

## 鋼の熱処理に関する二三の問題 I.

## 熱処理鋼に現れる割に就て

(日本鐵鋼協會第 15 回講演大會講演)

門 間 改 三\*

熱処理鋼に現れる割に大體三種類がある。第一は最もよく知られたる焼割、即鋼の焼入によつて生ずる割である、第二は削磨割と稱すべきもので、焼入鋼を削磨砥によつて研磨する場合に生ずる割で、又第三は高速度鋼等を焼戻す場合に、第二次硬度を得る如き温度範囲まで焼戻したるものに屢々現れることのある所謂焼戻割である。焼入操作によつて起る割たると、既に焼入を完了せる鋼に起る割たるとを問はず、夫等は總て製品を廢棄に歸せしむるのみならず、概ね工程の最後に起る現象であるから、其意味からも亦重大なる損失である。本研究は此等の割の個々の場合につき夫等の發生機構を明にし、併せてその防止法を研究したものである。

## I. 炭素鋼の焼割防止に関する研究

炭素鋼の焼入に関する研究は非常に多いが、夫等を大別すると、焼入硬化の機構を明にせんとするものと、實地に焼入を爲す場合に於ける技術的方面を取扱へるものとなる。後者に屬するものゝ内、如何にして焼割を防止すべきやは非常に重大な問題であるが、これに関する研究は比較的少く、特に決定的解決を與ふ可き研究は未だ見出されない。冷却劑として水を用ふれば焼割を生ずる、故に焼割防止の爲に油焼入が行はれて居るが、この場合には所謂トルースタイトを生じて、完全なる焼入を爲さんとする目的に對しては殆んど之に適しない。従て水と油との中間の冷却速度を有する冷却液の探索が行はれて居るが、この試みも亦成功の域に達して居ない。尙實際の焼入作業に於て、水に焼入れたる鋼を或時間後に大氣中に引出し、後更に温湯又は油中に投入して、トルースタイトの發生並びに焼割防止の目的を達して居るが、其結果は必ずしも満足なりと云ひ得ないのみならず、これを行ふには深き經驗と熟練とが必要で、一般的にこの方法に依ることは不可能である。よ

つて著者はトルースタイト並びに焼割を生ぜず、而も充分の硬度を得る如き焼入法を見出さんとし、次の如き方針により研究を試みた。

炭素鋼をオーステナイト状態より焼入すれば、冷却速度に應じてトルースタイト或はマルテンサイトとなるが、前者は  $Ar_1'$  (600~500°C)、後者は  $Ar_1''$  (200°C) に於て生成する、之に就き佐藤博士<sup>1)</sup> はその考案になる自記膨脹計を用ひて、巧妙にこの事實を證明せられて居る。斯の如くトルースタイトは比較的高温なる 600°~500°C に於て生ずるものであるから、其發生を防止するには此附近に於ける冷却速度を大にして、所謂  $Ar_1'$  變化を阻止すればよい譯である。次に焼割の生ずる主因が急激なる  $Ar_1''$  變化にあることは一般に信ぜらるゝ通であるが、著者も亦次の如き經驗を有する、即 2 種の試料を高温より急冷して  $Ar_1''$  よりも少しく高き温度に持來り、其一つは温湯又は油中に入れ、他は之を水中に投じたるに、前者には焼割は無く、後者にのみ割を生じた。此結果から見ると焼割の防止に對しては  $Ar_1''$  域の徐冷が必要である、而して斯る温度に於ける冷却速度の大小は硬度の上に殆んど無影響であることは特殊鋼に就き吾々の屢々經驗せる所である。即ち下に記述する著者の研究は總て斯る見地から出發して居る。

## 焼割を生ぜざる冷却劑の研究

(a) 水溶液浴 最も簡単に水と油との中間の冷却能を有するものを得んが爲に、水に他の物質を適當に溶解してその目的を達せんとする試みは非常に多い。<sup>2)3)4)</sup> 著者も先づ從來の研究に見らるゝ石鹼、珪酸曹達、グリセリン等の溶液を使用して見たが、其濃度の小なる間は焼割を防止し得ず、濃度高き場合に於ては、液の粘性大なる爲め試料の表面に生ずる氣泡の逸散困難となり、容易にトルースタイト

1) 佐藤清吉 東北帝大理科報告 20(1931)260

2) J. French; A. S. S. T. 17 (1930) 872

3) E. Hamill; B. of Stand. J. of Res. 7 (1931) 555

4) H. Scott; Scientific paper. B. of Stand. No. 513

\* 東北帝國大學金屬材料研究所

の發生を見た。

故に次には比較的低濃度の溶液を用ひ溫度を種々に變化して焼割の有無を検したが、液の溫度が大體  $80^{\circ}\text{C}$  以上ならば焼割を生ぜざることを知つた。但し此の條件の下に於てはトルースタイトの發生より免るゝ事を得なかつた。

これ等の事實より推せば吾々の目的に適す可き焼入液は相當に高温であり、併も氣泡の發生は小なる可く、其逸散は容易なる可しと云ふことになる。故に今度は食鹽、鹽化カルシウム、炭酸曹達等の如き極めて普通で水に對する溶解度の非常に大なる鹽類を探り、之等の濃厚溶液に就き實驗した、但し濃度を大としたのは水の蒸氣壓を低からしめんが爲である、又溫度は勿論適當に選んだ。併しその結果は前記のものと大差なかつた。

(b) 熔融鹽浴 焼割は冷却液の溫度を調節して防ぎ得るが、同時にトルースタイトの發生を止むることは困難であつた、故に次には水溶液の代りに  $65\% \text{KNO}_3 + 35\% \text{LiNO}_3$  の如き混合熔融鹽浴を試みた。夫は焼入時に於ける蒸氣の發生を出来る丈け少からしめんとしたのである。尙實驗時に於ける鹽浴の溫度は  $150^{\circ}\sim 200^{\circ}\text{C}$  であつた。この場合鹽浴の溫度につき一考を要するが、炭素鋼を急冷した時オーステナイトよりの變態は  $\text{Ar}_1'$  及  $\text{Ar}_1''$  域に於ては極めて速かに進行するが、その中間に於ける溫度範圍での變態速度は非常に小なるものである<sup>1)2)3)</sup>。従て若しこの鹽浴に依つて  $\text{Ar}_1'$  域の急冷にさえ成功すれば、夫れ以下の冷却に對しては、浴の溫度如何の如きは大なる問題であるまいと考へたのである。

實驗の結果に依るに、この場合トルースタイトの發生は比較的僅少に止り、浴の溫度低き時殊に然りであつた、然し浴の溫度が高まるに従ひマルテンサイトの地に黒色に焼戻されたる針狀晶が混在して居つた。

尙適當の溫度に保てる濃硫酸を冷却液として用ふれば、稍完全なる焼入を爲す事を得るが、勿論これは實用にはならない。

(c) 可熔合金浴 熔融鹽浴を用ひし場合の結果は稍良好であつたが、尙一步目的に達し得ないので、遂に可熔合金を選びこれを  $100^{\circ}\text{C}$  前後の溫度に保ち其中へ焼入を行ふ事にした。これは熔融金屬であるから熱傳導が良く、比重

が大である爲に試料との接觸が良い、又蒸氣の發生も極少いので、大體求むる焼入浴としての條件を具備して居る。試験の結果は果して良好であつた。故に此項については以下に稍詳細に述べる。

焼割の最も著しく現れるのは比較的含炭量高き鋼である故に試料としては  $0.7, 0.9, 1.1, 1.3\% \text{C}$  の瑞典鋼を選んだ、又其形狀は  $4.5 \times 30 \times 50 \text{mm}$ ,  $10 \times 30 \times 50 \text{mm}$ ,  $15 \times 30 \times 40 \text{mm}$  の3種とした。厚さ  $4.5 \text{mm}$  のものには焼入後研磨に際して取付けに都合よき様に兩端に孔を作り又厚さ  $10 \text{mm}$  及  $15 \text{mm}$  のものには焼入の場合針金を附する爲に一端に小孔を穿つた。又之等の孔は容易に焼割の生ずる原因ともなるであらうから、種々の冷却液の効果を比較するにも便であると考へた。斯様に仕上げられた試料には焼入前豫め真空中にて充分に焼鈍を與へて置いた。

焼入溫度は  $\text{Ar}_1$  以上凡そ  $900^{\circ}\text{C}$  迄種々に變化した、その加熱は勿論真空爐中にて行ひ、焼入溫度に保つこと 15 分の後、一組の試料は常溫の水へ、他の一組は  $110^{\circ}\text{C}$  の一定溫度に保たれたる可熔合金浴中に挿入して急冷を行つた。使用せる可熔合金は  $\text{Bi} 52\%, \text{Cd} 8\%, \text{Pb} 40\%$  のものであつた、そしてこの合金中へ焼入れた場合は急激に攪拌しつゝ約 5 分間その内に保ち、試片が大體浴と同溫度に下つて後浴より取出し、或は大氣中に於て、或は布片の如きものにて保護し徐々に冷却し乍ら充分にマルテンサイト化を行はしめた。第 1, 2, 3 圖に示す寫眞は斯くして得たる試料の肉眼的寫眞である。第 1 圖は厚さ  $4.5 \text{mm}$  の試材に就ての結果で、この中  $a_w, b_w, \dots e_w$  は夫々  $780^{\circ}\text{C}, 805^{\circ}\text{C}, 830^{\circ}\text{C}, 855^{\circ}\text{C}, 900^{\circ}\text{C}$  より水中に焼入れたもの、又  $a_m, b_m, \dots e_m$  は同様の溫度から可熔合金浴中へ焼入れたものである。此種の試料は  $780^{\circ}\text{C}$  以上の溫度より焼入れられた時總てマルテンサイト組織を有し、トルースタイトは顯微鏡的にも發見されない。

第 2 圖の寫眞は厚さ  $10 \text{mm}$  の試料の結果で、 $a_w, b_w, \dots e_w$  及び  $a_m, b_m, \dots e_m$  は  $790^{\circ}\text{C}, 820^{\circ}\text{C}, 850^{\circ}\text{C}, 875^{\circ}\text{C}, 900^{\circ}\text{C}$  より夫々水及び合金浴中へ焼入れたものである。此場合に  $760^{\circ}\text{C}$  より合金浴中へ焼入せるものには多量のトルースタイトを認めるが、それ以外のものは總てマルテンサイトのみ組織を有して居る。

第 3 圖の寫眞は厚さ  $15 \text{mm}$  の試料を同様に扱へる場合の結果で、水及合金の兩浴共に焼入溫度が  $830^{\circ}\text{C}$  以下の時にはトルースタイトを伴つて來る、然し焼入溫度が夫以上

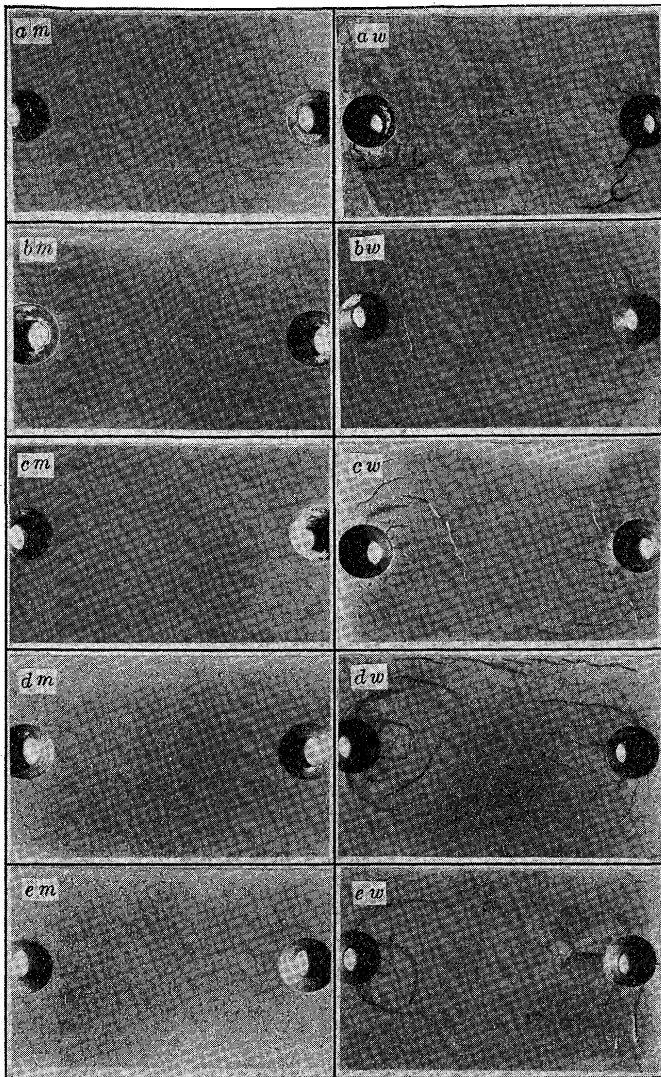
1) 本多、菊田、金屬の研究 1( )453

2) H. Hanemann u. H. J. Wiester; Archiv E. H. W. 5(1931~2)377

3) S. Steinberg; Archiv E. H. W. 5(1931~2)383

第 1 圖

試料=0.9% C 鋼、厚さ 4.5 mm



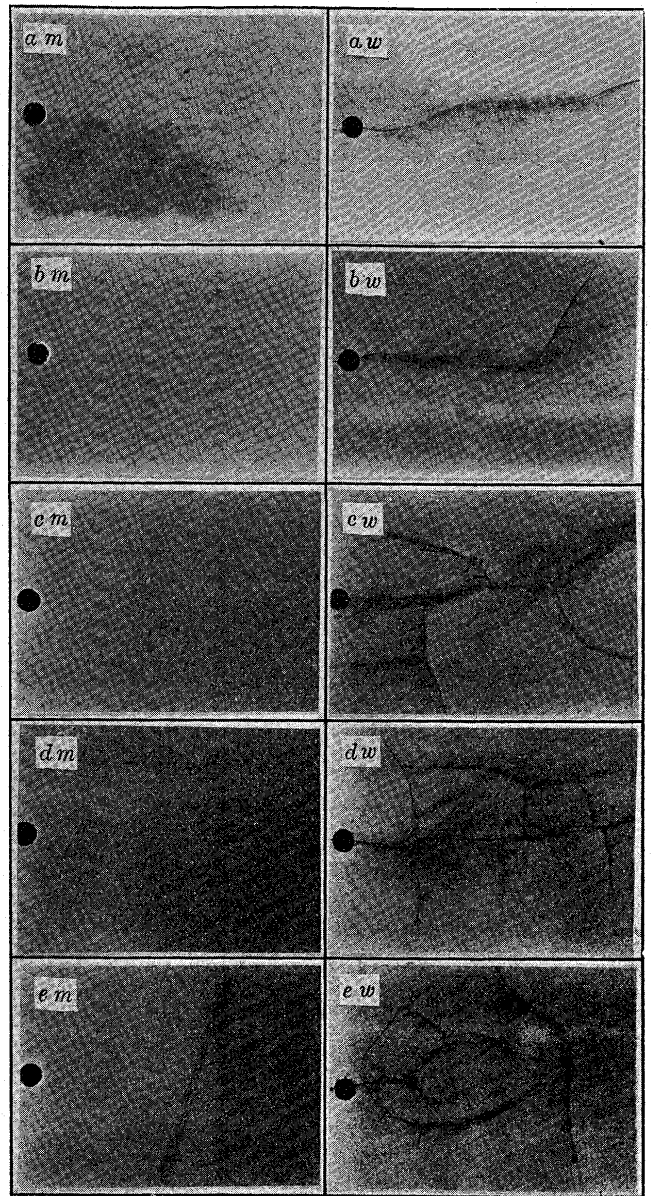
|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| am 780°C より 110°C の合金浴へ焼入 | aw 780°C より 常温の水の中へ焼入 |
| bm 805°     "     "       | bw 805°     "     "   |
| cm 830°     "     "       | cw 830°     "     "   |
| dm 855°     "     "       | dw 855°     "     "   |
| em 900°     "     "       | ew 900°     "     "   |

であればトルースタイトは認められない。

第 4 圖の寫眞は焼入後の顯微鏡組織の例として 0.7% C 鋼、厚さ 4.5 mm の試料を各温度より焼入れたる場合を挙げたもので aw, bw, cw, dw 及び am, bm, cm, dm は夫々 780°C, 830°C, 860°C, 885°C より水及び合金浴中へ焼入れたものである。寫眞に見ゆる如く之等は總てマルテンサイト組織を有するが、合金浴中へ焼入れたるものは浴槽の温度が高い (110°C) 爲にβ-マルテンサイトとなつて居り、水焼入の場合に比し多少腐蝕が早い。

第 2 圖

試料=0.9% C, 厚さ 10 mm

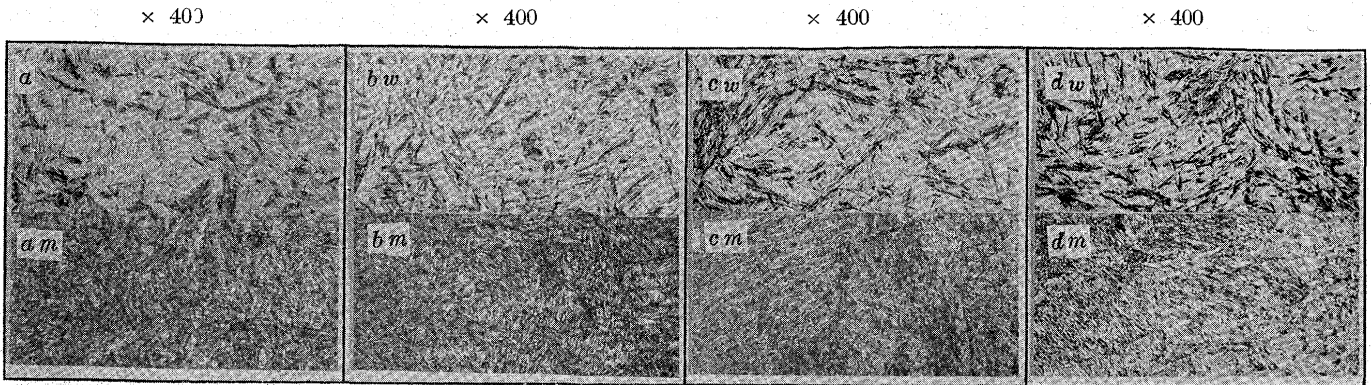


|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| am 790°C より 110°C の合金浴へ焼入 | aw 790°C より 常温の水の中へ焼入 |
| bm 820°     "     "       | bw 820°     "     "   |
| cm 850°     "     "       | cw 850°     "     "   |
| dm 875°     "     "       | dw 875°     "     "   |
| em 900°     "     "       | ew 900°     "     "   |

これ等の試料の焼割に就ては、又夫々の寫眞に見ゆる如く、各厚さの場合を通じて水焼入せるものには多數の焼割を認むるが、合金浴中へ焼入れたものには全然焼割を生じて居ない。

第 5 圖(A)は炭素量は 0.9% の一定にとり、厚さを 4.5 mm 10 mm 及び 15 mm に變へて水及合金浴中へ焼入せる場合の焼入温度と硬度との關係である。これに依ると試料の厚さ大にして、焼入温度低き時は水中に焼入れたものよりも合金浴中へ焼入れたものの方が硬度が低い。然るに焼

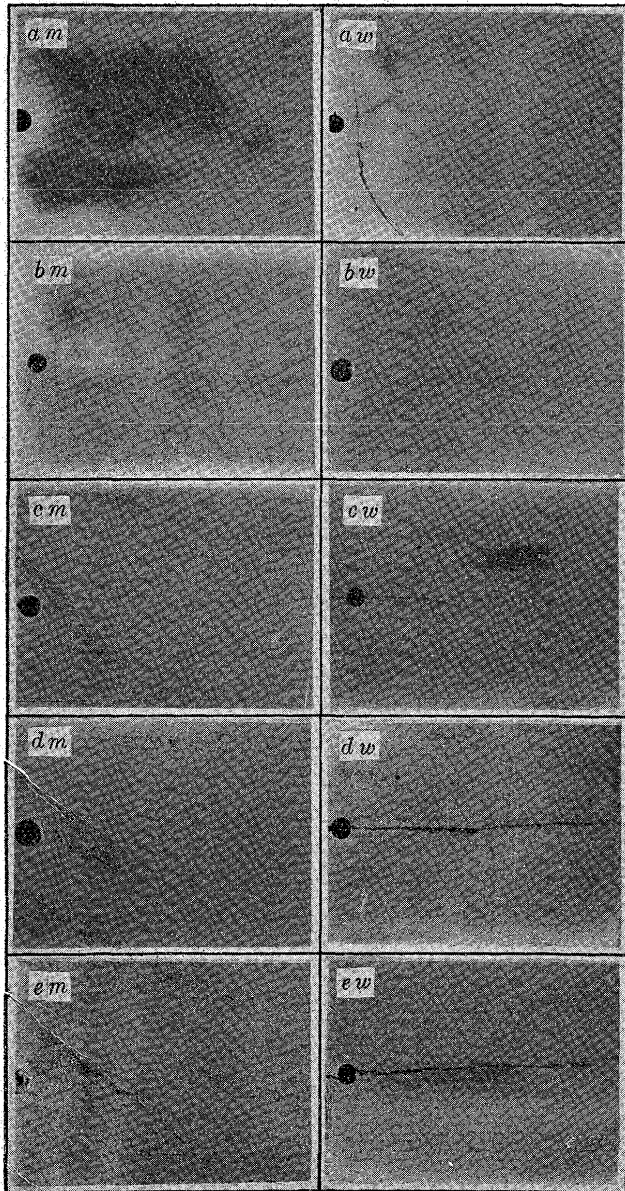
第 4 圖 試料 0.7% C 鋼



aw 780°C bw 830°C cw 860°C dw 885°C より常溫の水へ焼入  
 am 780°C bm 830°C cm 860°C dm 885°C より110°Cの合金浴へ焼入

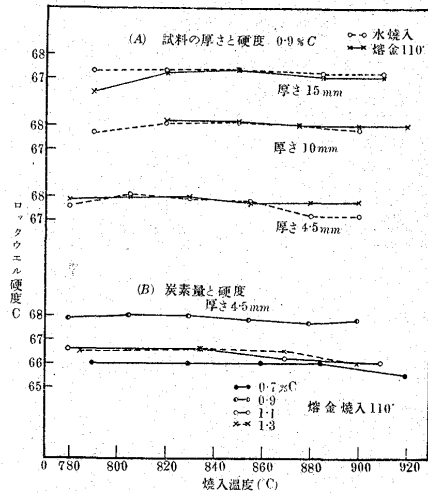
第 3 圖

試料=0.9% C 鋼、厚さ 15 mm

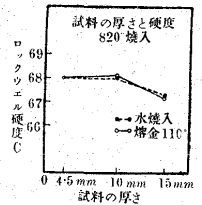


am 790°C bm 830° cm 860° aw 790°C bw 820° cw 850°  
 dm 885° em 910° dw 875° ew 900°  
 以上を110°Cの合金浴へ焼入 以上を常溫の水の中へ焼入

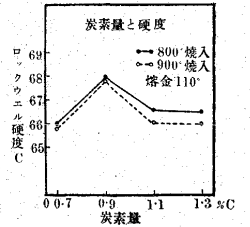
第 5 圖



第 6 圖 (A)



第 6 圖 (B)



入温度を高める時及び試料の厚さが比較的小なる場合には、水及び合金浴中に焼入れたものゝ間に全く硬度上の差異を認むることが出来ない。是等の事は水焼入と油焼入との關係に似て居る。而して試料の厚さ小にして焼入温度高き場合には水焼入の方が硬度が低い。これは水焼入の場合には多數の焼割を生ずる爲に見掛上硬度が低いのと、残留オーステナイトの多量を生じたことに因るのであらう。

第 6 圖(A) は第 5 圖(A) の 820°C に於ける断面で、試料の厚さと硬度との關係が見られる。曲線の傾向は水浴を使用せる場合と、合金浴を用ひたる場合と全く同一で、試料の厚さ小なる時は硬度高く、厚さ大なる時は硬度は稍低い。

第 5 圖(B) は試料の厚さを 4.5 mm に一定し、炭素量を 0.7% より 1.3% まで變化して、合金浴中へ焼入れたる場合の焼入温度と硬度との關係で、第 6 圖(B) は同じ試料につき焼入温度を 800°C 及 900°C に一定した場合の硬度と炭素量との關係を示したものである。この結果に依る

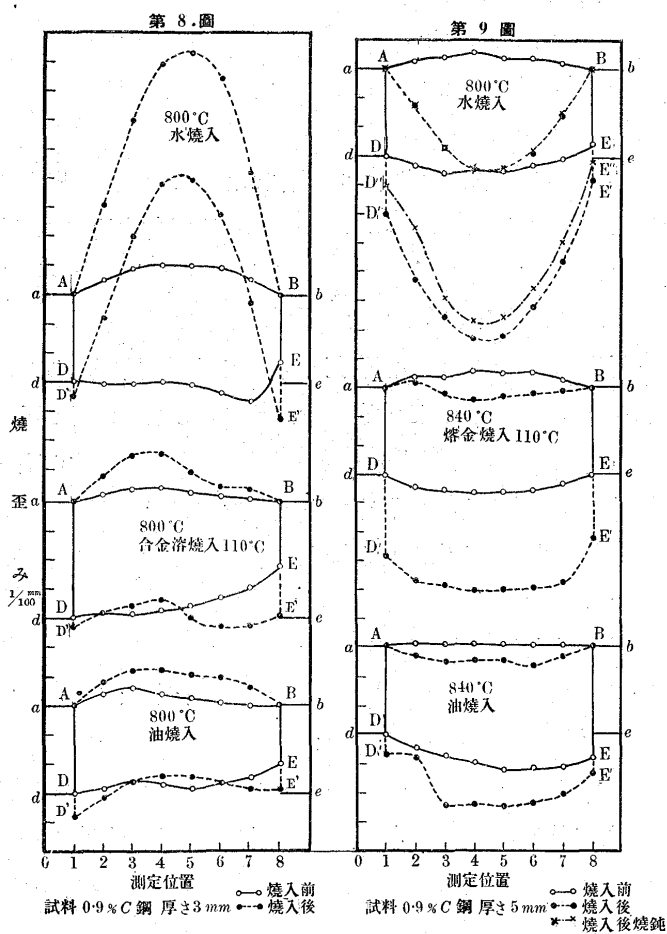
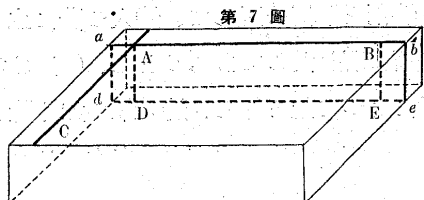
と、合金浴を用ひて焼入れしたる場合の硬度は、鋼の含炭量 0.9% 附近で最も高く、炭素量が夫よりも大なるか又は小なる場合却て硬度が低い。この事は水焼入れに於けると大體同様の關係になつてゐる。

次に含炭量 0.9% の鋼をとり、 $3 \times 15 \times 30$  mm 及び  $5 \times 15 \times 30$  mm の試料に仕上げ、適當の溫度より水、油及び合

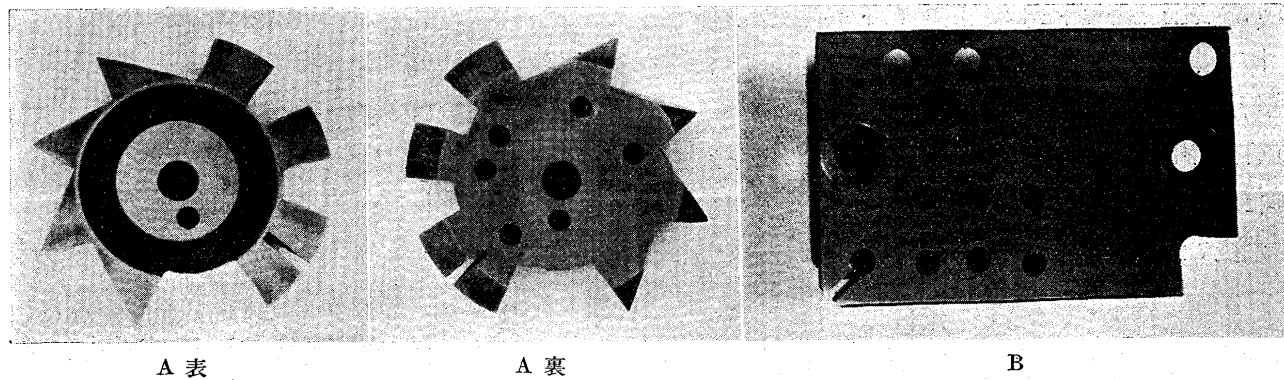
金浴中へ焼入れして、これ等 3 種の冷却劑による焼歪を比較研究した。測定の方法は第 7 圖に於ける如く試料の一面上の三點 ABC を含む平面及び反對側の面上に於ける一點 D を通り之に平行なる面を考へ、此の兩平面に對して試料面上の各點が幾何の距離にあるかを測定するのである。實際には ABDE の如き ABC 面に直角なる斷面上の各點に於て測定を行ひ、斷面の形を決定し、而して焼入の前と後との結果を比較して焼歪を見たのである。

第 8 圖は厚さ 3 mm の試料を總て 800°C より夫々の冷却劑中に焼入れたる結果を示すものであり、第 9 圖は厚さ 5 mm の試料につき 800°C より水焼入れのものゝ 840°C より油及び合金浴中へ焼入れたるものを比較例示したものである。但し一つの試料に就ては前記各斷面の形は大體一致して居るので、此處には單に ABDE 面についての結果のみを擧げた。圖に於て矩形 abde は試料の豫定の斷面であり、實線 ABDE は焼入前の試料面を平滑ならしめる爲め、研磨したる後測定せる結果で、點線 ABD'E' は焼入後の測定結果である。而して試料の斷面は餘り擴大せず、豫定の大きさよりの變異のみを 1/100 mm の單位にて測定し、夫を圖の如く擴大して現したものである。

この結果によると、試料は總て焼入前 5/1,000 mm 程度の不規則さを有して居たが、焼入後に於ける變形は水浴の場合に最も大きくして 5/100~1/10 mm 程度に及び、油浴の場合は最も小にして 1/100~2/100 mm 程度である。而して合金浴の場合は寧ろ油浴の夫に近いが變形の度は明に兩者の中間で、著者の目的とする水と油との中間冷却速度を目標とせる事によく一致する。勿論焼歪は試料の形狀、焼入溫度及び冷却劑が一定しても常に一定の歪を生ずるとは限らないから、之等の例のみでは直ちに合金浴中への焼入が焼歪を生ずることが少いとは結論出來ないが、著者の多數の測定結果を綜合すると、合金浴中への焼入によつて



第 10 圖 試料 0.9% C 鋼 950°C より 110°C の合金浴中へ焼入



A 表

A 裏

B

は餘り大なる歪を生じない。又第9圖水焼入の試料に示す如く、焼入試料を焼鈍せる結果その形状は焼入状態と全く相似で、僅かに厚さの収縮を來して居るに過ぎない。この事實並びに焼入後の變形が水浴の場合に最大である事を併せ考ふる時は圖に見ゆる如き焼歪は焼入の途中に起る粘性變形が主なる原因で、マルテンサイト化の不均一に因つて起る形状變形は餘り關係して居ない様である。

以上の結果から合金浴を用ふると焼割を生ずることなく、焼歪も小であることを知つた。そこで最後に第10圖の寫眞に示せる如く0.9% C 鋼をとり、部分によつて厚さを變化し又所々に孔又は切込を附したる極めて複雑なる形状の試料を作り、これを950°Cの高温より110°Cの合金浴中へ焼入したが、全然焼割を生ぜず、又肉眼的に見て何等の變形をも來さなかつた。而してその試料の先端は硝子を傷くるに充分の硬度を有して居た。

**結 論** 本章の研究事項を總括すれば次の如し。

(1) 炭素鋼を用ひてトルースタイトも焼割も生じない焼入を行ふ爲には、トルースタイト化範圍(Ar')に於ける冷却能が大にして、マルテンサイト化範圍(Ar'')の冷却能の極めて小なる冷却剤を用ふればよい。

(2) トルースタイト化範圍の冷却が遅くて相當にトルースタイトを生じたものも、マルテンサイト化範圍を急冷すれば割を生ずる。

(3) 焼入液の温度を80°~90°C以上に保てばマルテンサイト化範圍の冷却速度は小となるから割は生じない。

(4) 種々の鹽類その他のもの、濃厚なる水溶液を用ひて、蒸氣壓を小ならしめ、液の温度を高めて焼入浴として試みたが、斯る液は粘性が大で焼入試料の表面に生ずる氣泡の逸散を困難ならしめトルースタイトを生ずることが多い。

(5) 熔融鹽は焼入浴として稍好結果を與へるが、多少マルテンサイトの焼戻せられて腐蝕の際黒く着色せられる針狀結晶を生ずる。

(6) 可熔合金を焼入浴として用ふればトルースタイトの發生を防止し得、硬度は水焼入の場合と殆んど變化なく、然も絶対に焼割を生じない。

(7) 合金浴中へ焼入れたものの焼歪は水焼入の場合よりも遙かに小で、大體油焼入の場合と同じか又は夫よりも稍大なる程度である。

## II. 焼入炭素鋼に生ずる削磨割に就て

焼入鋼の加工又は仕上げは専ら削磨機(grinder)による以外方法がないが、此場合屢々製品の表面に無数の龜裂を生ずる、これを削磨割(grinding crack)と呼ぶ。削磨割に關しては從來大體次の様な見解が下されて居る、即ち(a)は削磨割と焼割とを同一視して、焼入の際に生じた割が削磨の爲に表面に現れたのであらうとし、(b)は削磨の際の機械的衝激によつて起るとし、焼入鋼の如く脆きもので然も焼入によつて相當程度の内應力の存在するものは削磨の際に割を生ずるのが當然であると説き<sup>1)</sup>、又(c)は摩擦熱による試片の部分的過熱がその原因であるとする<sup>2)3)4)</sup>。但しその部分的過熱が如何にして試片に割を生ぜしむるに至るかは説明してゐない。而してその防止法としては削磨砥の適當なる選擇と、適當なる操作によつてのみ之を防ぎ得るとして居る。又G. R. Brophy<sup>5)</sup>は削磨前試料の硬度がロックウエル“c”で60前後となる迄焼戻すことによつてそれを防止し得ると述べてゐる。

以上の如く焼入鋼の削磨割は甚だ重要な問題であるがため種々なる研究又は考察が行はれてゐるが、目下の所では割を生ずる原因は明瞭となつて居らず従てその防止法にも適當なるものがない状態である。故に著者は最も普通で且つ基本的なりと考ふ可き焼入炭素鋼に就て本問題を研究した。

**削磨割防止に關する研究** 試料は總て0.9% Cの瑞典炭素鋼を用ひ、後に寫眞に示す如く、5×30×50mmの矩形を作り、その一端に約10×10mmの凸起を附し、中央に孔を穿ちて焼入の際に針金を附するに用ひた、凸起の肩の所には圓味を付けて其所より焼割の發生する危険を避けた。斯くして製作せる試料は眞空爐中にて850°Cに30分間焼鈍したる後徐冷した。

焼入温度は810°C及び795°とし眞空中にて加熱した、試料がその温度に達してより10分間保持せる後手早く室温の水中に挿入して焼入を行つた。焼入温度を斯の如く選んだのは出来る丈焼割を避け、後に焼割と削磨割との混同を無からしめんとしたのである。

<sup>1)</sup> J. P. Gill & H. G. Johnston; A. S. S. T. Vol 21(1933)354

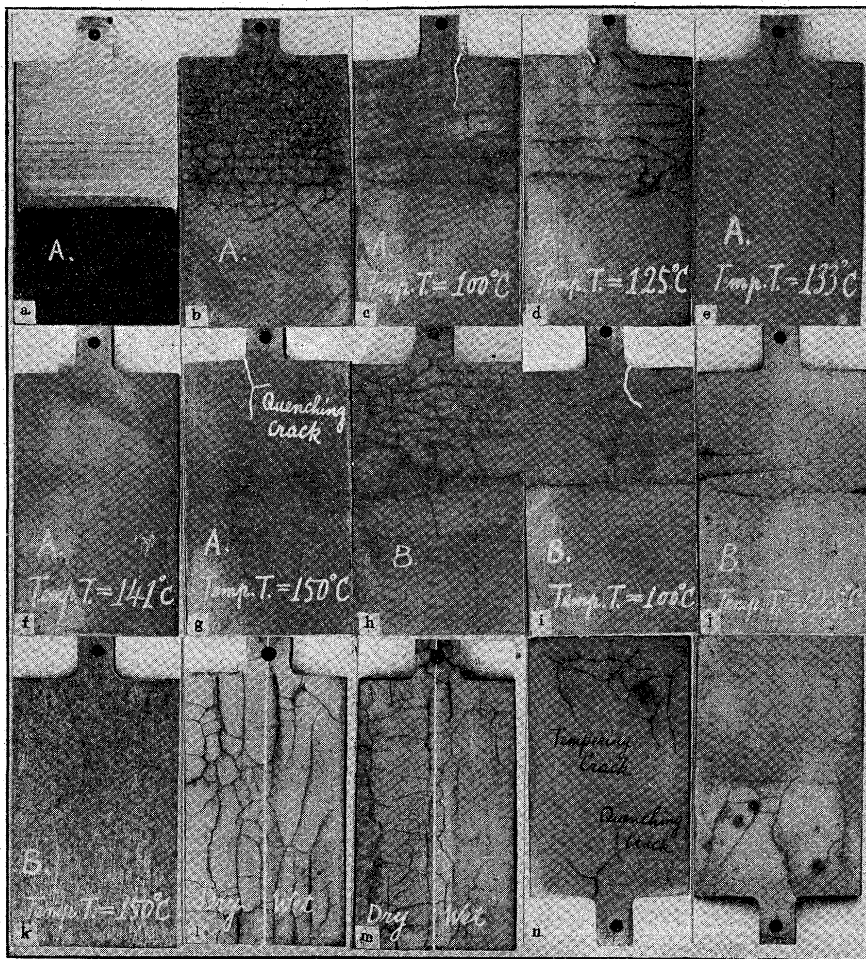
<sup>2)</sup> G. R. Brophy; A. S. S. T. 18 (1930) 423

<sup>3)</sup> C. E. Sweetser; Heat Treating and Forging (1931) 776

<sup>4)</sup> A. M. Steever; Metall Progress 27 (1935) 52

<sup>5)</sup> G. R. Brophy; <sup>2)</sup> に同じ

第 11 圖 試料 0.9% C 鋼、厚さ 5 mm A; 810°C 水焼入 B; 795°C 水焼入



斯くして焼入れたる試料を焼入のまま及び種々の温度に油中にて 30 分間焼戻を行ひ徐冷した後、極めて軽く削磨機に掛けて表面の半分を 0.5 mm~1mm 程度削磨した。削磨後同試料を再び真空爐中に入れて極めて徐々に 800°C 迄焼戻を行ひ、然る後に表面の残部を同じく削磨し去りて前の半分と同一平面になる様にした。この場合焼鈍を行つたのは、この部分に削磨割の發生を防がんと爲である。斯くして全面を削りたるものを顯微鏡試料と同様に研磨した後 5% HNO<sub>3</sub> のアルコール溶液にて腐蝕して割目を明瞭に顯し然る後に寫眞の撮影を行つた。

第 11 圖の寫眞に於て、(a) は 810°C より焼入れたる試料の表面上半を削磨せる狀況を示したもので、他の場合も總て同程度の削磨を行つた。(b) は (a) の状態に削磨したる後 800°C に焼戻して又下半分を削磨し研磨せるもので、上半には無数の網目状龜裂を生じてゐる、これを焼割に比較すれば様様が明かに異つてゐる。又下半即焼鈍後削磨せる部分には斯る割は全く存在しない、従てこの龜裂が削磨割なることは明かである。

寫眞 (c)(d)(e)(f)(g) は總て 810°C に焼入れたるものを種々の温度に焼戻して同様の試験を行へる試料中より二三の場合を探つて掲げたものである。この結果から見ると 133°C 以下の焼戻試料には何れも削磨によつて龜裂を生じてゐるが 141°C 以上の焼戻試料には全く割の發生が認められない。

寫眞 (h)(i)(j)(k) は 795°C より焼入れたる一例の試料で、(h) は焼入のまま、他は夫々 100°~150°C に焼戻したものである。この結果も亦前の場合に於けると同様で 125°C 以下の焼戻では龜裂を生ずるが、150°以上に焼戻せらるれば龜裂を生ぜざることが知らるゝ。

次に寫眞 (l)(m) は夫々 795°C 及 810°C より焼入れたる試料に就き、左半分は普通に右半分は充分に水を注ぎながら削磨して、所謂乾式或は濕式の削磨を行ひその結果を比較研究せしものゝ例である。單にこの二例のみでは

何等の結論をも導き得ないが、著者の行つた其他の實驗結果から判斷するに、削磨の際相當多量の水を用ふるとも龜裂の防止に關しては顯著なる効果はない、然し濕式を乾式に比すれば多少割の数が少いかと思はれる程度のものである。

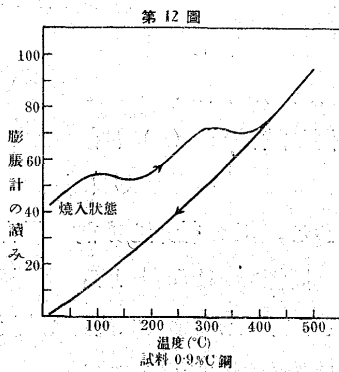
**實驗結果の考察** 以上の實驗結果から焼入せる炭素鋼は軽度の削磨に因つても龜裂を生ずる、然るに削磨前 150°C 附近まで焼戻を行つて置けば割を防止し得ることを知つたが、この事實は如何にして説明することが出来るか。

先づ從來龜裂の原因として考へられてゐる削磨による試料面の部分的過熱、試料に内在する應力、又は焼入鋼の脆性等を探つて之を吟味して見るに、焼入炭素鋼を 150°C 前後に焼戻す場合硬度は焼戻前と略同様である、然らば削磨の際に生ずる發熱量も同様であらうし、試料の熱傳導度も非常に變化したとは考へられない。又硬度が殆んど同様である時衝擊抵抗などもそれ程増加するとは思はれない<sup>1)</sup>。斯る理由で從來の考丈では現在の事實を充分に説明するこ

<sup>1)</sup> 田丸、金屬の研究 6(1929) 講 591

とが出来ない様である。

故に原因を他に求めて、焼入炭素鋼を 150°C 前後に焼戻しする時、この場合の現象を説明し得る如き何等かの大きな變化は起らぬかを考ふるに、丁度これに相當して $\alpha$ -マルテンサイトより $\beta$ -マルテンサイトへの變化が起る。即第12圖に見ゆる如く普通この變化は 120°C 附近より始



り、約 170°C 邊で終る、而も $\alpha$ より $\beta$ に變化するに連れて大なる體積の收縮を伴ふものである。今試料の表面を考ふるに削磨さるる部分には摩擦の爲に相當量の熱が発生する筈である、然るに本實驗の如く削磨が極めて輕き場合には、その

熱量は比較的少く、削磨面の温度の上昇は極めて僅少であるらしい、この事柄は削磨後の鏡檢に依て證明することが出来る。故に削磨されたる面は摩擦熱の爲に $\alpha \rightarrow \beta$ マルテンサイトの變化をなすが、これは極めて薄き表面層のみで、内部は依然として $\alpha$ -マルテンサイトとして残る。即摩擦熱による焼戻により薄き表面層は體積の小なる $\beta$ -マルテンサイトとなり而も内部に於ける體積の大なる $\alpha$ -マルテンサイトを蔽はねばならない。従て表面層は内部より大なる張力を受けることになるが、 $\beta$ -マルテンサイトは延伸率の極めて小なるものであるから、この張力に伴ひ變形し得ず遂に龜裂を生ずるに至るのであらうと考へられる、それは恰も乾燥收縮に因つて粘土の表面に龜裂を生ずると同じ理由に基けるもので寫眞に見ゆる削磨割の模様も亦この見地に合する様に思はれる。

而して 150°C 以上に焼戻されたる試料は内部まで既に $\beta$ -マルテンサイトとなつてゐるから、この場合には上に考へた如き張力は作用しない、従て削磨に依り龜裂を生じないのも亦當然である。又前章に記述したる熔融合金浴へ焼入せられたる試料も其組織は概ね $\beta$ -マルテンサイトであるので削磨に依り殆んど割を生ずる事がない。

上述の考を更に確めん爲に次の如き實驗を行つた。試料は前同様 795°C より水焼入せるものを探り、これを先づ鏡檢に用ゆる如く研磨し置き、表面に充分の水を注ぎつゝ、瞬間的に酸素-アセチレン焰を靜かに當てて、焰の壓力を以て表面の流水層を押退けて試料面を焼戻して見た。斯く注

意深く三四回焰を當てると、試料面の各所に龜裂が発生し進行するのを認めることが出来る、但しこの場合流水層の存在の爲めに表面のみ僅かに温度の上昇を來すが、内部まで温度の上昇することはない。寫眞 (n) (o) は斯くして割を生じたる試料を普通の鏡檢程度に腐蝕したものである。これ等の寫眞に見ゆる黒點は焰の稍強く當つたがため焼戻の進だ所で、鏡檢によるとその組織はトルースタイトに近いそして割の發生してゐる表面の大部分は明に $\beta$ -マルテンサイトとなつてゐる。此試驗では機械的衝擊は少しも存在せず、割の原因は全く表面層の焼戻變化に基因するもので、よく著者の説に一致する。尙上の場合に試料面を豫め研磨する時石油を注ぎながら充分注意して磨くことが肝要で、強く砂紙に當て發熱するが如き事あらば試料面は焼戻されて $\beta$ -マルテンサイトとなり、この焼戻組織が自然に内部に進んでゐるので、後に焰に依り焼戻を行ふとも鮮かなる龜裂の發生を見ることが出来ない。

高速度鋼その他の特殊鋼に削磨を行ふ場合、矢張り類似の龜裂を生ずることがあり、これに關する研究も發表せられてゐる<sup>1)</sup>。然し此等は一般に可成に強度に削磨を行ふ時に見らるゝ割であつて、著者も高速度鋼に就て實驗を行つたが、前述の實驗に於て行へる程度又は夫よりも遙かに強度の削磨を與ふるも龜裂を生じなかつた、又後章に於て述べる如く、焼入せる高速度鋼には $\alpha \rightarrow \beta$ マルテンサイトに相當する如き體積變化が認められない、従て著者の唯今論ずる如き龜裂は當然生じない。勿論特殊鋼に於ける上述の如き割は著者も亦認めるものではあるが、それは炭素鋼を極めて輕度に削磨する場合の割とは全く別の機構に屬するものであると考へられる。

結 論 本實驗により知り得たことを總括すれば次の如し。

(1) 焼入炭素鋼に起る削磨割は削磨による發熱のため、鋼の表面が $\alpha$ -マルテンサイトより $\beta$ -マルテンサイトに變化し體積の收縮を來すのがその原因で、全く組織上の變化に因るものである。

(2) 従て試料の表面のみを加熱して焼戻を行つても同様の龜裂を生ぜしめることが出来る。

(3) 削磨割を防止するには削磨の方法に注意することは勿論であるが、削磨を行ふ前に豫め $\alpha$ - $\beta$ マルテンサイト變化を起さしめて置けばよい、即約 150°C 以上に焼戻せられたるものは問題の龜裂を生じない。

<sup>1)</sup> C. E. Sweetser; Heat Treating and Forging (1931) 776



(4) 乾式削磨と濕式削磨とを比較するに焼入炭素鋼では大なる差を認むる事が出来ない、多少濕式削磨の方が優れてゐる様に見ゆる程度である、何れによるも豫め焼戻を行つて置くことが必要である。

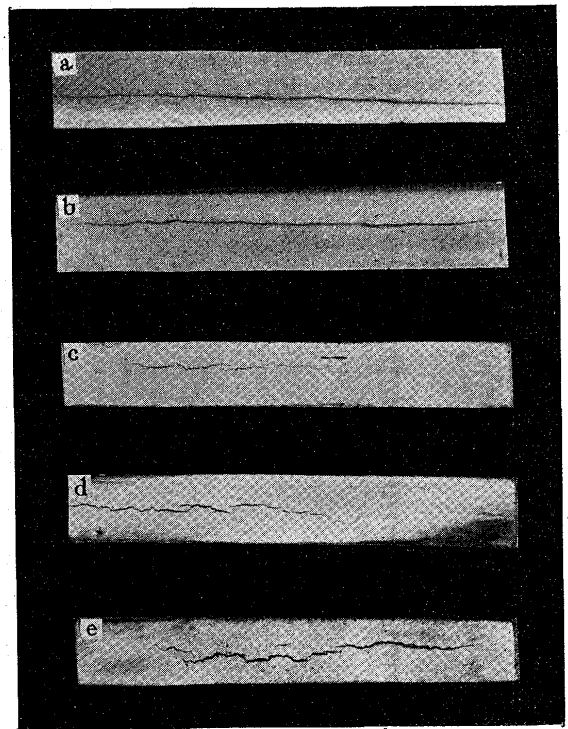
### III. 高速度鋼の焼戻割に就て

著者は前二章に於て炭素鋼の焼割及び削磨割に關する問題を取扱つたが同様の事實が高速度鋼の如き特殊鋼にも存在することは一般に知られてゐる。併し著者の見る所では高速度鋼の如きは焼入後可成に多量の残留オーステナイトを有するものであるから、炭素鋼の如く容易に焼割を生ぜぬであらう、又焼入せる高速度鋼は低溫度に焼戻されたる場合炭素鋼の如き體積變化を生じないから、著者が焼入炭素鋼において爲したる程度の削磨では決して龜裂を生じないであらうと考へられる。而して試験の結果は果して然りで、炭素鋼と同様に取扱つた場合高速度鋼には決して焼割乃至削磨割を生じなかつた。然るに高速度鋼に於ては次に述べるが如く熱處理により別種の割を生ずる事實を経験したので、茲に其原因と對策に就て研究した。

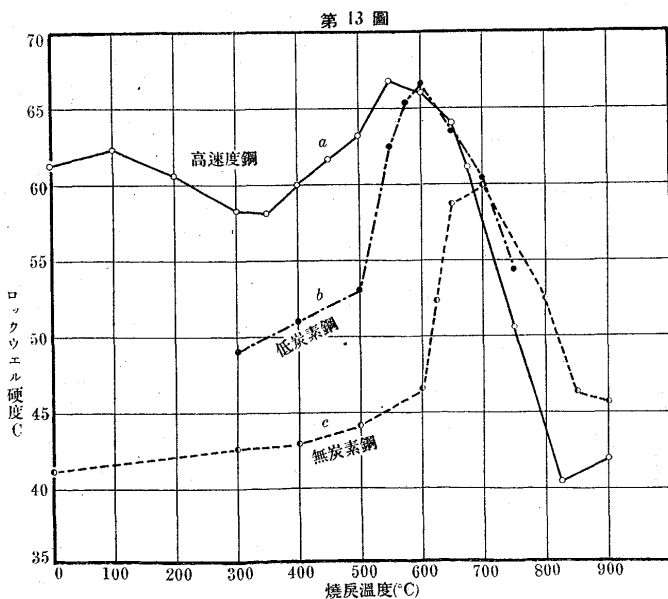
高速度鋼は一般に約 1,300°C より焼入を行ひ、これを 550°C 乃至 600°C に焼戻して用ふるが、この焼戻によつて硬度を増加し所謂第二次硬度を呈する。著者もその組成 0.56% C, 19.66% W, 4.6% Cr 7.1% Co, 殘餘鐵なる高速度鋼を用ひ 1,300°C より油中に焼入し、油又は眞空

°C 附近より先づ減少を始め 300~400°C の邊に至つて極小を示すが、より以上の焼戻溫度に於ては反對に上昇に變化し 550°C 附近に於て極大となり、次には次第に降下する、そして此場合の極大は焼入状態の硬度に比して餘程高い。この實驗に於て、硬度を測定すべき試料面は、脱炭などの影響を除く爲に焼入後約 1~2mm 削磨し去つて置いた、この様に用意した試料には何れの面にも勿論龜裂等は

第 14 圖 試料 高速度鋼



- a: 1,300°C 油焼入 550°C 焼戻
- b: " " " 600°C 焼戻
- c: 1,300°C より 500°C の熔融錫浴へ焼入  
1,300°C " 500°C の熔融錫浴へ入
- d: " 550°C "
- e: " 600°C "



爐中にて種々の溫度に 30 分間宛の焼戻を行つた、この時に得たる硬度—焼戻溫度曲線は第 13 圖曲線 (a) である。この結果は概ね豫期せらるゝ通りで、硬度は焼戻溫度 100

生じてゐなかつた。而してこれを焼戻して行くに、低溫の場合は外見上何等の變化も起らないが、硬度の極大を示す可き 550°C 或は夫以上 650°C 附近の溫度範圍に於て試料面に第 14 圖 (a), (b) に示す如き割を生ずることがある然もこの割の發生するのは焼入後削磨を行はなかつた面に限られる。焼戻の溫度がこの範圍を超ゆる時、即常溫より加熱して行きて 550°C 乃至 650°C を通過して、より高き溫度まで焼戻されたる場合には又この割は發生しない。便宜のため斯くして生ずる割を焼戻割と名づけて置かう。

**焼戻割の原因に關する研究** 焼入せる高速度鋼を焼戻すれば、残留オーステナイトがマルテンサイトに變化する、

この事が焼戻割の原因であるかも知れない、然し焼戻を行ふ場合の加熱冷却は油中又は爐中に於て極めて徐々に爲されてゐるのであるから、割の生ずる機構は急冷に依つて炭素鋼を焼入する場合と全然異なるものでなければならぬ。又焼入の際の熱的歪力の如きものが焼戻割に關與するかも知れない、若し然りとすれば焼入を油中に行はずに、高温浴中に行ひ、出来る丈熱歪を少なからしむる様にすればよい譯である、所が結果は次の如く全く豫期に反したものとなる。

1,300°Cに加熱せられた試料を種々の温度の熔融金屬浴中へ焼入し、その中に5分間保持せる後取出して空中冷却を行ひしに、焼入浴の温度低き間は何等の割を生じなかつたが、浴の温度高き場合に却て割を生じた、第14圖の寫眞(c)(d)(e)は此等の試料中550°, 550'及び600°Cの浴中に焼入せられて焼割を生じたものの例である。これは炭素鋼に於けると全く反對の事實で、比較的低温に於ける冷却速度を緩慢にすると却て割を生ずると云ふのである。

これは試料を高温の金屬浴中へ焼入れたる後取出して比較的徐々に空中冷却を爲せる結果、オーステナイトよりマルテンサイトへの變化が普通焼入の場合よりも一層進行したる爲で、冷却速度の如何は割の直接原因ではないと解する外はない。然らば多量のマルテンサイトを生ずれば冷却緩徐なるにも拘らず何故高速度鋼に焼割を生ずるか、又夫よりも加熱冷却の速度一層緩徐なる焼戻に於て割を生ずるかと云ふに、夫は試料の内外に於ける組織の變化にその原因を歸する外はないのではないか。即高速度鋼が火造せられ又焼入の際1,300°Cの如き高温の加熱に遇つてゐる事實からすると、表面層は相當程度の脱炭を受けてゐるであらうと想像せられる、而して斯る脱炭又は低炭素の層には、焼入又は焼戻の場合マルテンサイトへの變化がなく、又あるとするもその爲の體積膨脹は少いと考へられる、然るに内部の脱炭せざる部分は焼戻により或は焼入後の緩徐冷却によつて多量のマルテンサイトを生じ體積の異狀膨脹を來すであらうから、外層は内部より強大なる張力を受け、その張力が遂に試料に割を生ぜしむるのではなからうか。實際試料の加熱の際クリプトール爐を使用し、黒鉛坩堝を二重にしてその内に試料を入れ可及的に脱炭を少くしたるものに就ては焼戻割は生じない、又前にも述べた通り焼入後豫め表面を削磨し置きても同様に割は生じない。

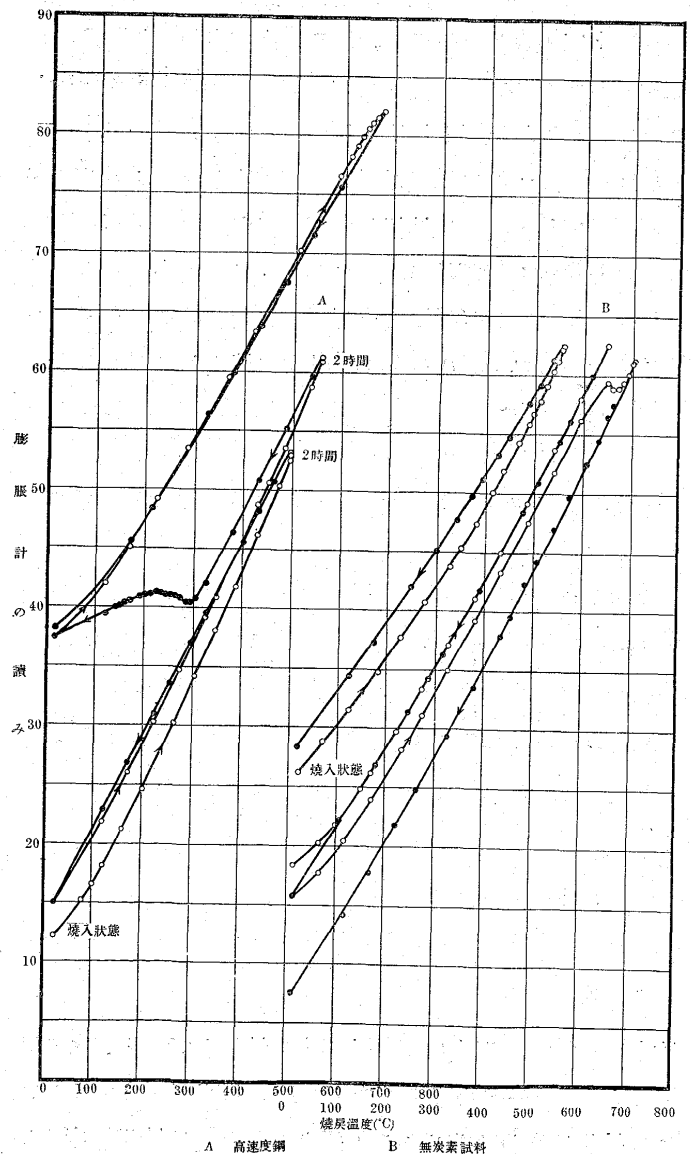
著者は以上の見解を確め、又事實の内容を明にするため

前記の高速度鋼、及び夫と同一組成で唯炭素を含有しないものを作り、夫々1,300°Cより焼入し、硬度測定並びに熱膨脹に依り下の如く二つの試料が焼戻中如何に變化して行くかを比較研究した。

**熱膨脹法及び硬度測定法による研究** 試料としては既述の組成のCoを含有する高速度鋼を用ひ、徑7mm、長さ50mmに仕上げ、これをクリプトール爐を用ひて脱炭せぬ様注意して1,300°Cに加熱し、油中焼入を行つた。又無炭素試料は他成分は總て前記高速度鋼と同一に配合し、炭素の混入せざる様に注意して高週波誘導電氣爐によつて熔解した、これを徑2cmの金型に鑄込み、火造、焼鈍したる後同じく徑7mm長さ50mmに仕上げ1,300°Cより油中焼入を行つた。斯くして得たる試料を先づ眞空式膨脹計を用ひ、加熱冷却を行ひ温度對膨脹曲線を得た。

第15圖Aは高速度鋼の場合の曲線である。これによ

第 15 圖



ると焼入せるまゝの試料を常溫より次第に加熱して行きて 500°C 附近まで持來る場合、加熱の途中には何等の變化も認められない、この 500°C の溫度に約 2 時間保持してゐると極めて徐々に變化する傾向があり多少膨脹を來す、之を冷却するに又何等の變化を認めず、只 500°C に保持され多少膨脹せる結果冷却曲線は加熱曲線に比して多少上位にあるのみである。然るに再びこれを加熱して行き最高溫度を前よりも高く 550°C とすると、加熱の際には何等の變化も認めないが、冷却の場合には 300°C 附近に於て異状なる體積の膨脹が認められる。この膨脹は勿論焼入の際の残留オーステナイトが此の溫度でマルテンサイトに變化するが爲である。このマルテンサイトになつたものを更に加熱冷却しても、約 680°C 迄の間では曲線は略可逆的で何等特別なる變化は認められない。現在の場合最高溫度を 550°C 附近にすると冷却の際にマルテンサイト化の現象を誘起さるゝことは非常に著しき事實であるが、これに關しては章を改めて尙精しく論ずる。

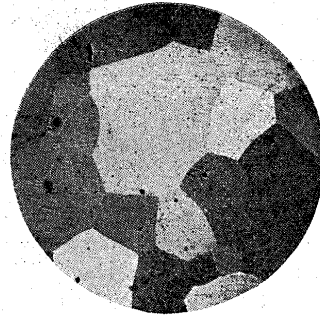
次に無炭素鋼試料に就ての熱膨脹曲線は第 15 圖 B であるこの場合も同様に焼入せられたる状態より約 550°C まで焼戻し行くに、加熱の際 400°C 邊より多少膨脹の傾向を示すが何等特別の變化はない、冷却曲線は又加熱の際に少しく膨脹を來したまゝの状態と温度と共に單に下る。これを再び 600°C 附近まで焼戻して行くに、前よりも一層變化なく、加熱並に冷却曲線は全く可逆的である。尙この試料を更に加熱するに 650° 附近の溫度に於て、其量は少しであるが稍急激なる收縮を來すが、この現象も亦章を改めて論ず可き事柄に屬し現在の目的に對しては餘り關係はないのである。

高速度鋼の焼戻と硬度の關係に就ては已に述べた。無炭素鋼試料に就いて同じ測定を行つた結果は第 13 圖曲線(c)であつて 1,300°C より油中に焼入し、油又は眞空爐中にて加熱し豫定の焼戻溫度に達してより 30 分間保持したる後徐々に冷却を行ひ、常溫に於て硬度を測定したのである。圖によるとこの試料は焼入状態から次第に焼戻しさるゝに従ひ少し宛硬度を増して 600°C に達するが、この溫度より 650°C の間に於て著しく硬度が増加する、そして焼戻溫度が更に上ると今度は急激に硬度の下降を來す。

上記二種の試料に就ての結果を要約するに、或焼戻溫度に於て急激に硬度の増加を來し、その傾向は非常によく類似してゐる、然し熱膨脹法的研究によると、高速度鋼の場

合は残留オーステナイトの變化に關係する硬度で冷却の際

表 16 圖



W Cr Co Fe 1,300° 油焼入  
20 5 7 残り 650° 30 分焼戻

は、第 16 圖は第 13 圖 c 曲線の試料を 650°C 迄焼戻したる場合の顯微鏡組織で一般に炭素を含まない鐵合金に時効硬化を生ぜしめたる場合の組織と概ね同様である。

**實驗結果の考察** 高速度鋼と無炭素鋼試料との熱膨脹曲線を比較して見るに、焼戻溫度が 500°C 迄の間は兩曲線の間は大した差異が認められない。然し焼戻溫度が 550°C になると高速度鋼は冷却の際に異状なる體積膨脹を來す、而してこの状態のものを更に加熱して 700°C にも近い溫度に至り再び冷却を行つて見ても、其間體積の上には何等の變化を生ぜずして矢張り異状に膨脹せる儘の状態を保つてゐる。然るに無炭素鋼のものは之に反し、焼戻溫度が 550°C 乃至 600°C になるも熱膨脹曲線上何等の異状を生ぜざるのみならず、焼戻溫度が 650°C 以上ともなれば、寧ろ收縮を來してゐる。

今焼入せられたる高速度鋼の試料を考へ、その表面或る厚さを、他は全く同様にして只炭素のみを缺ける地に依りて包みたる場合を想像して見るに、之を大凡 500°C 以下の溫度に於て加熱冷却を行ふとも、其處には明に特別なる現象は起らぬであらう。次にこれに 550°C 又は少しく高き溫度の加熱を與へたる上冷却を行ふ場合に於ては如何になるであらうか、加熱の際には又明に顯著なる變化は起るまい、然るに冷却の場合には 300°C 附近の溫度より内部の高速度鋼はマルテンサイト化のため異状なる體積の膨脹を來すに反し、外部を包める部分には冷却による收縮があるのみである、従てこれより溫度の降下に伴ひ内部は外層より大なる壓力を受け、外層は又内部より大なる張力を受けることになる、故に若し外層がこの張力に耐え得ざれば斯る試料は遂に割を生ずるに至るであらう。而して炭素を缺ける試料は既に第 13 圖曲線 c に示せる通り、約 650°

C に焼戻されたる時最高の硬度を示す、従て同温度附近に加熱せられたる場合抗張力は最も大にして延伸率は極めて小なる可く、容易に割を生ずることは極めて當然と考へられる。

酸化を受けたる高速度鋼の表面に就ては、上に用ひたる無炭素鋼試料に比す可き脱炭層を考へ得る外、内部に進むに従ひ次第にその度を減じて行く低炭素の層をも想像し得るが、之に就き又次の如き例を引用し得る。第 13 圖曲線 (b) は W. Eileuder, H. Klinar; u. H. Cornelius<sup>1)</sup> の研究結果で、著者の用ひし高速度鋼と大體同成分で炭素含有量の少き場合の焼戻硬度を示せるものである。試料の組成は 0.15% C, 3.8% Cr, 18.15% W, 0.55% V, 9.96% Co, 0.65% Mo 殘餘鐵よりなるもので、矢張 1,300°C より焼入せられてゐる。而してこの試料は別に磁氣的研究から、焼戻により硬度の増加を生ずるも、殘留オーステナイトのマルテンサイト化をば起さざる種類のものであることが證明せられてゐる。上記の曲線 b) によると硬度の極大は約 600°C 焼戻の場合に起るもので、曲線 a) の場合に於ける最大硬度の焼戻温度に近く、その硬度はロックウエル 66 以上に及ぶ。この事實より見る時は、尙多少の炭素を殘存する高速度鋼の外層は内部と大體同じ焼戻温度で硬度の極大を示し延伸率の小なるものとなるが、冷却中にマルテンサイト化を生ずることなくして又割の發生に導く譯で、著者の説の妥當なることを證する様である。

又普通に取扱ひ表面が多少脱炭を受けてゐる試料を低温の浴へ焼入せる場合は焼割を生ぜざるに 400°~600° の如き高温の浴に焼入する場合には却て焼割を生ずることも表面層には異状なる體積變化なきに拘らず内部にはマルテンサイト化により顯著なる體積の膨脹を來すの事實より全く同様に説明し得られる。

<sup>1)</sup> W. Eileuder, H. Klinar u. H. Cornelius;  
Archiv. E. H. W. 6 (1932~3) 563

尙焼戻に於ける最高温度を 550~650°C とする時は割を生ずるが、斯る温度範圍を過ぎ更に高き温度まで焼戻されたる場合には高速度鋼に割の發生せざる事實がある。これは表面層が高温に焼戻されて次第に延伸率を増加すること及び内部に存する殘留オーステナイトが同じく高温に於て徐々に  $\gamma \rightarrow \alpha$  の變化を進行し、冷却の際の異状膨脹は極めて制限せられたものとなる結果であると想像せられる。

斯く考ふれば前に述べたる現象即加熱の際出来るだけ脱炭を防止せるもの或は焼入後表面層を削磨し去りたるものには焼戻割を見ざる事實も亦容易に首肯することが出来る

**結論** 本研究に依り知り得たことを總括すれば次の如し。

(1) 試料の大きさが本研究に用ひたる程度に於ては、高速度鋼は水又は油中に焼入れたる場合には焼割を生ぜず、高温の浴中へ焼入れる時却つて割を發生する。

(2) 焼入せられたる高速度鋼を焼戻すに、最高温度が 550°C~650°C の範圍なる時は焼戻割を發生するが、焼戻温度がこれより低きか又は高き時は割は生じない。

(3) 焼入高速度鋼を第二次硬度が最高値となる位の温度附近まで焼戻を行ふとき、殘留オーステナイトのマルテンサイト化は、高温に於て起らずして、冷却の途中 Ar'' 變化に依りて行はれる。

(4) 脱炭層も亦相當に焼戻硬化をなすが、これはマルテンサイト化ではなく、時效的の焼戻硬化である。

(5) 焼戻割の原因は試料の表面に於ける脱炭によるもので焼戻を行ふ場合、試料の内部は殘留オーステナイトのマルテンサイト化により體積の異状膨脹を來すが、脱炭層は單に時效的に焼戻硬化を來し延伸率小なるものとなる、従て内部よりの張力の爲め、脱炭層に割を生ずる。

(6) 高速度鋼の焼戻割を防止するには材料の脱炭を完全に防げばよい、脱炭を受けたる部分あるときは焼戻前にそれを削磨し去ればよい。