

特種鋼材の二三の性質に就て

(質量効果、熱戻残留歪力、熱戻脆性)

(昭和三年十一月日本鐵鋼協會第四回講演大會講演)

佐々川 清

緒 論

第1節 質量効果

第2節 熱戻残留歪力

第3節 熱戻残留歪力の除去法並に熱戻脆性に就て

結 論

ON SOME PROPERTIES OF ALLOY STEELS. (mass effect; residual stress due to tempering; temper-brittleness) K. Sasagawa

According to the industrial progress, it is evident that the demand is going up to get large steel mass having the great stiffness and toughness. This problem will be solved by using some alloy steels in spite of plain carbon steel. To have good alloy steel it is necessary that the large mass is thoroughly uniform.

Some special properties of alloy steels are investigated and described here.

1) Mass effect; :- Steels used are plain C-steel, Ni-steel, Cr-steel, Ni-Cr-steel, Ni-Cr-mo steel, long rods of various diameters are forged from ingots, Annealed and quenched in water and in oil from hardening temperature. Hardness change through the sectional area is measured, Theoretical interpretation is made on the phenomene of mass effect, concerning to the chemical composition, cooling velocity and the mass,

2) Residual stress due to heat treatment; :-Several methods to measure the internal stress are described, Some experiments are made to research the residual stress due to heat treatment in using large mass of alloy steels, Some methods to eliminate the residual stress are discussed,

3) Temper-brittleness; :-The phenomene of temper-brittleness is described, To ascertain the relation between the temper-brittleness and tempering temperature, some experiments are made,

Conclusion; :-To have good alloy steels of large mass, it is necessary to select the steel without or least mass effect. To avoid the effect of residual stress due to tempering, it must be reheated to a high temperature for some hours, but the temperature must be selected that no temper-brittleness well occur.

緒 言

工業の進歩發達に連れて、使用される鋼材が増々大きくなり、而かも材力が強くて、靱性に富むものが、要求される様になつて來たのは當然である、鋼材として従來は、炭素鋼が一般に使用されて居たが、抗力が不足なので、勢ひ特種の合金鋼が次第に採用される様になり其の材質的研究が行はれると同時に均一なる缺陷の無い鋼材を得る爲に特殊鋼の熔解、注型、鍛鍊、熱處理等が種々研究される様になつて來た。

殊に砲身とか各種軸類とか云ふものの様に長大で直径が大きく而かも僅かの缺點も重大なる危険を

生じ勝ちな、鋼材に對しては少しの、缺陷も無く均一で全長に渡り一樣に強大なる、抗力を有することが必要である、之等の要求を満足させることは實際に於ては非常に難かしいことであり従つて合金鋼の選擇に當つても充分注意して各種の方面から研究しなければならない。

今茲に述べ様とする事柄は結局、之等の大きな要求に對して考へなければならぬ種々の條件の内、從來餘り考へられなかつたもので、而かも随分大切な事項に關する研究の結果である。

第1節 質量效果

鋼材は一般に其の抗力大にして而かも強靱ならしむる爲には普通、鋼の有する變態點以上の溫度から急冷し、其の後變態點以下の溫度に再熱するのであるが、此の内焼入作業に於て、冷却速度が急速であればある程完全に焼が入ることは周知の事實である、又焼入が完全なものは、焼戻作業によつて、極細かい所謂ソルバイト組織を得ることが出来る故、熱處理後材質として極めて優秀なるものを得る。

低炭素鋼は之を焼入しても仲々硬くすることは困難であるが、Ni-Cr 鋼の或種のものには空中放冷した位でも完全に硬くなることがある、即ち焼入の難易は鋼材の成分によることも明かである。

小さな質量或は直徑の小なる材料は之を變態點以上に熱した後、急冷すれば自硬性の強い材質（冷却の場合、變態點降下の著しいもの）でなくても相當均一に硬くすることが出来るけれども大なる質量或は直徑の大なるもの（冷却面より鋼材の中心迄の距離の大なるものの意、以下同じ）では冷却物質に接觸した極めて表面のみは硬くなつても内部には殆ど焼が入らない場合がある、又多少自硬性のあるものでも、質量が大きくなり或は表面の冷却速度が遅い時には内部迄を焼入状態にするのは仲々困難である、前述した様に砲身、軸類、甲鐵板其の他質量が大きく、或は肉厚の大なるものは内外部何れも均一であることが希望條件の一つであるので茲に質量、冷却速度及び材質成分の焼入效果に對する影響を明かにすべく次の實驗を試みた。

實驗

實驗に供した材料は、炭素鋼、Ni 鋼、Cr 鋼、Ni-Cr 鋼及び Ni-Cr-Mo 鋼の5種類で、其の分析成分は次の通りである。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
炭素鋼	·42	·36	·68	·017	·008	—	—
ニッケル鋼	·35	·30	·61	·020	·007	2.78	·09
クロム鋼	1.01	·31	·44	·013	·006	0.71	1.22
ニッケルクロム鋼	·29	·09	·35	·026	·009	3.53	·80
ニッケル、クロム、モリブデン鋼							

使用鋼材は何れも、電氣爐製で鋼塊を鍛鍊して各種材質につき長さ 300 mm、直徑 50 mm、100 mm、及び 200 mm の 3 種の圓筒を總て 2 個宛製作した。

鋼材は先づ充分なる焼鈍の後暖爐中で 850°C に 2.5 時間保熱し、(炭素鋼のみは

900°C)之を水中及び油中に投入して冷却焼入をなし次に長さの中央部に於て兩側から酸素アセチレン瓦斯焰で切込みを入れ、水壓機で壓して切斷し、先づ斷面寫眞を撮り、次に此の面を研磨し斷面の外

側から中心に向つて 5 mm おきに 2 列にブリネル及びショアー試験機で硬度を測定した。

断面の寫眞は後尾に附してあるのである。

實驗結果

測定したブリネル硬度數と材質の肉厚との關係を見る爲に、之を圖示して見たものが附圖第 1 第 2 及び第 3 である、試験にはショアー式硬度も測定したが大體同様の結果を示した故、茲にはブリネル硬度數のみを掲げる。圖に於て縦軸は硬度數を表はし、横軸は肉厚(試料の断面直徑)を示す。圖中に見る細線は 2 列に測定した硬度數値を、別々に連結したもので、太線は其の平均値を出して鋼材の断面の有する硬度の變化の傾向を示したものである。

1. 直徑 50 mm 鋼材に就て (附圖第 1)

第 1 圖を見るに、鋼材の成分の差及び冷却速度の異なる爲に焼入硬度が如何に違ふかが判る、肉厚の中心部で、炭素鋼は水焼、油焼共に硬度が 205 乃至 230 なるに拘らず、Ni 鋼では水焼 420 油焼で 280 Ni-Cr 鋼は 460 と 390、Cr 鋼は 600 と 435、Ni-Cr-Mo 鋼は共に 600 附近である。即ち鋼材に含まれる他の元素の量並に種類によつて、焼入硬度が著しく異り、又焼の入り難い炭素鋼と自硬性の著しい Ni-Cr-Mo 鋼は、水冷と油冷による硬度が大差無きに反し、其の他の鋼材では冷却速度の影響が多く、Cr 鋼の如きは其の差 150 以上に及ぶ。

茲に興味の深いのは、直徑 50 mm 位の肉厚の薄いものでも圖上で見るが如く表面と中心部との硬度差は可成あつて Ni 鋼水冷の如きは其の差 50 以上に及んで居る、而かも本試験ではブリネル硬度を測定した爲、表面迄は充分測定しなかつたが、實際表面の硬度は更に高いものであらうから其の差は圖に見る以上に大きなものと思はれる、(Ni 鋼で 50 mm 直徑でも既に内外部の機械的性質が異なるといふことについては 1926 年 Iron & Steel Institute で英國の Dr. Rosenhain が述べて居る所である) 従つてこんな小さな鋼材でも、完全に焼を入れると云ふことは仲々困難であることが判る。

2. 直徑 100 mm 鋼材に就て (附圖第 2)

第 2 圖の曲線と第 1 圖の曲線とを比較すると既に著しい差異が現はれて居るが簡単にする爲に直徑 100 mm 鋼材に就ての説明は省略して直徑 200 mm 鋼材につき觀察することにする。

3. 直徑 200 mm 鋼材に就て (附圖第 3)

直徑 200 mm の鋼材に就て得た結果(附圖第 3)、を直徑 50 mm、或は 100 mm の場合(第 1、第 2 圖)と比較すると更に興味深い關係があることが判る、(第 1 表参照) 先づ肉厚の中心部の硬度を圖上より調べて見るに、Ni-Cr-Mo 鋼を除いては、水冷も油冷も大差なく精々 20 位水冷の方が高い、そして油冷の場合にて硬度は炭素鋼で 185、Ni 鋼 255、Cr 鋼 330、Ni-Cr 鋼 310、Ni-Cr-Mo 鋼 430 と、順に分析成分によつて自ら異なる、今之を直徑 50 mm の場合と比較して見ると第 1 表の様に、一般に硬度がづつと低いことが判る、殊に自硬性の強いものでは其の差が著しい、直徑 50 mm の鋼材では前述した様に水焼と油焼との中心部の硬度差が随分激しいけれ共、直徑 200 mm になると極僅少になる、

第1表 各種鋼の焼入硬度に及ぼす肉厚及び冷却速度の影響

鋼種	直径 焼入法	D 50mm		D 100mm		D 200mm	
		油	水	油	水	油	水
中心部に於ける硬度數	C 鋼	205	230	185	210	185	195
	Ni	280	420	250	240	255	260
	Cr	435	600	340	375	330	340
	Ni-Cr	390	460	310	390	310	340
	Ni-Cr-Mo	590	600	530	560	430	555
内外部の硬度數差	C	40	30	25	40	20	75
	Ni	20	60	15	25	25	190
	Cr	25	15	75	250	75	260
	Ni-Cr	60	40	25	80	25	140
	Ni-Cr-Mo	15	0	20	10	40	25

つて非常に差異のあることが明瞭である、肉厚大なるものを水冷した場合は内外部の硬度差は随分甚だしく、其の度合は冷却速度の影響を相當受ける Ni 鋼、Cr 鋼等に於て殊に著しい、自硬性の少ない炭素鋼、自硬性の甚しい Ni-Cr-Mo 鋼などでは却つて内外の差は餘りない、冷却速度を急にすれば内部まで充分焼の入らないものでも外部は相當焼入状態にすることが出来る、併し油焼の様に冷却速度が比較的遅い時は肉が薄ければ相當焼きを入れることも出来るけれども肉厚のものでは可成困難である、従つて充分な焼入組織を得る爲には、分析成分を變更して自硬性を増す様にしなければならない、大きな鋼材を造る場合には此の點を充分考慮に入れる必要がある、焼入が充分出来なければ、焼を戻しても良好な機械的成績を得ることは困難で、小さな試験棒で随分良い成績を得ても大きな質量になると思つた程ウマク行かないと云ふのは即ち之が爲である。

外國の或會社では大きな鋼材を Ni 鋼で造つて之を水焼して居る、然しながら前述した様に焼入効果が不充分の爲之を焼戻したとき、肉厚の内外部の機械的性質の差違が甚しく、殊に弾性限に於て著しく現はれる、第4圖其1は肉厚による弾性限の變化を示すもので、冷却面に近い所が 46.6^k 及び 41.3^k なのに對し、肉厚の中心部では 38.0^k しか無いと云ふ甚しい相違を示して居る、之は外径 465mm 内径 160mm の圓筒材を水中焼入して、焼戻した例である、之に對して Ni-Cr 鋼を用ゐて油焼、油戻した場合は第4圖其の2に示す様に肉厚による弾性限の差異は殆ど無いのである、即ち質量効果と云ふ點から云ふと、Ni-Cr 鋼は Ni 鋼に優れて居ると云ふことが出来るのであるが次節に述べる焼戻残留歪力は Ni 鋼には無いと云ふ利益がある。

參 考

供試各種鋼材の冷却速度の差による變態點の變化は示差熱膨脹曲線を書いて見ると、了然である、第15圖(附圖)は即ち之で Chévenard 式装置に依つて測定したもの、冷却曲線中に見る變態點の急冷及び緩冷による差は炭素鋼と Ni-Cr-Mo 鋼に於て少なく其の他の鋼材に於て著しい、此の事は

但し外部の硬度は水焼の場合には 200mm のものでも、可成高く 50mm に近い數値を示して居る。

Ni 鋼や Cr 鋼では殊に水冷による内外部の硬度差が甚しく 260 に及んで居る。

油焼の場合には左程著しく無く、Cr 鋼でも 75 位である。

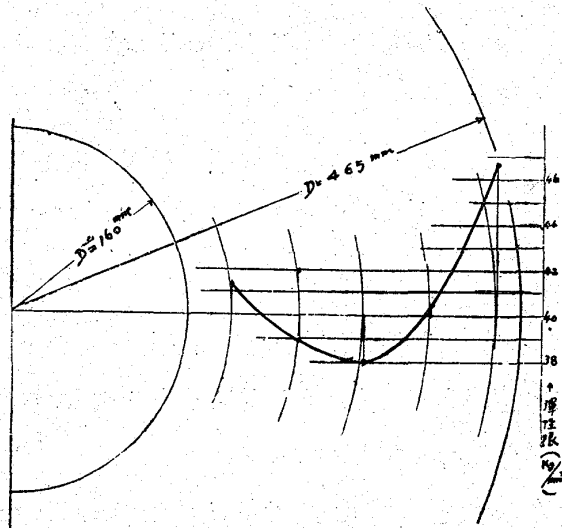
結果の綜合

以上述べた様に焼入硬度に對する肉厚の影響は冷却の速度、分析成分によ

第4圖 弾性限に及ぼす熱処理の影響

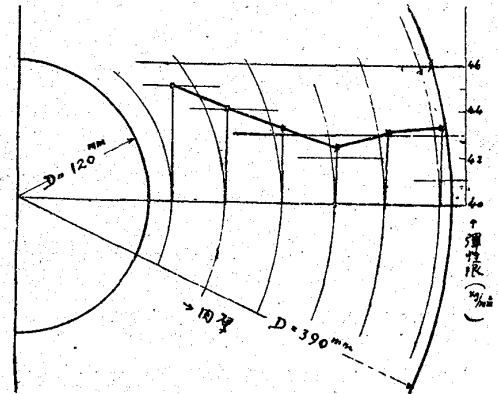
其の1 Ni鋼 水焼 空気炭

D=465mm
d=160



其の2 Ni-Cr鋼 油焼 油戻

D=330mm
d=120



前述の事實とよく一致する、因に、緩冷曲線に於ける變態點の降下は自硬性の程度を示すもので自硬性の甚しいもの程變態點の降下は著しい。

第2節 焼戻残留歪力

鋼材を焼入した時、鋼材中に生じる歪力が随分大きなものでそれが焼割れや變形の原因になると云ふことは、誰でも知つて居る事實であるが焼入れ後焼戻をした時に残る歪力に就ては從來余り問題にされて居ない、併し僅かな狂ひが重大問題となるべき推進軸や曲肱軸或は砲身等に對しては鋼材中に残る歪力は出得る丈小さくする必要がある、又近來發達して來た、圓筒に内壓を加へて變形を生ぜしめる方法等に於ては、残留歪力を考へに入れないと計算通りの變形を得ることが出来ないことになる。

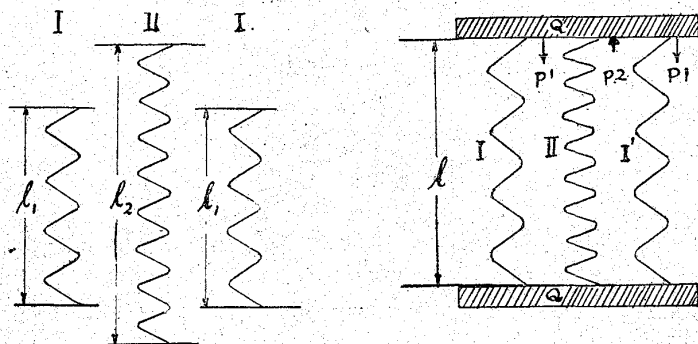
焼戻残留歪力は、焼戻後の冷却を緩徐にすば無くすることが出来る従つて炭素鋼、Ni鋼等では餘り問題ににならない、併し焼戻後緩冷すれば所謂焼戻脆性を生じて材質が極めて脆弱となる Ni-Cr鋼の如きはどうしても水冷又は油冷の様な急速な冷却をしなければならないので残留歪力も亦相當大きくなつて來る。

此の残留歪力は焼戻をしてから更に低温焼鈍を施せば多少減少せしめ得るものであるので茲に先づ焼戻残留歪力の測定方法を簡単に述べ、其の方法で實驗した結果を示して歪力の分布状態を調べ次に残留歪力と溫度及び時間との關係に關する研究結果を連ね一方、焼戻脆性と溫度との關係を明かにし、焼戻脆性を生ぜず而かも残留歪力を最小にすべき溫度と時間とを記述し様と思ふ。

焼戻残留歪力の測定法

茲に I, II, I, なる3つの發條があつて、力を加へないとき、 $l_1 l_1$ 及び l_2 の長さを有するとする。今之を QQ なる2つの棒に結びつけば I, I, は延び II に縮まつて、結局 l なる長さになる。此

の場合 $l_2 > l > l_1$ である。従つて I, I' 發條は P_1 なる力で Q を引かんとし、II なる發條は P_2 なる力を以て押さんとする。



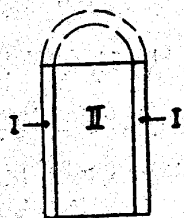
即ち平衡状態に於て $P_1 + P_1 - P_2 = 0$ つまり外力の影響が無くても 2 本の棒の間には、或る力が働いて居るのであつて此の力を内部歪力と云ふ。而して此の場合 I, I' は緊張、II は壓縮の状態であることが判る。

圓筒形の鋼材の場合にも同様なことが云はれるのであつて豫め圓筒の切斷面の或る部分につき同心圓的に直径を計り、次の其の直径だけ環を切り取ると此の環の直径は或は増し或は減ずることがある。此の場合環の部分は豫め内部壓縮歪力或は緊張歪力を有して居たと云ふのである。

圓筒鋼材に内部から壓力を加へたり或は鋼材を熱して急冷したりすると鋼材の有する内部歪力は部分的に相違を生ずる、此の内部歪力測定の方法は種々あるが今茲に其の 2・3 につき簡単に説明する。

其の 1 表面削りによる長さの變化の測定による方法

圓筒鋼材に、内部歪力があるとき (次圖参照) I を削り去れば II の長さに變化を生ずる、此の場合 II の長さが元より大となれば I' の部分は緊張、II の部分は壓縮の状態にあつたことが判る。



今左圖 1 の部の切斷面積を f_1' とし、殘部を f_1'' とし、I 部に前からあつた、内部歪力を σ_1 とし、元部の歪力を σ とし、又 I を削りたるとき長さを l_1 、元部の長さを l とすれば

$$\sigma = E \frac{l - l_1}{l} \quad f_1' \sigma_1 = f_1'' \sigma \quad \sigma_1 = E \frac{f_1''}{f_1'} \frac{l_1 - l}{l}$$

同様に表面から順に薄層を削つて、殘部の長さを計れば、各部分の有して居た、内部歪力を知ることが出来るのであつて、Dr. Heyn は此の方法を用ゐて冷間延伸をした鋼棒について内部歪力の分布状態を調べた。

此の方法は内部歪力が可成大で材料が小さい場合には非常に便利ではあるけれども直径の大きい鋼材では長いものを削り去ることは不經濟であるので吾人は次に述べる方法を採用することにした。

其の 2 環狀試験片採取による測定方法

鋼材内部に存在する、内力の強さ及び分布の状況の測定方法の一として横斷面につき同心狀に數個の圓環を切り取り、各環毎に切り取り前と切り取り後との、直径を比較測定し、其の變化量から内部歪力を測るのである、此の方法で測り得るものは切線方向の歪力のみであり、又試験環は外層内層を問はず、總て切口面積が等しい故、各試験環が切り取り後完全に歪を發現するものではないけれども

大約の状況は鏡ふに足るのである。

夫れで、次に述べ様とする研究に於ては主として此の方法によることにした。

試験環切取作業は、先づ圓筒の端面を仕上げて置き（端面とは熱処理したときの端面より少くとも半徑に等しい長さの材料を切り去つた後に現はれた面のことである）附圖第4圖の様に錐引をなし突切鉋で約1mm程の圓形の溝を切込み、其の徑を寸法通りに合せ精確に直徑を測定し、次に其の徑に沿つて切込を入れ、深さを10mmとする、斯くして數多の同心圓狀切込を入れ、次に帶鋸で之等の環を切り落し環の内外直徑を四方面から測定するのである。第4圖は中空鋼材、内部加壓後の内部歪力測定用試験環採取位置を示して居る。環は便宜上其の切口の面積を10×10mmとする、間隔もなるべく10mmにし、猶精密なる結果を得る爲、2列に試験環を採取し、第2列の試験環は第1列の試験環の間隔部に相當する所から採取する。

第2表(附表)は加壓圓筒の内部歪力測定結果であつて前述の方法によるものの一例である、前述した通り試験環は切落し以前に其の内外直徑を四方向にて測定し、切落し後又同様の測定を施行したものであるけれども一、一列記するのは無益故第2表には試験環採取位置(直徑)、切線方向の歪み及び切線方向の歪力のみを掲げた、猶彈性率は總て $21,000 \text{ kg/mm}^2$ として計算した。附圖第5圖は此の内部歪力の變化を圖示したもので、横軸は直徑を、縦軸には歪力を表はす、鋼材には内部にて壓縮、外部に近く緊張歪力を有し、最外部に於て再び緊張力が減少して居るのを見る。

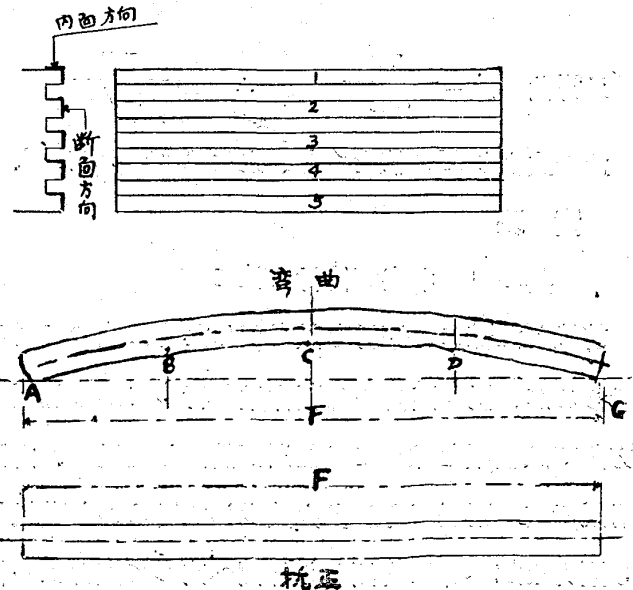
其の3 厚板材の内部歪力測定方法

厚い鋼板類の有する内部歪力も前述の方法を多少變更して測定することが出来る、第3表及び第6圖は油焼後水鈍して施した、100mmの厚板の有する残留歪力を測定した結果である、先づ板を切断し断面の長さを280mmとし、断面を仕上げ之から前述の様に等距離に10×10mmの棒を截取し、其

第6圖

第3表 100mm厚板(油焼水鈍)の有する残留歪力
(+は緊張、-は壓縮)

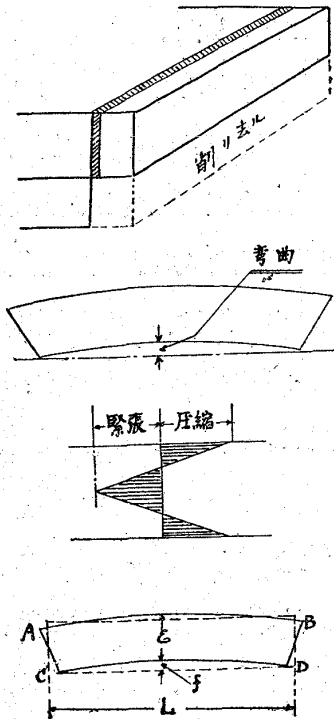
最初寸法	彎曲率					長さ(F)	長さの變化(彎曲を換算し)	歪力 kg/mm^2
	A	B	C	D	E			
mm 280,445	0	.42	.61	.42	0	280.560	-1153	-8.63
	0	.30	.42	.28	0	280.425	+0199	+1.49
	0	.06	.02	.0	0	280.330	+1150	+8.61
	0	.40	.58	.40	0	280.435	+0097	-0.73
	0	.31	.43	.23	0	280.585	-1401	-10.48



の長さの變化を測定したのである、10mm角の棒は何れも多少彎曲を生じたが之は棒の表面に存在する、歪力が異なる爲に起る結果である、此

の彎曲を考へに入れて長さの變化を測定すれば鋼棒の有する平均の歪力が計算出来る、計算の結果は

第 7 圖



厚鉄の中心部と外面とは歪力の數値が殆ど同じで方向が相反することが判つた、猶外側は壓縮で中心部は緊張の狀況にある。

此の方法では實驗が相當面倒である故、之を簡單にすべく次の方法が考へられる、(第7圖参照)

今厚鉄を前と同様切斷し、斷面を仕上げ斷面の長さを 280mm とし、次に斷面の中心より外側へ半分だけを削り去り、次に斷面より 30mm 程の所より鋸にて鋼材を切り落す、鋼材の長さは正確に測定して置く、切り落された鋼材は切斷後内部歪力により、變形し彎曲を生じる。

前述の實驗で熱處理によつて生じた内部歪力は、外側と中心部とは其の數値相等しく、方向相反することを知つた故生じた彎曲を精密に測定すれば、次式により最大内部歪力を知ることが出来るのである。

今 L一邊の長さ E厚さ f彎り KABとCDの變化係數、即ち兩邊の長さの變化を 1,000 分比にて表はせるもの

緊張力、壓縮力は相等しく、彈性係數を 21,000 とせば

$$\text{緊張力} = \text{壓縮力} = 21,000 \times \frac{K}{1,000} \times \frac{1}{2} = 10.5 K$$

今鋼材の面は R なる半径の圓弧に沿ひて彎曲せるものとし、圓弧の中心に於て張る角を α とせば

$$\text{ABとCDとの長さの差} \frac{K}{1,000} \times L = (R+E)\alpha - R\alpha = E\alpha = \frac{E}{R} L \quad \therefore \frac{K}{1,000} = \frac{E}{R}$$

$$\text{又彎曲 } f = \frac{L^2}{8R} \quad \therefore R = \frac{L^2}{8f} \quad \therefore \frac{K}{1,000} = \frac{8Ef}{L^2}$$

此の式より K の値を出し、之を 10.5 倍すれば、最大内部歪力を得るのである。

實 驗

其の 1 中空圓筒材に就て

前述した様に、鋼材を熱處理した時に残つて居る内部歪力は從來餘り考へに入れられなかつたものであるが、偶々圓筒の加壓作業を行つてから加壓によつて圓筒中に生じた内部歪力を見るべく第2の方法で試験環を採つて見た所が前記した通り、内側は壓縮で外側に進むに従つて緊張状態となり外側附近で其の緊張歪力が多少減少して居るのを發見した、一體鋼材中に残留歪力が無いとすれば内部から壓力を加へれば内側から外側へ向つて歪力は一様に變化し、外側に於て最大の緊張力を示すべきである。然るに最大緊張歪力は肉厚の中部(外側に近い)にあつて外側の方が其の量の少ないのは鋼材

中に豫め内部歪力があつたと云ふことを證明するので而かも外側には壓縮内力があつたことが想像されるのである。それで熱処理した鋼材に就て同様の方法によつて内部歪力を測定して見た。

試験に供した鋼材は $C=0.3$ $Ni=3.5$ $Cr=0.8\%$ 位の Ni-Cr 鋼である、内径 170 mm、外径 580 mm の圓筒材で 820°C 附近より油中焼入後 620°C 附近で油中焼戻したものである、鋼材の一端を切り去り次に前述第 2 の方法により、各 10 mm 置きに、2 列に 10 mm 角の切斷面を有する試験環を截取した。

焼戻残留歪力測定の結果は、第 4 表 (附表) に示した通りで之を圖示したものが第 8 圖 (附圖) である。

圖上に於て明かなる如く、焼戻による残留歪力は案外大きなもので冷却面に近く壓縮力を肉厚の中央部に緊張力を有し、其の數値は 12 kg/mm^2 に達し鋼材の弾性限の $1/4$ に及ぶ、最大緊張力は肉厚の中央より稍内側に近くそれより内側に向つて歪力の變化が急で、外側の方は緩慢である。

再焼鈍温度の影響

焼戻残留歪力が、斯くの如く豫想外に大きく其の爲に圓筒内加壓作業に於て所定通りの變形或は内力の分布を得なかつたことが判つたので此の残留歪力を出來得る限り減少せしむるの目的を以て鋼材を 400°C 及び 500°C に 10 時間焼鈍し、其の後空氣中放冷をして前と同様の方法で内部歪力の分布状態を見た、第 5、第 6 表 (附表) 及び第 9 第 10 圖 (附圖) は即ち其の結果を示すものである。

400°C 焼鈍に於ては内側の壓縮力は 12 kg/mm^2 で熱処理後其の儘の場合と大差は無いけれども肉厚の中部の最大緊張力はずつと減少して 12 kg/mm^2 のものが 9 kg/mm^2 になつて居り、更に外側の壓縮が 9 kg/mm^2 から 6.5 kg/mm^2 に減少して居る。

500°C 焼鈍に於ては、焼鈍の影響が一層明瞭で内側及び外側の壓縮力及び中央部の最大緊張力共に僅かに 3 kg/mm^2 であり、之を焼戻後其の儘の、それと比すれば充分焼鈍の効果があつたことが判る。

400°C のものも 500°C のものも、最大緊張力の存在する位置は焼戻後其の儘の場合と同じく肉厚の中央より稍内側に近く、緊張力より壓縮力に變化する度合は内側へ向つて急で、外側へ向つては緩である。

猶 500°C に 10 時間焼鈍したら歪力は $1/4$ に減少はしたけれども完全に無くなつた譯ではない、従つて之だけの大きなものの歪を全然無くする爲には、更に温度を上げるか或はもつと長い間焼鈍する必要があることが判る。

其の 2 鋼板材に就て

鋼板材に於ける、内部歪力の測定方法は前節に記した通りであるが前述の焼戻残留歪力が甲板材に於ても存在することの見當がついたので熱処理後其の儘の状況、温度の影響、時間の影響等を見るべく次の實驗を試みた。

實驗に用ゐた材料は、炭素、Ni Cr 等の含有量の多い Ni-Cr 鋼で厚さ 100 mm の鋼板を 820°C 附近より油中冷却し、620°C 附近で水中焼戻を施したものである、之を長さ 280mm に切り、前述した方法により、板の半側より試験片を採取して其の彎曲を測定した、測定結果は次の通りである。

第 7 表

	L(長さ)	E(厚さ)	f(彎曲)	歪力	
焼入、焼戻の儘	280.59mm	49.3mm	.30	15.7kg	即ち熱處理後其の儘のものは表面に於て 15.7 kg/mm ² の壓縮力を中央部に同じだけの緊張力を保有し居ることが判つた。
400°C × 10 時間焼鈍	280.19	49.8	.067	3.57	之を 400°C、500°C、及び 600°C の各溫度に 10 時間焼鈍し、空氣中で冷却して見た所 400°C 焼鈍により 15.7 kg/mm ² の歪力は 3.57 kg/mm ² に減じ、500°C 以上では完全に歪力が無くなつて仕舞つた。
400" × 50 " "	280.19	49.9	—	—	
500" × 10 " "	280.18	49.8	.004	21	
600" × 10 " "	280.19	49.8	—	—	

又 400°C で 10 時間及 50 時間熱して見たら、50 時間の焼鈍で歪力は完全に消滅したことが判つた。

此の實驗結果によると、100mm 厚さの鋼材では 500°C に 10 時間熱するか、或は 400°C に 50 時間熱すれば完全に歪力を除くことが出来るのである。

其の 3 鋼塊に有する内部歪力

第 8 表 (附表) 及び第 11 圖 (附圖) は参考として實驗して見た、鋼塊の有する内部歪力測定の結果である。鋼塊は八角形で直径は角で 615 mm、谷で 525 mm、鋼塊の材質は C=0.3 Ni=0.49 Cr=0.06% の分析成分のもので、注型後空氣中で冷却したものである。

圖でよく判る様に、鋼塊に於ても、外側は壓縮、中部は緊張の状態である、併し其の數値は案外少く、2 kg/mm 内外である。

第 3 節 焼戻残留歪力の除去法並に焼戻脆性に就て

以上述べた様に、焼戻残留歪力は之を或る溫度に適當時間再熱すれば殆ど消滅せしめ得るものであり、又焼戻後の冷却速度を緩慢にすれば殆ど生じることは無い、併し茲に厄介なのは所謂焼戻脆性と云ふ現象である。

『焼戻脆性』とは誰も知る通り、Ni-Cr 鋼の様な鋼材を焼戻し後緩冷した時に鋼材が極めて脆弱となる現象で、其の溫度範圍は普通 450°C 乃至 700°C である。

第 12 圖は焼戻脆性の溫度範圍、第 13 圖は焼戻脆性と冷却速度との關係を示したもので實驗に供した鋼材の成分及び機械的性質は第 14 圖の表の通りである。

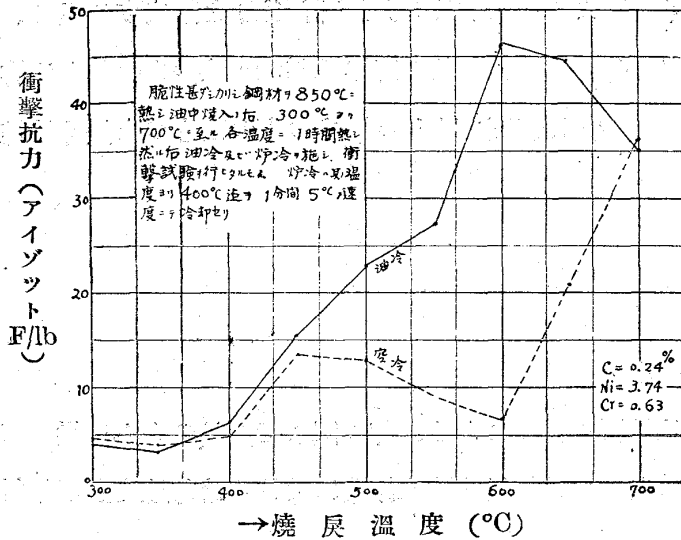
第 12 圖で明かである様に此の種の鋼材を 500°C 以上から緩冷すれば鋼材は脆弱となり、衝撃的荷重を受ける場所に使用することは極めて危険である。

従つて、譬へ前述した様に、焼戻による残留歪力を除くには溫度を高くして焼鈍する方がよいと云ふても、一方に此の危険性を伴ふて來るから結局、焼鈍溫度は 450°C 以下に制限されて仕舞ふので

ある。

又焼戻脆性は 500° 以上 700°C 以下から、緩冷するとき生じるもの故焼戻残留歪力を除く爲、

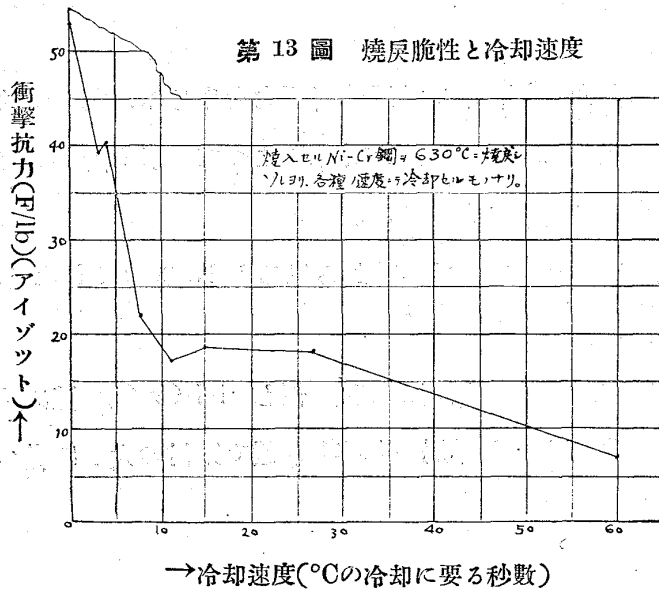
第 12 圖 焼戻脆性の温度範囲



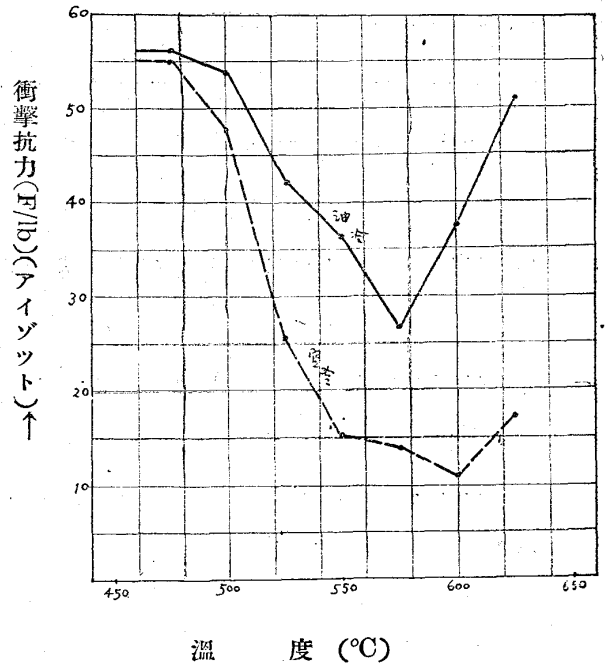
焼戻温度よりは低い温度、即ち 500°C 或は 550°C に熱してそれから急冷すれば歪力を減らすことが出来ると云ふことも考へられるが、實際に於て焼戻靱性を有するものを再焼鈍して後急冷しても矢張り脆弱になることが實驗の結果證明された故此の方法も好ましくないと云ふことが云へる。

第 14 圖は再焼戻後の冷却速度と、衝撃抗力との關係を示すもので緩冷したものは勿論急冷したものより脆性を帯びて居るが急冷したもので 450°C 以下に熱したものよりは、

第 13 圖 焼戻脆性と冷却速度



第 14 圖 再焼戻後の冷却速度と衝撃との關係



	分析成分						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.24	0.13	0.66	0.023	0.018	3.74	0.63
	機械的性質						
	弾性限 kg/mm ²	破断界 kg/mm ²	延伸 %	断面 収縮 %	ブリ ネル 硬度 数	アイ ソ ット 衝 撃 値 F/lb	
緩冷	59.6	72.7	19.3	41.0	222	45	
油冷 600°C	58.3	72.2	19.3	45.4	220	478	

大分脆くなるのである。

結局 Ni-Cr 鋼の様に、焼戻脆性を生じ易いものは、焼入焼戻後の冷却を急にして、其の後急冷によつて生ずる焼戻残留歪力を除去する爲に、450°C 附近に於て肉厚 100mm 位のものならば約 10 時間それ以上の厚さのものをもつと長く焼鈍

して緩冷することが必要である。

結 論

以上述べた、研究結果を綜合して次の結論を得る。

1. 鋼材は熱処理によつて内部迄均一な機械的性質を得ることは、却々困難で質量の大小に従つて熱処理の効果は自ら異なるものである、而して其の質量効果は焼入作業に於ける冷却速度及び鋼材の分析成分に盡大なる関係がある。
2. 一般に自硬性の少ない鋼では質量の影響が激しい、自硬性の強いものでは質量の大きさは焼入効果に大なる影響を及ぼさない、此の意味に於て大なる鋼材用として Ni-Cr 鋼或は Ni-Cr-Mo 鋼は Ni 鋼に優る。
3. 鋼材を熱処理するとき、焼戻後の冷却速度が急だと鋼材中に焼戻残留歪力を生じる、此の量は相當大きなもので僅かな變形が重大なる影響を生じる砲身、軸類、計算によつて變形や内部歪力を生ぜしめる圓筒の加壓作業等に於ては随分注意すべきことである。
4. 焼戻残留歪力は焼戻後の冷却速度を緩にすれば生じない、此の點から見ると Ni 鋼は Ni-Cr 鋼より便利である。
5. 焼戻残留歪力は低温度で或る時間焼鈍すれば軽減することが出来る、但し Ni-Cr 鋼の様に焼戻脆性を生ずる心配のある鋼材では温度に自ら制限を生じ結局 450°C 附近で鋼材の大きさに従つて適當なる時間熱するのが一番良い方法である。『終』

中空鋼材焼戻残留歪力 (弾性率 21,000kg/mm²)
(+緊 張 - 壓 縮)

第4表 焼入焼戻後

第5表 400°C×10時間焼鈍

区分	直徑 (mm)	切線方向の歪み	切線方向の歪力 kg/mm ²	
其 の 1	外徑	566	- 000442	- 9.3
	内徑	546	- 000458	- 9.6
	外徑	526	- 000223	- 4.7
	内徑	506	- 000232	- 4.9
	外徑	486	- 000072	- 1.5
	内徑	466	- 000075	- 1.6
	外徑	446	- 000022	- 0.5
	内徑	426	- 000023	- 0.5
	外徑	406	+ 000265	+ 5.6
	内徑	386	+ 000278	+ 5.8
	外徑	366	+ 000581	+ 12.2
	内徑	346	+ 000614	+ 12.9
	外徑	326	+ 000537	+ 11.3
	内徑	306	+ 000571	+ 12.0
	外徑	286	+ 000463	+ 9.7
	内徑	266	+ 000497	+ 10.4
	外徑	246	+ 000091	+ 1.9
	内徑	226	+ 000100	+ 2.1
	外徑	206	- 000522	- 11.0
	内徑	186	- 000577	- 12.1
其 の 2	外徑	546	- 000307	- 6.4
	内徑	526	- 000318	- 6.7
	外徑	506	- 000167	- 2.5
	内徑	486	- 000195	- 3.8
	外徑	466	0	0
	内徑	446	0	0
	外徑	426	+ 000158	+ 4.1
	内徑	406	+ 000166	+ 3.5
	外徑	386	+ 000330	+ 6.9
	内徑	366	+ 000396	+ 8.3
	外徑	346	+ 000564	+ 11.8
	内徑	326	+ 000588	+ 12.6
	外徑	306	+ 000498	+ 10.4
	内徑	286	+ 000533	+ 11.2
	外徑	266	+ 000291	+ 6.1
	内徑	246	+ 000315	+ 6.6
	外徑	226	- 000365	- 7.7
	内徑	206	- 000364	- 7.6

区分	直徑 (mm)	切線方向の歪み	切線方向の歪力 kg/mm ²	
其 の 1	外徑	566	- 000305	- 6.4
	内徑	546	- 000316	- 6.6
	外徑	526	- 000176	- 3.7
	内徑	506	- 000183	- 3.8
	外徑	486	- 000180	- 3.8
	内徑	466	- 000188	- 3.9
	外徑	446	+ 000028	+ 0.6
	内徑	426	+ 000029	+ 0.6
	外徑	406	+ 000191	+ 4.0
	内徑	386	+ 000201	+ 4.2
	外徑	366	+ 000335	+ 7.0
	内徑	346	+ 000354	+ 7.4
	外徑	326	+ 000414	+ 8.7
	内徑	306	+ 000441	+ 9.3
	外徑	286	+ 000219	+ 4.6
	内徑	266	+ 000235	+ 4.9
	外徑	246	- 000132	- 2.8
	内徑	226	- 000144	- 3.0
	外徑	206	- 000534	- 11.2
	内徑	186	- 000591	- 12.4
其 の 2	外徑	546	- 000174	- 3.7
	内徑	526	- 000180	- 3.8
	外徑	506	- 000114	- 2.4
	内徑	486	- 000118	- 2.5
	外徑	466	- 000021	+ 0.4
	内徑	446	+ 000022	+ 0.5
	外徑	426	+ 000117	+ 2.5
	内徑	406	+ 000123	+ 2.6
	外徑	386	+ 000350	+ 7.4
	内徑	366	+ 000369	+ 7.7
	外徑	346	+ 000419	+ 8.8
	内徑	326	+ 000445	+ 9.3
	外徑	306	+ 000376	+ 7.9
	内徑	286	+ 000402	+ 8.4
	外徑	266	+ 000160	+ 3.4
	内徑	246	+ 000173	+ 3.6
	外徑	226	- 000310	- 6.5
	内徑	206	- 000340	- 7.1

中空鋼材焼戻殘留歪力 (彈性率 21,000kg/mm²) (+緊張, -壓縮)

第6表 500°C×10 時間焼鈍

第8表 鋼塊に殘留せる歪力

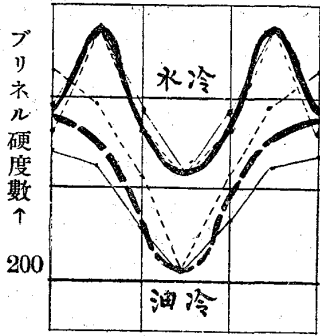
区分	直徑 (mm)	切線方向の歪み	切線方向の歪力 kg/mm ²	
其の1	外徑	566	- 000219	- 4.6
	内徑	546	- 000227	- 4.8
	外徑	526	- 000048	- 1.0
	内徑	506	- 000049	- 1.0
	外徑	486	+ 000010	+ 0.2
	内徑	466	+ 000011	+ 0.2
	外徑	446	+ 000045	+ 0.9
	内徑	426	+ 000046	+ 1.0
	外徑	406	+ 000086	+ 1.8
	内徑	386	+ 000091	+ 1.9
	外徑	366	+ 000109	+ 2.3
	内徑	346	+ 000116	+ 2.4
	外徑	326	+ 000150	+ 3.2
	内徑	306	+ 000159	+ 3.3
	外徑	286	+ 000122	+ 2.6
	内徑	266	+ 000132	+ 2.8
	外徑	246	+ 000020	+ 0.4
	内徑	226	+ 000022	+ 0.5
	外徑	206	+ 000085	- 1.8
	内徑	186	- 000094	- 2.0
其の2	外徑	546	- 000043	- 0.9
	内徑	526	- 000045	- 0.9
	外徑	506	- 000010	+ 0.2
	内徑	486	+ 000010	+ 0.2
	外徑	466	+ 000032	+ 0.7
	内徑	446	+ 000034	+ 0.7
	外徑	426	+ 000065	+ 1.4
	内徑	406	+ 000068	+ 1.4
	外徑	386	+ 000104	+ 2.2
	内徑	366	+ 000109	+ 2.3
	外徑	346	+ 000130	+ 2.7
	内徑	326	+ 000138	+ 2.9
	外徑	306	+ 000123	+ 2.6
	内徑	286	+ 000131	+ 2.8
	外徑	266	+ 000038	+ 0.8
	内徑	246	+ 000041	+ 0.9
	外徑	226	- 000066	- 1.4
	内徑	206	- 000073	- 1.5

区分	直徑 (mm)	切線方向の歪み	切線方向の歪力 kg/mm ²	
其の1	外徑	506	- 00044	- 9.24
	内徑	486	- 00046	- 9.66
	外徑	466	- 00035	- 7.35
	内徑	446	- 00036	- 7.46
	外徑	426	- 00023	- 4.83
	内徑	406	- 00025	- 5.25
	外徑	386	- 00003	- 0.63
	内徑	366	- 00003	- 0.63
	外徑	346	+ 00011	+ 2.31
	内徑	326	+ 00012	+ 2.52
	外徑	306	+ 00020	+ 4.20
	内徑	286	+ 00022	+ 4.62
	外徑	266	+ 00042	+ 8.82
	内徑	246	+ 00046	+ 9.66
	外徑	226	+ 00061	+ 12.31
	内徑	206	+ 00067	+ 14.07
	外徑	186	+ 00060	+ 12.60
	内徑	166	+ 00068	+ 14.28
	外徑	146	+ 00069	+ 14.49
	内徑	126	+ 00079	+ 16.59
外徑	106	+ 00071	+ 14.91	
内徑	86	+ 00087	+ 18.27	
其の2	外徑	480	- 00039	- 8.19
	内徑	466	- 00040	- 8.40
	外徑	446	- 00031	- 6.51
	内徑	426	- 00032	- 6.72
	外徑	406	- 00018	- 3.78
	内徑	386	- 00019	- 3.99
	外徑	366	+ 00010	+ 2.10
	内徑	346	+ 00011	+ 2.31
	外徑	326	+ 00019	+ 3.99
	内徑	306	+ 00020	+ 4.20
	外徑	286	+ 00031	+ 6.51
	内徑	266	+ 00033	+ 6.93
	外徑	246	+ 00051	+ 10.71
	内徑	226	+ 00055	+ 11.55
	外徑	206	+ 00055	+ 11.57
	内徑	186	+ 00060	+ 12.60
	外徑	166	+ 00060	+ 12.60
	内徑	146	+ 00069	+ 14.49
	外徑	126	+ 00069	+ 14.49
	内徑	106	+ 00083	+ 17.43
外徑	86	+ 00073	+ 15.33	
内徑	66	+ 00095	+ 19.95	

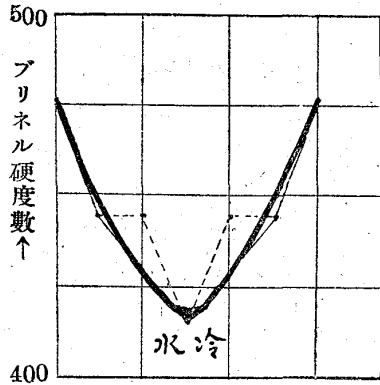
第1圖 焼入硬度と肉厚との関係圖

直径 50mm 焼入温度 850°C

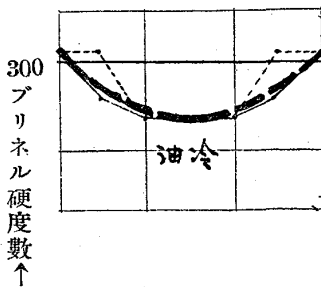
炭素鋼
C=0.42%



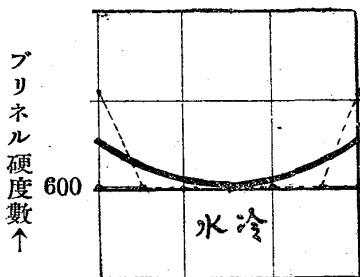
ニッケル鋼
C=0.35 Ni=2.80



ニッケル鋼
C=0.35 Ni=2.80

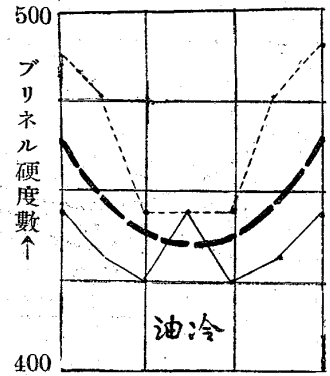


クロム鋼
C=1.0% Ni=0.7 Cr=1.2

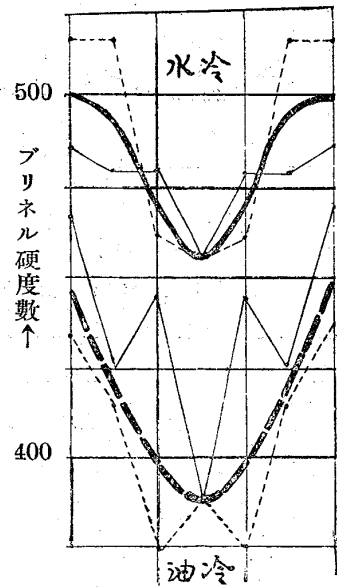


クロム鋼

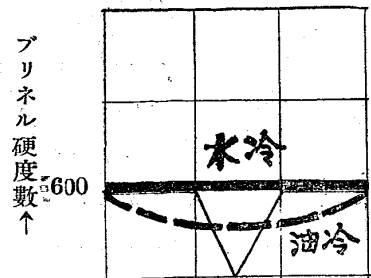
C=1.0 Ni=0.7 Cr=1.2



ニッケルクロム鋼
C=0.3 Ni=3.5 Cr=0.8

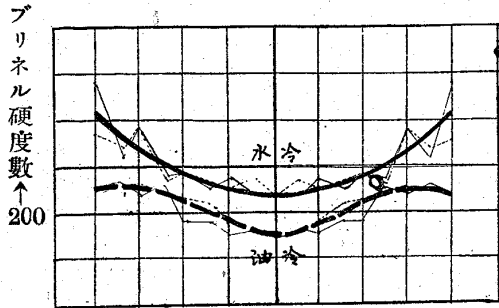


ニッケル・クロム・モリブデン鋼

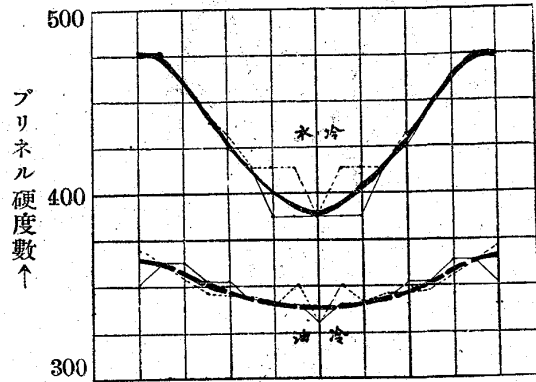


第 2 圖 焼入硬度と肉厚との關係圖
直徑 100mm 焼入溫度 850°C

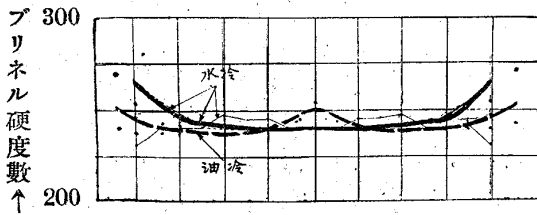
炭素鋼
C=0.42



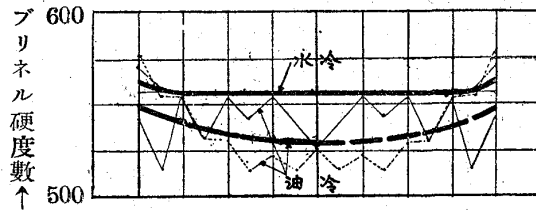
ニッケルクロム鋼
C=0.3 Ni=3.5 Cr=0.8



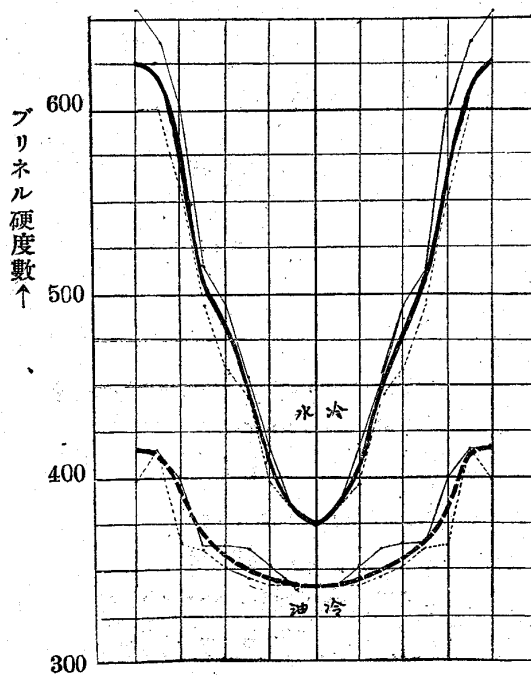
ニッケル鋼
C=0.35 Ni=2.80



ニッケルクロムモリブデン鋼



クロム鋼
C=1.0 Ni=0.7 Cr=1.2

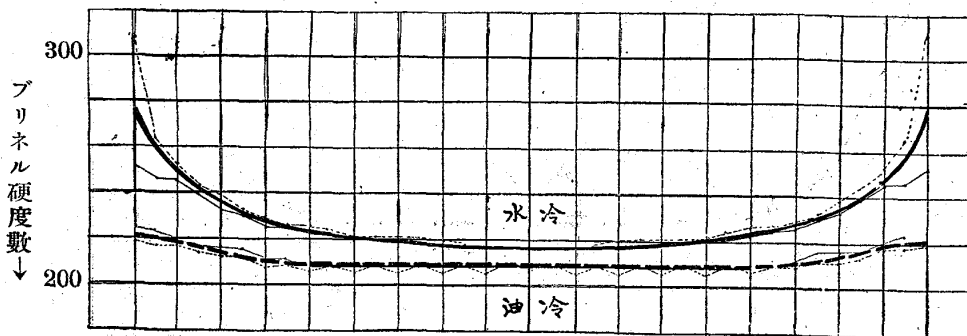


第 3 圖 焼入硬度と肉厚との関係圖

直径 200mm 焼入温度 850°C

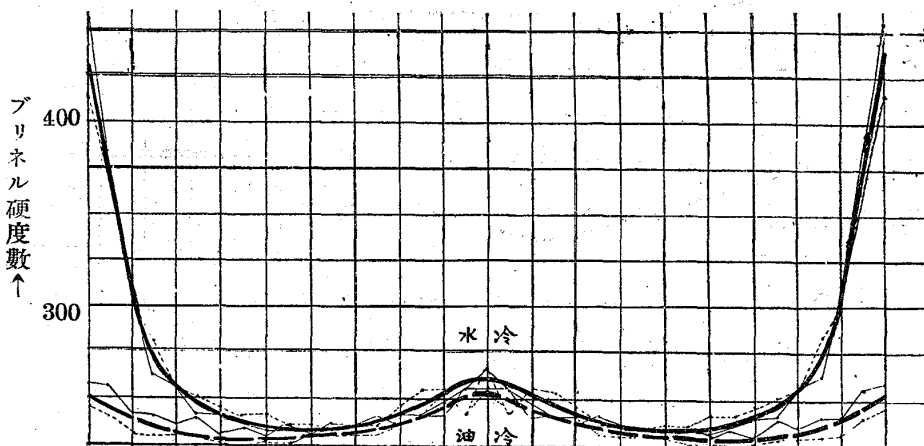
炭 素 鋼

C=0.42



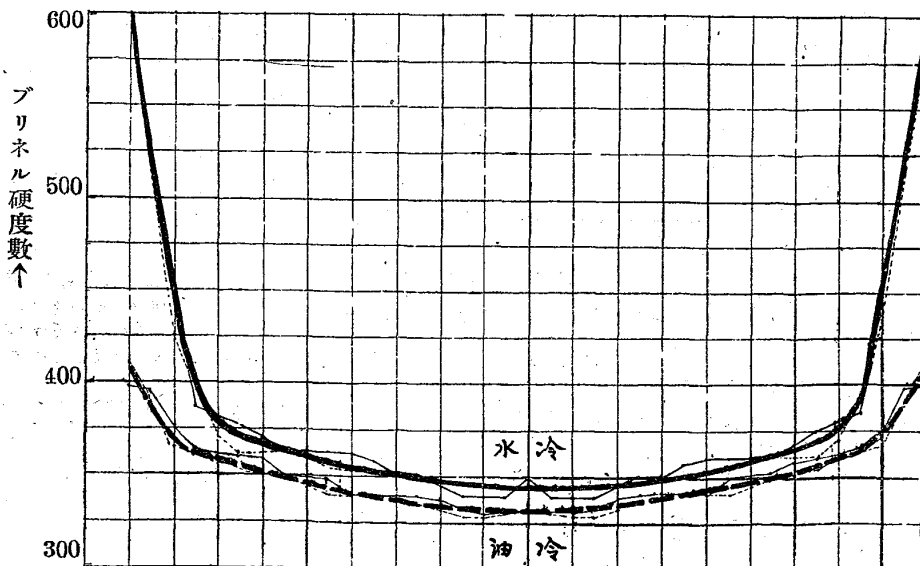
ニ ッ ケ ル 鋼

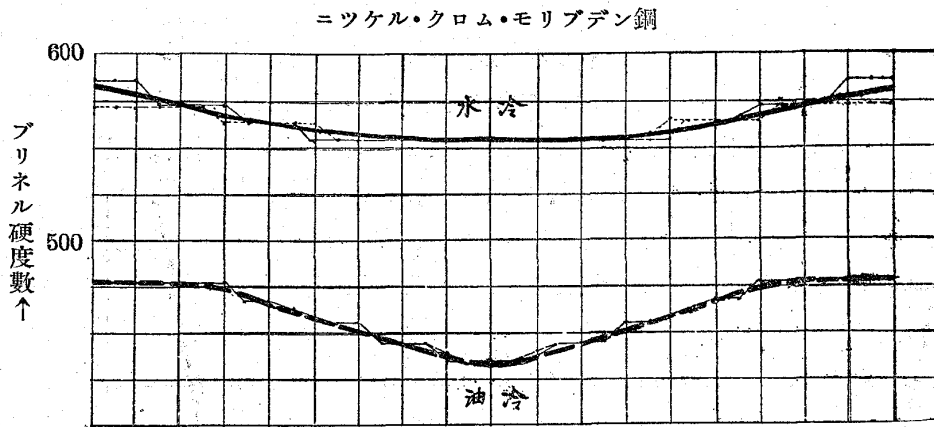
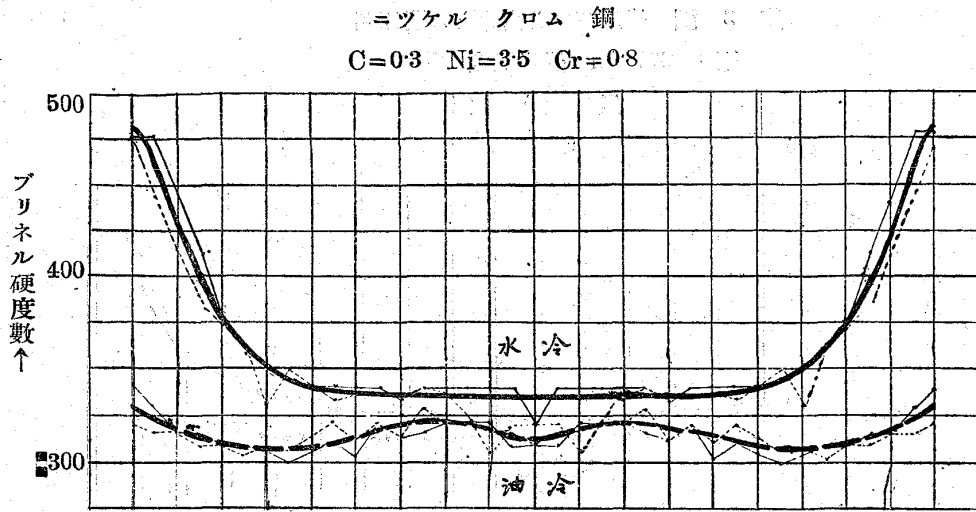
C=0.35 Ni=2.80



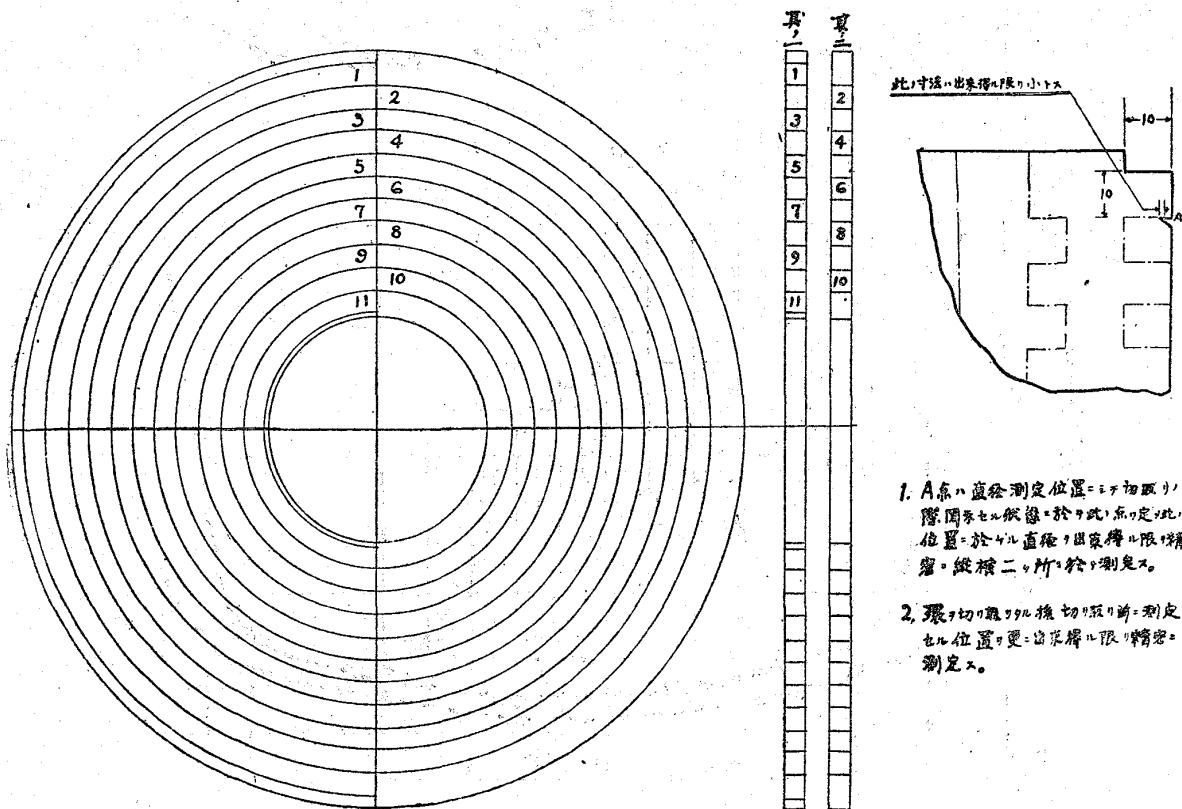
ク ロ ム 鋼

C=1.0 Ni=0.7 Cr=1.2





第4圖 内部歪力測定用試験環採取位置(中空鋼材内部加壓後)



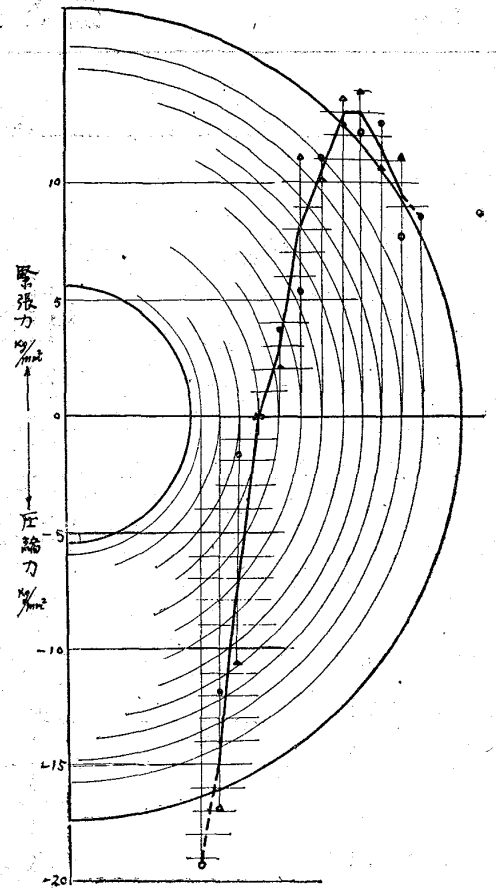
第2表 中空鋼材加壓後の内部歪力
(弾性率 21,000 kg/mm²)

区分	直径	切線方向の歪力 kg/mm ²		
		歪み	歪力	
其の1	外徑	1	+0.0041	+8.6
	内徑	1	+0.0037	+7.8
	外徑	2	+0.0060	+12.6
	内徑	2	+0.0057	+12.0
	外徑	3	+0.0060	+12.6
	内徑	3	+0.0053	+11.1
	外徑	4	+0.0024	+5.0
	内徑	4	+0.0016	+3.4
	外徑	5	0	0
	内徑	5	-0.0013	-2.7
	外徑	6	-0.0057	-12.0
	内徑	6	-0.0092	-19.3
其の2	外徑	1	+0.0053	+11.1
	内徑	1	+0.0050	+10.5
	外徑	2	+0.0068	+14.3
	内徑	2	+0.0065	+13.7
	外徑	3	+0.0048	+10.1
	内徑	3	+0.0052	+10.9
	外徑	4	+0.0010	+2.1
	内徑	4	0	0
	外徑	5	-0.0051	-10.7
	内徑	5	-0.0080	-16.8

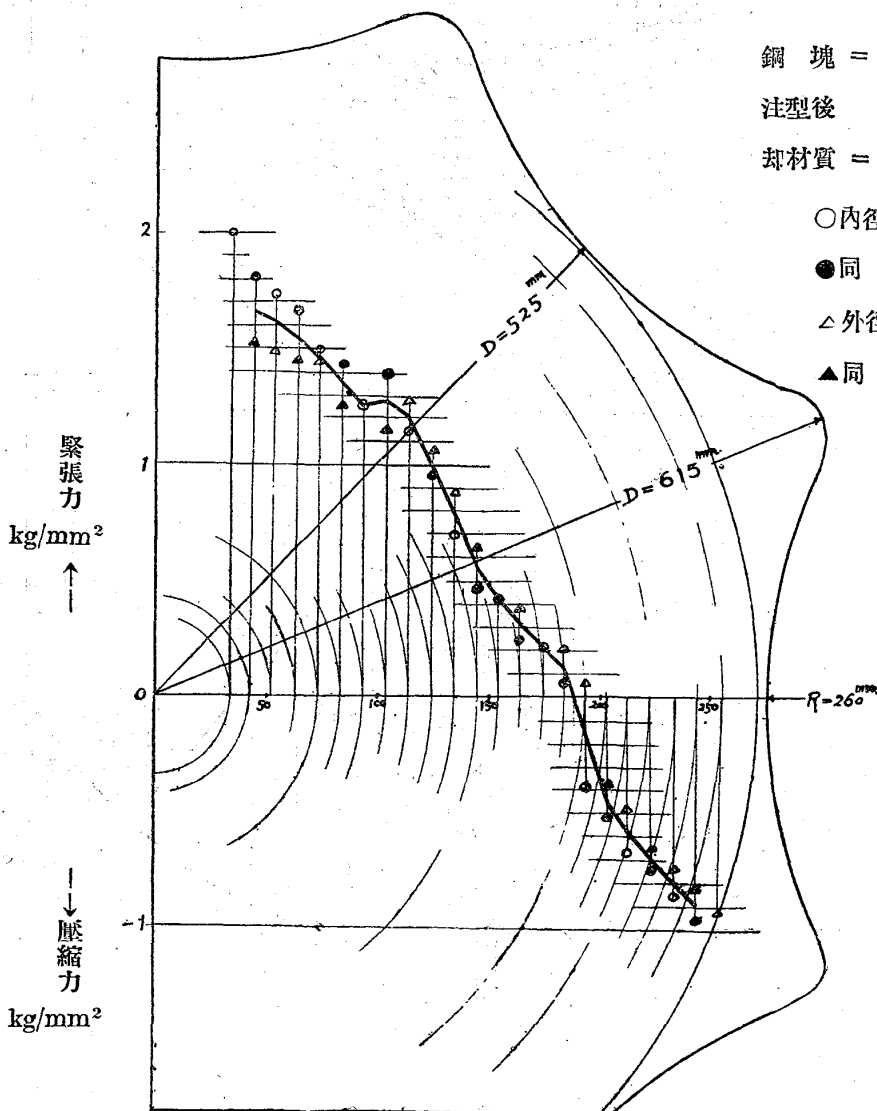
(+緊張 - 壓縮)

第5圖 中空鋼材内部加壓後の歪力分布圖

- 内徑其の1
- 同 其の2
- △ 外徑其の1
- △ 同 其の2



第11圖 鋼塊に残留せる歪力 (D=615mm)

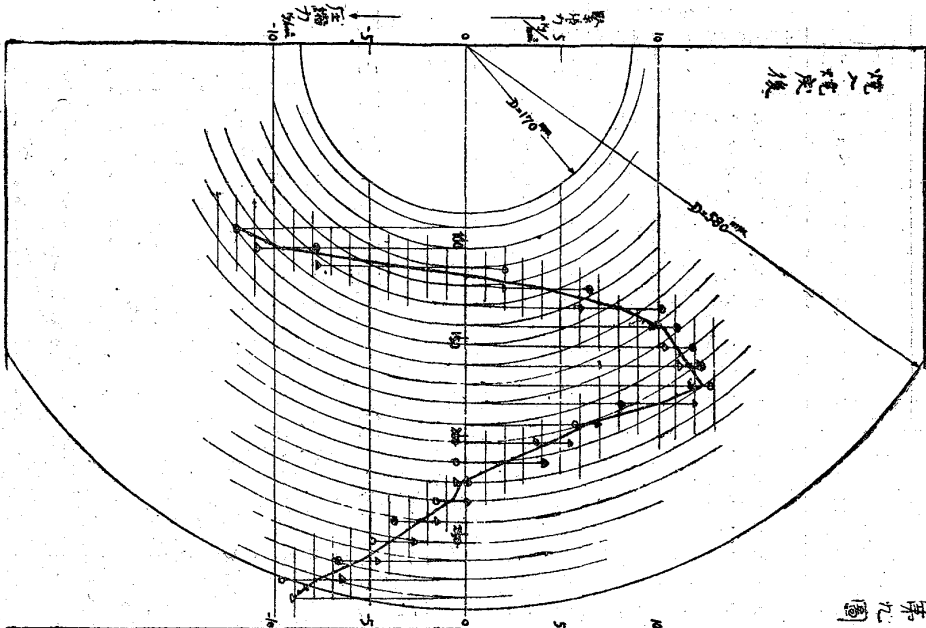


鋼塊 = 八角形
注型後 空中冷
却材質 = ニッケル鋼

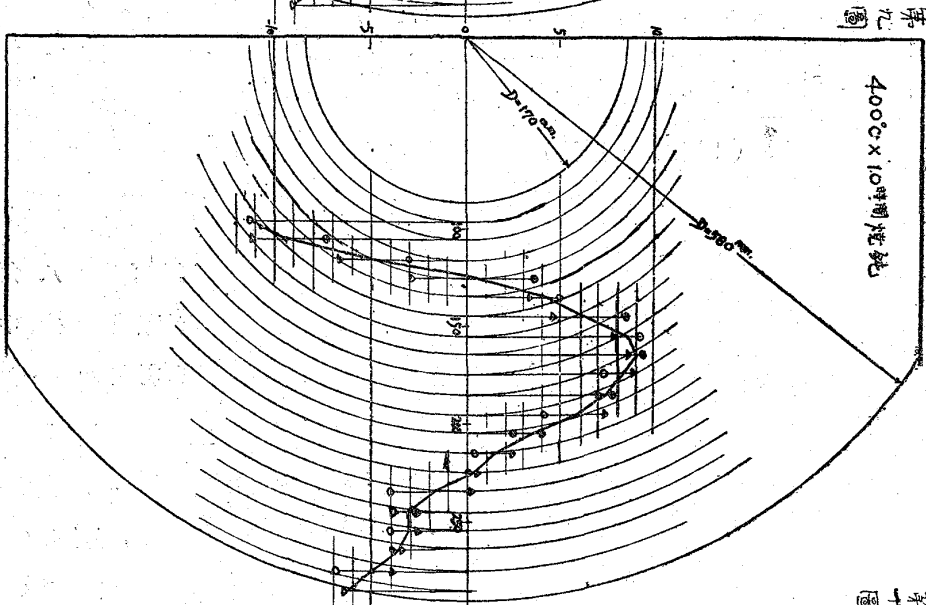
- 内徑其の1
- 同 其の2
- △ 外徑其の1
- ▲ 同 其の2

○内徑其の1 ●同 其の2 △外徑其の1 ▲同 其の2

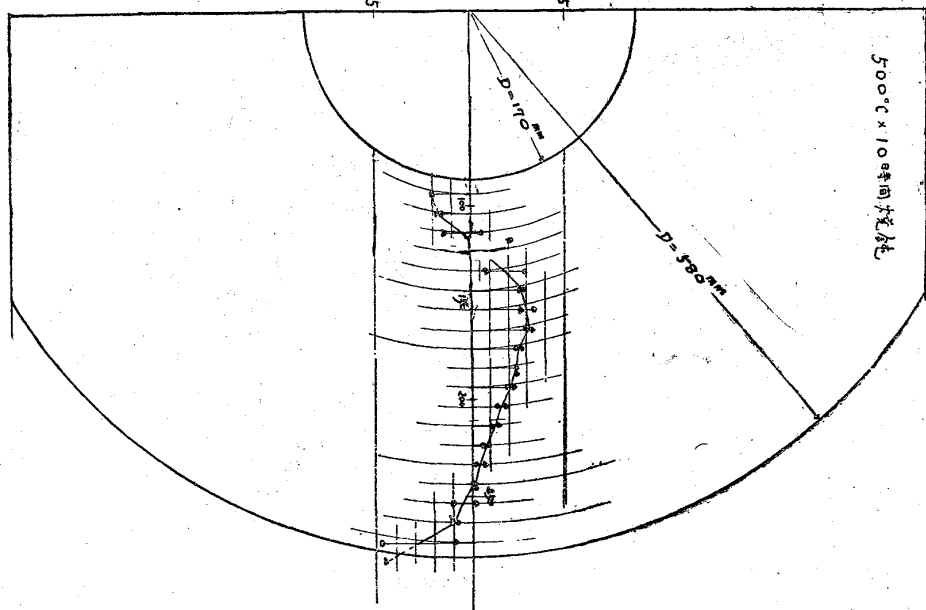
第 8 圖



第 9 圖

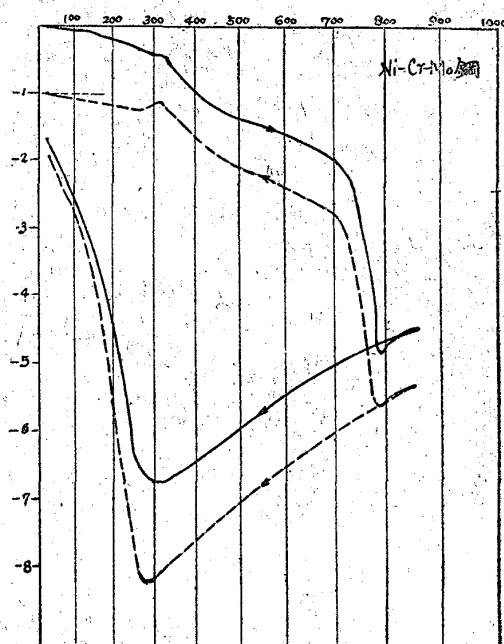
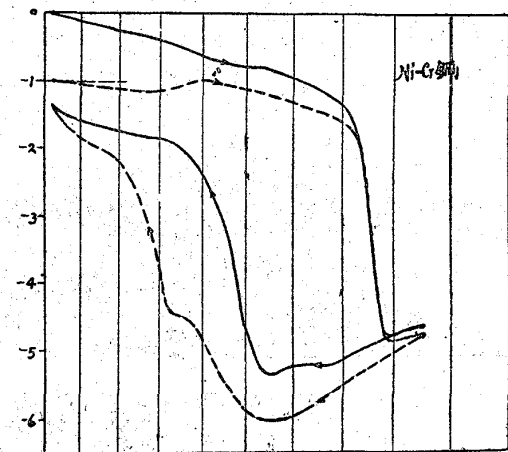
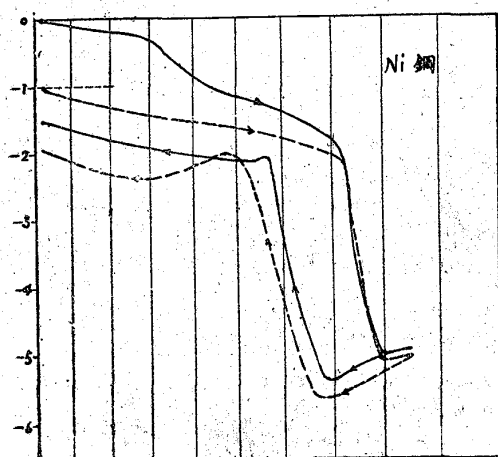
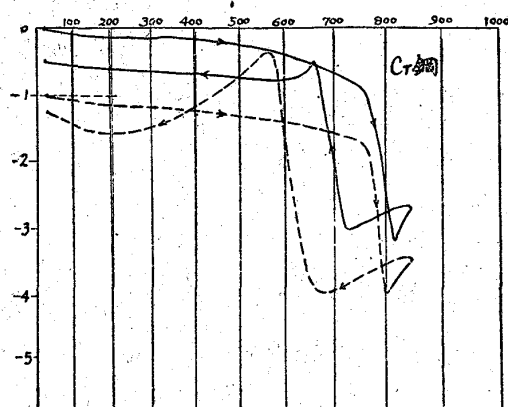
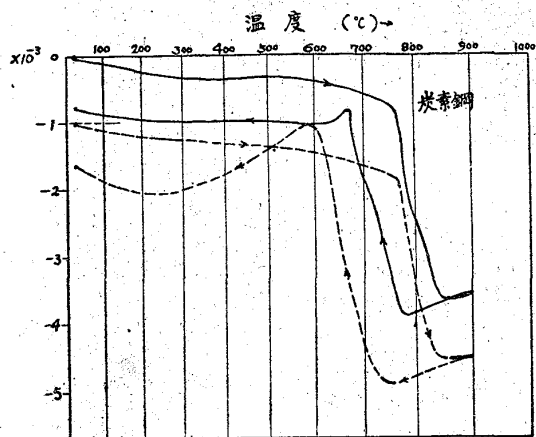


第 10 圖



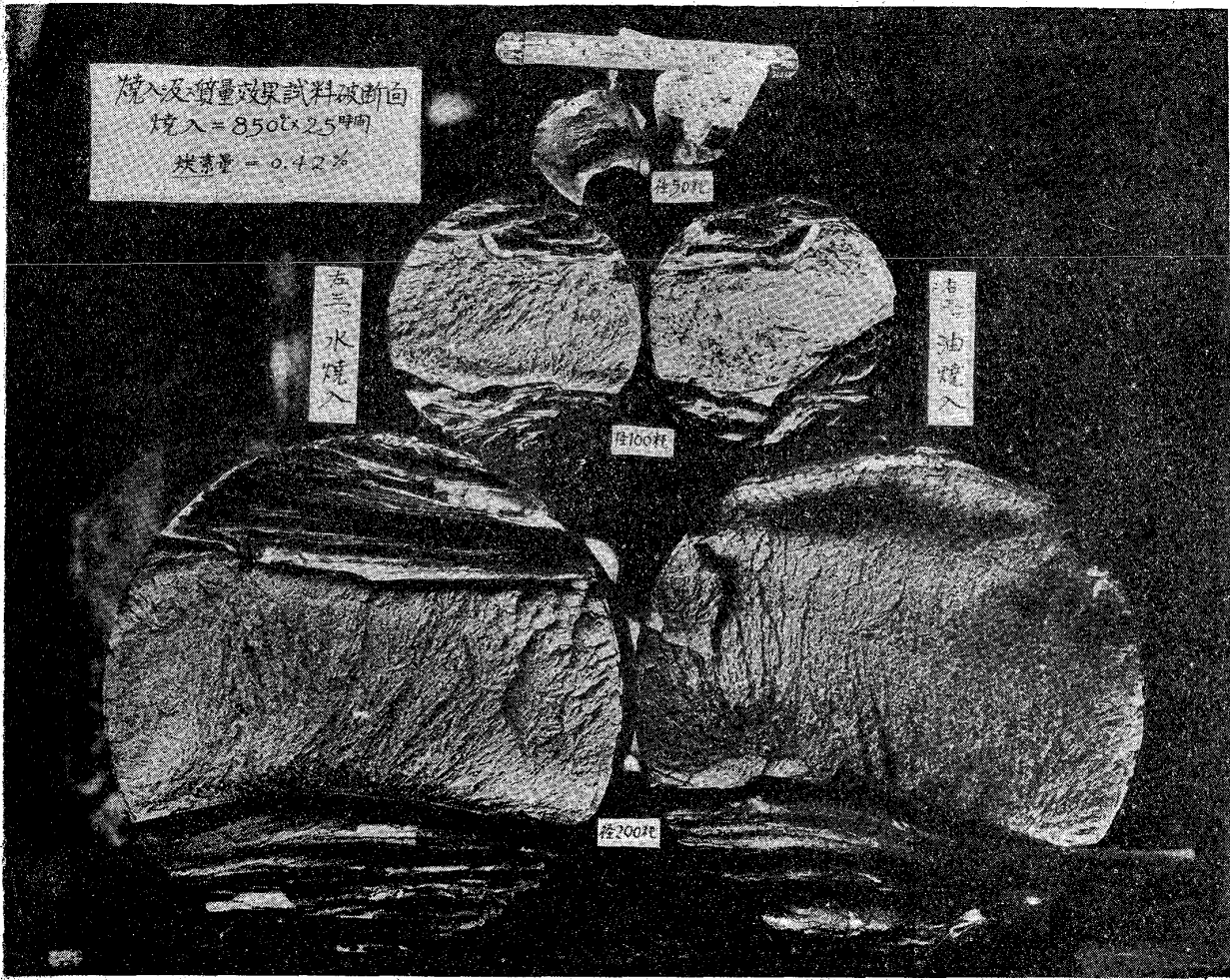
中空鋼材焼戻後殘留歪力 (外徑 580mm 内徑 170mm)

第 15 圖 各種鋼材の示差熱膨脹曲線圖

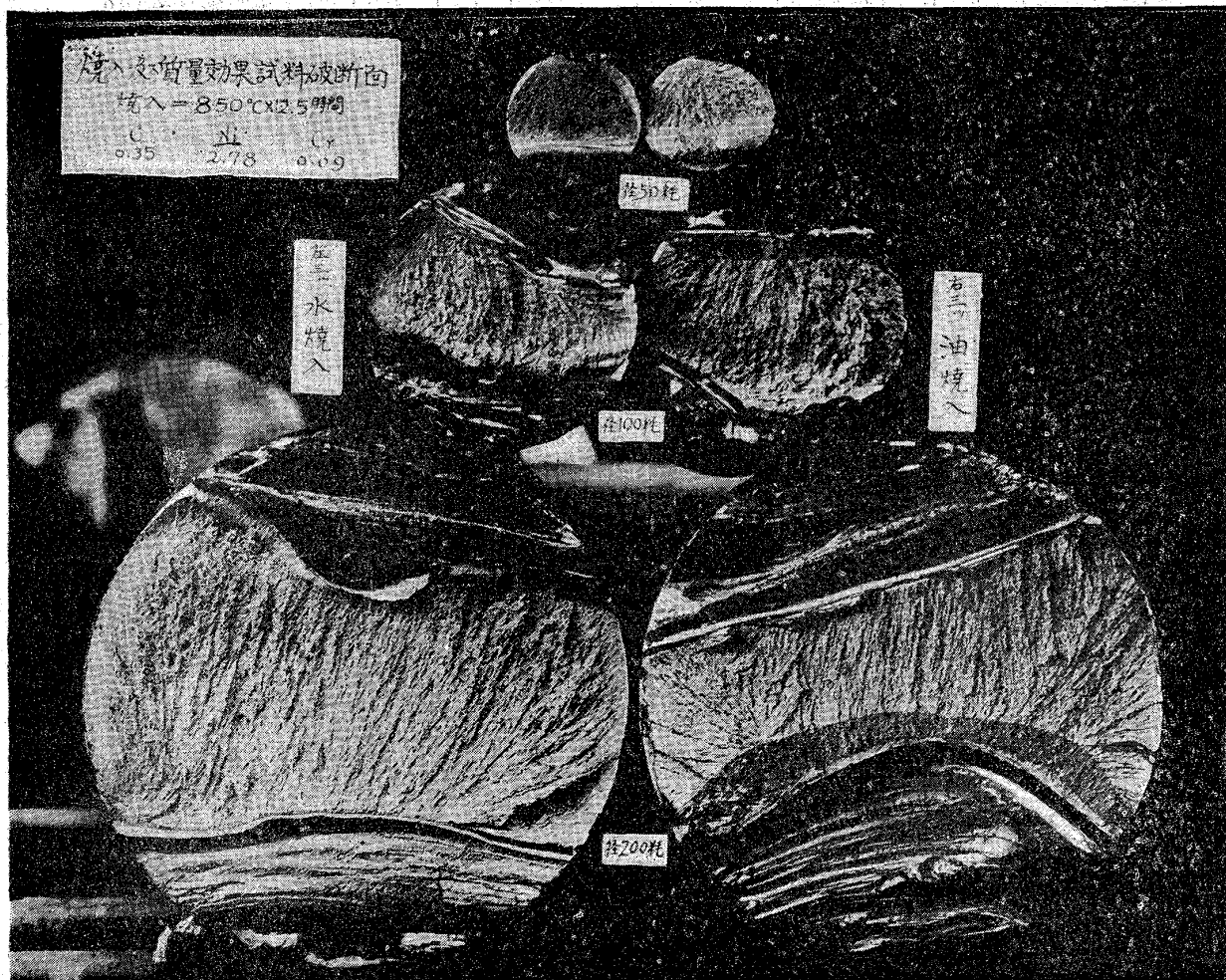


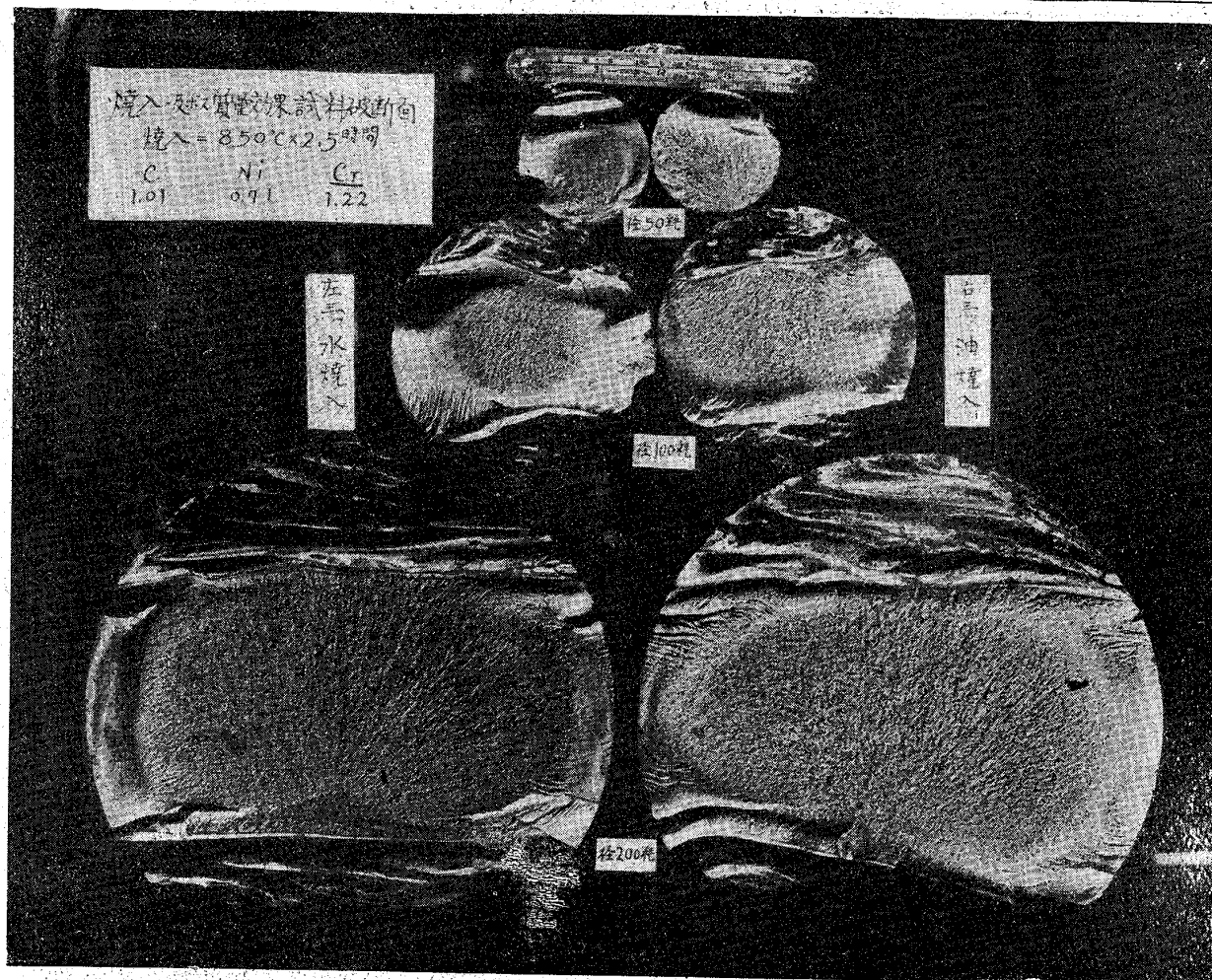
—— 炉中冷却
 - - - 空気冷却

炭素鋼

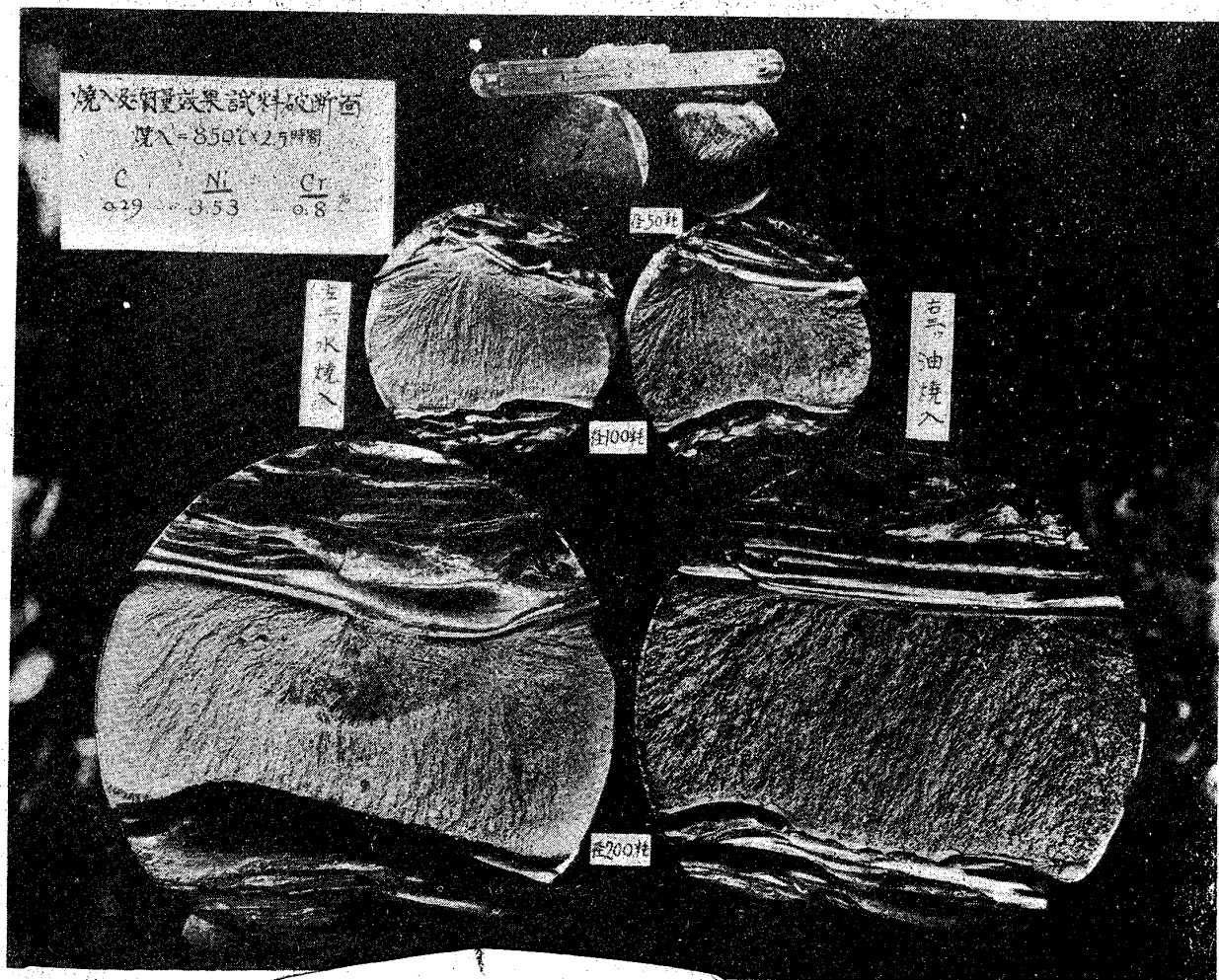


ニッケル鋼





クロム鋼



ニッケルクロム鋼

ニッケル、クロム、モリブデン鋼

