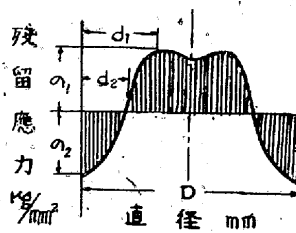


第12圖 0.3% C 炭素鋼を階段焼入した時の残留
 応力分布—第一段水冷 12s の場合

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)



(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

(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

(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

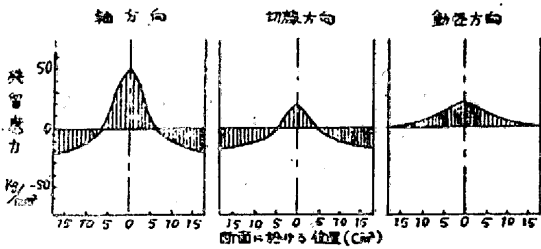
(炭素鋼試験片に階段焼入を行ふ際に於ける内部應力發生機構の考察)

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。

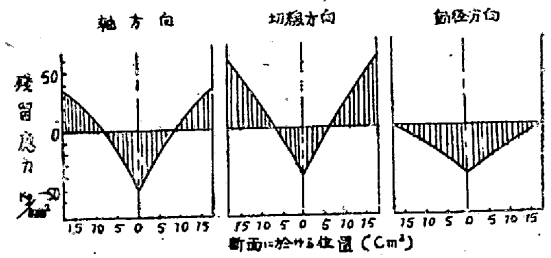
第1圖は徑50mmの純鐵製試驗片を850°Cから水焼入した時の残留應力分布曲線⁽²⁾であるが、850°Cでは未だ變態點を越えてゐ



第1圖 熱應力のみによつて生じた残留應力の例 (H. Bühler, H. Buchholz u. E. H. Schulz) (純鐵製 50mmφ 試験片を 850°C から水焼入した場合)

ない故、得られた結果も熱應力のみによるものである。この場合如何にして圖に示す如き残留應力分布が生じたかを軸方向應力の例に就き考へて見ると、先づ水焼入に依り表面が急冷され収縮するので外部に張力、内部に壓力が生ずる。然るに内部は未だ高温で塑性域にあるから、容易に塑性變形を起して生じた應力を中和する。所が更に内部迄冷却するに従ひ中心の穀部分が著しく収縮するので、今度は前と逆に内部に張力、外部に壓力が生じ圖に見る様な應力分布を呈するに至る。この際若し材料が高温迄完全弾性體であれば、試験片の内部が常温に戻つた後に於て應力が残留せぬ事は、弾性體の熱應力に關する常識から明かである。

次に第2圖には11.7% Ni鋼 (C 0.05%) 製の徑50mm試験片を最初900°Cに加熱して置き、Ar點の直上360°C位迄徐冷(爐冷)して、其處から氷水中へ焼入れた時の残留應力分布曲線が示してある。この際11.7% Ni鋼は330°C→200°C位の間に於て變態を行ふので、その温度範圍では容積の膨脹が起る事になる、尤も同時に熱収縮も起るが、その値は變態の爲の膨脹に比し1/7程度であるから、得られた残留應力は變態應力に依るものと考へても差支へ無いであらう。この時の應力發生具合を考へるに、先づ表面附近が初めに變態して體積の膨脹を來す爲外部に壓力、内部に張

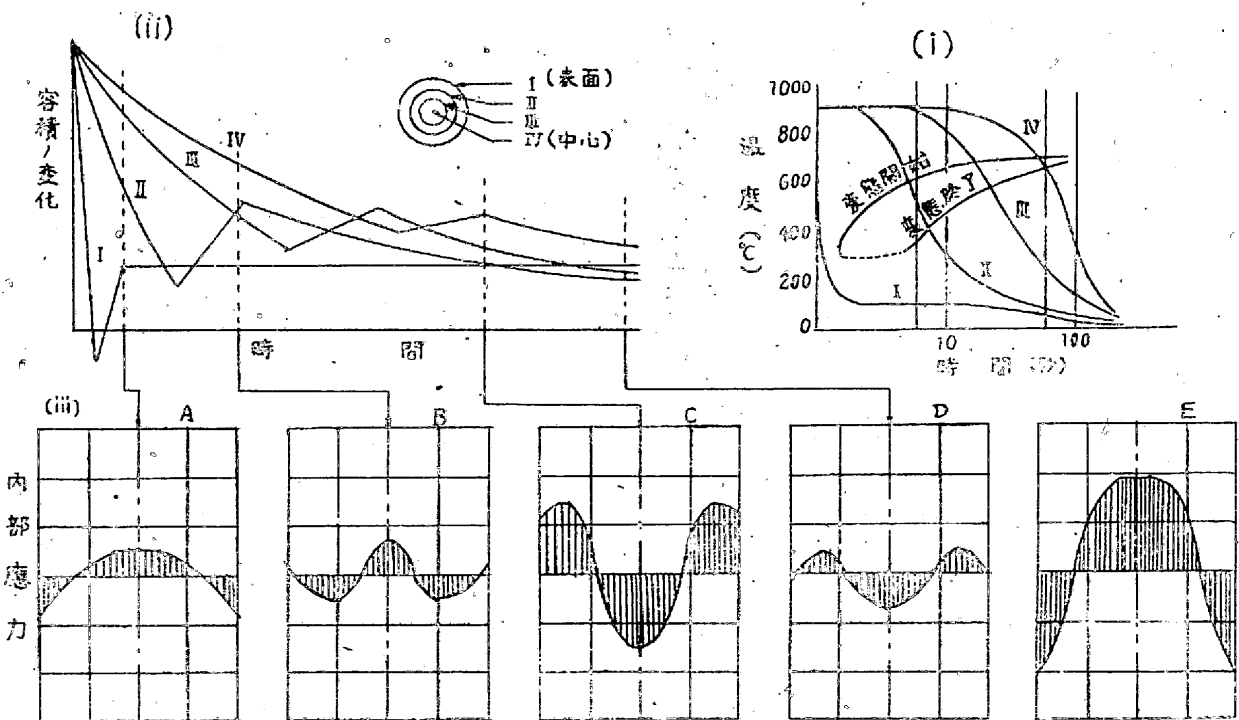


第2圖 變態應力のみによつて生じた残留應力の例 (H. Bühler u. E. Scheil) (11.7% Ni 鋼製 50mmφ 試験片を 900°C→360°C 迄爐冷し其處から氷水中へ焼入れた場合)

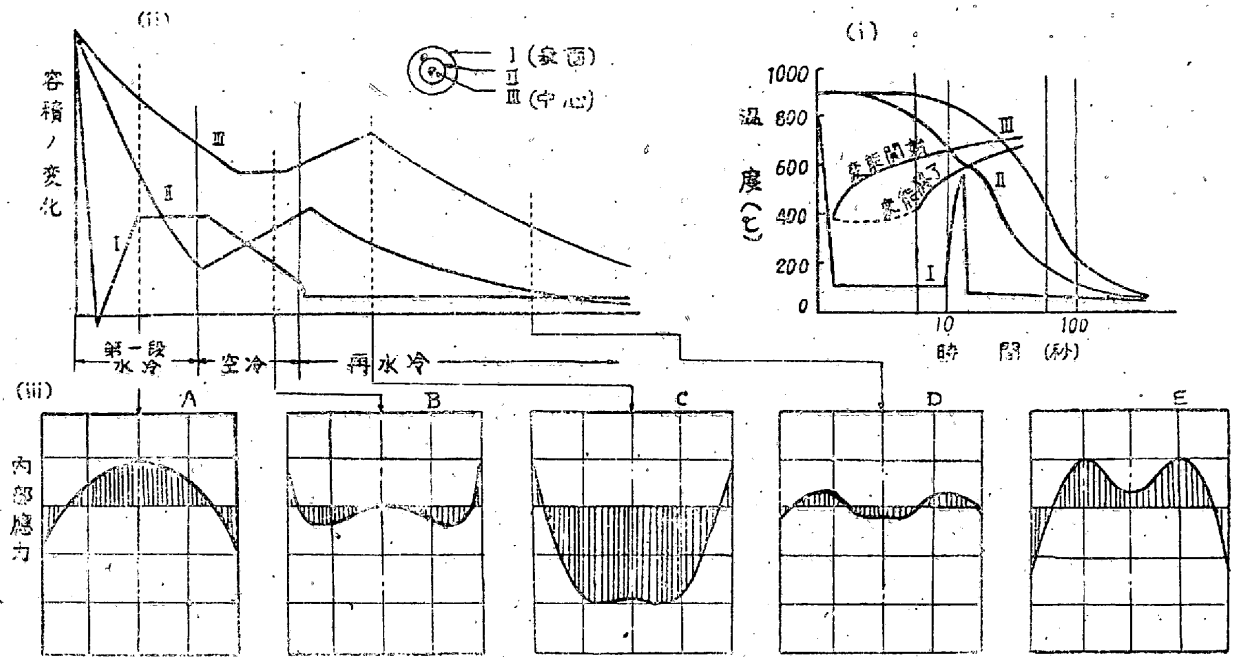
力を生ずる。然るに11.7% Ni鋼は300°C位でも未だ塑性的性質を有するので(之は炭素含有量が少い故)應力を緩解する方向に永久變形を起す。所が變態が内部迄進んで中心の大容積の部分が變態の爲膨脹すると、前に永久變形を起した分だけが残留應力として残る結果となり、最初と反對の向きの應力即ち外部に張力、内部に壓力が生じ、圖に示す様な應力分布を呈するに至る。この場合の應力分布は、熱應力に依る第1圖の場合とは全然反對の形になつてゐる事が判る。

扱上述の結果は11.7% Ni鋼に就てのものであるが、炭素鋼に就ても同じ事が成立つてあらうと考へられる。即ち若し上の場合と同様に炭素鋼の焼入に際して熱應力の影響を全く除き得たら第2圖と同様な残留應力分布を示すであらう。唯炭素鋼の場合にはNi鋼の場合に於ける如く、熱應力の影響を除く事が實際上困難なので、特に變態應力のみによつて生じた残留應力の例としてNi鋼の結果を借用したのである。

以上二つの場合は何れも極端な例として、熱應力或は變態應力のみに基づく残留應力分布具合を示したものであるが、一般にはこれ等の双方が重疊して生じ、残留應力の上にも二つの影響が組合さつて現れて來る。そしてその現れ方は高温に於ける弾性限の値、塑性彈性轉移と温度との關係、變態が塑性域で起るか弾性域で起るか、又熱應力發生經過に於て外部に未だ張力の頃に變態が開始するか、應



第3圖 水焼入を行ふ際に起る内部應力發生機構の説明



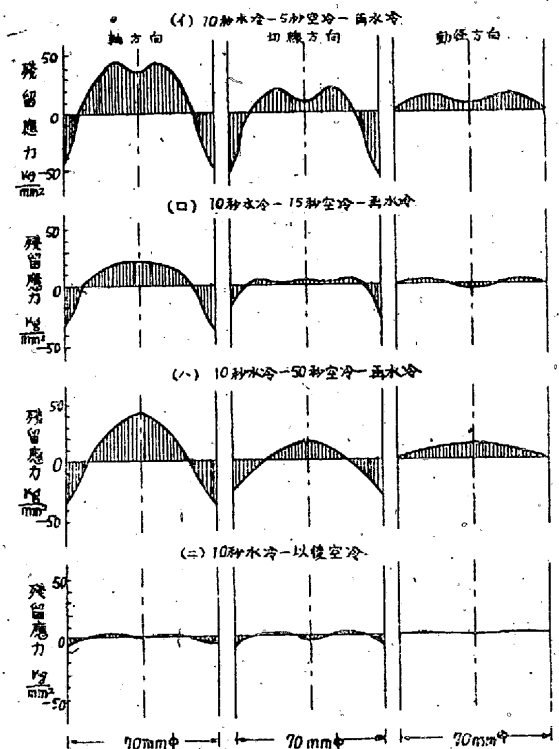
第4圖 階段焼入を行ふ際に起る内部応力発生機構の説明

力の向きが變つてから變態が開始するか、等々に依り色々異つて來て必ずしも一定しない。

第3圖は普通鋼の水焼入時に於ける應力発生状況を原理的に示したもので、この圖は熱應力の向きが内外逆轉する以前に變態が始まる場合に當る。圖中 (i) は水焼入時に於ける試験片各部の温度變化及び變態開始終了曲線、(ii) はこれに相應する試験片各部の容積變化曲線、又 (iii) は (ii) の點線で示した各時刻に於て試験片内に存在する應力分布曲線である。(i) 及び (ii) から判る様に試験片の最外廓部 I は完全なマルテンサイト變態を行つて居り、他の II, III, IV の部分はパーライト變態を行つてゐる。それに相應して應力分布曲線は先づ外廓部 I がマルテンサイト變態を行つた直後の時刻 A に於ては内部に張力、外部に壓力が生じて居り、次いで I に隣接する部分 II がパーライト變態を完了した時刻 B に於ては II の部分は張力から壓力に變化して居り、外廓部 I は壓力から張力に變つてゐる。斯して内部迄完全に變態を終つた C では表面が張力、内部が壓力になつて居り、以後再び熱應力が重疊生成して變態應力を打消す様に働き、結局 D を經て最後に E の様な残留應力分布を呈するに至る。

これと似た事を階段焼入の場合に就て試みて見たのが第4圖である。第3圖と同様に (i) は試験片内外温度變化曲線(假りに10s 水冷-5s 空气中取出-再水冷の場合を借用した)、(ii) は (i) に相應する試験片各部の容積變化曲線、(iii) は冷却の各段階に於ける應力分布曲線である。先づ表面がマルテンサイト變態を完了した A 時刻に於ける應力分布曲線は第3圖の時と全く同様であるが、試験片を空气中に引上げて暫く經つた時刻 B に於ては、表面 I はマルテンサイトが焼戻されて A の時より幾分容積が收縮し中央 III は冷却が緩になつて一部分變態が始り、表面と中央との間 II ではパーライト變態が六分通り進行して體積は膨脹しつつある。従つて表面には收縮の爲張力が生じ中央は容積の變化が殆どない爲應力も零で、表面と中央の間では膨脹の爲弱い壓力が生じてゐる。次に再水冷後暫時の後の時刻 C に於ては、表面は既に冷却して體積の變化なく表面と内部との中間部分は將に變態が完了せんとする前まで膨脹してゐる。従つて應力分布も中央附近に著しい壓力が働いて

ゐる。その後再び中央の方も冷却による收縮が始り熱應力を發生し、結局 D を經て E の様な残留應力分布曲線を得る。この際普通の焼入と階段焼入との相違が應力發生経過の何處に現れてゐるかといふに、B 又は C 時刻に於て空气中引上により表面のマルテンサイトが焼戻されて容積の收縮を來してゐるにも拘らず、内部ではパーライト變態が進行して依然として膨脹して居り、變態の爲の應力が通常の焼入よりも階段焼入の時の方が強く現れて來る。従つて後に生ずる熱應力(第2回目の收縮)は、普通の焼入の時より一層前の變態應力に依り打消される結果となり、最後の残留應力は階段焼入の



第5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

時の方が遙に小さい値を示す事となる。尤も以上の現象は階段焼入の典型的な場合で、一般には空氣中引上の時期、時間等により必ずしもこれと同一経過を辿らない。

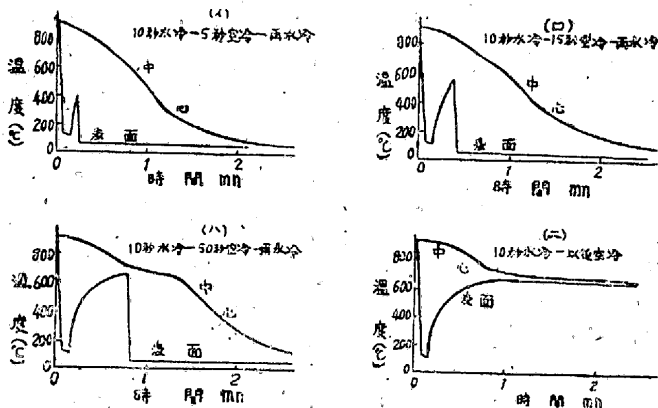
現上述の考へに基き 10s 水冷-15s 空氣中取出-再水冷と、10s 水冷-50s 空氣中取出-再水冷に依て得られた 殘留應力分布曲線 (第5圖の(ロ)及び(ハ))の相違を説明してみる事にする。(44mmφ 試験片に就て行つたこれと相似な階段焼入 4s 水冷-9s 空冷-再水冷及び、4s 水冷-30s 空冷-再水冷の場合に就ても全く同様) 既述(第2報 その1第3節参照)の如く、後者は前者より空氣中引上時間が長いにも拘らず殘留應力の値が前者よりも大きく且應力分布曲線は中央が山型で他の場合の如き凹みを示さない(第5圖参照)。今前者に就て考へて見るに、第6圖の溫度變化曲線(ロ)からも判る様に 15s 間空氣中へ取出して再水冷する際の中心の溫度は未だ 800°C を一寸降つた位の所なので、その組織はオーステナイトで次の再水冷の時に變態するものと考へ得る。然るに表面は第一段水冷で生じたマルテンサイトが空氣中取出の際の溫度上昇で焼戻され幾分收縮しつゝあるので、再水冷に際しては中心部分の變態に依る膨脹と相俟ち、普通の單純な水焼入の時よりももつと大きな變態壓力

が内部に生ずる。この壓力がその後生ずる熱應力を相殺して、圖に示す様な比較的の小さい殘留應力を示すに至る。即ち 10s 水冷-15s 空氣中取出-再水冷は、前に説明した階段焼入の典型的な場合に當る譯である。

次に空氣中取出 50s の場合を考へて見るに、この時は第一段水冷で變態しなかつた内部のオーステナイトが、空氣中取出時か又はその後内外共に未だ相當高温で(内部は 700°C 位で未だ塑性域にあり、外部は空氣中取出時間が長い爲可成り溫度が上昇して 600°C 位となり、これも塑性状態に近い状態になつてゐる) 應力を解放し易い状態にある内に全部變態完了し終る。それ故變態の爲の應力は殘留應力の上に何等の寄與をなさず、殘留應力は熱應力のみによつて惹起される事になる。従つて前の場合の様に熱應力が變態應力によつて相殺される事がない爲、生じた殘留應力の値もこの時の方が大きい値になる。

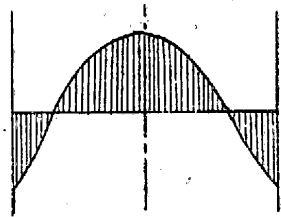
以上の事實から判る様に、空氣中取出時間を長くすれば必ずしも殘留應力が小さくなるといふ譯のものではなく、鋼材内外の冷却状況と變態状態とを睨み合はせて、熱應力と變態應力が最もよく打消し合ふ様に水冷或は空氣中取出時間を定むれば、殘留應力を最少ならしめ得る譯である。而して更にこの外材質の方から要求される焼入深度も考慮に入れれば、焼入深度は可成り深くして而も殘留應力を最少にする様な階段焼入法が存在する筈で、これは鋼種により夫々異なるであらうが、0.3% C 炭素鋼の場合には第1報と本報告とを照し合はせて、必要な階段焼入の時間を各々の場合に就て定め得る。

尚こゝで面白いのは 5s 間空氣中取出した物、15s 間空氣中取出した物、及び 50s 間空氣中取出した物の間に於ける 殘留應力分布曲線の形の相違に關する事で、第一の場合は中央に凹みがあるが、第三の場合には無く單純な山型である。而して 15s 間空氣中取出したものでは應力分布曲線の形も 5s 空氣中取出及び 50s 空氣中取出の時の中間を取つた様な形をしてゐる。この事は又 44mmφ 試験片に就て行つたこれと相似な階段焼入 4s 水冷-9s 空冷-再

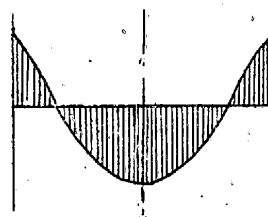


第6圖 階段焼入時に於ける試験片の溫度變化狀況

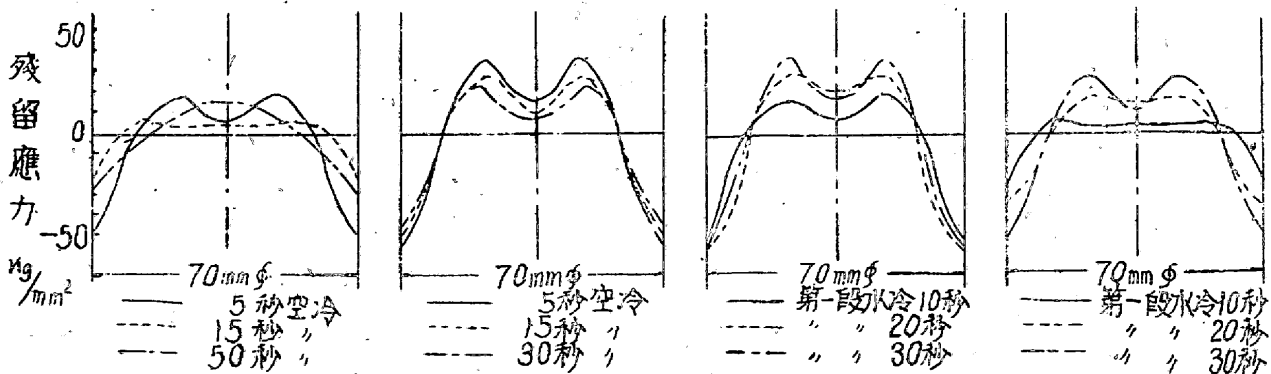
熱應力ノミノ場合



變態應力ノミノ場合



- (i) 第一段水冷10秒
- (ii) 第一段水冷30秒
- (iii) 空氣中引上5秒
- (iv) 空氣中引上15秒



第7圖 階段焼入各段階の時間が殘留應力分布に及ぼす影響

水冷及び、4s 水冷—30s 空冷—再水冷の場合にも全く同じ様に現れてゐる(第2報その2(V)参照)。この現象から想像される事は、残留応力曲線の中央の凹みは熱応力と反対の向きに生じた変態応力に依り惹起されるのではないかといふ事で、空冷50sの時の様に變態応力の加はつて来ないものでは凹みが出ない。又第2報その2に於ける第3—5圖からも明かな様に、變態応力の影響が大で残留応力の値が小さくなつてゐるもの程凹みが深くなつてゐる如くである。要するにこの凹みは焼入応力發生経過中に於て熱応力を打消す様に働いた變態応力の名残りと言へやう。

第7圖は階段焼入の際に於ける水冷又は空冷の時間が残留応力分布曲線の形の上に如何なる影響を及ぼすかを切線方向の例に就て見たもので、(i)及び(ii)は空气中取出時間の影響、(iii)及び(iv)は第一段水冷時間の影響である。圖の上方に比較の爲、熱応力又は變態応力のみによる残留応力分布曲線を原理的に圖示して置いた。(i)で見られる様に第一段水冷10sの場合には空气中取出時間の長短により分布曲線の形が著しく異つて来るが、第一段水冷30sの時には空气中引上時間に依り分布曲線の形が餘り影響されないのは、後者に於ては既に第一段水冷30s間の中に中心部分の變態が可成り進行して仕舞つて、最後の空冷により變態狀況が殆ど左右されない爲であらう。第一段水冷時間の影響では水冷時間の長いもの程凹みが深く、變態応力の利き方の著しい事を示してゐる。尤も水冷時間が長いと熱応力も大きくなるので、残留応力そのものとしては減少してゐない。

第2報(その1,その2)の總括

第1報に引續き階段焼入した時に生ずる残留応力を、炭素鋼試験片の例に就て報告した。

抑々階段焼入の主目的は焼割防止にある故、階段焼入によつて、どの程度焼入応力發生が軽減されるかは最も大切な問題である。我々は試験片の水焼入に際して、中心迄冷却しきる前に一寸空气中へ引上げて再び水冷するといふ階段焼入の内で最簡單な焼入法を、0.3% C 炭素鋼製徑70mm 試験片に就て行ひ、第一段水冷時間、空

氣中引上時間等を種々變へて、これが残留応力に及ぼす影響を調べて見た。

その結果第一段水冷時間の長い時には、一般に空气中引上時間が長くなる程焼戻効果に依つて残留応力は減少するが、第一段水冷時間が比較的短い時には必ずしも空气中引上時間を長くすれば残留応力が小さくなるとは限らず、或る適當な水冷時間及び空气中引上時間に於て残留応力の値を最小ならしめ得る事が判つた。

既に文獻にもある如く焼入応力は互に向きの反対な熱応力及び變態応力の組合はさつたものであるので、上の現象は空冷時間又は水冷時間を適當に加減する事により、熱応力及び變態応力をして互に相殺するに好都合の大きさ並に發生時期を得せしめ得べき事を示すものであらう。或は又逆にこの事實から焼入時の残留応力が熱応力並に變態応力の合成である事を確認し得る譯である(残留応力分布曲線の形の方面からこの點に一寸觸れて置いた)。尙試験片の徑を變へた場合互に相似な冷却状態を與へる様な階段焼入を施すと、残留応力の値も略等しくし得る事が實驗的に證明された。従つて前報の計算式及びこの結果を利用すれば、研究室で試験片に依り求められた残留応力最少となる可き階段焼入を、相似則の適用に依つて現場の大型鋼材の焼入に使用し得る譯である。

最後にこの研究の發表を許可された會社當局に對して謝意を表すると共に、専ら計算並に實驗に當られた當研究室の辻弘君に對し厚く感謝する次第である。

文 獻

- 1) H. Bühler u. E. Scheil: Arch. Eisenhüttenwes. 6 (1933), S. 283/88
- 2) H. Bühler u. E. Scheil: Arch. Eisenhüttenwes. 7 (1934), S. 359/63
- 3) H. Bühler, H. Buchholtz, u. E. H. Schulz: Arch. Eisenhüttenwes. 5 (1932), S. 414
- 4) H. Bühler u. E. Scheil: Arch. Eisenhüttenwes. 6 (1933), S. 285
- 5) 4) に同じ

二三の代用鋼の等温變態に就て

(日本鐵鋼協會第30回講演大會講演 昭18.10. 於大阪)

門 川 勳*・塚 本 成 之*

I 緒 言

1930年にE. S. Davenport and E. C. Bain¹⁾が等温變態速度曲線、即ちS-曲線を發表してから、鋼の冷却に際しての組織、或はその機械的性質等の研究には甚だ合理的な方法である事が認められ、各國でその研究が盛に行はれるに至つた。我國に於ても最近に至り等温變態に関する研究が多く發表せられる状態となつた²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。この時に當り、我國に於ては對米英戰爭は發展し、從來敵性國家に依存してゐた金屬資源は入手不能となりたる爲、それ等の資源を用ひず、少くとも大東亞共榮圏内に産する資源のみにて兵器その他の製造を遂行すべき事となり、ここに代用鋼を用ひ始めた。

即ちNi-Cr鋼の代用鋼としてCr-Mo鋼、或は更にMoを節約する目的を以てCr-Si-Mn鋼等を用ひてゐる。その組成を考へるに、代用鋼はCr-鋼に種々の元素を少量添加した鋼であり、Ni-Cr鋼はNi-鋼に他の元素を添加した鋼である故、種々の特性は全く異り、これ等代用鋼を處理し、或はその特性を改良する研究等には、それ等の鋼の特性を良く知る必要がある。これ等の特性を表示する方法として、上記のS曲線を以てすれば甚だ合理的である。依て著者等は現在用ひられつゝある代用鋼のS曲線を測定し、その特性を知ると同時に、その特性改良に資せんとした。

頁數の都合により實驗方法其他詳しき事を除き、單に實驗結果のみを報告する。

* 川崎重工業製鋼工場