

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  $\theta$  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  $\theta$  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。

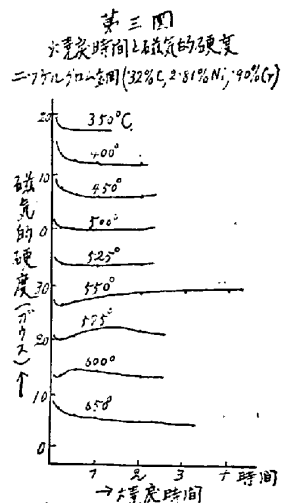
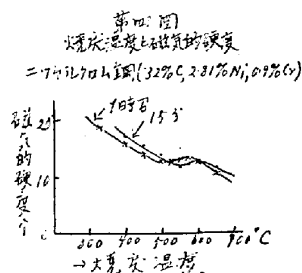
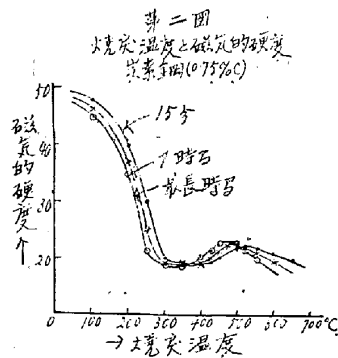
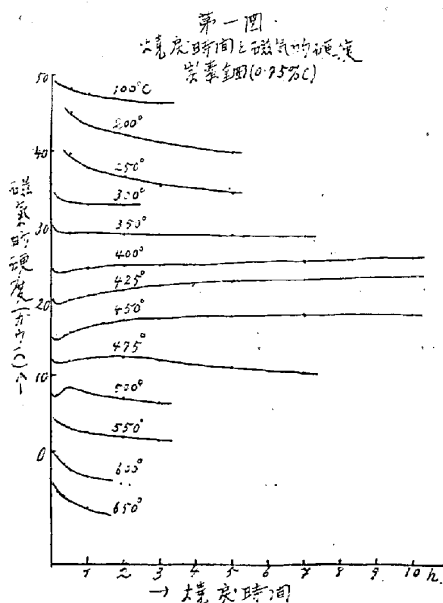
(1) Journ. Iron and Steel Inst., 2 (1919), 398.

本研究は此の磁氣的硬度を以て炭素鋼、ニッケル鋼及びニッケルクロム鋼に就て種々の燒戻温度に於ける燒戻効果の進行状態を精密に検査せんとする目的の下に計畫せられたるものにして従つて最初は専ら燒戻時間の進行に伴ふ磁氣的硬度の變化を測定したるものなるが此の結果より誘導を得て逐次研究の歩を進め遂に次に列擧せるが如き從來見逃され居たる燒戻鋼の重要な一性質を明にするを得たり。

- 1、炭素鋼を燒戻せるものの磁氣的硬度は最初燒戻温度の上昇と共に次第に減少すれ共約400°C乃至450°Cより再び増加し初め約475°C乃至550°Cに於て極大値に達し以後は單に減少す。
- 2、上記の磁氣的硬度の増加に伴ひ鋼材は硬化す。
- 3、燒戻鋼の機械的諸性質對燒戻温度曲線は從來一般に信ぜらるゝ如く燒戻温度の上昇と共に滑かに單調的に變化するものに非ずして上記の硬化に伴ひ明瞭なる異常變化を表す。
- 4、以上の現象は獨り炭素鋼に限らず總ての他の特殊鋼にも共通するものにして唯其の温度に多少の差を見るのみなり。

以下上記諸結果を導出せる實驗を略述すべし。

**實驗第一 燒戻時間と磁氣的硬度** 炭素含有量 0.75% なる純炭素鋼の徑 8mm なる 1本の壓延丸棒より長さ 10mm なる試験片 13本を採取し此等を 800°C に於て水中燒入を行ひ先ず其の燒入状態を比較す



る爲め各々に就て磁氣的硬度を測定し略其の焼入效果同等なることを確めたる上此等を夫々 100°、200° 250°C 300°、350°、400° 425°、450°、475°、500°、550° 600°、及び 650°C、に於て焼戻を行ひ其の焼戻時間と共に磁氣的硬度の變化する模様を觀測したり。第一圖は其の結果にして曲線は重複を避くる爲め次第に座標軸を移動せしめて記したり。

圖に於て特に注意すべきは 450°C 近傍の焼戻曲線にして 400°C 以下の焼戻のものに於ては焼戻時間の増加と共に其の磁氣的硬度は單に減少しつつ夫々一定の漸近値に近づくのみなれ共 425°C. のものに於ては一度下降せる磁氣的硬度は時間の経過と共に再び増加の傾向を示し約 10 數時間にして略一定なる極大値に達す。而して極大値に達すべき時間は焼戻温度の上昇と共に次第に減ずるものにして 450°C に於ては約 7 時間、750°C、に於ては約 2 時間、500°C に於ては僅かに 20 分を要するのみなり。極大値を経たる後は何れの場合を問はず時間と共に次第に減少するものにして此の場合焼戻温度高き程其の時間に對する減少の速度大なり。更に焼戻温度上昇して 550°C 以上に達する時は其の磁氣的硬度は、最初より直に減少のみの傾向を示す。

今第一圖より焼戻時間15分、1時間及び本實驗に於ける最長時間に對應する磁氣的硬度の値と焼戻温度との關係を圖示する時は第二圖に見る曲線を得べし。

三曲線は其の凸起部に多少のズレを認むれ共此れ全く同一現象に對する時間の影響と見るべきものにして、各曲線共焼戻炭素鋼の磁氣的硬度は焼戻温度の上昇と共に一度下降すれ共約 400°C 以上に於て一時的に其の値を増し比較的著しき極大値を経たる後次第に減少することを示す。

嘗て E. Maurer 氏は一種の炭素鋼 (0.83%C) を焼入後種々の温度に焼戻せるものに就て其の頑磁力を測定し略と上記と同様なる曲線を得たり。

次に同一實驗をニツケルクロム鋼 (0.32%C、2.81%Ni、0.90%Cr) に就て行ひたり。此の場合に於ては最初 850°C. に於て油中焼入を施せる後焼戻を行ひたり第三及び第四圖は其の結果を示す。

此等の曲線を炭素鋼の場合の夫等と比較する時は直に兩者の極めてよく類似せることを見るべし。但しニツケルクロム鋼の場合に於ては第四圖に於ける其の極大點の温度前者より約 100°C、高し。

**實驗第二 衝擊抗力試験** 上記の磁氣的硬度曲線の異常變化に相當して鋼質内部に何等かの變化が豫想せらるゝ故著者等は此れに伴ふ機械的性質の異常變化を立證すべき目的の下に先づ材質の内部變化を鋭敏に指示すべき機械的性質として衝擊抗力の變化を測定したるに其の結果は次に述ぶる如くよく豫想と一致し上記の現象に相當して明瞭なる衝擊抗力の異常變化を觀測し得たり。

本實驗に使用せる鋼材の化學的組成は次表の如し。

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%
炭素鋼	0.24	0.21	0.38	0.028	0.029	—	—
"	0.45	0.29	0.43	0.024	0.030	—	—
"	0.64	0.18	0.39	0.025	0.013	—	—
"	0.80	0.39	0.39	0.023	0	—	—

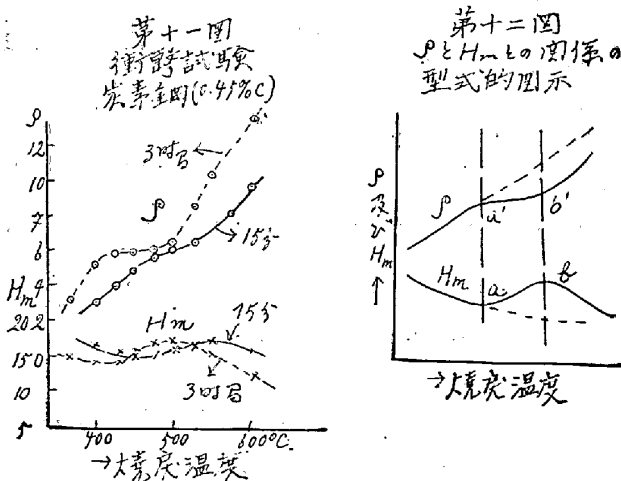
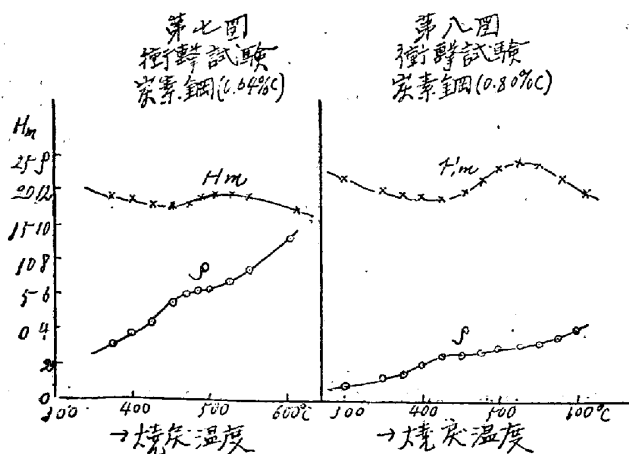
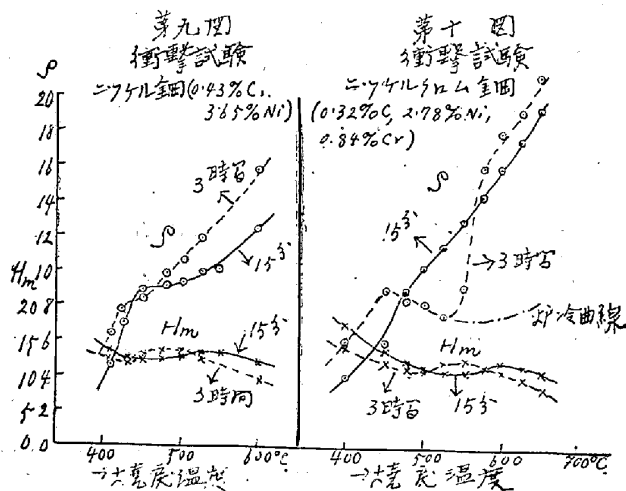
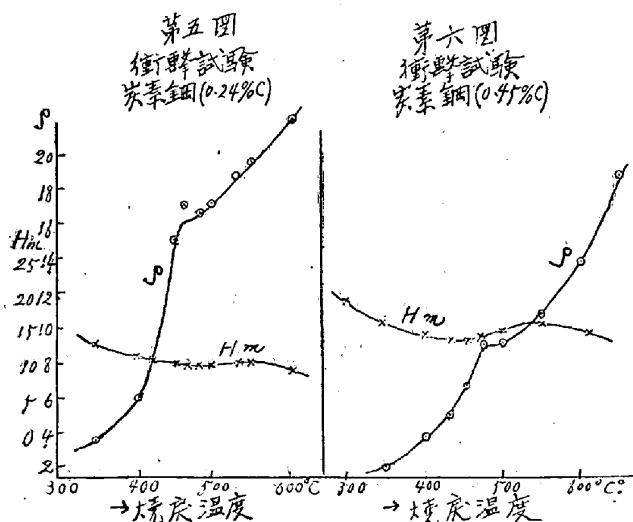
ニッケル鋼	0.43	0.28	0.62	0.012	0.011	3.65	—
ニッケルクロム鋼	0.32	0.16	0.39	0.014	0.013	2.78	0.84

試験機はシャルピー式容量 30kg/m のものを使用し、試験片の型式は Mesnager 式を採用したり。実験は特に磁氣的硬度曲線の極大点前後約 200°C の範囲に限定し其の間成るべく多数の測点を得る爲め 15°C 乃至 25°C の温度間隔を置いて実験したり。

尙本実験に於ては能ふ限り其の精密度を高むる爲め一列の試験片は必ず此れを同一圧延角棒より採取し、焼戻前に於ける此等の熱処理（焼鈍及び焼入）に當つては凡て同時に同一ニクロム、線電氣抵抗爐内に於て行ひ温度測定用としては白金對白金ロヂウム熱電對を使用したり。又各焼戻温度に於ける温度誤差は ± 2°C. を越ゆること無からしめたり。

試験片の大きさは便宜上實際の衝撃試験片寸度 (10mm×10mm×55mm) の 2 倍の長さのものに就て、其の熱処理並びに磁氣的硬度の測定を行ひ、最後に衝撃試験の際之を切離して獨立なる 2 個の試験片としたり。

試験片の熱処理に當つては、其の各階梯毎に磁氣的硬度の測定を行ひ努めて全試料の均等的取扱ひに留意したり。



焼戻時間の選擇に關しては、其の磁氣的硬度曲線に及ぼす影響は實驗第一に示せる如くなるも其の特性は何れにも共通して存在するに依り本實驗に於ては試験片の大きさ比較的小なるを以て焼戻温度に達せる後15分間焼戻を繼續したる後空中放冷を行ふことゝしたり。

以下其の結果を各鋼材毎に曲線を以て示すべし、尙同圖中に焼戻後の磁氣的硬度曲線を並記して實驗第一との對照に便したり。

以上の結果に依れば各鋼材共其の磁氣的硬度曲線の異常變化に相當して其の衝擊抗力の異常變化を伴ひ明に兩者の相關的なることを見る。今兩曲線の異常變化を對照するに總ての場合を通じて略第十二圖に示すが如き關係にあり。

即ち兩曲線の異常變位の大きさは各焼戻温度に於て略々平行的にして磁氣的硬度曲線のa點(極小點近傍)に相應して衝擊抗力曲線の異常變化始まり、又磁氣的硬度の異常變位大なるb點に相應して衝擊抗力の異常變位も亦最大なり。更に焼戻温度上昇する時は兩者共齊しく其の異常變位の次に減じ行くを見る。

曲線の狀況より見る時はa'點を境として衝擊抗力曲線は兩折す、而して夫以上に於ては鋼材は脆性加はり温度の上昇に對する衝擊抗力の増加の割合を減ず、然れ共焼戻温度一層上昇する時は軟化效果の影響大となるを以つて再び靱性を増し曲線の傾斜も亦從つて次第に増加す。

純炭素鋼のみに關しては、炭素量の増加と共に磁氣的硬度の異常變化の温度は次第に僅か低下すれ共其の大きさを増し、此れに伴ひ衝擊抗力の異常變化も亦大となる、此の事實は上記現象の原因の説明上重要なものたるべし。

次に上記鋼材の内炭素鋼一種(0.45% C)、ニツケル鋼及びニツケルクロム鋼に就て焼戻時間の衝擊抗力に及ぼす影響を實驗したり。第九第十及び第十一圖中の點線は夫々焼戻時間3時間に對應する曲線なり。以上の内炭素鋼に關しては本實驗に使用したる鋼材の豫備的取扱法前の場合と多少異なるを以て焼戻時間15分のものも新に實驗を繰返したり。

炭素鋼及びニツケル鋼に於ては磁氣的硬度曲線の極大點及び衝擊抗力曲線の屈折點は共に焼戻時間の増加に伴ひ次第に低温度に移ることを見る。

ニツケルクロム鋼に於ては、其の磁氣的硬度曲線の極大點の移動に關しては前兩者と同一傾向を示せ共衝擊抗力曲線に於ては少しく其の趣を異にし、屈折點附近に於ては3時間の焼戻に依り著しく其の値の下降を示す、若し試験片を焼戻後爐中に於て極めて徐々に冷却する場合には第十圖の鎖線に示すが如き結果を得べし、此れ本鋼に特に著しき“焼戻脆性”の現象にして此れに關しては他日此の方面よりの研究結果を發表の機會あるべしと信ず。

**實驗第三 牽引試驗** 實驗第二の結果に依り、衝擊抗力の異常變化を明瞭に觀測し得たるを以て續て牽引諸性質の同様な變化をも確むべき目的を以て炭素鋼2種及びニツケル鋼に就て牽引試驗を行ひたり。試験鋼材の化學成分は次表の如し。

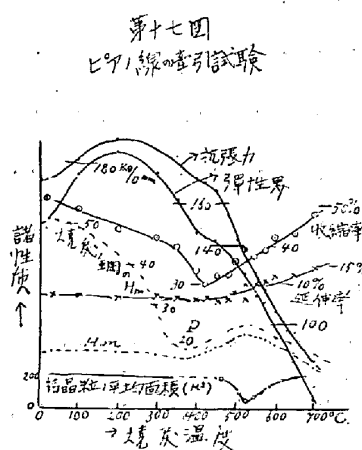
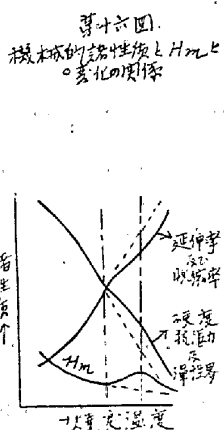
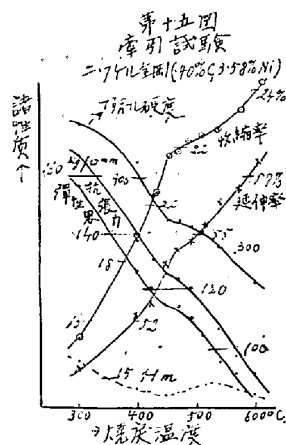
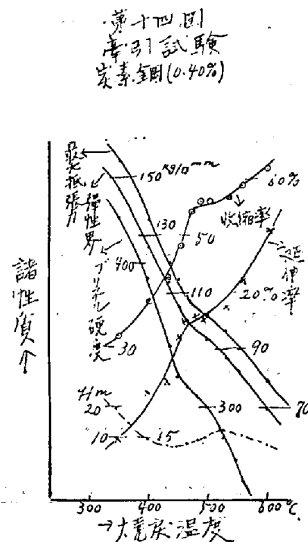
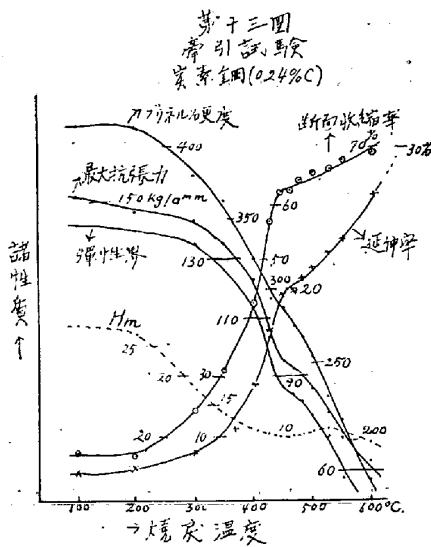
	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%
炭素鋼	0.25	0.23	0.29	0.013	0.017	—
〃	0.40	0.21	0.36	0.021	0.033	—
ニッケル鋼	0.40	0.22	0.54	0.013	0.013	3.58

本試験に於ても其の試験試料の調製に當つては、衝撃試験の場合と全く同様なる方法及び注意を採用し特に此の場合に於ては比較的低温焼戻のものある爲め及び試験棒全部が成るべく熱処理に鋭敏なることを期する爲め径 10mm 平行部長 72.4 mm なる比例、縮少寸度の試験棒を採用したり。且つ同一焼戻温度のもの 2 本宛に就て實驗を行ひ其の結果の平均値を採ることゝしたり。

尙實驗は磁氣的硬度曲線の極大値附近に限定したれ共炭素鋼 1 種 (0.25% C) に関しては低温焼戻のものとも雖も比較的容易に試験結果を得られたるを以て焼戻温度 100°C 以上の曲線を完結することを得たり。

以下其等の結果を圖を以て示すべし。

**實驗第四 硬度試験** 機械的硬度試験としてブリネル硬度の測定を行ひたり。試験試料としては上述牽引試験に使用したる鋼材の一端を用ひたり、其の結果は第十三、第十四及び第十五圖中に記入する



ことゝしたり。

以上の結果を見る時は機械的諸性質も凡て同様に此の現象に伴ひ異常變化を起すことを知る、而して此の場合諸種の異常變化と磁氣的硬度の夫とは第十六圖に示すが如き型式の關係を有す。

從來此の焼戻温度附近に於ける機械的性質の變化は單調に滑かなる曲線として表はされ居たれ共本研究の結果に依れば然らずして明瞭なる屈曲を有する曲線として表はさるべきものなるを知る。

### 理論的考察

次に焼戻鋼に於ける上記の現象に就て其の原因を考究すべし。

先づ機械的諸試験特にブリネル硬度試験の示す所に依れば以上の現象は結果として鋼材の硬化せることを指示す。而して此の事實は實驗第一の磁氣的硬度の増加より直接に證明せられ居るものとも見らるべし。以上の理由に依り著者等は之を“焼戻硬化”の現象と命名せるものなり。

次に其の硬化の原因を求めんに著者等は此れを鋼材焼入の際に生成せる内部歪が焼戻温度上昇の結果として消滅せらるゝ際に起る、フェライトの再結晶に依り結晶粒の數を増加することに歸せんとす。

次に上記の結論に到達せる論程を略述すべし。

1. 焼戻鋼はマルテンサイトの潰滅後と雖も尙多大の内部歪を保留す：—

焼入鋼の高温度に於ける電氣傳導度<sup>(3)</sup>の測定並びに磁氣分析等<sup>(4)</sup>の結果に依ればマルテンサイトは約300°Cに於て全く潰滅し去り以後は單なるフェライト及びセメントイトの混合となるを知る。然るに焼戻鋼の機械的並びに磁氣的硬度は此の温度の焼戻を行ひたる後と雖も尙相當に大なるを見る。是れ鋼材内に尙多大の焼入の爲の内部歪を保留することを示すものにして此の事實は又次に述ぶる冷間加工を施せる鋼材が常に上述兩種の硬度を増加する事實よりも類推するを得べし。

2. 低温加工に依り内部歪を與へたる鋼材を焼鈍せる場合に於ける其の磁氣的硬度並びに機械的性質曲線の異常變化は全く焼戻鋼の場合の夫と同じ：—

ピアノ線(0.80%C, 冷間延伸せるものにして著しき内部歪を保留す)を種々の高温度に於て焼鈍を行ひ其の磁氣的硬度及び機械的諸性質の變化を測定したるに第十七圖に示すが如き結果を得たり。

圖に於て磁氣的硬度曲線を見るに、其の極小點P以上に於ては同一ピアノ線を焼入後焼戻せる場合の曲線と全く其の狀況を同うし、又機械的諸性質の異常變化に關しても焼戻鋼の場合に得たるものと全く同様なる傾向を示したり。此の類似よりして焼戻鋼の場合に於ける異常變化も亦低温加工のものと同様に單なる内部歪に原因するものなるべく而して前者の保留せる内部歪は焼入のために生成せられたるものなり。

尙圖の磁氣的硬度曲線に於てP點以下の焼鈍によるものの値が焼戻鋼の夫れよりも著しく小なるは後者にありては未だ固溶態マルテンサイトの存在するが爲なり。

3. 内部歪を保留せるフェライトは一般金屬と同様に之を加熱する場合には再結晶を起す：—

(5)  
従来多數の研究者に依り報告せられたる如く内部歪を保留せる鐵又は鋼は或る一定溫度以上に於て加熱する場合には再結晶を起すべし、今此の溫度を假に再結晶溫度と命名せん此の溫度は決して一定のものに非ずして鋼の組成、焼鈍時間、内部歪の程度等に依り廣き溫度範圍間を移動す。従つて従来此の溫度の決定は充分正確に行はれずして極めて不完全乍ら直接には顯微鏡的に、間接には此に伴ふ材質の諸性質の變化より其れを判斷せるものにして従つて研究者毎に其の溫度に相違ありたり。然るに磁氣的硬度は此の目的にも最も有利なる方法にして其の曲線の異常變化は他の凡てのものよりも明確に其の溫度を指示す。例へば炭素鋼に於ては焼戻時間 15 分の場合には、約 425°C (亞共融晶鋼) 乃至 475°C (極軟鋼) の範圍に在り。

(6)  
著者の一人は“反淬鋼の研究”中に於て各種鋼材は其鋼材獨特なる或る一定溫度以上に於ては其自身内に如何なる種類の内部歪力をも貯ふることは不可能にして此等は結晶間に粘性的變位を生じつゝ消去せらるゝものにして此の溫度を該鋼材の降伏溫度と命名したり、上記再結晶溫度は此の降伏溫度に極めて近く存在することを知れり。

#### 4. 再結晶に於ては一時鋼材は硬化すべし：—

極度に變形され著しき内部歪を有すると雖も未だ殆ど一結晶粒としての機能を具備せる舊結晶粒の各々は適當なる溫度に焼鈍せらるゝ時は分裂を起し多數の安定にして全く獨立なる新結晶粒を生ずるを以て結晶粒の境界は著しく増加され此の爲め硬度の増加を起すべし。而して再結晶に基く結晶粒増加の様子は磁氣的硬度曲線より明に知るを得べく即ち略其の極小點に初まり極大點に於て極大に達し以下結晶粒の成長に伴ひ次第に減少す、従つて此れに關聯して諸性質の變化も了解すること容易なりとす。

(7)  
Chappel 氏は常溫にて引伸せる鐵線に就て直接顯微鏡的方法に依り上述結晶粒の増加の様態を觀測し第十七圖の最下部に示すが如き結果を得たり。曲線は各溫度に焼鈍せる後に於ける平均の結晶粒の大きさを示すものにして其の極小點即ち最も細粒狀態は宛も磁氣的硬度曲線の極大點に極めて近く存在するを見る。

尙今回測定せざりし他の物理的、化學的、金相學的及び機械的諸性質も總て此の現象に伴ひ同様な異常變化を起すべきものと信ず。

終りに望み著者等は本實驗中種々有益なる御助言を賜りたる本多教授に深謝し又本研究並びに發表の機會を與へられたる日本特殊鋼合資會社々長工學博士渡邊三郎氏に對し深甚なる謝意を表せんとす。實驗中磁氣的硬度の測定に互理直毅君を又機械的諸試験に平田作一君を煩はしたること大なり茲に厚く兩君の勞を感謝す。

参考文献 (1) 松下、東北帝國大學理科報告、11(1922)471 (2) 松下、E. Maurer. Rev. de Met., 10(1908)711 (3) 松下、東北帝國大學理科報告、7(1918)43 (4) 齋藤、" 9(1920)281 (5) J. E. Stead. Jour. of the Iron & Steel Inst., 1(1898)145 D. Goerens. " Carn. Sch. Mem.,



3 (1911) 320. A. Sauveur. Proc. of the Intern. Assoc. for Test. Mat., 2 (1912) C. Chappel. Jour. of the Iron & Steel Inst., 1 (1914) 460. (6) 松下、本誌、第十二年第二號 177 (7) 前掲。

## 緊張力試験に於ける試験片切斷の徑路に就て

絹川 武良 司

### 目 次

#### 第一章 緒 言

#### 第二章 局部面積縮少を起せる試験片の金相學的觀察

##### 第一節 局部面積縮少を起せる試験片の内部 第二節 結晶の永久變形

#### 第三章 試験片切斷の機構

##### 第一節 棒狀試験片に於ける横斷面積の大小と面積縮少率の關係 第二節 棒狀及び管狀試験片に於ける面積縮少率 第三節 板狀試験片に於ける局部面積縮少 第四節 試験片切斷の機構

#### 第四章 緊張力試験の際に起る各種現象の説明

##### (I) 切斷後の破面 (II) 板狀又は方形横斷面の試験片に於ける局部面積縮少 (III) 管狀試験片に於ける面積縮少率 (IV) 外力による應力に直角に應力を加ふる場合の緊張力試験 (V) 常溫引抜きを加へたる材料の緊張力試験

#### 第五章 壓縮試験

#### 第六章 結 論

以 上

### 第一章 緒 言

多結晶 (Poly grain) の靱性に富む金屬 (Ductile metal) 試験片が緊張力試験 (Tensile test) に際して受くる力學的關係に就ては既に多くの學說が發表せられておる。

これ等の學說の多くのものに於ては試験片全體を一つの均質體 (Isotropic body) と見做し其金屬に固有な弾性限 (Elastic limit) 内だけでそれ等の力學的關係が成立するものとして實際的に重要な多くの法測が導かれておる。然しながら事實は有方向的 (Unisotropic) な多數の結晶が集合して一つの試験片を構成しておるのであるからかゝる試験片の緊張力試験の際に起る現象を吟味する場合には Mohr が其の著書の中にも言へるが如く個々獨立して存する結晶の特性を考ふると同時に結晶相互が共存する爲めに發生する性質をも考へなければならぬ場合もあるであらう。

F. C. Thompson の說に従へば個々の結晶の弾性限は金屬の種類によりて異なるは勿論、試験片の大小並びに考ふる結晶の試験片内に於ける位置にも關係するとのことである Thompson の説明する處によれば試験片の表面に於て自由表面 (Free surface) を有する結晶では加へられたる力に應じて比較的自由に滑行面 (Slip plane) に滑行 (Slipping) が起り得るが試験片の内部の結晶はこれに隣接する他の結晶の境界 (Grain boundary) の爲めに滑行が牽制 (Restrained) せらるゝが故に表面に於ける結晶よりもより大なる應力 (Stress) を生ずるに至りて始めて滑行が起るから試験片の内部の結晶の弾性限は表面の結晶の弾性限よりも大であると