

8s の場合で 70mmφ に於ける 20s 水冷に等しい。第12圖も同様に 70mmφ の 30s に相應するもので第一段水冷 12s である。孰れも一見して 70mmφ の時の残留応力分布と酷似した形をしてゐるのが判る。即ち冷却状況が相似であると得られた残留応力分布も相似になるらしく思はれる(相似とは必ずしも初等幾何學的の意味に非ず)。この事を更に定量的に確めてみる爲、相對應する階段焼入を施した 70mmφ 及び 44mmφ 兩試験片の残留応力分布曲線の内、切線方向のものに就て極大應力 σ_1 、表面應力 σ_2 、表面から極大點迄の距離 d_1 と直徑 D の比及び、表面から應力零になる點迄の距離 d_2 と直徑 D との比を取り、双方を比較して見た(第3表左上圖参照)。若しこれ等の値が 70mmφ 及び 44mmφ で一致すれば、夫々相應する位置での残留應力の値が兩者共等しくなるのみならず又兩方の應力分布曲線の形も一方が他方を縮め乃至伸した様な形になつてゐる事になる。第3表に該結果を示す。表を見るに應力の極大點の位置及び零になる點の位置を示す指數 d_1/D 、 d_2/D の値は兩者共例外なくよく一致し、又極大應力及び表面應力の値 σ_1 、 σ_2 も一二的例外を除き殆ど一致してゐて、豫想の正しかつた事が證明された。

従つて上の結果から階段焼入時に於ける鋼材の残留應力分布は之を一々切削して測定せずとも、それと相似な冷却状態を與へるが如き階段焼入を施した小試験片の残留應力を實測し置くことに依り、確實に推定し得る事が理解される。尙第10圖で上から二番目の空氣中引上 30s のものの方が一番上の空氣中引上 9s のものより全體的

第3表 70mmφ 及び 44mmφ 試験片に冷却状況が相似になるが如き階段焼入を行つた場合の残留應力比較(切線方向)



(1)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	5	5
σ_2	25	24
d_1/D	0.10	0.11
d_2/D	0.23	0.25

(2)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	15	15
σ_2	29	31
d_1/D	0.19	0.18
d_2/D	0.50	0.50

(3)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	3	5
σ_2	5	5
d_1/D	0.24	0.25
d_2/D	0.14	0.14

(4)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	15	15
σ_2	34	33
d_1/D	0.33	0.34
d_2/D	0.18	0.18

(5)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	14	13
σ_2	29	29
d_1/D	0.33	0.35
d_2/D	0.26	0.23

(6)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	27	26
σ_2	49	48
d_1/D	0.31	0.32
d_2/D	0.16	0.18

(7)

徑比較 スベキモノ	70mmφ	44mmφ
σ_1	12	12
σ_2	27	25
d_1/D	0.29	0.32
d_2/D	0.18	0.18

に應力の値が高くなつて居り、且應力分布曲線の形も前者は他と少し異つてゐるが、この階段焼入に匹敵する 70mmφ の場合の 10s 水冷-15s 空冷及び、10s 水冷-50s 空冷に於ても同様な現象があつて(第2圖参照) 50s 空冷の物の方が 15s 空冷の物よりも應力値が高く出て居り、且 50s 空冷の物の應力分布曲線の形は他と少し異つてゐた。この現象に就ては第2報その2に説明するが、要するに徑の異なる試験片に相似な冷却を與へる様な階段焼入を行ふと隨伴する現象も全く同じ様に起る事を示す一事實として興味深く感じられる。

鋼の階段焼入に関する研究 第2報 その2

(炭素鋼試験片に階段焼入を行ふ際に於ける内部應力發生機構の考察)

菅野 猛*

一般に鋼の焼入に際して生ずる内部應力は、2種の異なる原因に基づく應力即ち内外の温度差に依る熱應力と Ar 變態の爲の膨脹に基づく變態應力とが重疊して起るものと考へ得る。この事に関しては既に H. Bühler 及び E. Scheil¹⁾ が、種々の成分の低炭素 Ni 鋼を用ひ、變態應力及び熱應力が焼入時の残留應力の上に如何に現れて來るか

に就き詳細なる研究結果を發表してゐる。又同氏等はその後矢張り低炭素 Ni 鋼を用ひ、焼入温度及び焼入液の温度を色々變へた場合の残留應力を測定し、その結果から熱應力及び變態應力の發生時期に就て考察した²⁾。階段焼入に依り生ずる残留應力も、普通の焼入の時と同様に熱應力と變態應力の重疊したものであるが、今階段焼入時に於ける應力發生の機構を論ずる前に、一般の焼入の際如何にして應力が發生するかにつき考へて見る。