

鐵 と 鋼 第十三年 第一號

昭和二年一月二十五日發行

論 說

鋼の焼戻脆性に就いて

(大正十五年十一月日本鐵鋼協會第二回講演大會講演)

本 多 光 太 郎

山 田 良 之 助

I 緒 言

鋼の焼戻脆性に就いてはこれまで多數の實驗者によつて研究せられて來た。その中主なるものはR. Greaves⁽¹⁾, F. Rogars⁽²⁾, Philpot⁽³⁾, R. H. Greaves⁽⁴⁾ 及び J. A. Jones⁽⁴⁾, 吉川晴十⁽⁵⁾, W. T. Griffiths⁽⁶⁾ 等である。而してその性質も之を除去する方法も既によく知られてゐる所であるがその原因に至つては未だ明かでない。それで著者は 1925 年の初より此の焼戻脆性の原因を究めるために新しく實驗を初め同年の終りに於て大略之を完成したのである。その結果は同年11月東京で開催せられた理化學研究所の講演會で發表した。

最近に至つて J. H. Andrew⁽⁷⁾ 及び H. A. Dickie⁽⁷⁾ は同じ問題に關する論文を發表したが之によると彼等は焼戻脆性を呈する材料より強靱なるものと脆弱なるものを作りその硬度と比容積とを測定

(1) R. A. Greaves, Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1919), 329.

(2) F. Rogars, ibid 2 (1919), 325.

(3) Philpot, Rev. Mét., Mém., (1920), 93.

(4) R. H. Greaves and J. A. Jones, Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1920,) 171; 1 (1925), 231; 2 (1925).

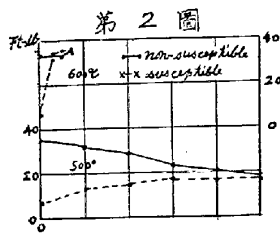
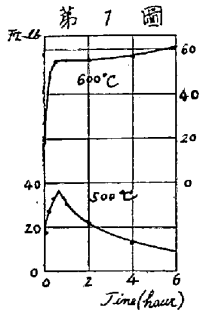
(5) 吉川晴十, 鐵と鋼, 11 (大正13), 723.

(6) W. T. Griffiths, Journ. Iron and Steel Inst., 1 (1925), 257.

(7) Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1926),

したのである。その結果此の著明な現象の原因に就いて著者等と同一の結論に到達した。即ち A_1 點以下の溶解度曲線に沿うて炭化物が析出し之が結晶粒の境界に集るために焼戻脆性の現象を呈するのである。

ニッケル、クロム鋼例へば 0.3% C, 3.7% Ni, 0.7% Cr を含むものを 850°C より油に焼入し 400°~650°C に或る時間焼戻し然る後水中冷却をするか或は徐冷をするときは、有溝衝撃試験に對する抵抗は前者は後者よりも遙に大である。今此の兩者の吸收勢力の比を焼戻脆性感受率 (Susceptibility to temper-Brittleness) と呼ぶときはアイソット試験に於て通常 20~30 にも登るのである。次に焼戻脆性に就いて數多の研究者によつてなされた實驗の主なるものを掲げやうと思ふ。



- 1、 焼戻脆性は單にニッケルクロム鋼に於て認められる許りでなくマンガンクロム鋼、マンガンニッケル鋼及びマンガン鋼に於ても認めることが出来る。此等の鋼に於て感受率は磷の含有量を増せば尙大になる。焼戻脆性を呈しないニッケル鋼でも之に少量の窒素を加へるときは脆性を呈せしめることが出来る。
- 2、 焼戻脆性を呈すべき鋼にモリブデンの少量例へば 0.5~1.0% を加ふれば全然焼戻脆性を呈なさいやうになるか、或は呈しても極めて微弱となる。
- 3、 焼戻脆性を有する鋼の焼入せるものを種々の時間 650°C に焼戻して然る後水中冷却を施すときは、衝撃抵抗は焼戻時間と共に初め急激に増加し 30 分乃至 1 時間の後はその増加は徐々となり次第

に一定の値に近づくのである。若し焼戻温度がこれより低く例へば 500°C ならば衝撃抵抗は初め増加して一度最高の値をとりその後は次第に減少する (第 1 圖)。

- 4、 焼戻脆性を呈する材料の強靱なるものを再度焼戻して水中冷却せるもの、又は脆弱なるものを再度焼戻して徐冷せるものはその性質に變化を呈しない。
- 5、 焼戻脆性を呈する材料の強靱なるものを再び 650°C に種々の時間焼戻して之を水中冷却しても僅か衝撃抵抗を増すのみである。若し焼戻温度が前よりも低いときは衝撃抵抗は時間と共に次第に減少する。而してその變化の大きさは時間を一定にすれば焼戻温度が低い程大である。
- 6、 上と同様の處理を脆弱なるものに就いて施すときは、衝撃抵抗は時間と共に初めは急激に後は徐々に増加する。而して焼戻温度を一定にすれば終局の値は強靱なるものの値と一致するに至る (第 2 圖)。

焼戻脆性の原因に就いて今日迄呈出せられてゐる中の主なるものは炭化物又は酸化物が溶解度を有

(1) F. Rogars, Journ. Iron and Steel Inst., 2(1919), 325.

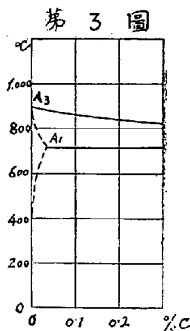
(2) R. H. Greaves and J. A. Jones, Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1920), 171.

するためと考ふる説である。之等を溶解せる鋼は強靱であるが、混合物として含むものは脆弱であると見てゐる。然しながら何故に斯の如き少量の炭化物又は酸化物の存在が衝撃抵抗にかゝる大なる差を生ずるかに就いては全く明かでない。且又焼戻脆性に關する上述の如き種々の現象は上の如き考によりては十分に説明することは出来ない。

II. 焼戻脆性に關する學說

吾々の學説は Andrew 及び Dickie のものと同一であり炭化物説を開發せるもので全然新しい學説ではない。焼戻脆性が主として炭化物に歸因し酸化物には關係しないことは、此の現象を呈するニツケルクロム鋼より單に炭素を除くときは此の現象を呈しないことによつて明かである。

ニツケルクロム鋼に出来る炭化物は多分セメンタイトと、鐵とクロムの複炭化物であると考へられる。(1) ニツケルの炭化物は極めて不安定であるから多分存在しない、但しニツケルは鐵中に溶けて固溶體を作つてゐる。炭素鋼の場合には A_1 點以下のセメンタイトの溶解度は温度の低下するに従つて(2) 0.04%より0.01%以下に下降する(第3圖)。



晶粒の境界に析出するのである。之と同様にニツケルクロム鋼に於ては A_1 點直下に於ける炭化物の溶解度は炭素鋼の場合よりも少しく大で且つ温度の降下と共に初めは急激に後は徐々に減少するものと思はれる。而して常温に於ける此の炭化物の溶解度は極めて小で殆んど溶解しないと云つて差支なからう。故に650°Cから徐冷すれば炭化物は結晶粒の周圍に析出して焼戻脆性の原因をなすものと考へられる。

焼入鋼を焼戻して生ずる粗粒組織はセメンタイトとフェライトの微細なる混合物で衝撃試験に對しては甚だ強靱である。然るに焼戻後徐冷して炭化物が結晶粒の周圍に析出するものは粒の境界が脆弱で衝撃抵抗が甚だ小である。従つて焼戻後急冷せるものと徐冷せるもの、衝撃抵抗の比が大となるのである。若し上記の説が正しければ、感受性には、粗粒組織は必ずしも必要でない筈で、波來土組織のニツケル、クロム鋼も600~650°Cから水中冷却せるものは徐冷せるものよりも大なる衝撃抵抗を呈すべき筈である。然しながら此の場合抵抗の比は粗粒組織の時よりも遙に小である。何故ならば結晶粒の境界の強さは前と同一であるが内部の波來土地は前の粗粒組織に比して衝撃抵抗が遙に小であるからである。下表は Greaves 及び Jones の實驗の結果を示せるものである。即ちニツケル、クロム鋼を900°Cにて焼鈍せる後下記(3)の速度を以て冷却せる後650°Cに加熱して水中冷却及び毎分0.3Cの速度に冷却せるものに就いての實驗の結果である。(4)

(1) 7, 村上武次郎、理科報告、7 (大正7).217.

(2) 山田男喜雄、金屬の研究 5 (大正15) 294

(3) 前掲

(4) Greaves and Jones, Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1920) 171.

A ₁ 點の冷却速度 毎分 °C	アイゾット衝擊値		感受率
	靱	脆	
1.0	35	15	2.3
0.70	47	23	2.9

従來焼戻脆性は有溝衝擊試験によつてのみ認め得るものと一般に信ぜられてゐたが實際は然らずして、精確なる實驗の結果によると他の物理的性質例へば磁氣の強さ、電氣抵抗等に於ても強靱なる材料と脆弱なる材料とによつて差違を生ずるものである。即ち強靱なる材料は脆弱なる材料に比して磁氣の強さは小で、電氣抵抗は大である。これ即ち前者に於ては炭化物がフェライト中に固溶體として存在し、後者に於ては混合物として存在することを證明するものである。

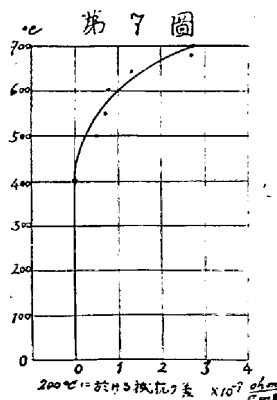
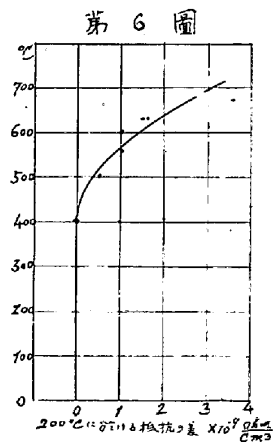
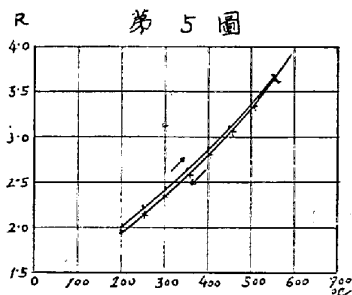
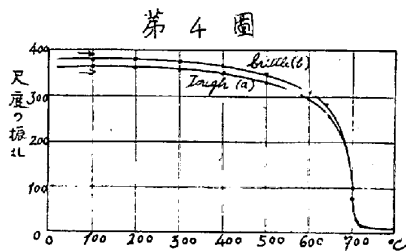
III. 上記の學説を確むる事實

(a) 磁氣の強さ對溫度曲線

金屬材料研究所に於て使用せられてゐる磁氣分析法によりて磁氣の強さと溫度第4圖との關係を求めた。第4圖に於て a は強靱なる材料、b は脆弱なる材料に對する曲線で後者は各溫度に於て前者よりも磁氣の強さ大である。此の結果は炭化物が固溶體を作るときは單に混合するときよりも磁氣の強さを減ずるといへる一般の事實とよく符合する。

(b) 電氣抵抗曲線

溫度の上昇と共に炭化物の溶解度の増加する有様を知らんがため焼戻脆性を呈する材料に就て各溫



(1)
 度に於ける電気抵抗を測定した。実験装置は當研究所常用のものを使用した。先づ焼戻脆性を呈するニッケルクロム鋼を焼戻後水中冷却せる後種々の温度に極めて徐々に加熱しつゝ、電気抵抗を測定し次で冷却の際再び電気抵抗を測定した。実験の結果は第5圖に示した通り冷却の際は加熱の際よりも抵抗は常に小である。常温或はその附近に於ける此の抵抗の差は炭化物の溶解せるために生ずるものであるから、此の差の大小は溶解せる炭化物の量に比例するものと見ることが出来る。下表及び第6圖は種々の焼戻温度に對する加熱及び冷却の際の抵抗の差を表はすもので δR は 200°C に於ける此の差を示してゐる。

焼 戻 温 度	400°C	560°C	600°C	930°C	630°C	670°C
$\delta R, \left(\frac{\text{ohm}}{\text{cm}^3}\right) \times 10^{-7}$	0.5	1.0	1.0	1.5	1.6	3.6

第6圖によるに炭化物の溶解度は 400°C 以下に於ては殆んど變化なけれども之以上に於ては温度の上昇と共に急激に増加してゐる。

同様の實驗をマンガン鋼に就いても行つたが結果はやはり上記と同様であつた。下表及び第7圖はその實驗結果を示すものである。

焼 戻 温 度	400°C	500°C	550°C	600°C	640°C	680°C
$\delta R, \left(\frac{\text{ohm}}{\text{cm}^3}\right) \times 10^{-7}$	0.5	0.7	0.8	1.3	1.3	2.7

Andrew 及び Dickie 兩氏は強靱なる材料と脆弱なる材料の二つに就いて比容積と硬度とを極めて精密に測定してゐるが、その結果によると此の兩性質共前者の方が後者よりも大である。この差も亦炭化物の溶解度が硬度並に比容積を増すことを表はすもので、恰も炭素鋼に於ける麻留田と同様である。

従來多くの學者は感受性鋼の強靱なるものと脆弱なるものにと就いて顯微鏡的相違を検出しやうと努力したが何れも成功しなかつた。然るに Andrew 及び Dickie は脆性を帯べるニッケル鋼に就いて結晶粒の境界に炭化物の微粒の存在することを確めた。

上述の種々の實驗より次の結論が得られる、即ち焼戻脆性を有する鋼に於ては A_1 點以下に於ける炭化物の溶解度は温度の上昇と共に増加する。故に焼戻温度より試片を徐冷すれば此の炭化物は粗粒跛組織の結晶の境界に析出して焼戻脆性の原因をなすものである。

IV. 焼戻脆性に關する諸現象の説明

終りに上述の學說によりて焼戻脆性に關する諸現象の説明を與へやうと思ふ。

第1節第3項に於て述べた如く、焼戻脆性を有する材料の焼入せるものを $600^{\circ}\sim 650^{\circ}\text{C}$ に焼戻する際には、衝撃抵抗は時間と共に初めは急激に後には徐々に増加する。これは焼入鋼を A_1 點以下に於

て焼戻すれば時間と共に次第に粗粒組織となり衝撃に對しては極めて強靱であるからである。之に反して焼戻温度がもし前よりも低く例へば 500°C 位の時には衝撃抵抗は一度極大の値を取り然る後は次第に減少するものである。これ一方焼戻温度が低いため麻留田より粗粒組織への變化が徐々に起るため衝撃抵抗もやはり徐々に増加すると、他方炭化物の量 500°C の溶解度を越ゆるだけのものは次第に結晶粒の境界に析出して之が衝撃抵抗を減少せしむるためである。此の二つの反對の影響の相加はるため衝撃抵抗に極大點が表はれるのである。

第1節第5項に於て述べたるが如く、強靱なる材料を再度 650°C に種々の時間焼戻して之を水中冷却せるものは衝撃抵抗は殆んど變化なく幾分増加の傾向あることは説明を俟たなくとも自ら明かであらう。此の場合若し焼戻温度が低い時にはその温度の溶解度に相當するよりも餘分の炭化物は次第に結晶粒間の炭化物として析出するがために焼戻時間が長い程衝撃抵抗の低下も亦大である。第1節第6項に於て述べたる如く、脆弱なる材料の場合には、種々の時間再度焼戻したる後水中冷却せる場合には、その温度の溶解度に相當するだけの結晶粒間の炭化物は溶け込むので時間と共に衝撃抵抗は次第に増加し遂には一定の値を取る。此の値は温度が同一ならば強靱なる材料の取る最後の値と等しくなる筈である。

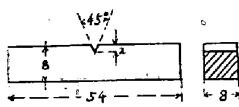
モリブデンが焼戻脆性を除く作用のあるのは A_1 點以下の炭化物の溶解度を著しく減少するか或は温度による溶解度の變化を無くするためと考へられる。換言すればツケルクロム鋼に 0.5~1.0% のモリブデンを加へると A_1 點以下に於ける炭化物の溶解度を著しく減少するから、或は溶解度曲線が垂直となるのであるまいか。電気抵抗の測定の結果から見ると此の見解が正當であると考へられる。

之に反して窒素、マンガ、磷等が焼戻脆性を増進せしめるといふのは恐らく結晶の境界面に析出する窒化物、マンガンの炭化物或は磷化物等が温度の上昇と共に急激に増加するためであると考へられる。

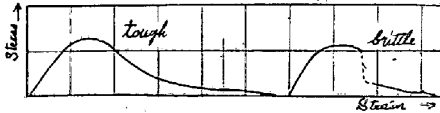
焼戻脆性は普通衝撃試験に於てのみ認められるものと考へられておるが衝撃試験そのものは必ずしも必要でない。靜的屈曲試験に於ても殆んど同程度に認めることが出来る。此の現象の表はれるに必要缺くべからざるものは試片に附した切込 (notch) である。此の切込の部分に於ては歪力の強さは極めて強大で之がために切込内の粗粒組織の結晶粒間から割目が進行するのである。特に脆性を帯べる材料は結晶粒間に脆い炭化物が存在して結晶粒間を一段と脆くし割目の進行を容易ならしめる。一度割目が生ずればその鋭利な尖端は直ちに極めて鋭利な切込の役目をしてその部分の歪力は更に強大となり割目の進行を助ける。斯の如くして割目は次第に進行するのである。此の場合には材料は殆んど變形せずして破壊するのであるから吸収エネルギーは甚だ小である。何となれば曩に著者の一人が示した通り試片を破壊する際に費さるゝ勢力の大部分は試片を變形せしむるに要する勢力である。故に變形の小なる場合には吸収勢力をも亦小である。結晶間に炭化物が存在しない場合には結晶の境界

(1) 本多光太郎、金屬の研究 10(大正14), 977.

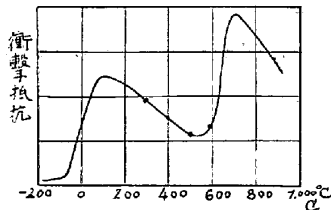
第 8 圖



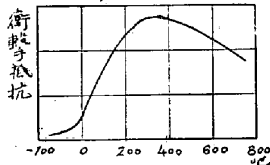
第 9 圖



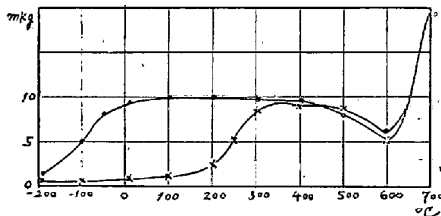
第 10 圖



第 11 圖



第 12 圖



は比較的強靱であつて充分變形せる後でなければ材料は破壊しない。従つて吸収勢力も極めて大となるのである以上の説明によつて焼戻脆性の表はれるのに何故試片の切込が重要な要素であるかよく了解せられたことと思ふ。

こゝに注意して置きたいことは破壊の出発點が結晶の境面にあるからといつて破壊が始終境面に沿うて進むものと考へる必要はないのである。破壊は時には結晶の境面(2)を通ることもあり、時には結晶を横斷することもあり得るのである。

靜的屈曲試験の結果が衝擊試験の結果と殆んど等しいことは既に Philpot (2) によつて證明せられてゐる處であるが著者の實驗に於てもやはり同様の結果を得た。第 8 圖は試片の形狀及び寸法を示してある。屈曲衝擊試験は容量 30kg/m のシャルピー式試験機によつて。靜的屈曲試験は尙研究所で考案した装置によりその吸収勢力は歪對歪力の圖から測定したのである。材料は炭素 0.3%、ニッケル 3.5% クロム 0.8% の鋼で、之を 880°C に於て油中焼入し、600°C に 30 分焼戻して後急冷又は徐冷せるものである。その實驗の結果は下表に示してあるが各數字は夫々 2 個の實驗結果の平均で個々の結果は 10% 内の差で

一致してゐる。

	吸収勢力、米胚	
	衝擊	靜力
600°C 水中冷印	5.9	4.9
600°C 徐冷	3.2	2.9

靜的試験に於て最大歪力は強靱なる材料も脆弱なる材料も共に大なる差を表はさない。然しながら第 9 圖に示せる如く強靱なる材料に於ては歪力は最大値を過ぎて後は徐々に減少するが脆弱なる材料に於ては急激に減少してゐる。

一般に焼戻脆性を有しない鋼に於て實驗溫度を變へて衝擊試験を行へば此の兩者の關係は第 10 圖に示せる如き特異の曲線となる。即ち極めて低溫度に於ては衝擊抵抗は極めて小で溫度の上昇と共にその増加は殆んど認められないが -30°C 邊より急激に増加して 550°~600°C に於て極小の値をとり

(1) Rev. Mét., Mém., (1920), 93.

(2) 同上

650°~700°C に於て再び極大の値をとつてゐる。

鋼の性質より考ふれば吸収勢力對溫度の曲線は第11圖に示すが如き單一の極大を有する曲線であるべきである。何故かと言へば吸収勢力は主に變形に要せられる勢力であるから今試片の屈曲の角を θ とし歪力の平均の値を F とすれば吸収勢力は $F\theta$ に比例する。然るに一方 θ は低溫度で甚だ小であるが溫度が-30°C 以上に昇れば溫度による粘性の増加のために急に増加するが他方 F は溫度の上昇と共に連続的に減少すべきである。従つて此の相反する二つの原因によつて吸収勢力は溫度に對して一極大を有する曲線となるべきである。然るに實際に於ては曲線は單一の極大を有する曲線に非ずして更に550°~600°C に一極小を有する。此の極小は鋼の青熱脆性を示すもので衝撃を加へつゝある間の變形硬化の影響によるものである。即ち此の極小は加工硬化による副効果で鋼の自然の性質によるものではない。以上の變化は溫度に對して可逆的である。

(1)

焼戻脆性を有する鋼に於ても溫度の變化による衝撃抵抗の變化は既に Moneypenney が指摘せる如く以上と類似である第12圖は著者の得た結果でニツケルクロム鋼の靱、脆2種の材料に就いての實驗結果を示してゐる。粗粒破組織の強靱なる材料に於ては衝撃抵抗の急激なる上昇は常溫以下に降つてゐるに反し脆い材料に於ては比較的高溫度即ち100°~300°C にて起つてゐる。又此等の變化は加熱時間が短小であるならば可逆的である。以上の現象は時としては焼戻脆性に對する一つの説明になるものと見られてゐるが之は決して説明でなく單に吸収勢力對溫度の關係が靱、脆2種の鋼に就て著しく異なることを示すものである。之が焼戻脆性に對する説明となるためには何故に脆き材料に於ては衝撃抵抗の急激なる上昇が強靱なる材料に於けるよりも遙に高溫度に於て起るかに就いて説明を與へなければならぬ。終りに本研究に近藤留松氏の御熱心なる御助力を感謝する。

焼戻硬化の現象に關する研究

(大正十五年十一月日本鐵鋼協會第二回講演大會講演)

松 下 德 次 郎

永 澤 清

緒 言

(1)

嘗て本論文著者の一人は焼入鋼の物理冶金的研究に際して其の磁氣的硬度(頑磁力)の測定を行ひ數多の興味ある結果を得たれ共就中其れが材質の機械的硬度(ブリネル或はショアー式に測定したる)と同一傾向を示しつゝ變化する量にして然かも其の測定數値に關しては後者の場合に比し遙かに精密度を高め得るものなることを指摘したり。

(1) Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1919), 398.