

特殊鋼の分離抗張力と疲勞による耐久力に就て (II)

(日本鐵鋼協會 第8回講演大會講演) (第18年第10號繼承)

高 瀬 孝 次¹⁾

(第4章)

第2節 衝 撃 脆 性

脆性を最も良く代表的に示すものとして國際的に定められてゐるのは衝擊試験による衝擊値であるが、本試験を材料の規格に迄も課する様になつたのは僅か 10—15 年前に過ぎず。主として航空機材料の採用された時に重視されたものである。

試験機には Charpy 型と Izod 型とが一般的である事は言ふ迄も無いが、之を材料検査に課する事の是非と、之を如何程に重視するか例へば破損金質の調査の結果衝擊値の低かつた事に直接間接に故障又は破損に影響を有したか否かの原因たるや頗る疑問の存する處であつて、今之等の點に關して筆者の今日迄に得られたる試験の結果に徴して論及せんとするものである。

今便宜上、衝擊値の價値を論ずるに當り各人の立場を明にする必要がある。

1. 材料製造者

2. 材料使用又は取扱者

材料製造者は材料の改善を目的とする爲め換言すれば良き材料を得る爲めに衝擊値を如何に見做すか、他の一方では材料使用に際し強度の完全なる事即ち如何なる負荷狀態でも安心し得る事換言するならば耐久性充分なる事を重視するならば、この衝擊値を如何に觀察すべきやに在る。

唯衝擊値は極めて微妙の性質と左右すべき條件

陸軍航空本部技術部

が無數に在る。例へば次の通りである。

1. 試 験 機

2. 試 験 片

3. 試験片の溝

4. 試験片の製作

5. 材料の鍛造、鍛鍊の程度、寸法

6. 材料の焼入、焼戻及冷却速度、殊に焼戻温度と冷却時間には最も大きな關係がある。

7. 材料から試験片の採取要領

殊に大なる材料では内外部に於て著しく差あり又は縦横の方向に切出す事によつて大差がある。

之等様々の條件で支配されてゐる故に材料の供給者即ち製造者は検査方法如何に基く成績の差による不合格の懸念を生ずる事が多く、殊に焼戻温度の僅の上下に基く衝擊値の低下例へば高溫計の誤差、爐の位置による温度の分布の差異の爲めに著しい差を生ずる等各種の條件に基く不合格の憂がある。

尙使用者側から言へば衝擊値の大なる事は皮相的に觀察するならば折損し難いと判斷さるゝかも知れないが、事實は之に反し實際疲勞破斷による場合は殆んど抗張力並に硬度の大で衝擊値の寧ろ小なる時が耐久性大である事實は寧ろ吾人の豫想を裏切つてゐる。故に使用者側の見解によれば工作上の可能性有れば成るべく抗張力高く若干の衝擊値を犠牲にするも可であると言ふ結果となる。

即ち衝撃値を高める爲めに餘り焼戻温度を高める事は危険である。

併し材料の品質の上からは衝撃値の高い事は低いより（抗張力同程度として）も品質良好の状態にあるものと考へられるが夫より寧ろ次の様な副結果を吾人に與へてくれる。

1. 破面の景況で焼戻の齊一か材料の齊一かを検す
2. 破面に生ずる疵により材料の内部に潜在する pinhole 等を検出出来る。
3. 破面の景況で材料を見分けられるか又は組織、温度の概略も知る事が出来る。

故に之等重要指針を與へる試験と見れば検査項目に本試験を課する事は反對の要無く、唯之が實用上價值に就ては見解を改め使用者は餘りに重視せざるを寧ろ安全と認めらる。假りに砲身鋼や防楯鋼の様な1回に大きな衝撃を受ける場合は別とするも多く繰返震動的荷重を受ける場合は衝撃値を低下するも充分能力を發揮してゐる實例が多い。

本論文には主に Charpy 型試験機に依つた試験成績を基礎として其の性質を出来るだけ明瞭にし、脆性の本質と更に分離抗張力との關係を探究する事とする。

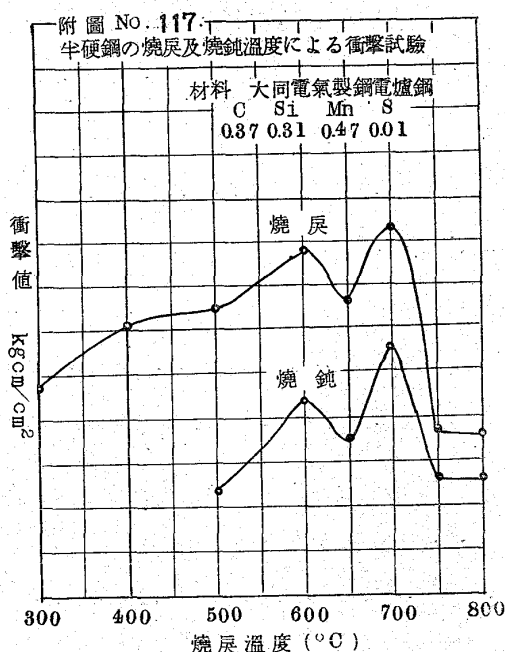
其 1. 各種鋼の熱處理による衝撃値

I. 炭素鋼の衝撃試験

炭素鋼の衝撃試験は今日迄餘りに多くの研究發表あつて、こゝに別に記すことを省くも今一例を取つて半硬鋼の焼鈍温度の變化と焼入後焼戻温度の變化に依る衝撃値の影響に就き述べ一般炭素鋼の脆性に就て説述することとする。分析成分は次の通りである。

C	Si	Mn	P	S
0.37	0.31	0.47	0.013	0.010

この結果は附圖 No. 117 に記してある。焼鈍及焼戻温度別の場合共に 700°C に於けるものは衝撃値最大である、即ち A₁ 變態點附近で冷却したものは所謂ニセコ處理と同様に球狀 Pearlite (Sorbite からの變化) 状にあることは質を最粘靱ならしめる事は周知の事實である、700°C を越せば急に脆性を増大し以上大なる變化を伴はない。焼鈍したものと焼入後焼戻温度の變化に伴ふ



衝撃値の比較をなせば後者は著しく大きい事は曲線でも知られるが温度による變

化曲線は同様であつて何れも 700°C で最大であるのはこの點では完全な Sorbite となりそれ以上は Pearlite に分解する爲めであつて Pearlite State では衝撃力は著しく低い。即ち脆化するのである。焼鈍の場合では 500°C 附近と 750°C 以上の場合共に同一衝撃値に在るは何れも Pearlite State に在る事が知れる。

尙炭素鋼の各種に就き大體の衝撃値 (Charpy 式) を得るために焼鈍、焼入、焼戻状態を比較して見る。

炭素量 %	衝撃値 kgm/cm^2		熱 處 理		
	焼鈍	焼入 焼戻	焼鈍	焼入	焼戻
0.27	9.5	10.0	820(灰)	850°C(油)	500°C(空)
0.45	5.4	7.0	800(灰)	830°C(油)	550°C(空)
0.77	2.6	4.3	780(灰)	800°C(油)	400°C(空)

上記焼戻状態に於ての衝撃値と炭素量との關係式は大體次の様に示す事を得。

$$\text{衝撃値 } \rho(kgm/cm^2) = \frac{2.8}{C} - 1 \quad C \text{ は炭素量 } \%$$

一般に炭素鋼の脆性は Fe_3C の遊離に歸因すると解釋されてあるが C の極めて乏しいアームコ鐵の場合にも著しい脆性を呈する處理法がある。石澤氏(三菱航空機會社研究報告第 275 號)はアームコ鐵に就いて下記の様な熱處理の差により衝撃値に極めて大きい差のある事を報じてゐる。

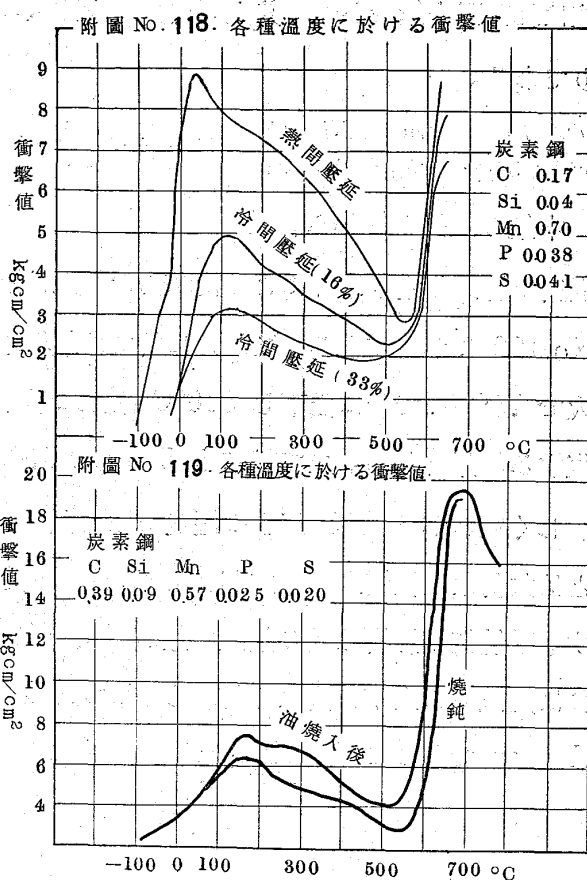
熱 處 理	衝撃値 kgm/cm^2
950°C 30 分保持後爐冷 (200°C迄 65 時間を繼續)	7.58 4.80 5.40 } 5.93
950°C 30 分保持後 900°C 迄 60 分 90°C に 60 分保持水冷	0.44 0.44 0.44 } 0.44
950°C 30 分保持後水冷 900°C 60 分保持後水冷	35.38 34.75 35.00 } 35.04

上記試験の結果最均齊で柔軟な質を得るには 900°C に加熱後 700°C 迄徐冷し後水中急冷したもので單に 700°C に加熱徐冷したものも稍脆い。

之を要するに 700°C に於ては Sorbitic の最粘靱性の大なる状態にある事を知りこの事實は R. H. Greaves & J. A. Joes (Woolwich) の實驗した高温及低温状態に於ける衝撃試験の結果とも符號してゐる(附圖 No.118 及 No.119)。

蒔田氏(鐵と鋼第十七年第十號)は焼鈍温度と冷却速度とによつて焼戻脆性と同様焼鈍脆性のある事を指摘した。

之等は何れも鐵中の Fe_3C の存在によつて之の



分離程度に比例すること變態點以上の高温より冷却の場合は Grain Growth の現象によつて脆性を増すことを述べた。

筆者は衝撃試験による脆性は溝付影響を有する事と fine Brittleness (細粒脆性) と coarse Brittleness (粗粒脆性) とが A_1 變態點上下に起り A_1 より僅に以下の温度に於ける焼戻状態即ち Sorbitic State にあるものは衝撃力に於て勝つてゐても、他の機械的性質上は決して望ましい状態では無い事を指摘したのである。

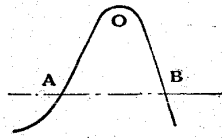
而して脆性は試験片の形状と溝の形状にも支配され組織上は Slip 又は glide し易き状態即ち變形變位を惹起し易き材料には起らないことを示すこととする。

II. 86kg Ni-Cr 鋼

本鋼は今日迄多くの發動機其の他の機械部品に

使はれた強力鋼であつて其主要成分は大體次の通りである。

C	Si	Mn	Ni	Cr
0.3	0.35以下	0.5以下	2.8	0.8



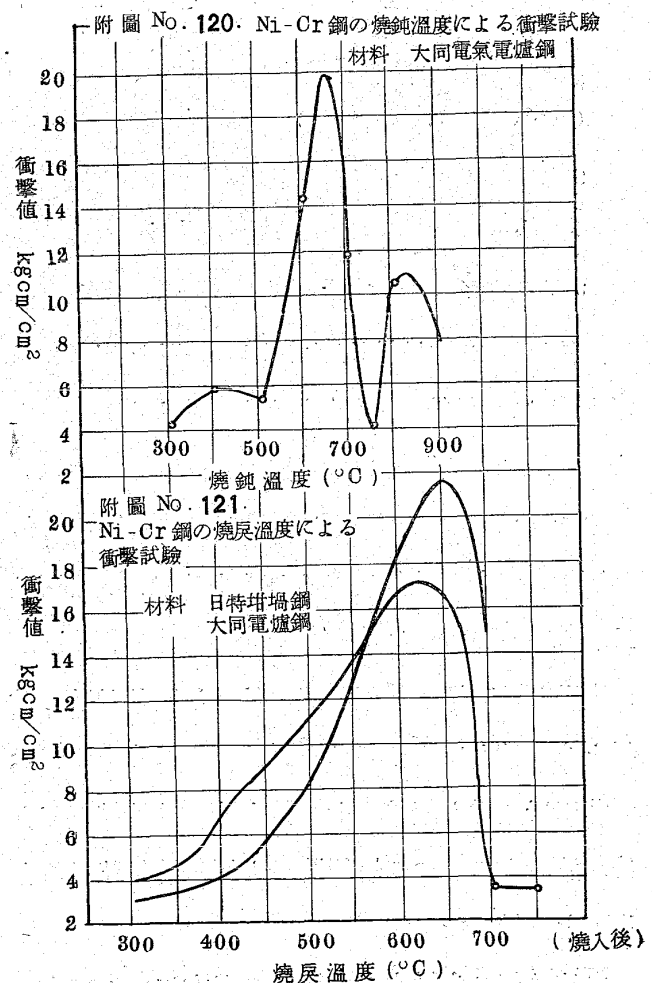
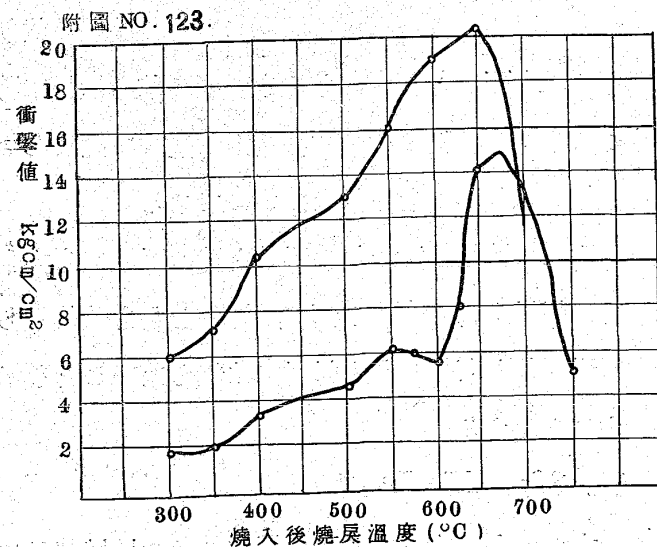
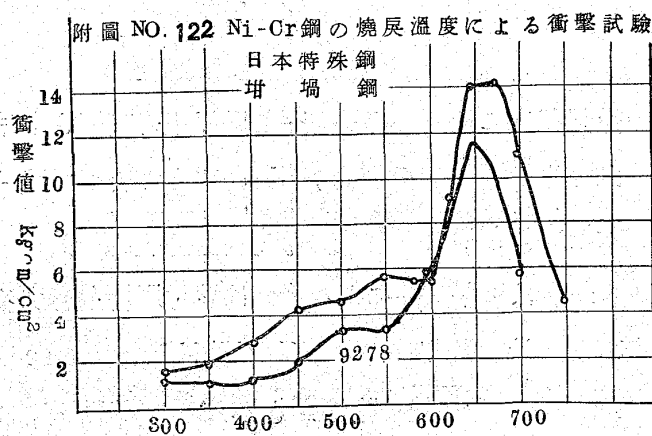
本鋼の鍛造の儘から各種

温度で焼鈍し空中冷却による衝撃力の状態は附圖 No.120 に示してある。650°C に於ては最衝撃値大で 750°C で急に低下し 800°C 附近で若干恢復する結果となる。之で見ても 500°C 以下では著しく脆いが 650°C 以上の温度では低温の脆性とは如何なる性質上の相違があるかは研究を要す。唯焼鈍の影響は元の鍛造状態が Pearlite ならば變態點の上下に論なく何れも Coarse Brittleness であつて Pearlite の發達程度によつて

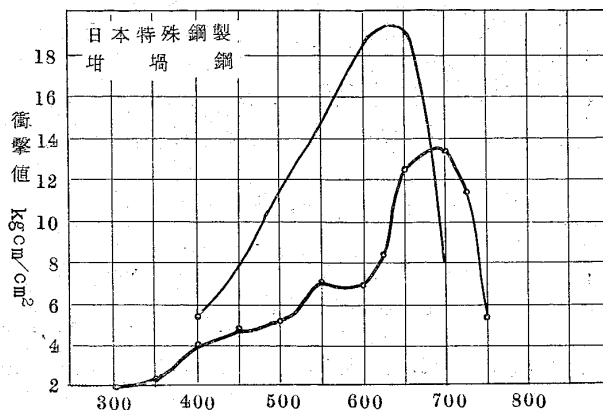
衝撃値に差を生ずる。

次に本鋼を 850°C 附近で焼入した後焼戻温度を變化する時も大體同様に衝撃値の變化は現れるがその景況は附圖 No.121 乃至 No.125 に示してある。これ等は總て同種の Ni-Cr 鋼であるが曲線はすべて若干の相違を見る。唯或種のものは 550°C を境界として之以下の焼戻温度で衝撃値の至つて低き種類と殆んど始めから直線的に 650°C 迄上昇するものとある。前者の様な Ni-Cr 鋼は規格には合格せざるもの多くこの種のものは將して性能の不良なるものか否か研究の要あり。

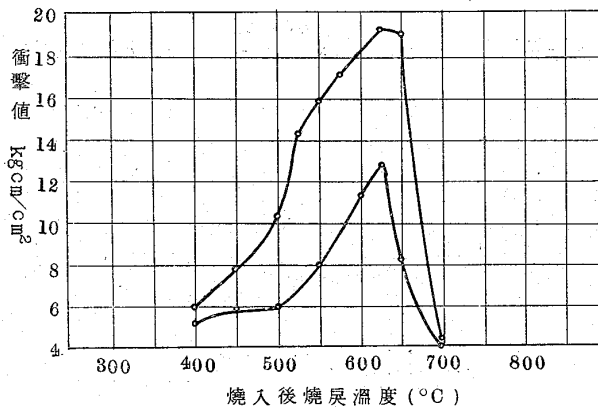
從來の經驗上 C の低く且 Cr の餘り高からざるものはかゝる現象を呈すること少きものゝ様であるが斯るものは一方抗張力硬度低く所望の強さを



附圖 NO. 124. Ni-Cr 鋼の焼戻温度による衝撃試験



附圖 NO. 125.



得難い結果となり返つて危険性を伴ふものではなからうか。

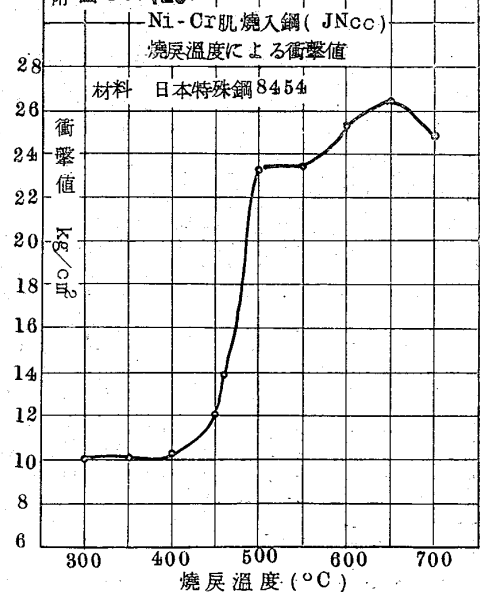
焼戻温度の變化によつて衝撃値に極めて大きな差を生ずる事は附圖曲線で明であるが、今假に A と B との 2 點の脆性を比較する事とすれば、衝撃値は同一であるから脆性は同一であると云へるが、A 點は組織上から云へば Sorbite 化せんとする點であるのに B 點は Sorbite が分解して Pearlite 化せんとする状態即 Fe_3C の分離せんとすることを示し、衝撃値は同一であり乍ら Brittleness を異にしてゐる。A 點は B 點よりも抗張力、硬度、耐久限界等著しく高く 0 點より左は固溶體の脆性とも見做さるに對し右方は介在物として Fe_3C の游離に基く脆性を示し、従つて A の方は Grain は平滑となつて破斷し B は粒狀光澤を呈する事となる。前者を細粒脆性 (fine

Brittleness) とすれば後者は粗粒脆性 (Coarse Brittleness) と稱せられる。Martensite に於ける脆性は Slip 又は Deformation を伴はない互の結果の迂りを障げ破斷する。故に之と同様に極めて細微なる Fe_3C (Cementite) や WC (Tungstite) の組織にあるものも Slip 又は Deformation を障げる爲に細粒脆性となる。

III. Ni-Cr 表面硬化用鋼

C の少い Ni-Cr 鋼を 850°C 油焼入後焼戻温度別に衝撃値の變化を試験した結果は附圖 No. 126 に示してある。

附圖 No. 126.



焼戻温度 400°C 迄は衝撃値低く大差はないが 500°C より急に上昇し夫れ以上再び大差なく 650°C で最大となり、700°C で僅に低下するに止る。此變化は C が 0.12% 程度で極めて少く Fe_3C の游離が 650°C 以上焼戻の場合にも少く粗粒脆性を呈し得ないものと解釋される。

IV. 100kg Ni-Cr 鋼

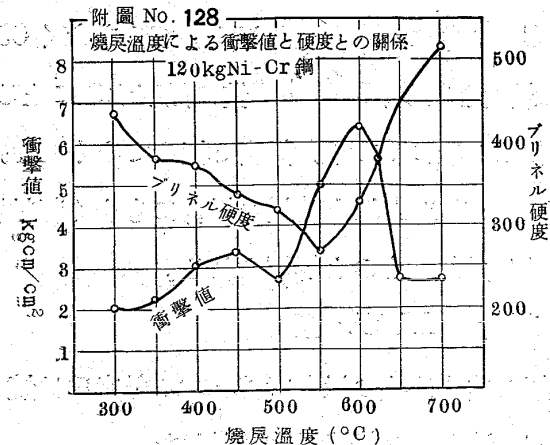
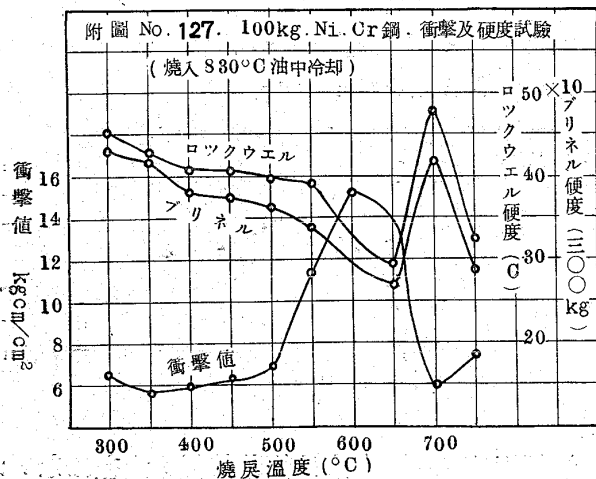
本鋼の成分は次の通りであつて熱處理は焼入 830°C (油中) の後焼戻を變更した。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	其他
0.29	0.18	0.38	0.018	0.011	3.22	1.29	Mo W
							0.42 0.37

焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

焼戻温度 °C	衝撃値 (kgm/cm ²)	ブリネル 硬 度	ロックウェル C 硬度
300	6.5 6.4	6.45	430
350	5.6 5.75	5.67	415
400	5.47 6.5	6.00	380
450	6.57 6.17	6.37	375
500	6.97 6.97	6.97	365
550	11.24 11.63	11.44	340
600	15.85 14.68	15.27	295
650	14.04 14.06	14.05	270
700	6.07 1.07	6.07	420
750	5.54 9.37	7.46	375

曲線に示せば附圖 No.127 の通りである。この結



果に依れば衝撃値は 600°C で最大で硬度は 650°C が最低である。

V. 120kg Ni-Cr 鋼

本鋼の成分は次の通りであつて熱処理に焼入 850°C の後焼戻を次の如く變更した。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
1	0.43	0.28	0.34	0.020	0.010	3.73	1.18
2	0.31	0.31	0.34	0.022	0.020	3.70	1.01

焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

焼戻温度 °C	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル 硬 度
300	2.0	436
350	2.26	381
400	3.09	377
450	3.42	339
500	2.73	319
550	4.93	270
600	6.41	328
650	2.77	457
700	2.75	512

曲線に示せば附圖 No.128 の通りである。この結果に依れば衝撃値は 600°C で最大でブリネル硬度は 550°C が最低である。

VI. Ni-Cr-W 鋼

本鋼の成分は次の通りであつて熱処理は焼入 850°C 空中冷却の後焼戻を次の様に變更した。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W
0.22	0.16	0.40	0.012	0.011	4.00	1.37	0.75

焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

熱 處 理 °C	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル 硬 度	ロックウェル C 硬度
焼入の儘	8.11	382.5	39.3
焼戻 100	7.99	385.0	39.6
150	8.55	390.0	39.7
200	7.88	388.5	39.8
250	7.97	383.5	40.0
300	7.85	376.5	39.1
350	7.34	385.0	39.5
400	7.48	371.0	38.7
450	8.22	365.5	37.7
500	8.67	355.0	36.5
550	10.14	338.5	35.8
600	16.30	286.5	29.7

熱處理 °C	衝 撃 値 kgm/cm ²	ブリネ ル硬度	ロックウェ ル C 硬度	焼戻	100	7.88 8.19	8.04	430	43.2	
焼戻	650	19.30	260.0	26.6	〃	150	8.07 8.28	8.18	430	42.4
〃	700	12.00	296.0	29.1	〃	200	8.18 8.53	8.36	432	43.1
〃	750	8.94	380.3	39.6	〃	250	9.79 9.18	9.49	428	43.2
〃	800	8.31	405.0	41.55	〃	300	11.40 11.30	11.37	334	38.8
〃	850	7.54	403.0	40.90	〃	350	7.79 8.14	8.27	413	42.4
〃	900	7.84	385.0	39.8	〃	400	5.84 5.90	5.87	403	42.5
〃	950	7.74	383.5	39.6	〃	450	7.95 7.41	7.68	367	36.7
〃	1,000	8.07	384.5	38.8	〃	500	6.56 6.47	6.52	392	39.9

この結果を曲線に示せば附圖 No. 129 の通りである。尙主要焼戻温度の狀態の組織は附圖 No. 130 a 乃至 j に示してある。

VII. Ni-Cr-Mo 鋼 (タハード鋼)

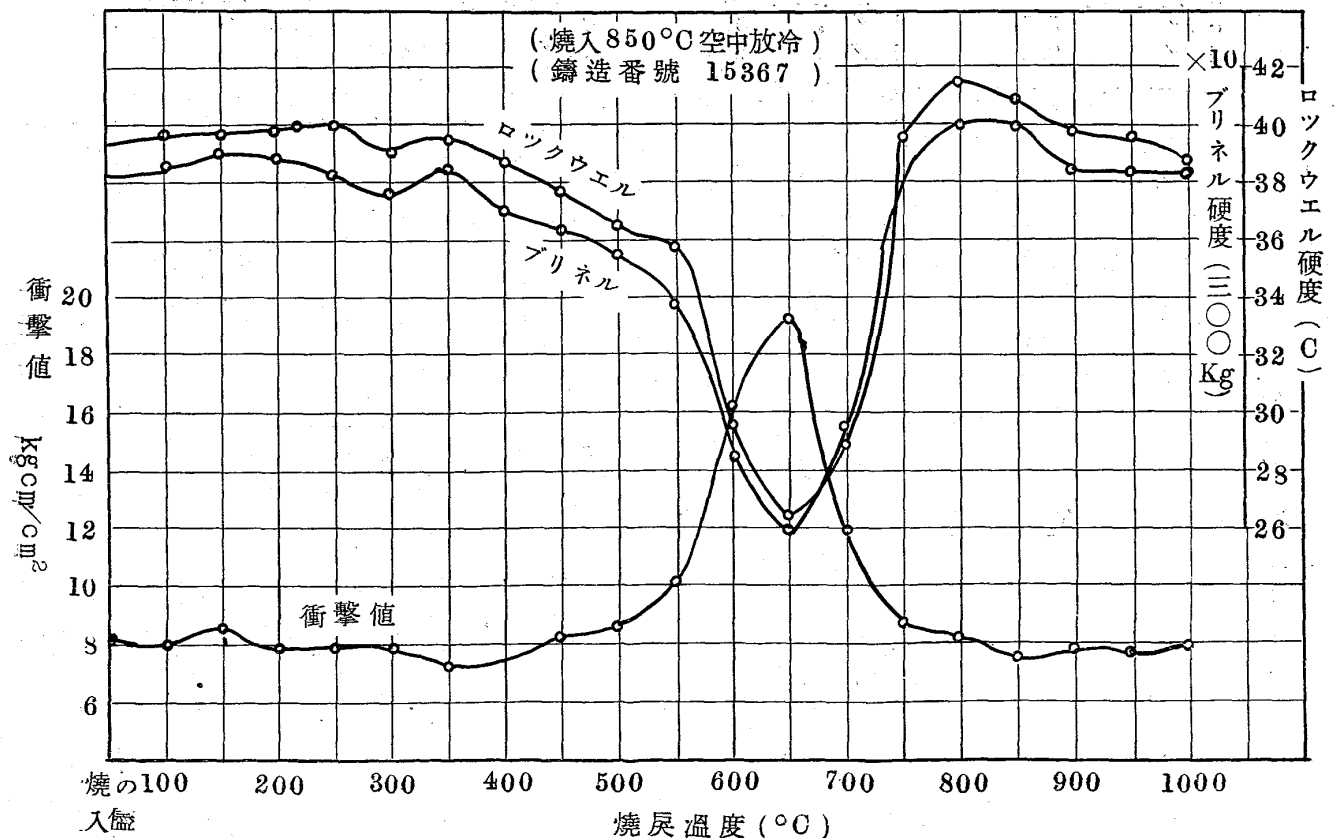
本鋼の成分は次の通であつて熱處理は焼入 850 °C 空氣中冷却の後焼戻温度を 100 °C から 1,000 °C の範圍に變更した。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.23	0.24	0.98	0.016	0.011	3.04	1.69	0.48

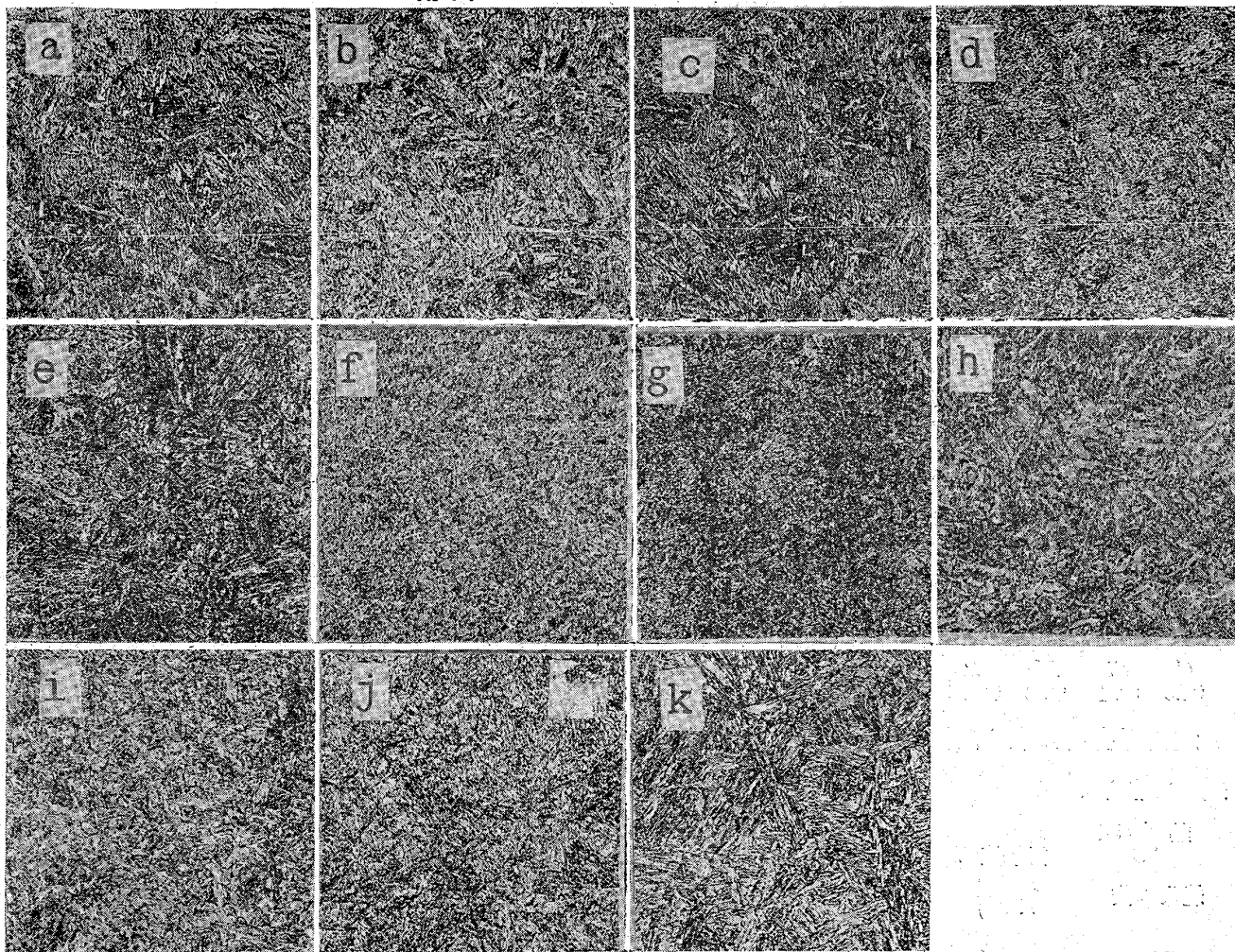
焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

熱處理 °C	衝擊値 kgm/cm ²	ブリネル 硬度	ロックウェル C 硬度	〃	950	12:03	12:27	390	39.3
				〃	950	11:10	12:27	390	41.8
				〃	950	11:44			
焼入の儘	11:10	11:50	384	41.0	〃	8:82		435	43.5
	11:99				1000	9:39	8 61		

附圖 NO. 129. BMW 曲軸鋼乙 (Ni-CrW.) 衝撃及硬度試験

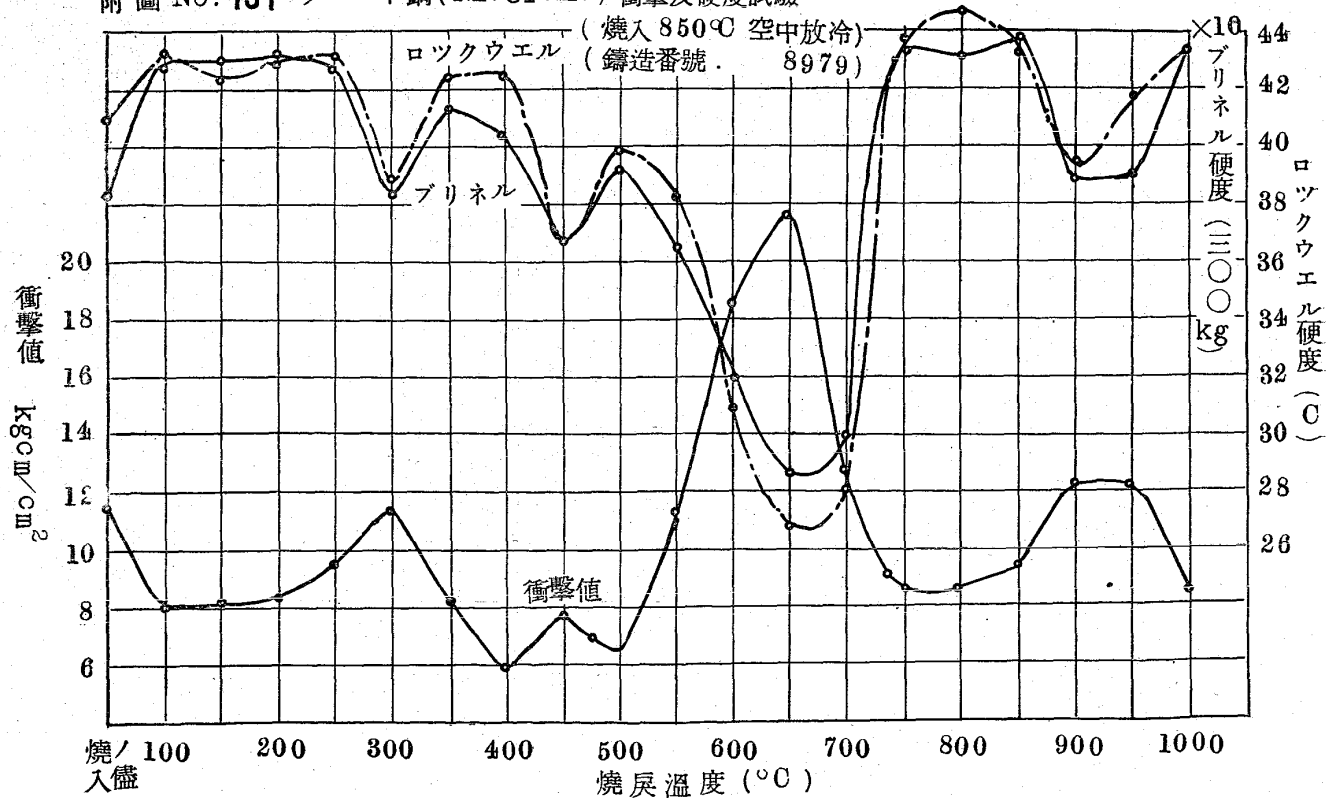


附圖 No. 130 Ni-Cr-W 鋼 ×200

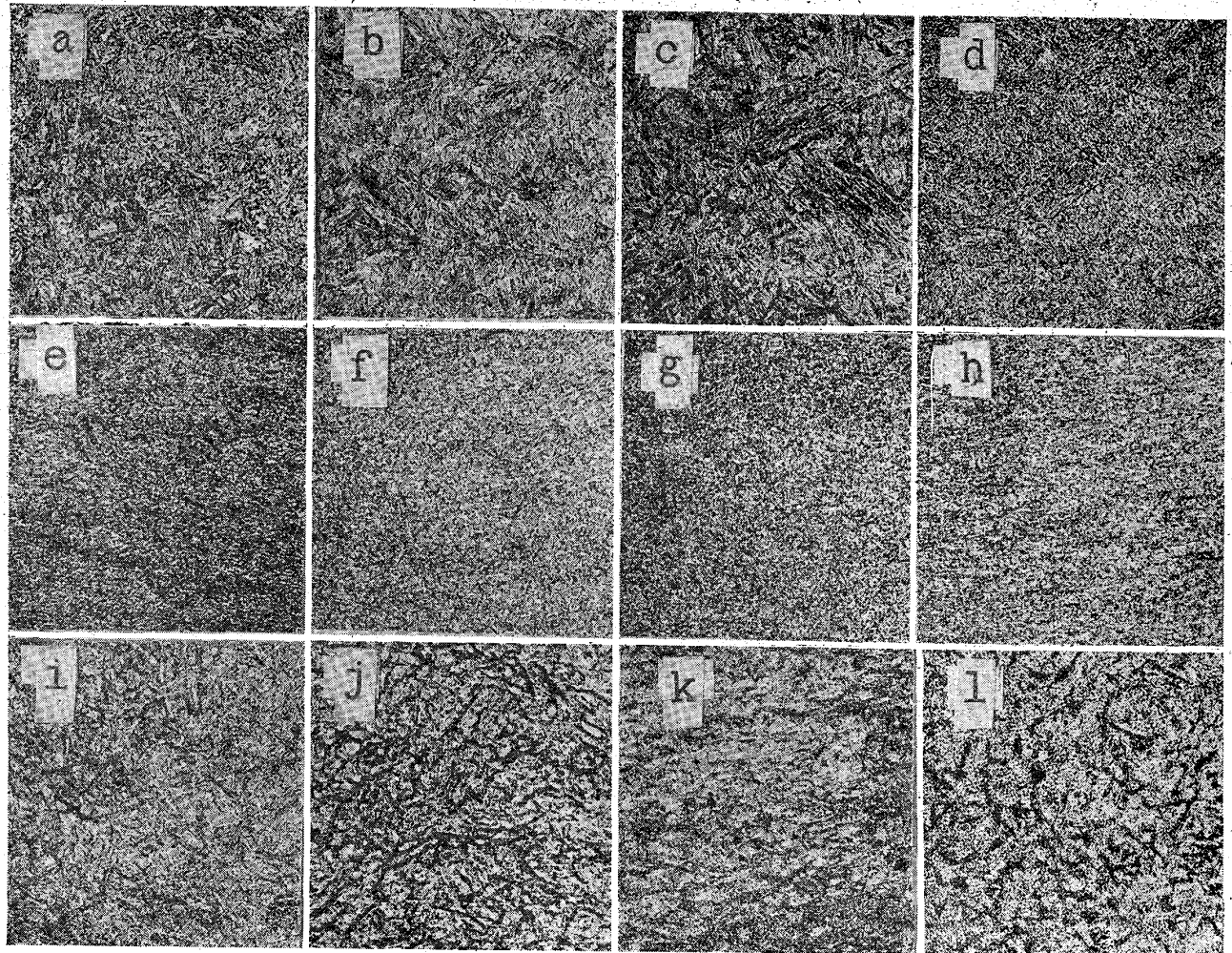


a 焼戻温度 100°C b 焼戻温度 200°C c 焼戻温度 300°C d 焼戻温度 400°C
 e " 500 f " 600 g " 650 h " 700
 i " 800 j " 900 k " 1,000

附圖 No. 131 タハード鋼 (Ni.Cr.Mo) 衝撃及硬度試験



附圖 No. 132 *Nr-Cr-Mo* (タハー F) 鋼 $\times 200$



a 焼入の儘	b 焼戻温度 100°C	c 焼戻温度 200°C	d 焼戻温度 300°C
e 焼戻温度 400°C	f " 500	g " 600	h " 700
i " 750	j " 800	k " 900	l " 1,000

この結果を曲線に示せば附圖 No. 131 の通りである。尙主要焼戻状態の組織は附圖 No. 132a 乃至 l に示してある。

VIII. *Cr-Va* 鋼

本鋼の成分は次の通りである。熱処理は焼入 850°C 油中冷却として焼戻は 100°C 乃至 1,000°C の範囲に変更した。

C	Si	Mn	P	S	Cr	Va
0.37	0.26	0.49	0.010	0.030	1.15	0.25

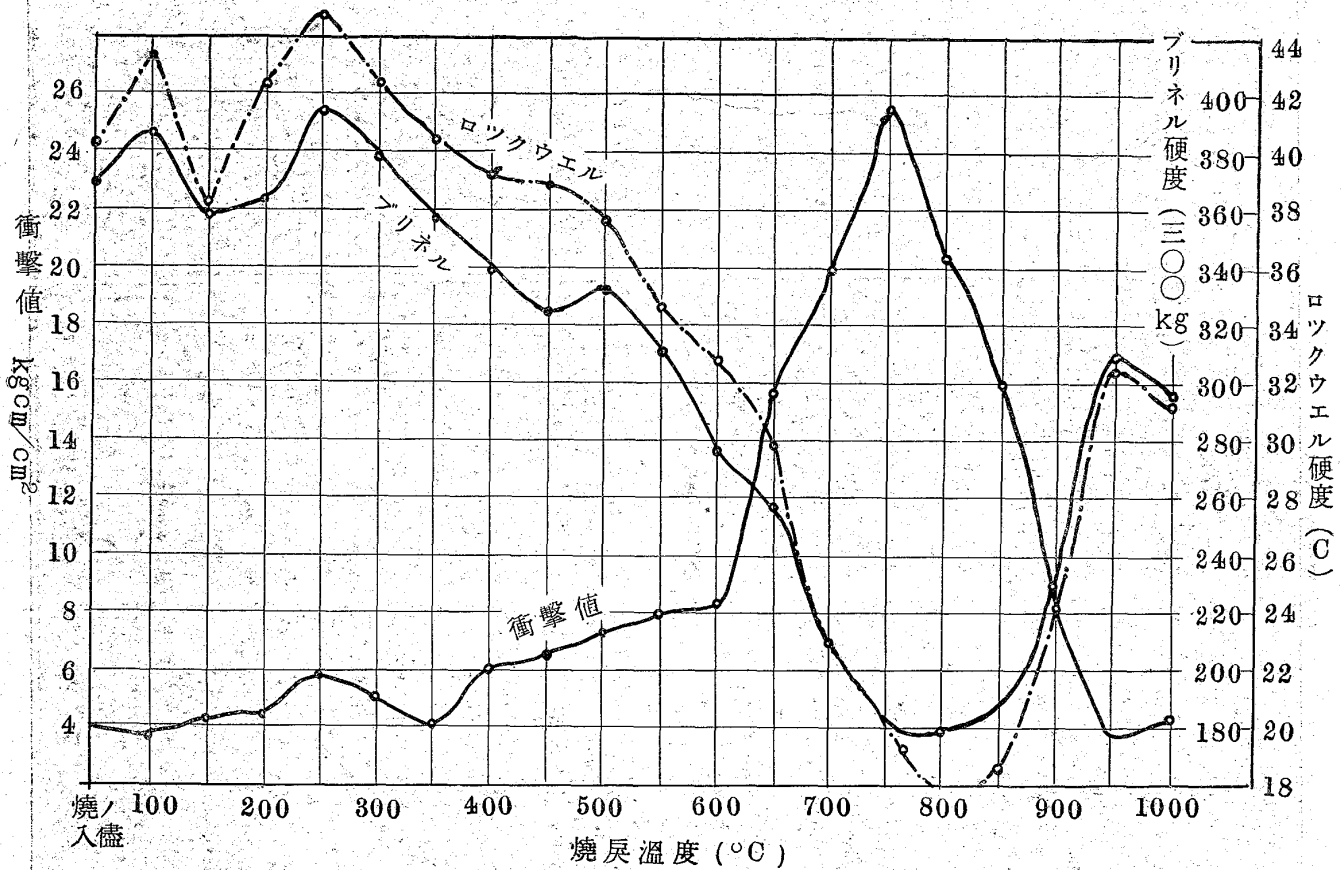
焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

熱処理 °C	衝撃値 kgm/cm^2	ブリネル 硬度	ロックウェル C 硬度
焼入の儘	4.10	370	40.27

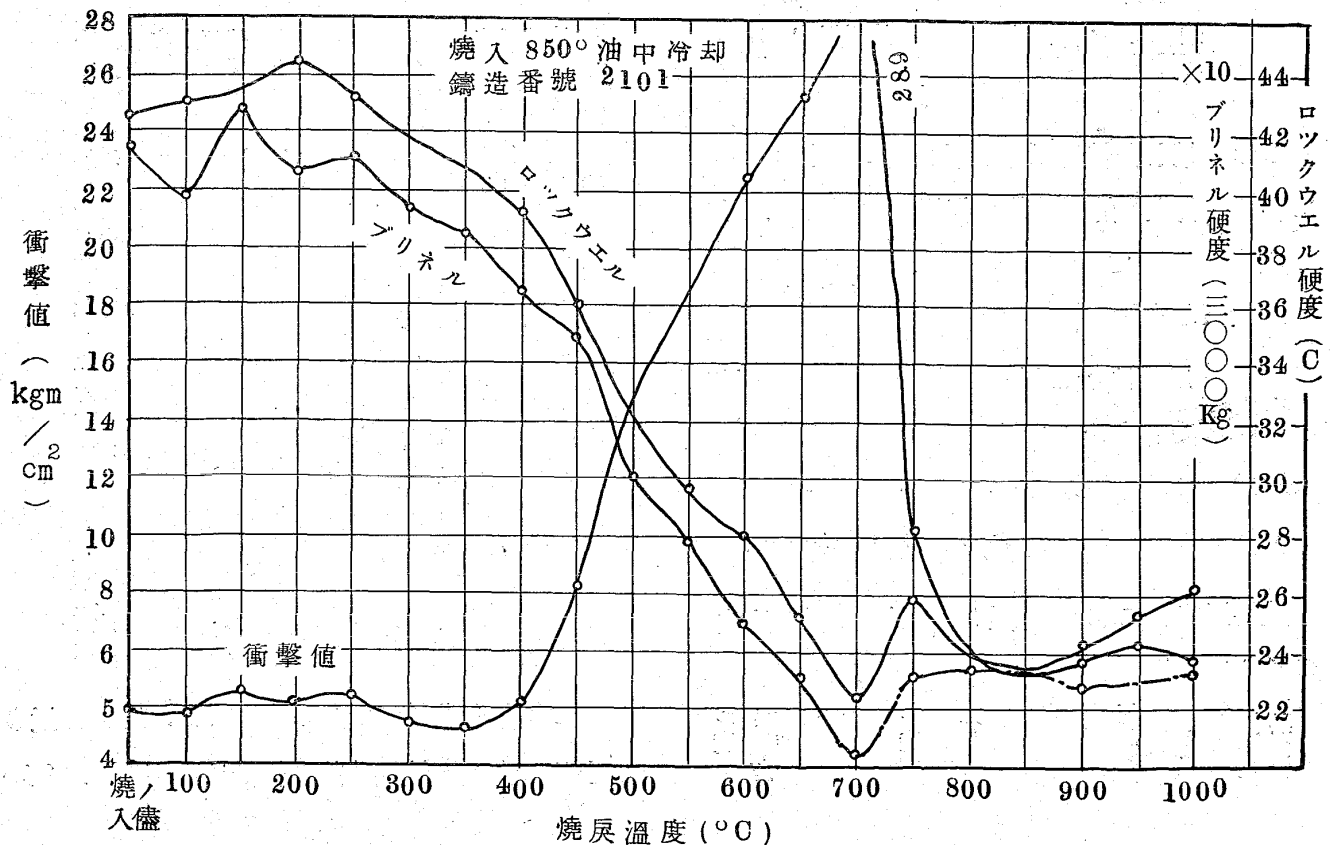
°C	kgm/cm^2	ブリネル	ロックウェル
焼戻 100	3.77	387	43.4
" 150	4.28	358	38.2
" 200	4.54	364	42.4
" 250	5.82	395	44.8
" 300	5.05	379	42.4
" 350	4.19	358	40.5
" 400	6.10	340	39.2
" 450	6.60	325	38.9
" 500	7.38	332	37.7
" 550	7.97	311	34.6
" 600	8.34	277	32.8
" 650	15.65	257	29.8
" 700	19.89	210	23.0
" 750	25.60	183	20.3
" 800	20.27	179	17.8
" 850	15.92	187	18.6
" 900	8.23	234	24.2
" 950	3.76	309	32.5
" 1,000	4.39	296	31.2

この結果を曲線に示せば附圖 No. 133 の通りである。尙主要焼戻状態の組織は附圖 No. 134 a

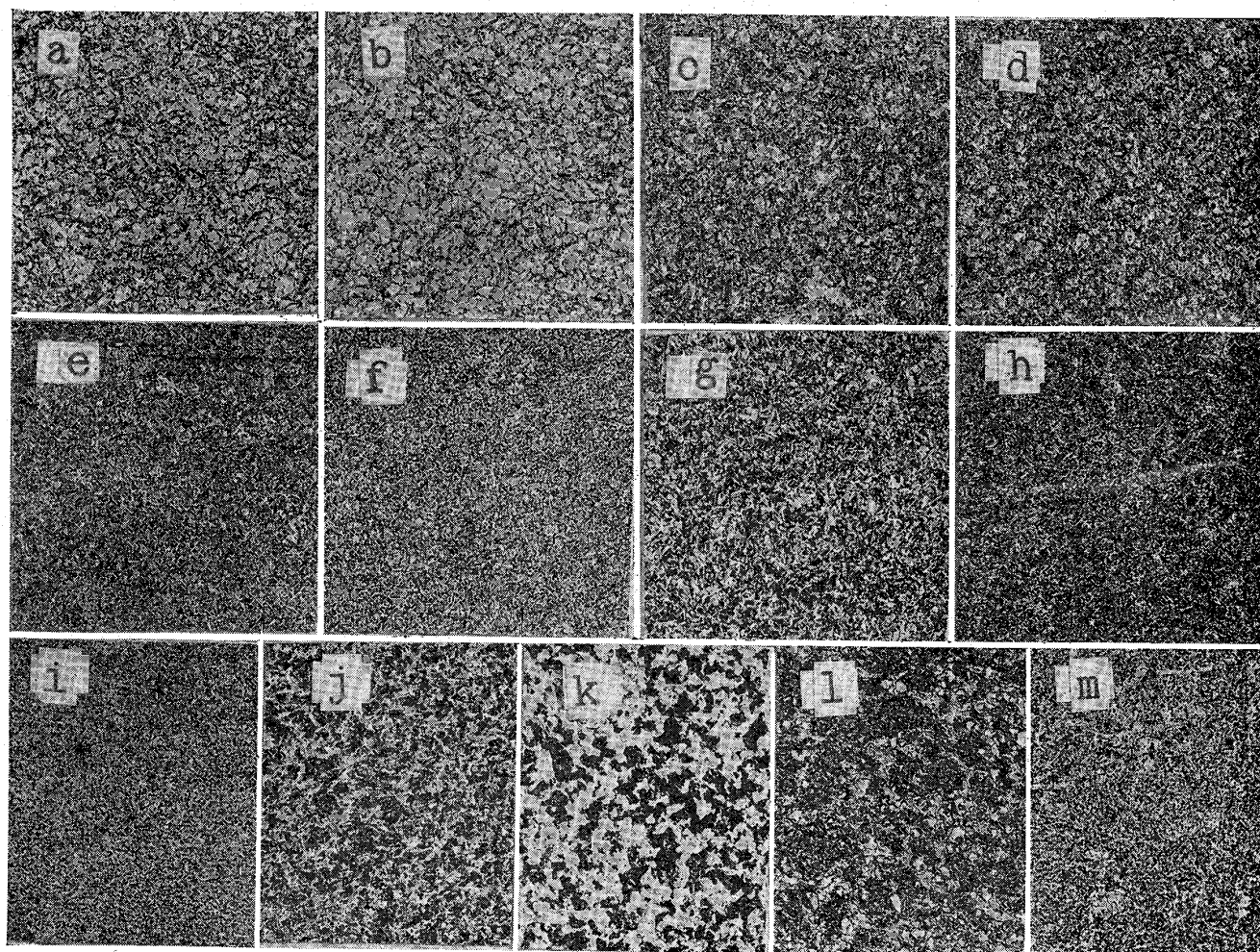
附圖 NO. 133. クローム・ヴァナヂウム鋼 (Cr. Va) 衝撃及硬度試験
(焼入 850°C 油中冷却 鑄造番號. 15170)



附圖 NO. 135. マクロン鋼 (Mn. Cr) 衝撃及硬度試験



附圖 No. 134 Cr-Va 鋼 ×200



a 焼入の儘	b 焼戻温度 100°C	c 焼戻温度 200°C	d 焼戻温度 300°C
e 焼戻温度 400°C	f " 500	g " 600	h " 700
i " 750	j " 800	k " 900	l " 950
m " 1,000			

乃至 m に示してある。

IX. Mn-Cr 鋼 (マクロン鋼)

本鋼の成分は次の通りであつて熱処理は焼入 850°C (油冷) とし焼戻は 100°C 乃至 1,000°C の範囲に変更した。

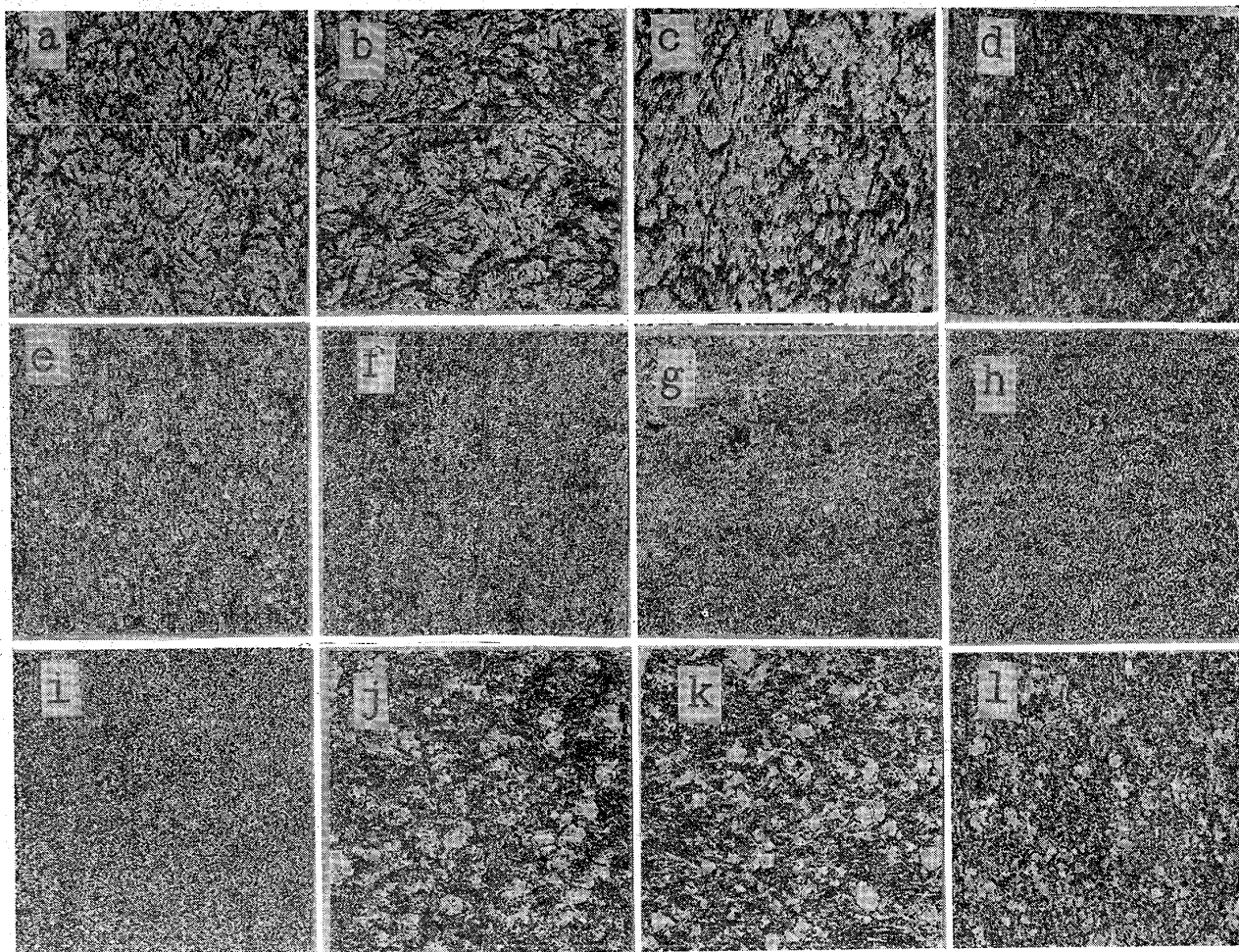
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.23	0.15	1.40	0.010	0.005	0.90	0.14

焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

熱処理 °C	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル 硬 度	ロックウェル C 硬 度
焼入 850°C (油冷)	3.95	414	42.6
焼戻 (空放) 100	3.75	397	43.0
150	4.51	428	43.5

熱処理 °C	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル 硬 度	ロックウェル C
200	4.16	406	44.4
250	4.35	411	43.2
300	3.50	394	—
350	3.28	385	39.5
400	4.20	365	39.2
450	8.20	349	36.0
500	14.62	300	32.1
550	18.46	278	29.6
600	22.50	250	28.0
650	25.30	231	25.0
700	28.90	204	22.4
750	10.22	231	25.8
(焼戻) 800	6.18	234	23.9
850	5.23	234	—
900	5.69	228	24.2
950	6.28	230	25.3
1,000	5.70	233	26.2

この結果を曲線に示せば附圖 No.135 に示す様に 700°C で衝撃値は最大で硬度は最低である。

附圖 No. 136 *Mn-Cr* (マクロン) 鋼 ×200

a 焼入の儘 b 焼戻温度 100°C c 焼戻温度 200°C d 焼戻温度 300°C
 e 焼戻温度 400 f " 500 g " 600 h " 700
 i " 750 j " 800 k " 900 l " 1,000

尙本鋼變態點以上で空中冷却の儘では焼入効果が無い故に 750°C 以上では衝撃値も硬度も低い。主要焼戻温度に於ける組織は附圖 No. 136 a 乃至 l に示してある。

X. *Ni-Cr-Mo* 鋼 (CN 12 鋼)

本鋼の成分は次の通りであつて熱処理は焼入 850°C (大氣中)とし焼戻は 100°C 乃至 1,000°C 範圍に変更した。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.24	0.13	0.39	tr.	0.006	2.91	3.00	0.58

焼戻温度別に求めた衝撃値及硬度の變化は次の通りである。

熱處理 °C	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル 硬度	ロックウェル C 硬度
焼入の儘	5.51	449	47.2
焼戻 100	5.26	468	47.8
" 150	5.61	465	47.4
" 200	5.70	469	47.0
" 250	6.74	458	46.8
" 300	6.06	450	44.7
" 350	5.00	435	44.7
" 400	5.11	430	43.8
" 450	5.10	426	43.5
" 500	5.46	414	42.6
" 550	7.19	405	40.9
" 600	16.56	325	32.3
" 650	19.49	300	30.3
" 700	20.09	280	26.7
" 750	8.41	359	36.7
" 800	5.86	453	48.4
" 850	6.18	471	48.5
" 900	5.48	473	48.2
" 950	5.76	471	47.7
" 1,000	5.73	468	48.7

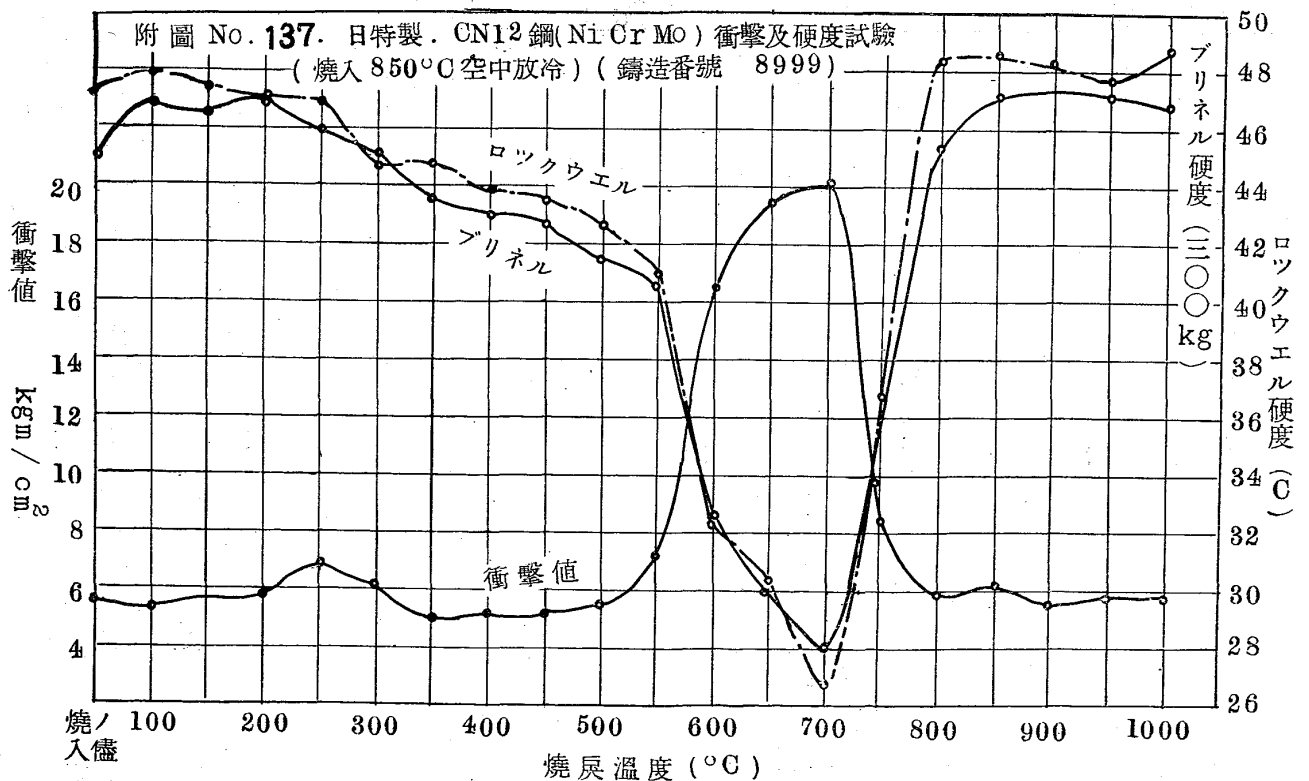
この結果を曲線に示せば附圖 No. 137 に示す様に 700°C では衝撃値は最大で硬度は最低である。700°C 以上では空中で焼入される爲に硬度は高く衝撃値を低下する。尙主要焼戻温度に於ける

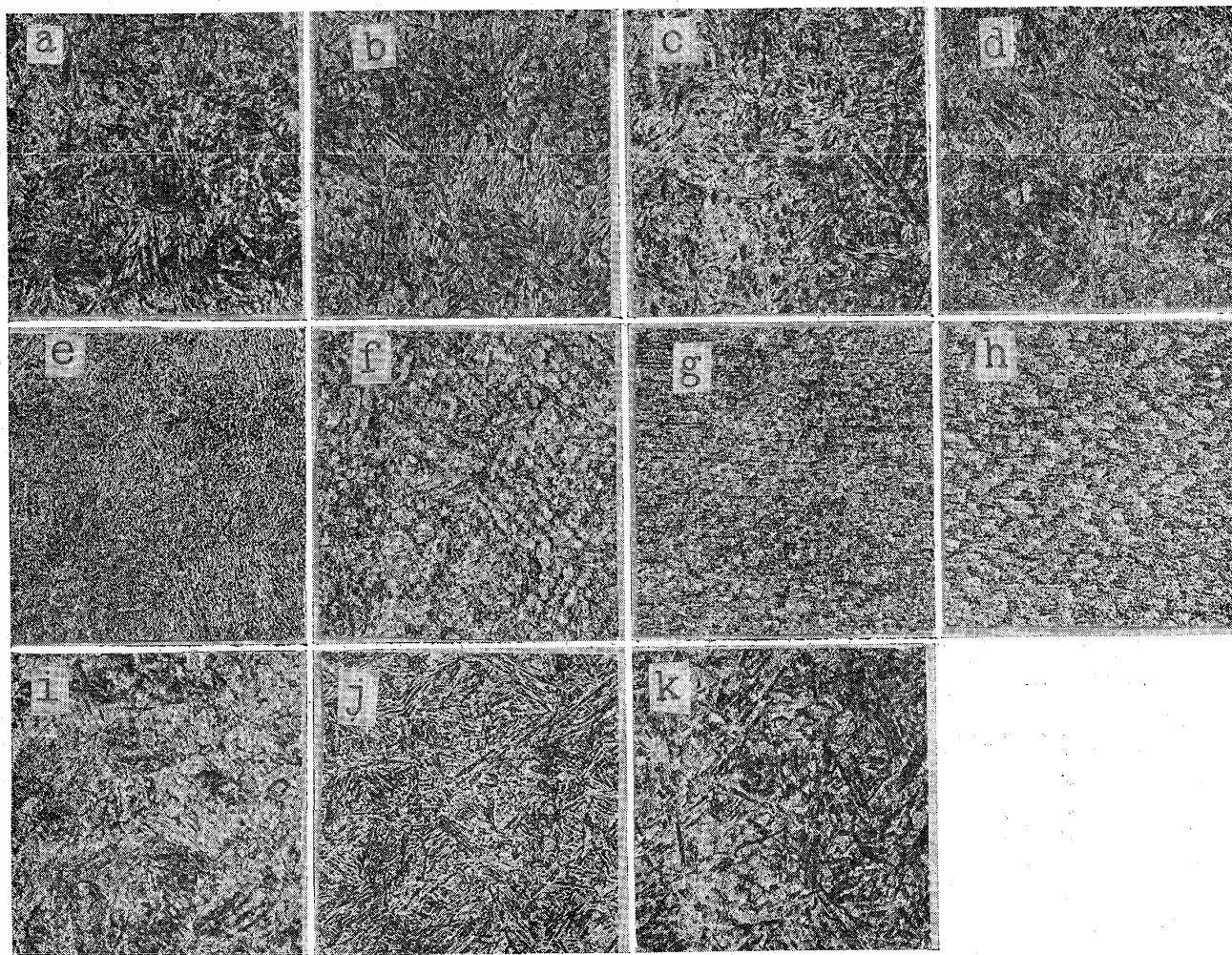
組織は附圖 No. 138a 乃至 k に示してある。

XI. 各種航空發動機用鋼の衝撃値の比較

從來及現今使用せられて居る主要な耐熱用鋼に就き各種状態の衝撃値を比較して見る。

鋼 種	主 成 分	熱 處 理	衝撃値 kgm/cm^2
耐 鋳 鋼	C 0.40, Cr 13.66	焼入、焼戻 700°C	0.668
WKZ (Cr-W 鋼)	C 0.42, Cr 3.25, W 11.20	" 660°C	3.210
JCW (Cr-W 鋼)	C 0.59, Cr 3.49, W 16.24, Va 0.32	" 660°C	1.550
"	"	" 700°C	2.030
Co-Cr 鋼	C 1.29, Cr 13.24, Co 3.20, Va 0.90	" 650°C	1.190
"	"	" 700°C	1.894
"	"	" 750°C	1.895 (1.63)
"	"	" 786°C	1.842
Si-Cr 鋼	C 0.32, Si 2.88, Cr 12.42	焼入、" 750°C	3.14
"	"	" 800°C	3.42
"	"	" 850°C	7.07
"	"	" 875°C	5.21
"	"	" 900°C	(3.24)
VII (Ni-Cr-W 鋼)	C 0.59, Si 2.51, Ni 13.10, Cr 12.6, W 11.04	焼入 1,100°C	2.03
高 C-Cr 鋼	C 1.25, Cr 19.36	" 800°C	0.89 (1.42)
"	"	" 850°C	0.557
FWV (Ni-Cr-W 鋼)	C 0.36, Si 1.82, Ni 13.57, Cr 12.33, W 2.86	" 930°C	10.39
"	"	" 930°C 焼戻 600°C	7.76
"	"	" 700°C	9.35
"	"	" 800°C	10.22

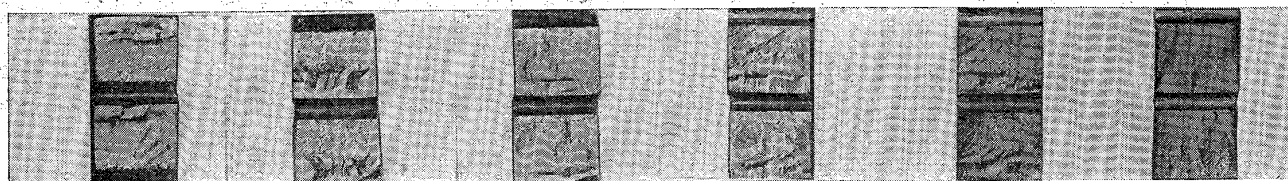


附圖 No. 138 *Ni-Cr-Mo* 鋼 ×200

a 焼入の儘 b 焼戻温度 100°C c 焼戻温度 200°C d 焼戻温度 300°C
 e 焼戻温度 400°C f " 500 g " 600 h " 700
 i " 800 j " 900 k " 1,000

附圖 No. 139 兎用鋼衝擊試驗

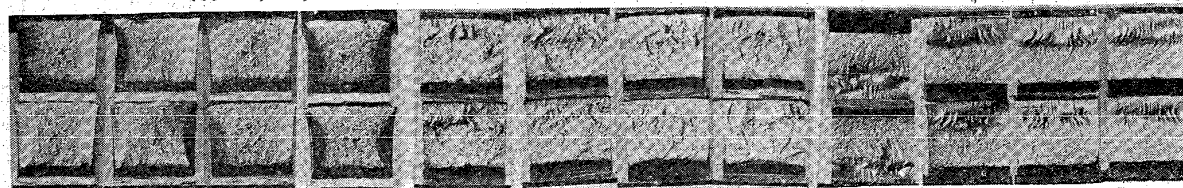
WKZ☆ W-Cr ♂ 9,507 W-Cr ♂ 9,507 BMW ♂ 12,256 同 左 VII ♂ 12,120



焼入 950 空 950 空 " 660 °C 焼入 800 空 850 空 1,100 空 °C
 焼戻 660 空 700 空

附圖 No. 140 兎用鋼衝擊試驗

FWV (♂ 12,143)

Si-Cr 鋼 (♂ 11,381)*Co-Cr* 鋼 (♂ 12,262)

焼入 930 " " " 焼戻 750 800 850 875 焼戻 650 700 750 780
 焼戻 600 700 800

これ等試験片の破面の景況は附圖 No. 139 及 No.140 に示してある。之等破面の状態から知られる事は所謂脆い之等の破面は何れも平であつて特徴のある力線を認めらる。之に反し粘靱性の大きな FWV の様な Austenite 鋼は Slip による變形が著しい。

其 2、Charpy 衝撃試験片の破面に就て

破断面には細粒破面 (fine fracture) と粗粒破面 (Coarse fracture) の外に二段又は三段に異なる粒狀破面を得られる事もある。溝は Mesnager 型として、その溝の低部には所謂分離破斷 (Trennung) を惹起する。今最多く得られる破面を大別する時は次の 4 種となる。

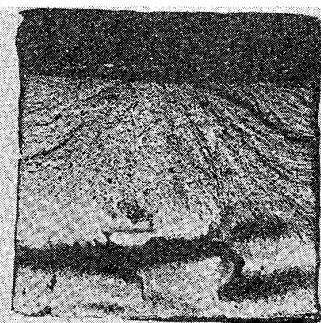
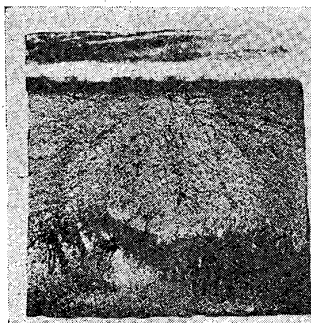
I. 細粒脆性破面、焼入状態又は著しく硬度の高い合金鋼の破面に見られるもので附圖 No. 141 及 No. 142 に示す様に溝底中心を基點とし内部に放射狀に力線を認める場合、反對

附圖 No. 141

高炭素クロム鋼

附圖 No. 142

コバルト、クロム鋼



の側は壓力を受ける。

II. 細粒粘性破面、Sorbite, Austenite の様な粘性の大きな材料に見受けられる破面で焼戻の充分きいた變態點より稍低い溫度で焼戻した場合で普通絹絲狀破面を呈す。附圖 No. 143 及 No. 144 参照。

III. 粗粒脆性破面、Pearlite State にある炭素鋼等の破面であつて附圖 No.145 及 No.146 に示すもの又は附圖 No. 147 に示す状態は之に屬す。Grain と Grain との間介在物又は結晶粒相互の粘性乏しい時に惹起する。

IV. 粗粒粘性破面、過熱された Ferrite grain の場合に見受けられる様な破面で Grain Growth 等が原因で惹起する。

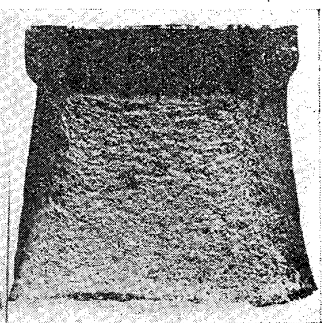
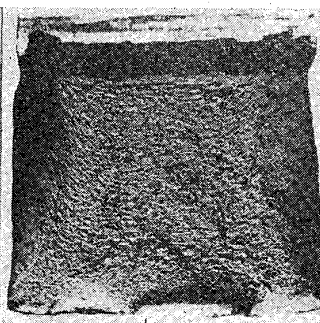
今これ等の破面の各種に就き圖示すれば附圖 No. 148 の Fig. 1 乃至 Fig. 4 となる。Fig. 1 に示すものは細粒脆性破面であつて溝端では抗張

附圖 No. 143

ニッケル、クロム鋼
(焼入 600°C)

附圖 No. 144

ニッケル、クロム
表面硬化用鋼



附圖 No. 145

0.45% 炭素鋼 (焼鈍)

附圖 No. 146

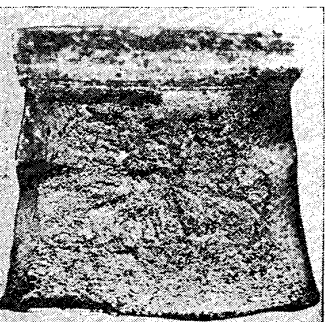
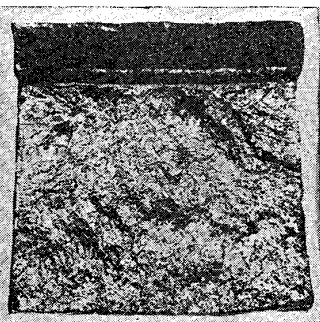
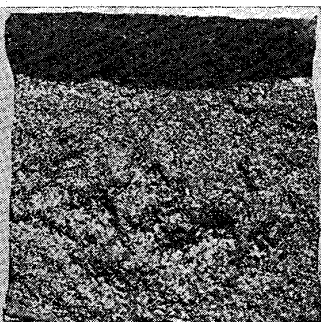
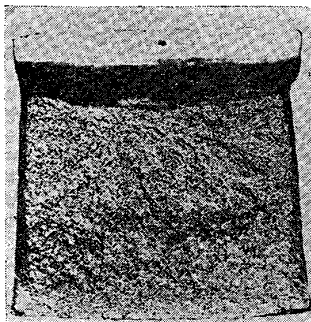
0.55% 炭素鋼 (焼鈍)

附圖 No. 147

シリ、クロム鋼

附圖 No. 148

クロム、ヴァナヂウム鋼



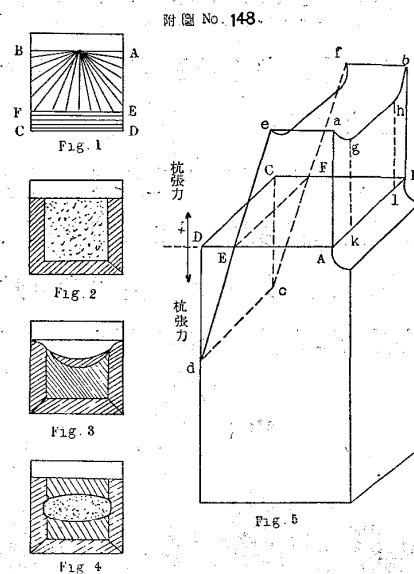
力を生じ打撃側では抗壓力を生じ、其中間に中立線を生じて折斷される。中立線迄の距離は打撃面より約 $2mm$ に亘りそれから約 $2mm$ に達すれば抗張力が作用する事を推定される。而して溝底から約 $4mm$ 迄は所謂分離抗張力 (Trennfestigkeit) と三元張力 (Triple Tension) とが作用してゐる事が想像せられる。之等の關係を圖示すれば Fig. 5 になる。圖中

Aa, Bb = 分離抗張力 gk, hl 二元張力
Dd, Cc = 抗壓力 とする。

之によれば ag, hb 曲線は一種の形狀をなし gh が殆んど一直線である事は破面が同一である事から推定される。又 Fig. 1 は fine fracture である故に aA = gk であつて従つて同面が ef 曲線の部迄等高であること (AB 線より約 $4mm$) と EF の中立線は CD 線より約 $2mm$ に在る事は附圖 No. 141 でも明である結果から、大體 Fig. 5 の様な内力線圖を想像される (此場合 ag, hb は殆んど一直線)、Fig. 2 に示すものは細粒粘性破面で附圖 No. 143 及 No. 144 はこの代表的のものである。此場合の内力線圖は Fig. 5 に示すものと殆んど同様で Aa は kg より遙に大であること (破斷の時に於て) が想像される。従つて ag 間の内力傾斜の爲に Slip を生じ變形するものである。この場合の分離抗張力は AD, BC の側面

に生ずることが分る。

Fig. 3 に示すものは特殊な場合で破面の中央を境として溝の方向に粗粒、他の方向に細粒を呈する場合が稀にある。本現象は Bohler CS 鋼 (Si-Cr 鋼) に惹起した現象で (焼戻 $650^{\circ}C$) Charpy 試験機の打撃の要領が何等かの異變により溝底部の張力を受ける際中立線を境として溝側に三元張力が作用したものと思はれる。勿論周圍には分離抗張力が作用し Slip を生じた事は前に同じ。Fig. 4 も特別の場合で偶然に Cr-Va 鋼

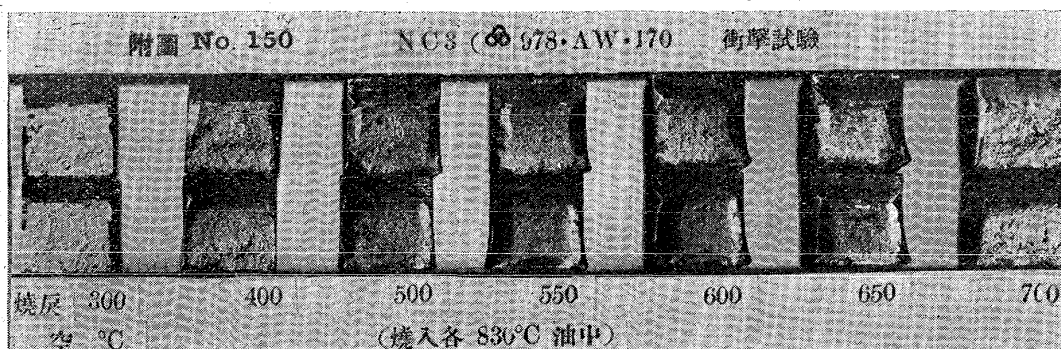


に之を發見したもので恰も溝を除いた断面の約 $1/3$ の中心に脆性破面を生じ打撃側には抗壓力溝の側には抗張力を同時に受け中立區域に三元張力を

受けたものと考へられるが、之が實際の機構に就いては明ではない。附圖 No. 149 参照。

尙附圖 No. 145 乃至 No. 147 に示すものは前記粗粒脆性破面であつて Pearlite 組織や Si-Cr

鋼の様な結晶の發達した様なものは之れに屬するものと思はれる。この場合には Fig. 1 に示す様な抗張、抗

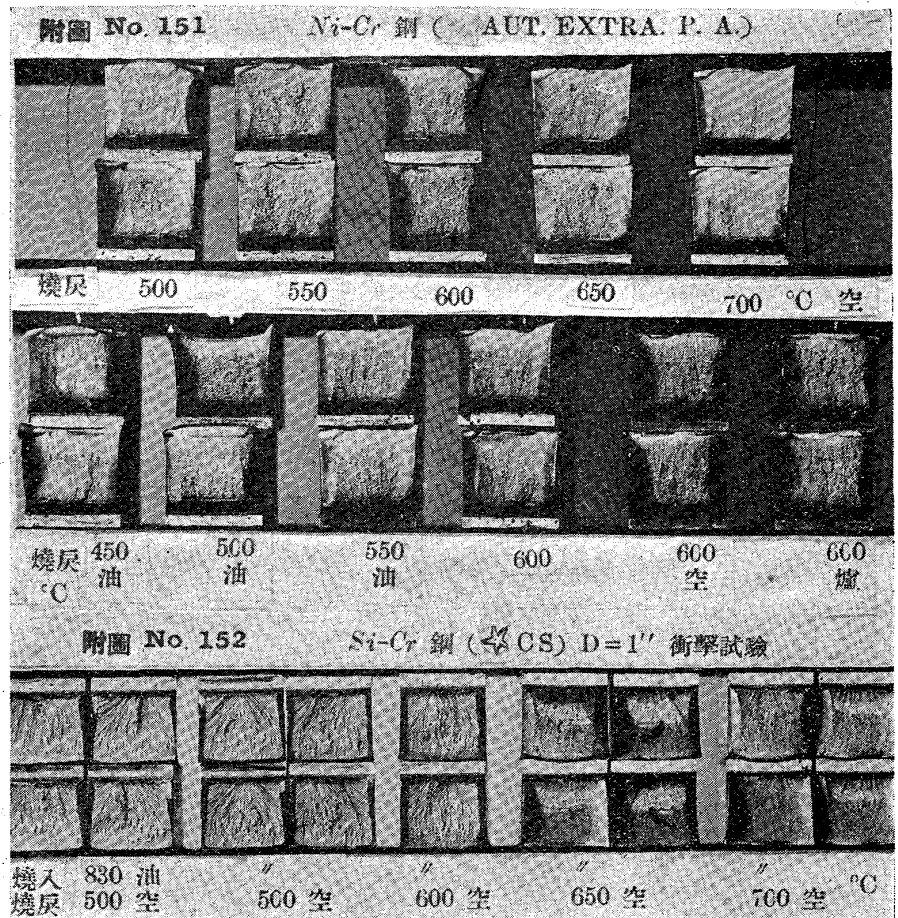


壓内力分布の形式にある事は想像されると共に分離抗張力と三元張力との差の少い事も推定される。

以上各種破面の景況は前記各種特殊鋼の焼戻温度別に異つた状況にある事は附圖 No. 150 乃至 No. 158 に示してある。之等を通覧する時は何れの場合にも A_1 變態點に近く靱性最大であつて衝撃値の最大の點がある。普通使用状態にはこの點より僅に低い状態の處を撰んでゐるが後述する様に工作上の難易を考へない時は衝撃値の最大の状態では最耐久性が乏しい事が明であつて結局附圖 No. 143

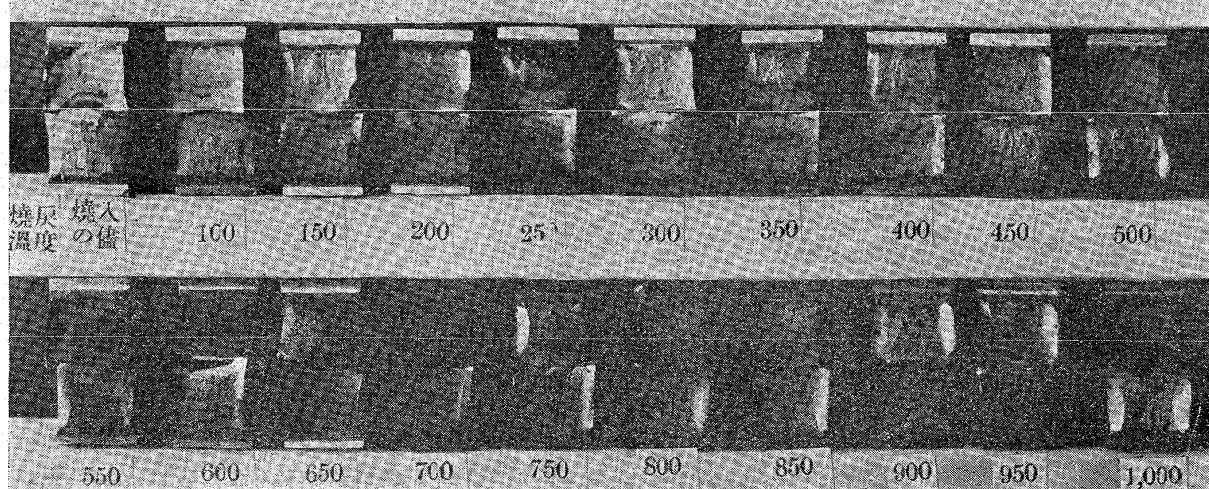
に示す様な tough な状態は實用上は望ましくないと言はれる。

實際衝撃試験の槌で打つ様な大きな衝撃では確に靱性の大きなものが良いと稱せられるが、寧ろこの様な場合は殆んどなくて僅かの



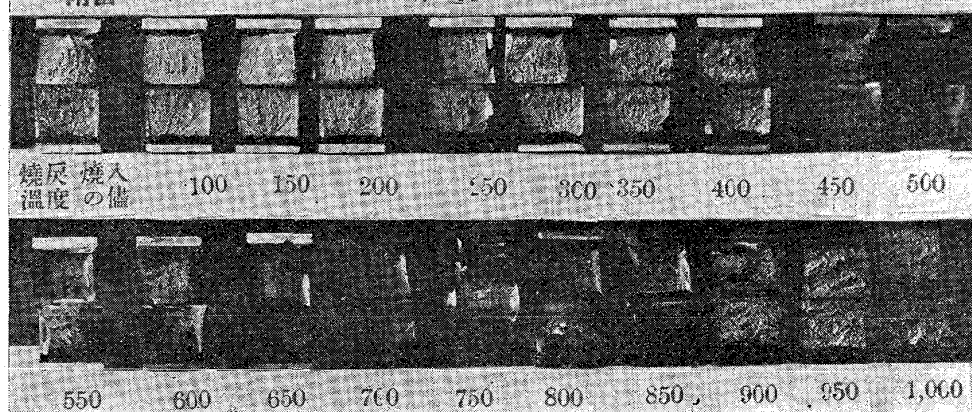
附圖 No. 155

$Ni-Cr-Mo$ 鋼 ターボ鋼 (⊗ 8979) 衝撃試験



附圖 No. 156

(Cr-V) 鋼 (⊗ 15178) 衝擊試驗 燒入 850°C 油中



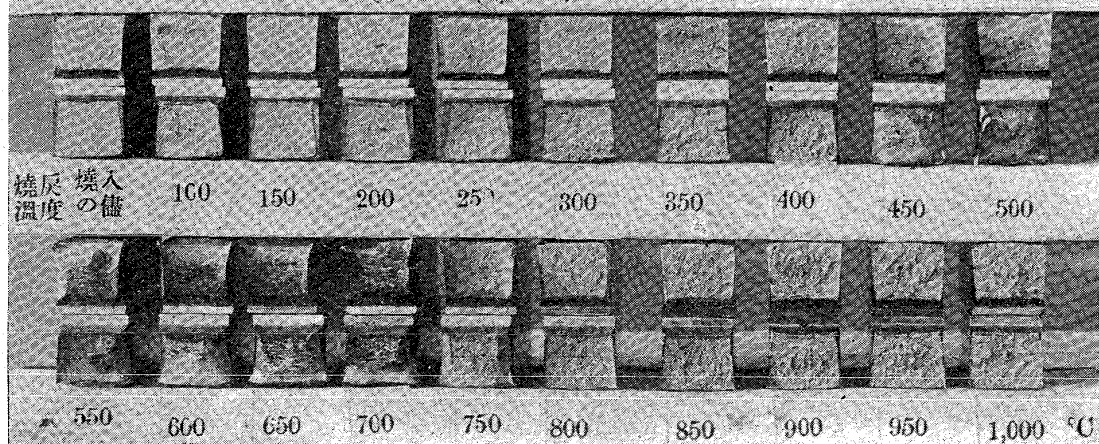
附圖 No. 157

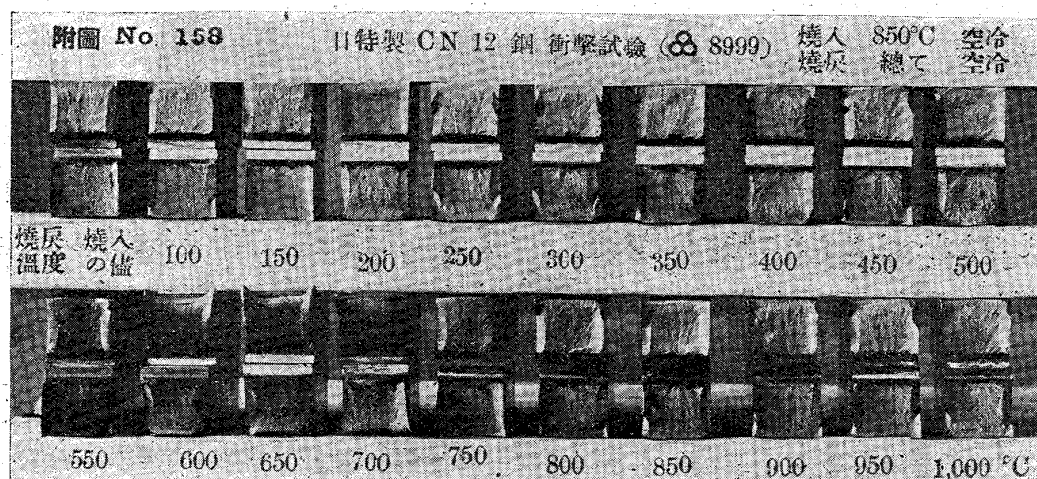
マクロン銅
(*Mn-Cr* 2101)

衝撃試験

焼入 850°C
焼戻 總て

空中冷却
空中冷却





荷重の累積による疲勞の場合に想到するならば衝擊値は小であつても前記細粒脆性破面を呈するものは耐久力が大きい。但變態點を超えて粗粒脆性を呈する様な状態では耐久性も乏しい事が事實であつて、從來衝擊値は細粒及粗粒兩脆性共通に考へて望ましくないと思つたのは妥當では無い。耐久性を重視する航空機用材料では工作上差支へなければ使用状態としては細粒脆性は害なきのみならず寧ろ必要であるものと思惟される。

第3節 疲勞脆性

粘靱性の大きな鋼の疲勞による破斷は殆んど脆弱破面を呈する事は前述の通りである。今各種疲勞試験の中松村式疲勞試験機及 Amsler Universal Hammer Machine による疲勞破斷に就き研究し分離破斷現象との關係を述べんとするものである。

其 1 松村式疲勞試験

順序として先づ炭素鋼に就て述べ次に特種鋼の各種熱處理状態に於ける疲勞試験結果を論じ分離破斷との關係を明にすることゝす。

I. 炭 素 鋼

C 量を異にする次の 3 種鋼を撰び松村式繰返打撃試験機にて 30 kg/cm の打撃活量による破斷回

數を試験した。

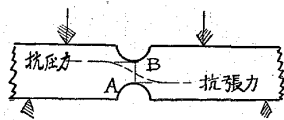
熱處理は次の様に焼鈍状態とした。

炭素量	熱處理	試験片形状	破斷回数	衝擊値 kgm/cm ²	ブリネル硬度
0.27	{ 焼鈍 820°C 灰冷	丸徑 10mm	326	9.5	143
		角 10×10mm	527		
0.45	{ 800°C "	丸徑 10mm	292	5.4	163
		角 10×10mm	334		
0.77	{ 780°C "	丸徑 10mm	107	2.6	231
		角 10×10mm	198		

この結果から見れば炭素量の増加に従ひブリネル硬度は増し衝擊値は低下してゐるが松村式の回數は衝擊値に比例して其の他のものに反比例してゐる。一般に疲勞耐久性は抗張力竝に硬度に正比例することが多いに拘らず之と反對である。この原因は打撃活量の大小と溝の影響によるものであつて若し溝底部に生ずる表面内力が所謂分離抗張力を越す時にはこゝに龜裂を生じ局部龜裂發生迄の回數に大差ない時は破斷面の回數は硬脆なる材料の方が少い事は推定に難くはない。

Pearlite 状態に在る炭素鋼では Ferrite と Pearlite ($Fe_3C + Fe$) の境で打撃力を受ける際 A 點の溝底部では著しく大きな分離抗張力を發生し反對側の溝底では抗壓力を生ずる、次に逆に打撃を受ける時は全々之に反對の力を受け従つて A と B の兩局部では大きな分離抗張力を繰返し受ける時は加工されることゝなつて而も A B 點から僅

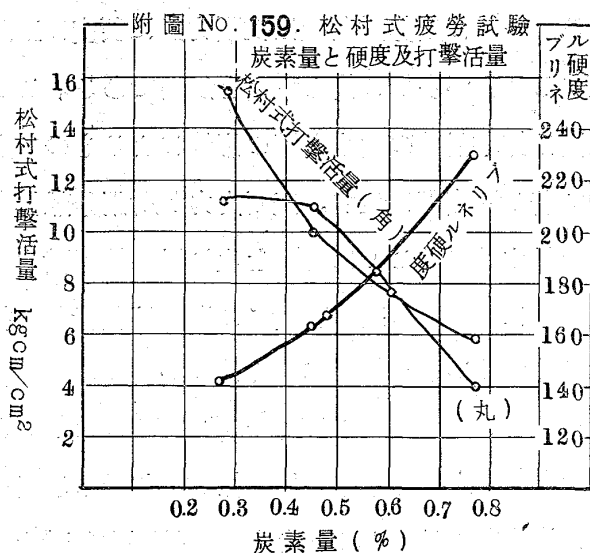
に内部との間に内力の傾斜極めて大きい故に益々



A と B 點に分離作用
を進捗し變質して最後
の一撃で分離する様な

状態となるものと考へらる。この時には龜裂を生じ龜裂が進行して破斷に至る。低炭素鋼では Ferrite の粘性大きい爲めに變形を生じつゝ遂に表面の Trennung を生じて後は龜裂の進入速度は比較的に高炭素鋼より遅く深く進入する事明である爲めに全體の破斷回数は低炭素鋼の方多いものと考へられる。絹絲狀破面を生ずるのは Trennung で生じた龜裂の面が互に摩擦の爲めに磨耗するからである。

若し打撃荷重が小であつて高炭素鋼で耐久限界以下の場合でも炭素量の低いものは僅かに限界を超過することがあつて、この場合は逆に高炭素鋼の方は耐久性大である譯である。附圖 No. 159 参照。



各種炭素鋼の焼入後低温焼戻を行つて松村式打撃回数の變化を試験した結果は松下徳次郎氏が發表されて $C=0.45\%$ 附近のものが約 400°C で最大回数を得られる實驗は周知の事實であつて炭素

量の大小によつて頂點の位置の異つてゐる事も周知の事である。

II. Ni-Cr 鋼 (Ne_3)

次に示す成分の Ni-Cr 鋼に就き焼入後焼戻温度別に松村式疲勞試験を行ひその結果次の通りである。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	鋼種
0.37	0.22	0.43	0.014	0.023	1.36	0.75	AW 170 8970

但し一回の打撃活量 30kg/cm とした。

焼戻温度 $^\circ\text{C}$	破斷回数	破斷活量 kgm/cm^2	衝擊値 kgm/cm^2	硬 度
300	1518.7	45,650	3.25	401
400	2973.0	89,800	4.15	377
500	1863.0	56,150	8.51	285
550	1807.5	54,850	13.7	254
600	1354.5	40,800	18.4	224
650	1175.5	35,080	21.6	201
700	1119.5	32,720	14.8	184

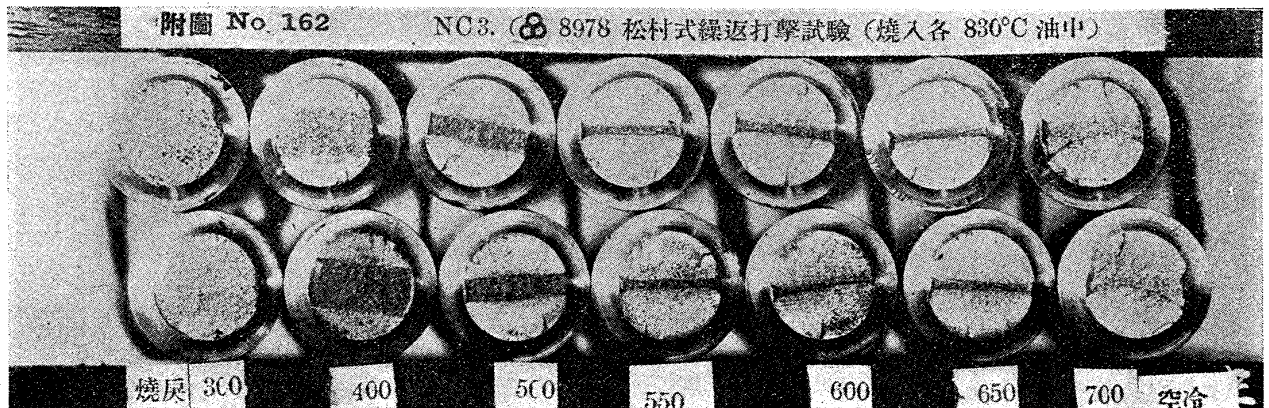
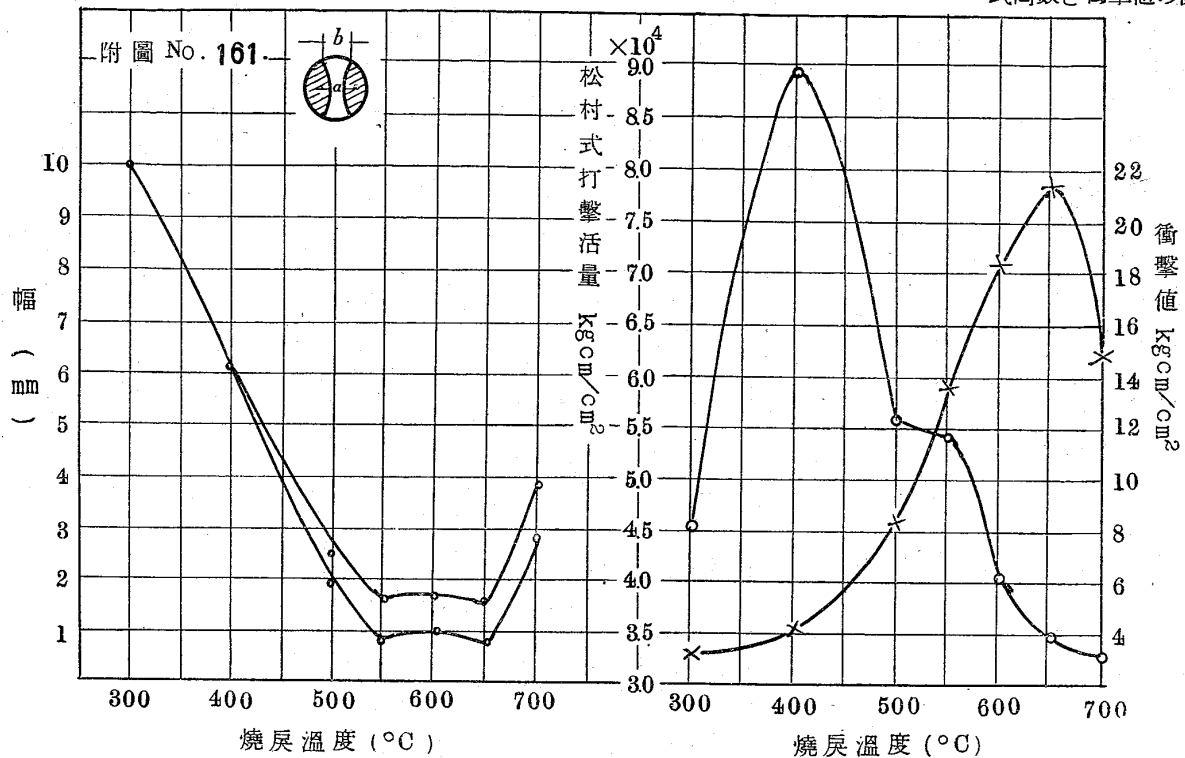
この結果は附圖 No. 160 に示してある通り焼戻 400°C の場合には 300°C の場合より遙に耐久力大であつて之 400°C 以上では急に低下する。500~550 $^\circ\text{C}$ 附近で停止點のある事も特徴である。400 $^\circ\text{C}$ 附近は所謂 Blueing Temperature であつてこの種衝擊力による耐久性では最強いとことが知られる。之に對し Charpy 式衝擊試験の様な唯一回の打撃による場合とは反對の現象を示してゐる。即ち焼戻温度が 600, 650, 700 $^\circ\text{C}$ と高まるに従つて破斷回数の低下するは溝底部に生ずる Trennfestigkeit は温度の上昇と共に低くなる爲めで殊に 650 $^\circ\text{C}$ を過ぐる時は Sorbite が $\text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe}$ の所謂 Pearlite 分解して grain boundary に出来る爲め前粗粒脆性を呈する爲めに速に震動的打撃荷重によつて疲勞し分離破斷を促進するのである。

破斷面を精細に觀察するに中央部に脆弱帶部の出来る事は附圖 No. 161 に示す通りであつて其の幅は焼戻温度と共に變化してゐる。而して 550

Ni-Cr 鋼 (NC₃) の松村式疲勞試験片破面の脆弱帶部の幅

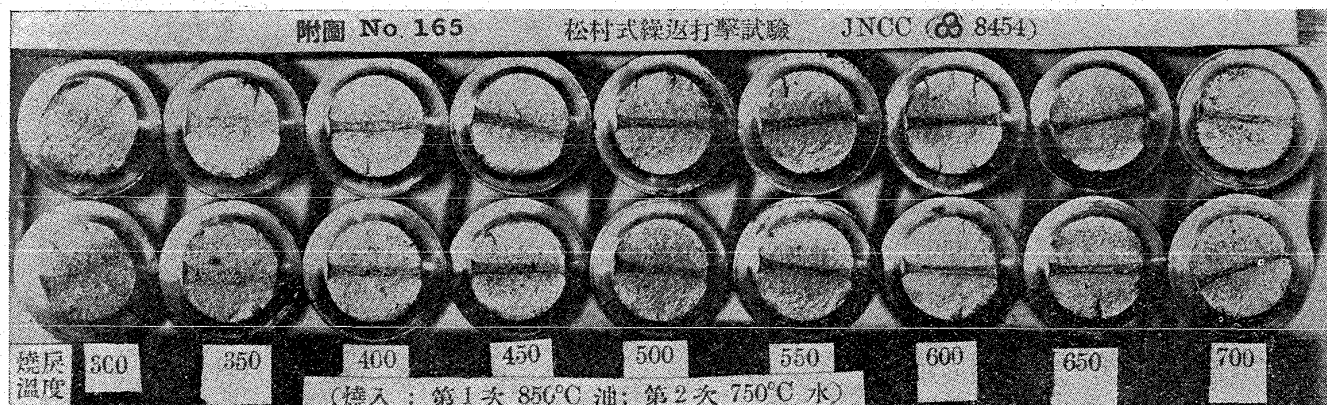
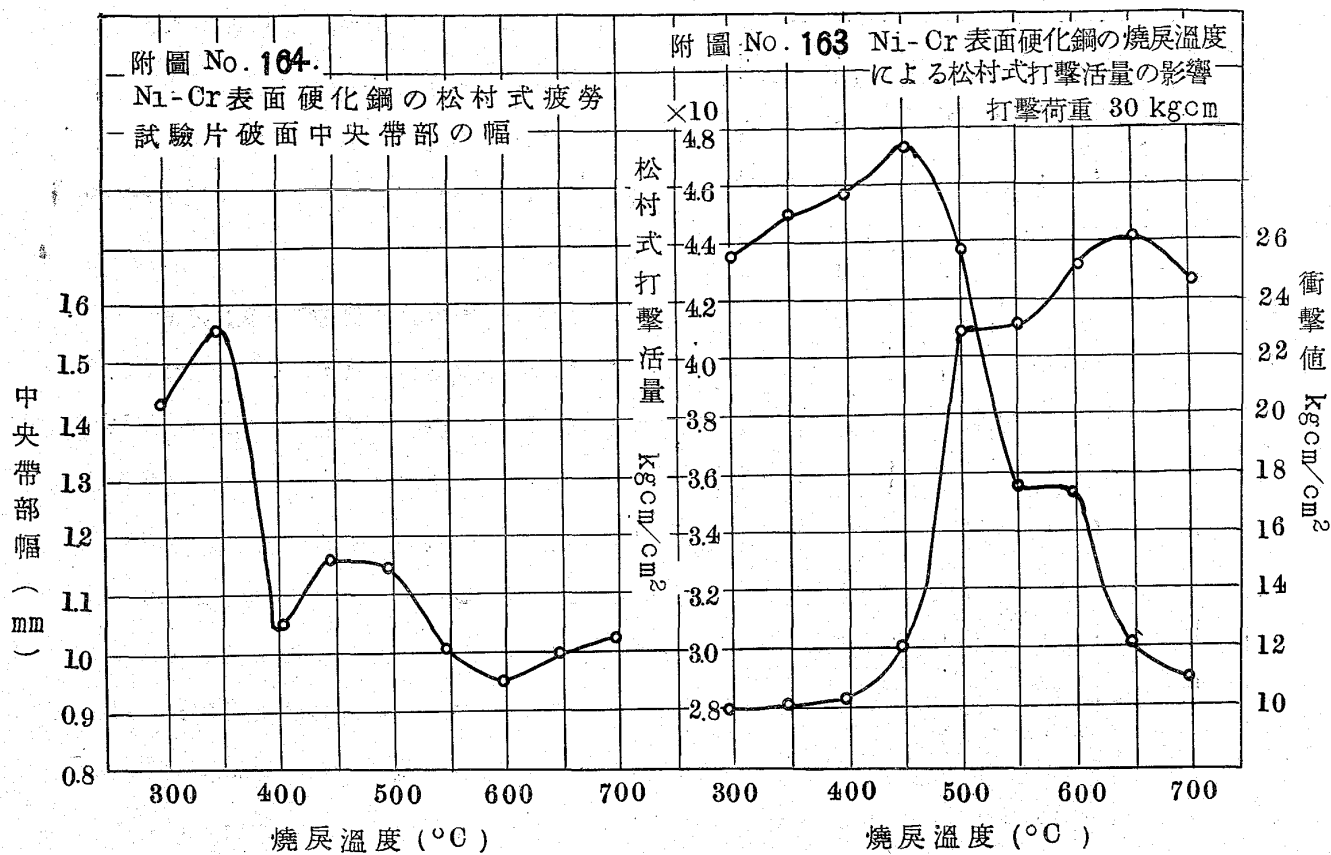
附圖 No. 160.

Ni-Cr 鋼 (NC₃) の焼戻温度による松村式回數と衝擊値の關係



°C 迄は其の幅が漸次に小となり 550° 乃至 650 °C 迄では殆んど一定する狀況は附圖 No. 162 に示す通りである。700°C に於ては急に幅を増大する。この幅の大なることは脆性の大なる事を示すもので 300°C 焼戻の場合には帶部が無い。即ち外面に起る分離抗張力以上の荷重がかゝるときに表面に分つ分離破斷を起し龜裂は遂次侵入せず直ちに破斷に至ることを示してゐる。かゝる細粒脆性の場合には繰返荷重による變質(加工の爲め)し最後の分離抗張力に達する迄の時間の極めて大き

いか一度龜裂が出来た後は内部迄力の傳播する事速で直ちに破斷する。打撃荷重の最極端に大きい衝擊試験では粗粒と細粒とを問はず硬度の大なるものは衝擊値小となるに反し松村式疲勞の場合には細粒脆性の焼戻 400°C の場合と粗粒脆性の焼戻 700°C の場合とは全々趣きを異にして後者の場合は $Fe_3C + Fe$ なる介在物が出来る爲めに震動的疲勞には著しく弱い事を知るのである。破面の景況は附圖 No. 162 に示す通りである。



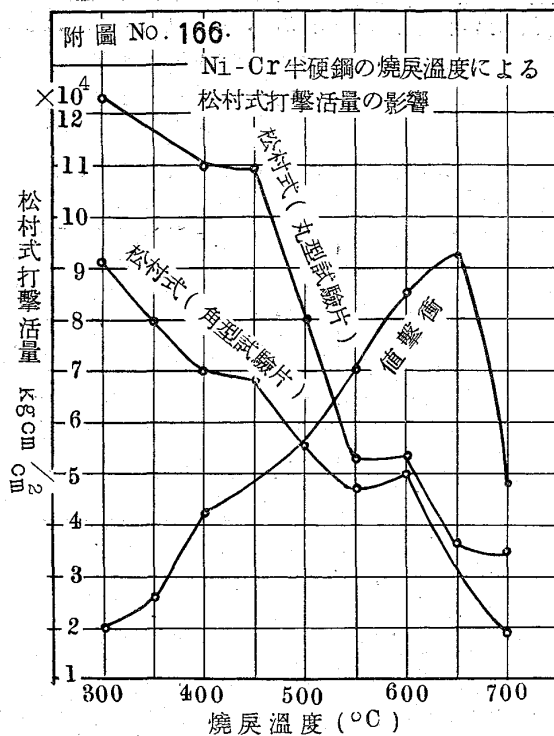
III. Ni-Cr 表面硬化鋼 (JNCC)

本鋼は Case hardening 用鋼である故に二重焼入して使用するが特に焼入後焼戻温度を變化して松村式疲勞試験を行つて衝撃値や硬度との關係を試験した。この結果は附圖 No. 163 に示してある。この結果から見れば 300°C から 450°C 迄は衝撃値の傾向と殆んど同様に上昇し之以上では全々反對の傾向をとり 500°C に達すれば之以上衝撃値に大差なきに拘はらず松村式回数は著しく

低下してゐる。尙 550~600°C に於て松村式回数の停止點のある事は前に同じ。尙破斷面の脆性帶部の景況は附圖 No. 164 に示す破面の景況は附圖 No. 165 に示す通りである。

IV. Ni-Cr 半硬鋼 (86 kg Ni-Cr 鋼)

本試験では特に丸型及角型の兩試験片の斷面積を各 1 cm² とし各種焼戻温度を變化する事による松村式破斷回数影響を見た、その結果は附圖 No. 166 に示してある。大體焼戻温度の上昇と共に低



下する事及 550°C~600°C の點で停止點の存在する事も同前である。衝撃値は 650°C で最大であるが松村式は連續低下して居る。

尙丸型は角型に比し松村式回數の大なる理由は溝底に生ずる分離破斷は打撃の際試験片を支える兩支點を安定狀態に置く爲めにその効果は角型の大なるものと考へられ特に細粒脆性狀態にて差は大きい (450°C 焼戻の時最大) 而して 550°C~600°C の場合では差が極めて小となる。700°C

で再び其の差大となつたのは粗粒で脆性となつたことを知る。破斷面の景況は前と同様に 300°C の場合に中央帶部の幅最大で温度上昇と共に狭くなる。700°C で再び大となり而も破斷回數も低下してゐる。

松村式疲勞試験の分離破斷と龜裂發生に就て

松村式疲勞試験は打撃によつて生起する内力が試験片の溝底で繰返し作用し試験片が反轉する事により抗張抗壓力が交互に起り従つて該部が加工される事となり漸次に分離破斷力の變化を來し遂に最後の一打撃によつて局部に分離現象を起す。この結果龜裂となり遂に龜裂が深く侵入する事により破斷に到達す。今龜裂發生の回數と破斷回數との間に何等かの關係あるやを試験する爲めに各種特殊鋼の熱處理別に於ける狀態を研究することとした。試験片寸法は次の 2 種とした。

角形試験片 15×10mm 溝斷面 10×10mm

丸形試験片 徑 15mm 溝 徑 11.29mm

溝の斷面積は何れも 100mm² である。供試特殊鋼の成分及之等鋼の熱處理要領は次表の通りとす。

符 號	鋼 種	分 析 成 分						
		C	Si	Mn	Ni	Cr	W	其 他
Bohler Anto Extra PA	Ni-Cr 鋼	0.15	0.32	0.45	2.49	0.68		
AW20(×527)	Ni-Cr-Mo 鋼	0.36	0.27	0.33	2.81	0.66		Mo 0.74
Bohler CS	Si-Cr 鋼	0.52	0.90	0.35		1.24		Mo 0.35
H-Cr (9108)	高-Cr 鋼	0.40	0.36	0.32		13.66		
FWV	Ni-Cr-W 鋼	0.36	1.82	0.34	13.57	12.33	2.86	Va 0.2
VII (12120)	Ni-Cr-W 鋼	0.59	2.51	0.39	13.10	12.60	11.04	
W-Cr (9507)	W-Cr 鋼	0.57	0.10	0.09		3.13	15.89	Va 0.5
BMW (12256)	高 C-Cr 鋼	1.25	0.60	0.41		19.86		
CN 12	Ni-Cr-Mo 鋼	0.24	0.13	0.39	2.91	3.00		Mo 0.58

區 分	Bohler Anto Exrap A	AW 20	Bohler CS	H-Cr	FWV	VII	W-Cr	BMW
燒 鈍	820°C	830°C	800°C	900°C			900°C	
燒 入	850°C(油)	850°C(油)	830°C(油)	930°C(油)	930°C(空)	1,100°C(空)	950°C(空)	800°C(空)
燒 戻		500°C~ 700°C	500°C~ 700°C	700°C			600°C	

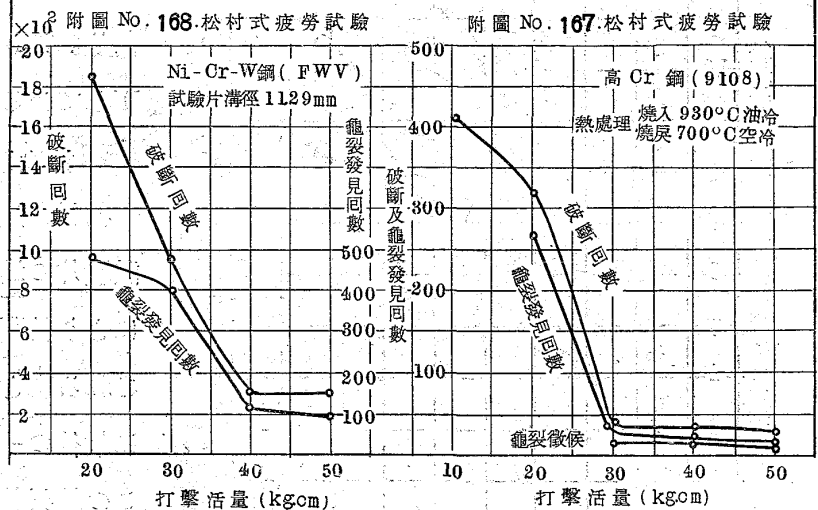
打撃荷重は FWV 及高 Cr 鋼(9108)のみは 10, 20, 30, 40, 50kgcm とし其他は何れも 30kgcm に一定した。

I. 打撃荷重變化による龜裂發生回數

高 Cr 鋼(耐鑄鋼)と Ni-Cr-W 鋼(FWV)の2種に就き打撃荷重を種々に變更し破斷の途中絶えず龜裂の發生状況を 1/100mm 迄の精度を有する顯微測器で検出することゝした。龜裂の明瞭でない前にその徴候とも見られるものを發見した場合には参考として徴候と記した。其の結果は次の通りである。

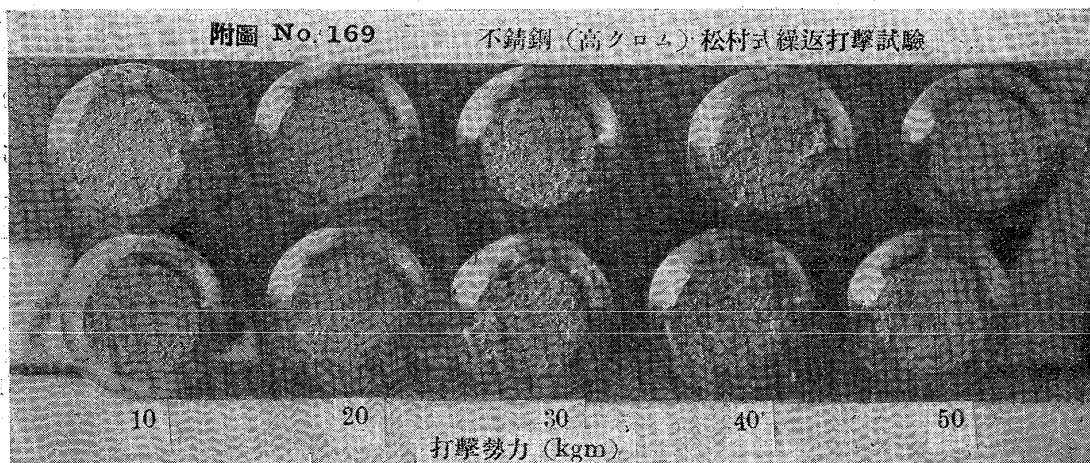
鋼 種	打撃 活量 kgcm	龜裂 發生 回數	破斷 回數	龜裂發生 と破斷回 數との%	ブリ ネル 硬度	衝 撃 値
高 Cr 鋼 (700°C 空冷)	10		463		平均 219	平均 0.668
	20	266	322	82.5		
	30	27	33	81.6		
	40	16	33	48.5		
高 Ni-Cr -W 鋼 (FWV)	50	11	24	48.0	平均 215	平均 10.39
	20	474(674)	1,837	25.8(36.7)		
	30	396	954	41.5		
	40	112	304	36.5		
	50	83	297	28.0		

耐鑄鋼の場合には荷重 30kgcm では極めて低く FWV では 40kgcm が變換點である。龜裂發生の回數は一定しないが荷重の小なる時には發生が遅延する。反之大荷重の時は發生が速かであ

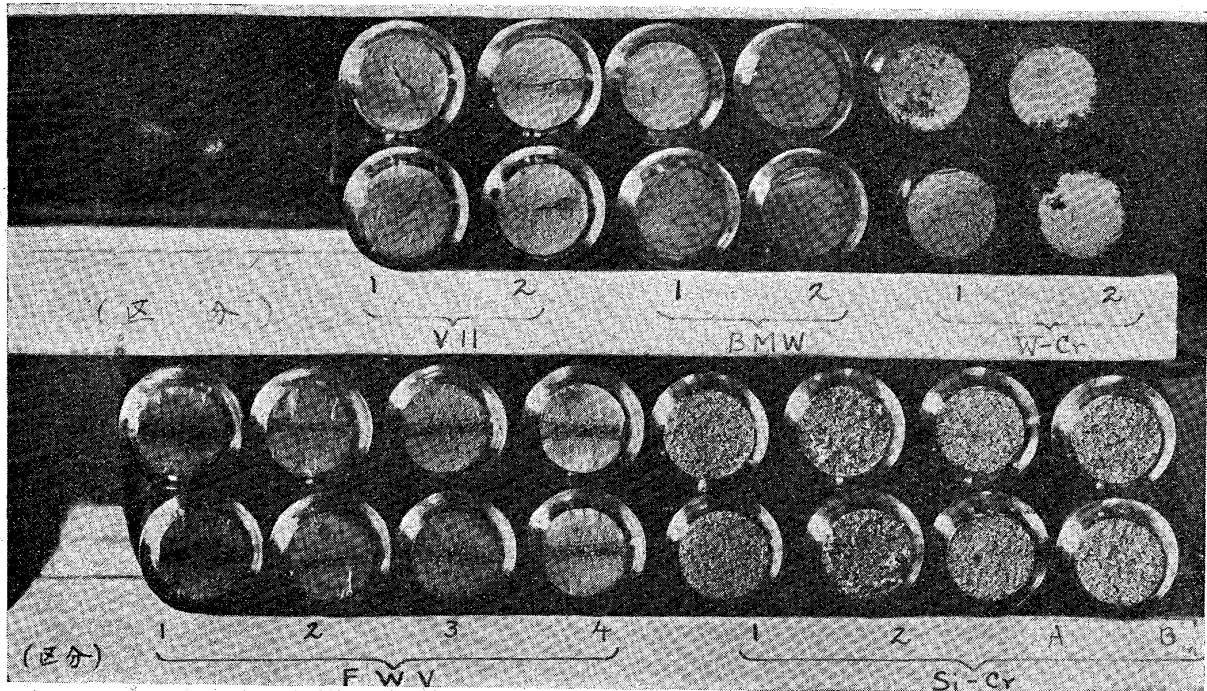


示してある。

この結果から高 Cr 鋼では龜裂發生後直に破斷し高 Ni-Cr-W (FWV) 鋼は比較的速に龜裂するも破斷迄に相當回數を要す。破斷面の景況は附圖 No.169 及 No.170 中に示す様に前者は各荷重共に粗粒破斷であつて中央帶部の存在を認めず後者は中心迄龜裂進行し最後の破斷部の中央帶部の荷重の大となる毎に幅の大となる状況を見る。即ち後者では 30~40%(全破斷回數の)で既に龜裂を生じ Grain の Slip 又は Shear で内部迄侵入せるは靱性の大なる材料の特徴である。



附圖 No. 170 兪用鋼の松村式繰返打撃試験

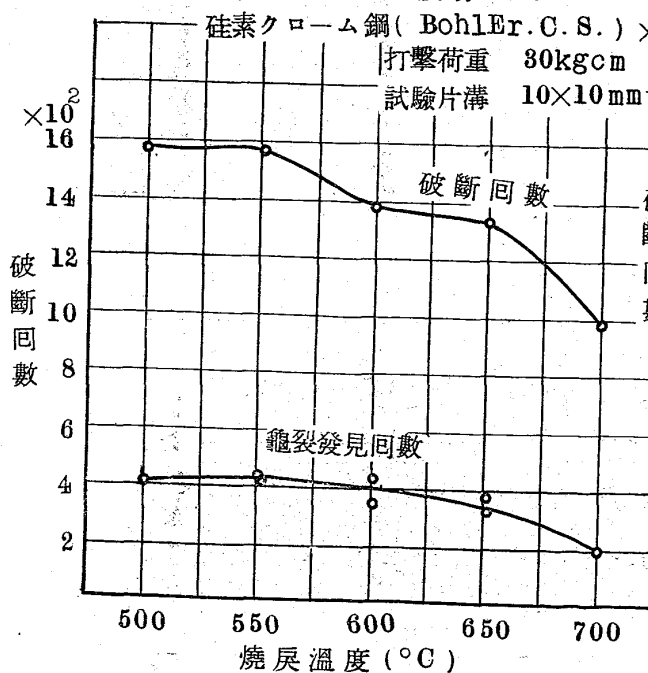


尙この兩者のブリネル硬度を比較するに何れも 210 附近であるが一方高 Cr 鋼の衝擊値は 0.668 kgm/cm^2 で他は 10.39 kgm/cm^2 であつて松村式回数は衝擊値の大なるものゝ方著しく大である事より見れば斯る疲勞破斷には衝擊値の大である事は必要の條件である事が看取される。

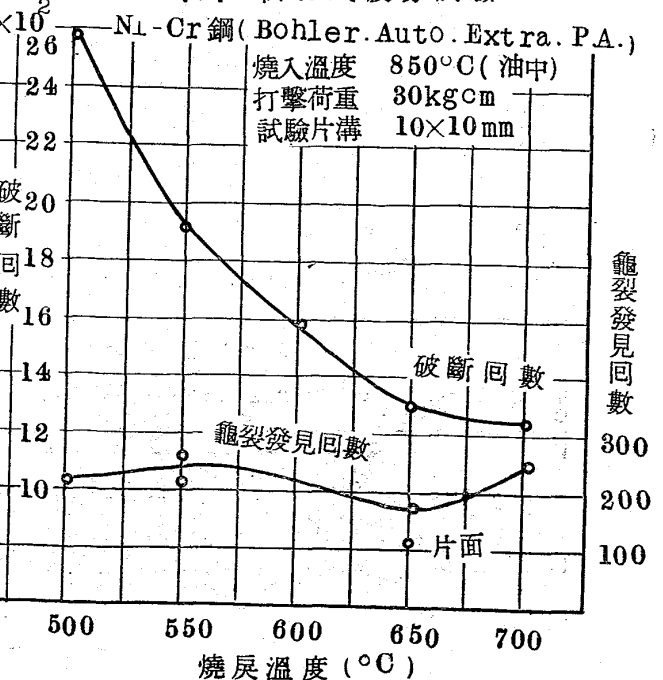
II. 焼戻温度の變化による破斷回数と龜裂發見の回数の關係

供試鋼は Bohler Anto Extra PA 鋼 (Ni-Cr 低炭素鋼) Bohler CS 鋼 (Si-Cr 鋼) Ni-Cr-Mo 鋼 (AW 20×527) の 3 種に就て實用焼戻溫度別に於ける破斷回数と龜裂發見回数との關係

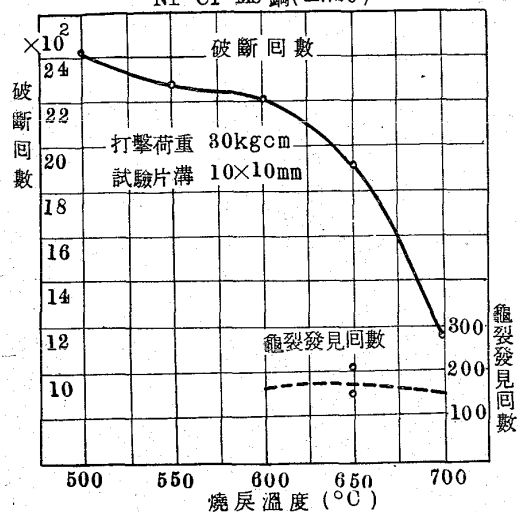
附圖 No. 172. 松村式疲勞試験



附圖 No. 171. 松村式疲勞試験



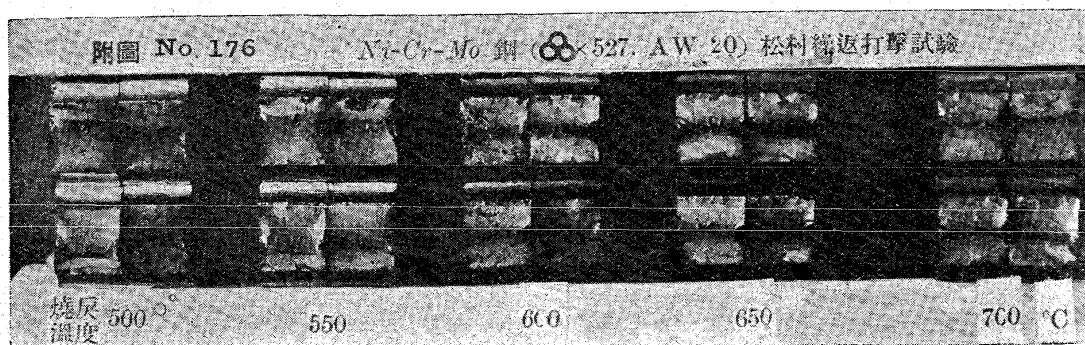
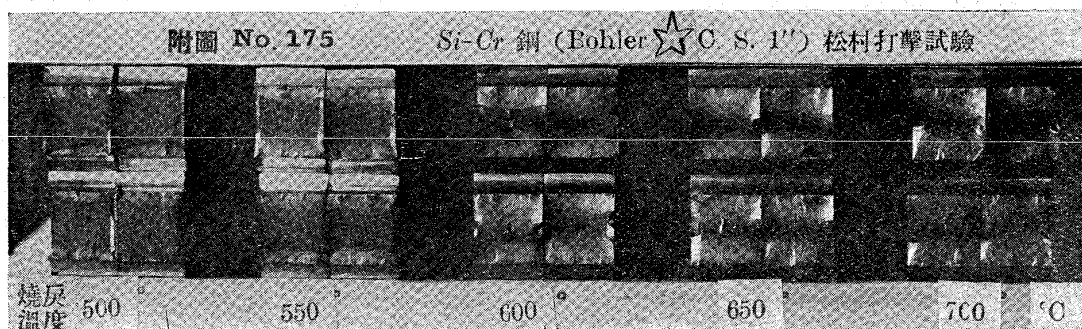
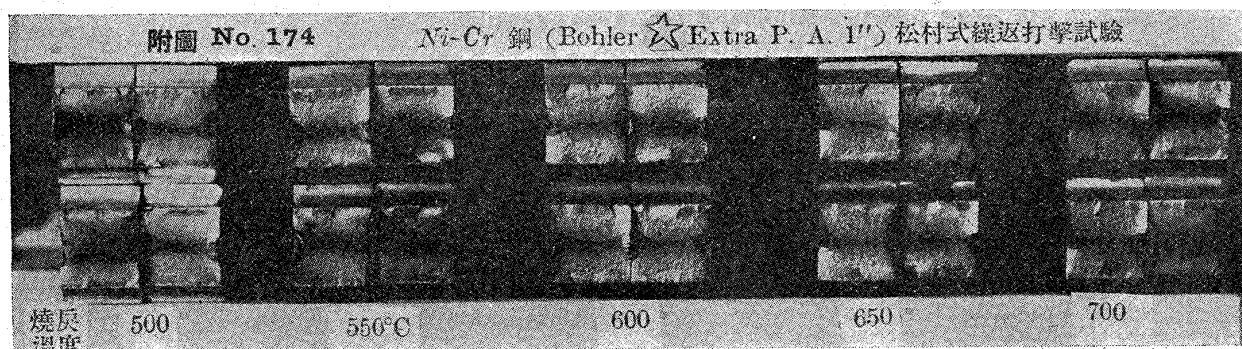
附圖 No. 173 松村式疲勞試驗
Ni-Cr-Mo 鋼 (AW20)



を試験した。但し 1 回の打撃活量は 30kgcm とした、この結果は。附圖 No.171 乃至 No.173 参照。破面の景況は附圖 No. 174 乃至 No.176 に示す。

この結果から次の様な事實を摘記することが出来る。

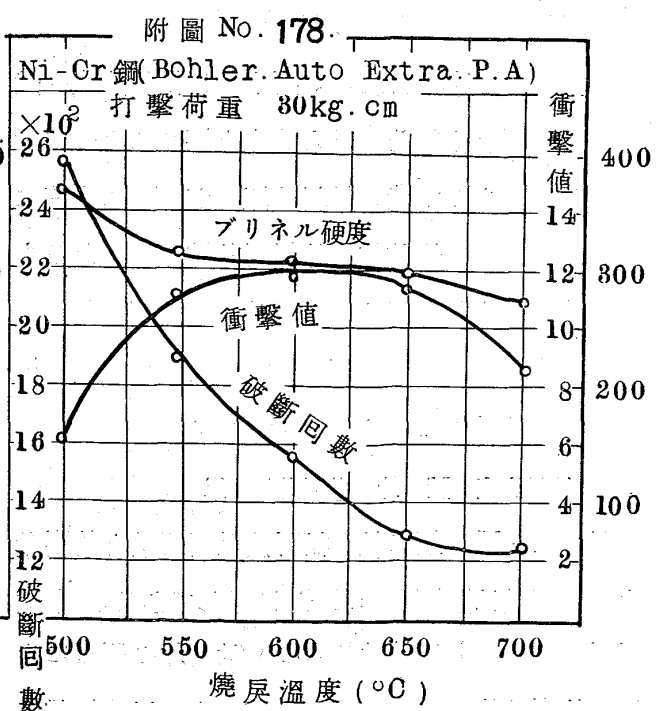
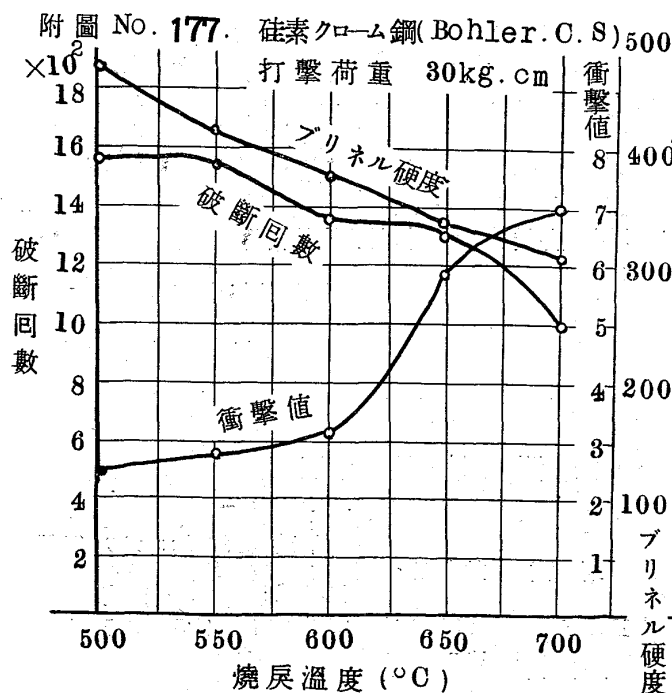
(1) 龜裂発見又は其の徴候とも認められる回数は全破断回数の 10% 附近であつて(荷重 30kgcm の時) 焼戻温度の變化と共に破断回数の著しく低下するにも拘はらず龜裂徴候の発見し得る回数には大差はない。



鋼 種	焼戻 温度 °C	龜裂微候 回数 N_1	龜裂發生 回数 N_2	肉眼にも 判明せる 回数 N_3	破斷 回数 N	% $N_1/N \times 100$ $N_2/N \times 100$	
						$N_1/N \times 100$	$N_2/N \times 100$
Ni-Cr 低炭 素鋼 (Bohln Anto Extra PA)	500°C	—	216	403	2581	—	8.37
	550	155	224	694	2569	8.22	8.71
			215	445	1886		11.40
			258	498	1941		13.30
			—	—	1576		—
	600	160	220	390	1561	—	14.1
	650	—	108	318	1196	10.22	7.03
			222	342	1402		15.80
	700	174	251	450	1255	14.8	20.0
			274	474	1238		22.1
Si-Cr 鋼 (C-S 鋼)	500°C	144	—	1229	1506	9.6	—
	550	154	207	1407	1641	9.6	12.6
			215	705	1613		13.3
			202	592	1520		13.3
			212	472	1420		14.9
	600	150	172	662	1318	10.3	13.1
	650	—	184	565	1311		14.0
			162	462	1347		12.1
	700	—	100	326	1000		10.0
			94	404	988		9.4
Ni-Cr-Mo 鋼 (AW 20)	500°C	—	—	(1764)	2347	—	—
	550	—	—	—	2510	—	—
			—	—	2217		—
			—	—	2355		—
			—	—	2184		11.81
	600	16.7	267	—	2257	7.4	—
	650	—	269	539	1977	8.2	10.6
			150	432	1856		8.1
	700	100	200	333	1197	13.4	16.7
			151	200	1132		17.7

(2) Bohler Anto Extra PA 鋼の様な靱性 低い脆い材料とを比較するに龜裂發見回数には大
の大きな鋼と Bohler CS 鋼の様な相當衝擊値の 差なきも破斷回数に於て差が大きい。この原因は

焼戻温度による松村式破斷回数と衝擊値及硬度との關係



龜裂が内部に侵入する速度と深さに關係を有する爲めて靱性の多い前者は耐久力は大である。兩者を比較すれば次の通りとす。之等鋼の焼戻温度別による衝撃値と松村式破斷回數との關係は附圖 No.177 及 No.178 に示す。

鋼 種	焼戻温度	衝撃値 kgm/cm ²	ブリネル硬度	松村式 破斷回數
Bohler Anto Extra PA (NiCr 鋼)	500°C	6.28	370	2575
	550	11.06	313	1914
	600	11.99	306	1569
	650	11.46	298	1299
	700	8.60	275	1247
Bohler Si-Cr 鋼 (CS 鋼)	500°C	2.56	470	1574
	550	2.83	418	1567
	600	3.19	381	1369
	650	5.93	337	1329
	700	6.96	311	994

即ち硬度同じく衝撃値の異なる場合 (PA 鋼の 550°C 焼戻では衝撃値 11.06 CS 鋼の 700°C 焼戻の場合は衝撃値 6.96) を比較するに松村式回數は著しく PA 鋼大で 1914 に對し CS 鋼は 994 である。

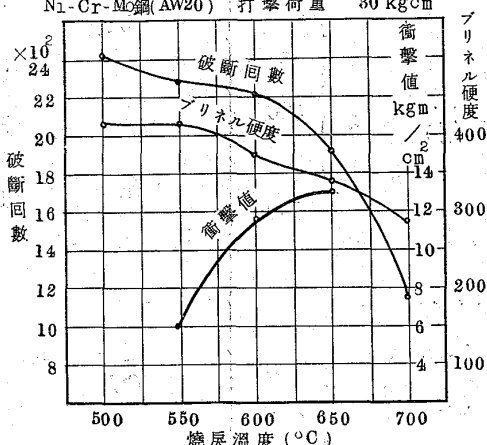
(3) 一般に松村式回數は硬度にのみ支配されず衝撃値の大なるものは打撃による震動を吸収し耐久疲労の點では破斷迄の生命は長い。但し局部の耐久限界即ち分離破斷の惹起する迄の耐久性には餘り差のない事が知れる。要するに松村式疲労試験では龜裂發生後その進入速度と深さによつて耐久性が定るもので脆い材料は深さが大ならず速に破斷する。反之衝撃値、伸斷面收縮率の大なるものは荷重の小なる間は一時に破斷には到らない。この意味にて低炭素 Ni-Cr-W 鋼 (タハード鋼の如き) は秀れてゐる。

III. 松村式疲労試験片の龜裂進行状況

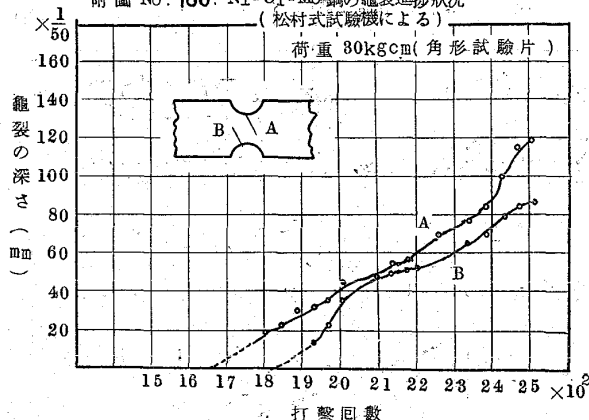
Ni-Cr-Mo 鋼に就き松村式破斷回數と龜裂發生迄の回數は附圖 No.179 に示してある。今焼戻温度 500°C に於けるものゝ試験片の側面に生じた龜裂は約 1,700 回附近で認めた。以後打撃の

進行と共に龜裂の進行状況を顯微鏡で 50 倍に擴大して A. B 兩龜裂を曲線に取つて見る時は附圖 No.180 に示す。側面龜裂の進行は溝底面に或る角度をなし概ね 70°~80° 範圍である。脆い状態のものは角度は直角近くなる傾向に在る。且つ進行速度は速かでなく其進入の深さは小である。

附圖 No. 179.
焼戻温度による松村式破斷回數と衝撃値及硬度との關係
Ni-Cr-Mo 鋼 (AW20) 打撃荷重 30 kgcm



附圖 No. 180. Ni-Cr-Mo 鋼の龜裂進行状況
(松村式試験機による)



IV. 各種耐熱鋼の松村式疲労試験

次に示す様な各種發動機排氣弁用鋼として從來使用せられた材料に就き同様松村式疲労試験を行つた結果次の成績を得た。打撃荷重は 30kgcm とした。附圖 No.170 参照。

鋼 種	熱處理	龜裂 發見 回數 N ₁	破斷 回數 N	N ₁ /N × 100	ブリネル 硬度	衝撃値 kgcm/ cm ²
FWV	930°C(油)	396	954	41.5	215	10.39
Si-Cr 鋼	燒入					
	110°C(空)	472	515	92.0		
	850°C(空)	183	515	35.5	253	7.07

"	{	"	236	427	55.2		
			900°C(空)	209	334		
高 C-Cr 鋼	800°C(空)		38		296	0.89	
VII	1,100°C(空)	{	107	293	36.1	249	2.13
			261	464	56.5		
W-Cr 鋼	{	焼入				249	2.13
		950°C	59	173	34.1		
		660°C(空)	99	169	58.5	488	1.55
Co-Cr 鋼	{	焼入				323	1.90
		900°C					
		750°C(空)	297				
"	"	780°C(空)	266		252	1.84	

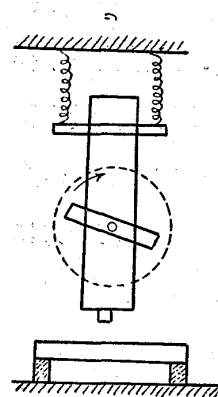
之結果を見れば松村式回数は單にブリネル硬度に比例せず明に衝撃値にも關係を有することが分る。FWV の如き硬度低く共衝撃値高きものは破斷迄の回数大で高炭素クロム鋼の様な脆いものは破斷回数極めて低い。尙硬度の著しく高い W-Cr 鋼の如きは龜裂の發生も速かで破斷回数も低い事は衝撃値の低いことに基因するものと考へられる。(但し本試験の打撃回数は 30kgcm であつてこれより小さな荷重では趣を異にするやも知れず、但し例外あるも大體松村式破斷回数はブリネル硬度と破斷回数の % 30% 附近より現出するものもあるが脆いものは夫以後進入する深さ少く、全々中央帶部の無くなるが幅は著しく廣くなる。

其 2. Amsler Universal Hammer

Machine による疲勞試験

本試験機は Amsler 會社製 Universal Hammer Machine と稱し右上圖に示す様な構造で其の機能及び負荷要領は次に示す様に 3 種に區分され繰返し屈撓、繰返し抗張及び繰返し抗壓の耐久力を求めるもので附圖の試験片は繰返し屈撓の場合である。この場合では衝撃屈撓で横に回轉中の試験片 (1 分間 6 回轉) を槌を以て其の中央を 1 分間約 600 回打撃し破斷に至る迄の回数を測定するのである。

I. 機能計算



槌の靜力量と動力量の關係。

$$(1) G = mg \cdots \text{槌の重量下}$$

方に働く

R (發條の力) は最高壓縮

位置の最大值

R_0 から直線的に低下し

R_m に達す

$$(2) R = R_0 - \frac{R_0 - R_m}{r} y \quad R = R_0 - Ky$$

K: 發條の彈性係數

y: 槌の最高位置からの衝程

r: 曲軸肱により描かれる圓半徑

N: 曲軸肱轉子の垂直壓力、之は槌の横軸承に受ける力で下方に働く D'Alemberts の原理で各瞬間の靜力量と慣性力 T とは平衡する

$$(3) T = -m \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$(4) G + R - N + T = 0$$

$$(5) y = r(1 - \cos wt) \quad \text{但し } w = \text{曲軸肱の角速度}$$

$$\frac{dy}{dt} = rw \sin wt$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = rw^2 \cos wt$$

$$(6) N = mg + R_0 - Kr(1 - \cos wt) - mrw^2 \cos wt$$

$$= mg + (R_0 - Kr) - (mrw^2 - Kr) \cos wt$$

槌が一定の運轉を續ける場合には $N > 0$ なるを要す。

$$\text{若し } \cos wt = 1 \quad wt = 0$$

$$(7) mg + (R_0 - Kr) - (mrw^2 - Kr) > 0$$

$$w^2 < \frac{mg + R_0}{mr}$$

本式は槌の重量、發條の初張力、曲軸腕の半径及回轉數の關係を示し、この條件は回轉數最大即ち r の最大の時に満足するとせば w 及 r の之以下の時にも成立する、此式から發條の初張力には關係あるも彈性係數には關係ない。

槌は試験片に與へる勢力、

槌の有効勢力即ち曲軸腕により描かれる圓の水平直徑を通過する際には次の通り、

$$(8) \quad A(\text{勢力}) = \int_{y=0}^{y=r} (G + R - N) dy$$

$$G + R - N = -T = -\left(-m \frac{d^2 y}{dt^2}\right)$$

$$A = \int_{y=0}^{y=r} m \frac{d^2 y}{dt^2} dy = \int_{y=0}^{y=r} m \frac{d^2 y}{dt^2} \cdot \frac{dy}{dt} dt$$

$$= \int_{y=0}^{y=r} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right) dt$$

$$= \left[\frac{1}{2} m \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]_{y=0}^{y=r}$$

$y=0$ (槌の最高位置)の點では $\frac{dy}{dt} = 0$ (垂直

速度)

$y=r$ に於ける槌の垂直速度は曲軸腕の圓周

速度に等しく $\frac{dy}{dt} = u$

從つて運動勢力の定理に従へば

$$m = \frac{G}{g} \quad u = wr = \frac{\pi n r}{30}$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 r^2 = \frac{5.5893}{10^6} \cdot G \cdot n^2 \cdot r^2 \text{ kgcm/stroke}$$

本試験機では槌の重量 $G = 3.43 \text{ kg}$ 回轉數

$$n = 300 \text{ r.p.m.}$$

曲軸腕半径 $r = 2 \text{ cm}$ 有効勢力 $A = 7 \text{ kgcm}$

$$= 3 \quad \quad \quad \approx 16 \text{ ''}$$

$$= 4 \quad \quad \quad \approx 28 \text{ ''}$$

$$= 5 \quad \quad \quad \approx 44 \text{ ''}$$

$$(\text{計算の 1 例}) \quad A = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 r^2$$

$$r=2 \text{ の時は } A = \frac{1}{2} \cdot \frac{3.43}{980} \cdot \frac{3.14 \times 300}{30} \cdot 2^2$$

$$\approx 7.0 \text{ kgcm}$$

II. 試 験 結 果

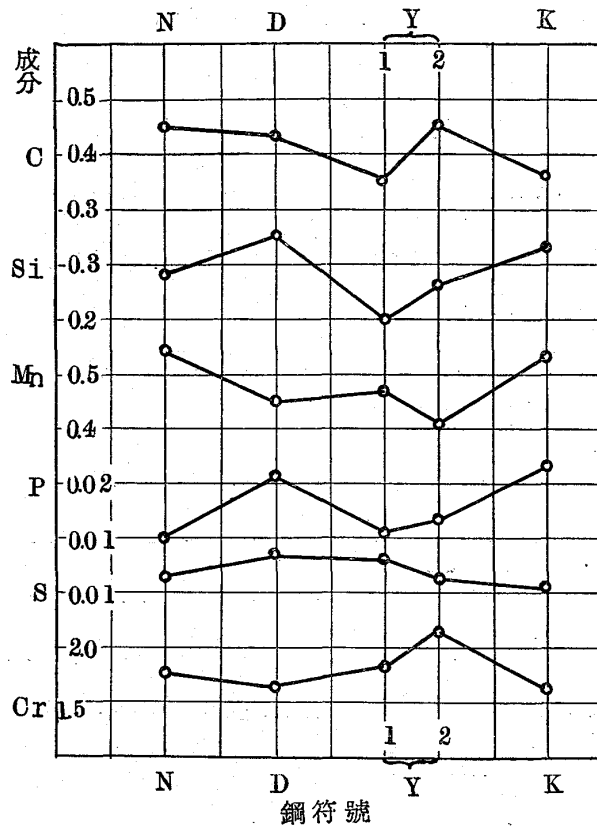
試験に供した鋼は次の 3 種の特殊鋼で特に Cr 鋼は電氣爐製として指定されたもので N.D.Y.K は製鋼所別のものである。

(a) 分 析 成 績

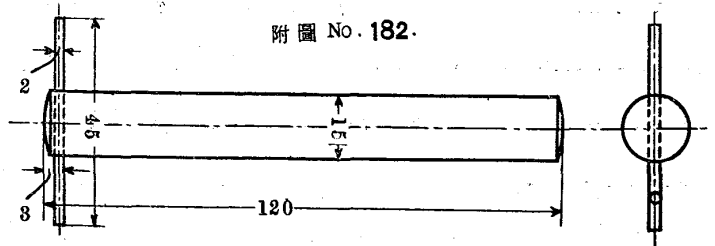
Cr 鋼の分析結果を區分別に對照すれば附圖 No.181 に示す。之による時は Y_1, K とは C 量低く、 Y_1, Y_2 共に Cr 鋼稍大である。何れも製

鋼 種	區 分	分 析 成 分						其 他
		C	Si	Mn	P	S	Cr	
Cr 鋼	N	0.45	0.28	0.54	0.010	0.013	1.76	
	D	0.43	0.35	0.45	0.016	0.017	1.63	
"	Y_1	0.35	0.20	0.37	0.011	0.016	1.85	
	Y_2	0.45	0.26	0.41	0.013	0.012	2.19	
	K	0.36	0.33	0.53	0.023	0.011	1.66	
規 格		0.40~0.50	0.20~0.50	0.30~0.80	0.03以下	0.03以下	1.50~2.20	
Ni-Cr 鋼	100NC	0.29	0.18	0.38	0.018	0.011	1.29	$\begin{cases} Ni & 3.22 \\ Mo & 0.42 \\ W & 0.37 \end{cases}$
Ni-Cr-Mo 鋼	CN12	0.28	0.21	0.18	0.014	0.021	3.13	$\begin{cases} Ni & 2.83 \\ Mo & 0.42 \end{cases}$

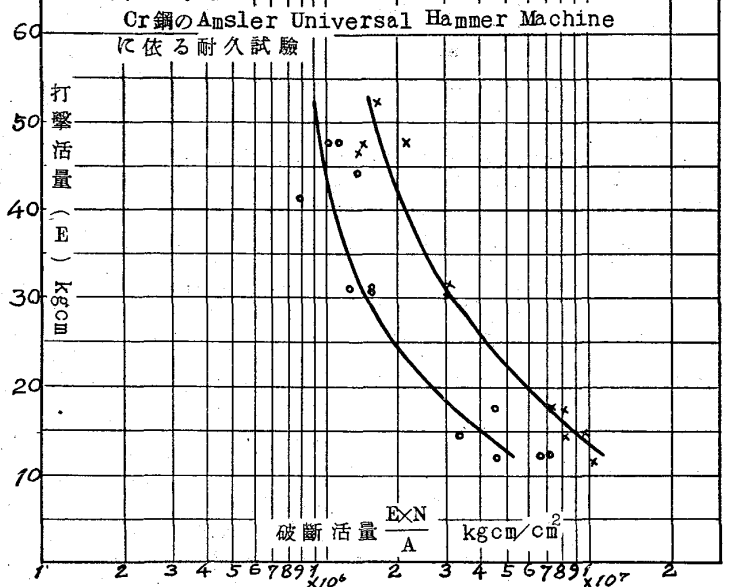
附圖 No. 181.



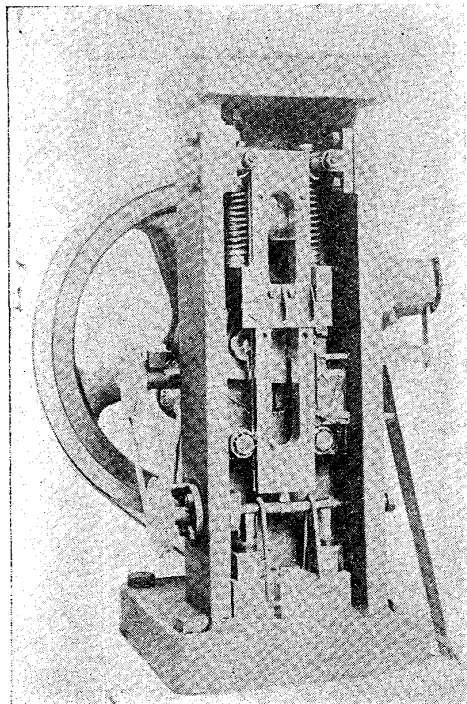
附圖 No. 182.



附圖 No. 183.



附圖 No. 183



鋼法に於て
最慎重なる
注意を拂つ
たものであ
つて成分に
於ても大差
はない。

Ni-Cr

鋼は成分で
示す様に所
謂 100kg

Ni-Cr 鋼
である、又

Ni-Cr-Mo 鋼は佛國 Jacob Holzer 會社製 CN
12 鋼であつて何れも坩堝鋼である。

(b) *Cr* 鋼の打撃力の變化による耐久力の影響
今上記 D 鋼に就き次に示す A. B 熱處理を施
した試験片(附圖 No.182) に種々の打撃荷重(ロ
ーラーの *r* を變更)を加ふる事によつて破斷に至
る迄の回數を測定した。

A、燒入溫度 850°C 燒戻溫度 700°C(油中)

B、 " " " 600°C(油中)

但打撃活量は I 項に示す通り次の式から計算した

$$E = \frac{5.5893}{10^6} \cdot G \cdot n^2 \cdot r^2 \text{ kgcm/stroke}$$

區分	燒戻 溫度	ローラー 半徑 (cm)	1 分間 の回轉 數	打撃活 量 E kgcm	破斷 回數 N × 10 ⁵	$\frac{E \times N}{A} \times 10^6$	ロック ウェル C 硬度
D (1)	700°C	5	{315 303}	{47.60 44.00}	{0.4481 0.5694}	{1.209 1.419}	{27.7 26.2}
" (4)	"	5	{315 293}	{47.30 41.30}	{0.4096 0.3802}	{1.104 0.890}	{23.4 22.4}
" (1)	"	4	{317 315}	{30.94 30.53}	{0.9199 0.9320}	{1.611 1.612}	{24.7 25.2}
" (4)	"	4	319	31.32	0.7467	1.315	23.2
" (1)	"	3	315	17.14	4.0256	3.910	25.9
" (4)	"	3	320	17.65	4.6450	4.641	23.4
" (1)	"	2.5	314	11.79	6.9073	4.610	
" (4)	"	2.5	"	"	10.5154	7.025	22.6
" (4)	"	2.5	"	"	7.0705	6.678	

打撃活量 E と $(E \times N)/A$ (A は断面積) との関係を示せば附圖 No.183 の如くなる。この範圍の E と $(E \times N)/A$ との関係は大體次の實驗式で示される。

$$E \times \log\left(\frac{E \times N}{A}\right) = 50 \times 10^6$$

尙 600°C 焼戻の場合は次の表に示す通りである。

区分	焼戻温度	ロ 1 半分間の打撃活量 E (cm) 1 回の打撃回数	1 回の打撃活量 E kgcm	破断回数 N × 10 ⁵	$\frac{E \times N}{A} \times 10^3$	ロックウェル C 硬度	
D (1)	600°C	5	315	47.6	0.5554	1.499	31.2
"	"	"	314	47.4	0.7901	2.121	
" (4)	"	"	312	46.8	0.5552	1.471	28.3
"	"	"	330	52.3	0.5701	1.687	
" (1)	"	4	315	30.5	1.7727	3.005	
" (4)	"	"	318	31.1	1.7068	3.005	31.9
" (1)	"	3	318	17.4	7.3027	7.240	31.8
" (4)	"	"	318	17.4	8.2999	8.195	30.8
" (1)	"	2.8	313	14.7	9.7900	8.250	32.9
" (4)	"	"	314	14.9	11.7865	9.910	36.0
" (1)	"	2.5	317	11.7	17.8879	破断せず	
" (4)	"	"	312	11.8	16.1275	10.775	31.0

この結果を曲線に示す時は附圖 No. 183 の様であつて關係式は次に示す事が出来る。

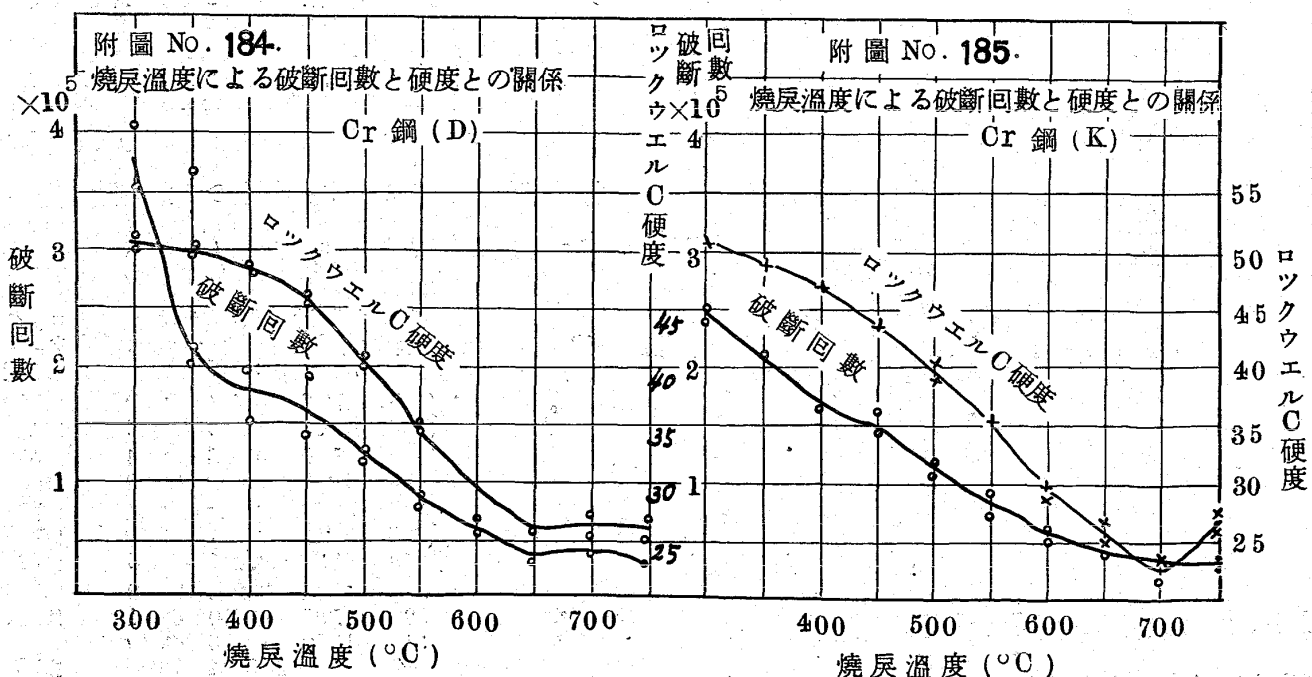
$$E \times \log\left(\frac{E \times N}{A}\right) = 100 \times 10^6$$

以上の結果から 700°C 焼戻の場合の耐久限界は $r=2.5\text{cm}$ 以下の打撃活量にあるも 600°C 焼戻の場合には 1 個の試験片は $r=2.5\text{cm}$ に於て 1.6×10^6 にて折斷したが他の 1 個は 1.79×10^6 回でも折斷しないことから見れば此場合の耐久限界は 2.5cm より僅に小さい荷重にあるものと考へられる。尙焼戻温度 600°C は 700°C のものに對して著しく耐久力大である事は抗張力硬度の量に耐久力は比例してゐる事を知る。

(c) 焼戻温度による Cr 鋼の耐久力比較

前記 D 鋼及 K 鋼の 2 種に就き焼入後焼戻温度 300°C 乃至 750°C 迄變化して破断迄の回数を測定した。但しローラーの $r=5\text{cm}$ とした。其結果は次の通りであつて附圖 No.184 及 No.185 にはこの關係を示す。

この兩種鋼共に耐久力は焼戻温度と共に低下しロックウェル硬度に反比例し即ち焼戻温度 650° 以上で使用する事は加工は容易であるが耐久性は最劣る事を知る。



鋼 區 分	燒 戻 温 度	1回 分 間 の 數	打撃活量 E kgcm	破斷 回数 N(×10 ⁵)	$\frac{E \times N}{A} \times 10^6$	ロッキ ン グ ウェ ル C 硬 度	備 考
D	300	{319 "	48.8 "	3.4997 4.0332	9.184 10.600	50.8 49.9	
"	350	{320 "	49.1 "	1.9715 2.1308	5.483 6.014	49.3 49.8	
"	400	{317 "	48.3 "	1.9162 1.4665	5.383 4.143	47.8 48.2	
"	450	{320 318	49.1 48.5	1.3546 1.8989	3.903 5.400	45.3 45.8	
"	500	{320 "	49.1 "	1.2234 1.1586	3.402 3.335	40.1 39.5	
"	550	{315 318	47.6 48.6	0.7870 0.8498	2.141 2.308	34.1 34.3	
"	600	{315 "	47.6 "	0.6728 0.5627	1.810 1.579	31.2 28.3	
"	650	{319 "	48.8 "	0.3528 0.3394	0.9754 0.9441	25.6 25.6	
"	700	{309 "	45.8 44.4	0.5088 0.3949	1.3140 0.9970	27.0 22.9	
"	750	{319 "	48.8 "	0.2776 0.2986	0.7775 0.8308	24.7 26.7	
K	300	{319 320	48.8 49.1	2.3613 2.4974	6.5900 6.9230	50.3 50.3	
"	350	{319 319	48.8 "	— 2.0820	— 5.7540	— 48.5	
"	400	{319 "	" "	1.6165 1.6036	4.4700 4.4510	46.6 46.9	
"	450	{319 "	" "	1.6189 1.4238	4.4475 3.9616	43.7 43.2	
"	500	{319 "	" "	1.0983 1.1985	3.0559 3.3347	38.9 40.2	

鋼 區 分	燒 戻 温 度	1回 分 間 の 數	打撃活量 E kgcm	破斷 回数 N(×10 ⁵)	$\frac{E \times N}{A} \times 10^6$	ロッキ ン グ ウェ ル C 硬 度	備 考
K	550	{318 "	48.5 "	0.8931 0.7412	2.4694 2.05629	35.2 35.3	
"	600	{319 "	48.8 "	0.4965 0.6011	1.38147 1.67251	28.5 29.8	
"	650	{319 "	" "	0.4220 0.4408	1.1742 1.22597	24.4 26.8	
"	700	{319 "	" "	0.3281 0.3488	0.91905 0.91351	26.4 24.2	
"	750	{220 319	49.1 48.8	0.3271 0.3457	0.92199 0.95548	22.6 27.3	
		"	"	0.3450	0.95993	25.8	

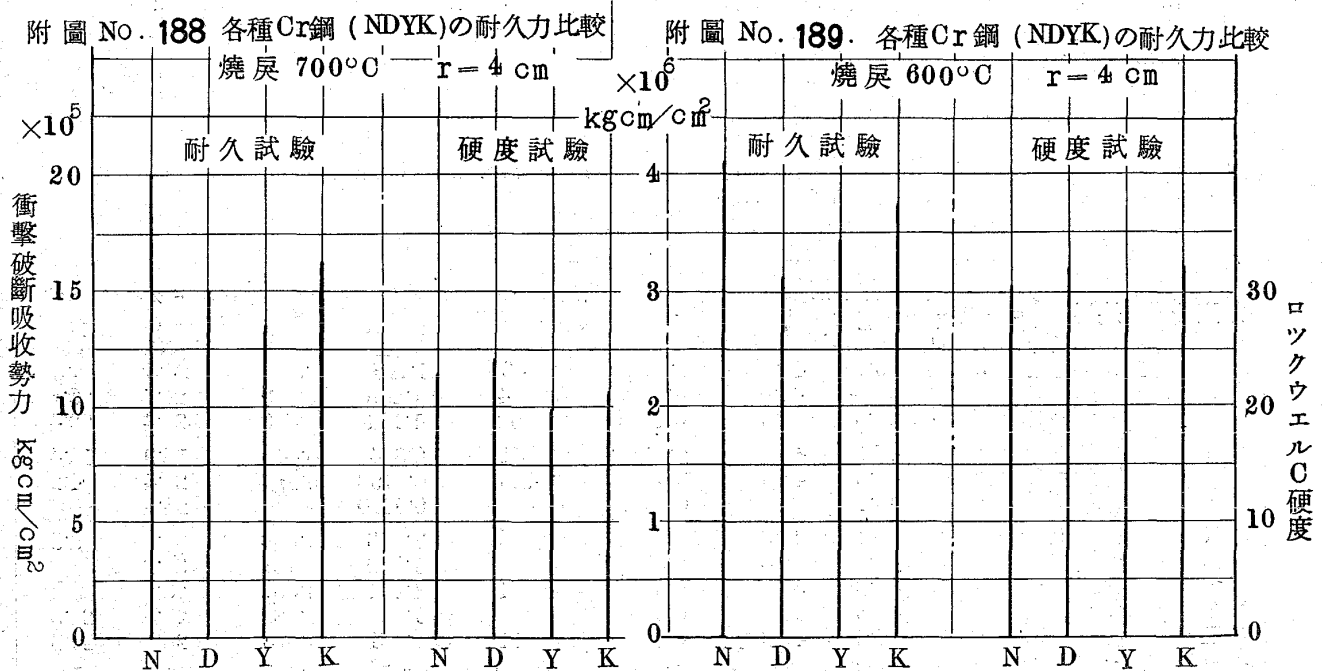
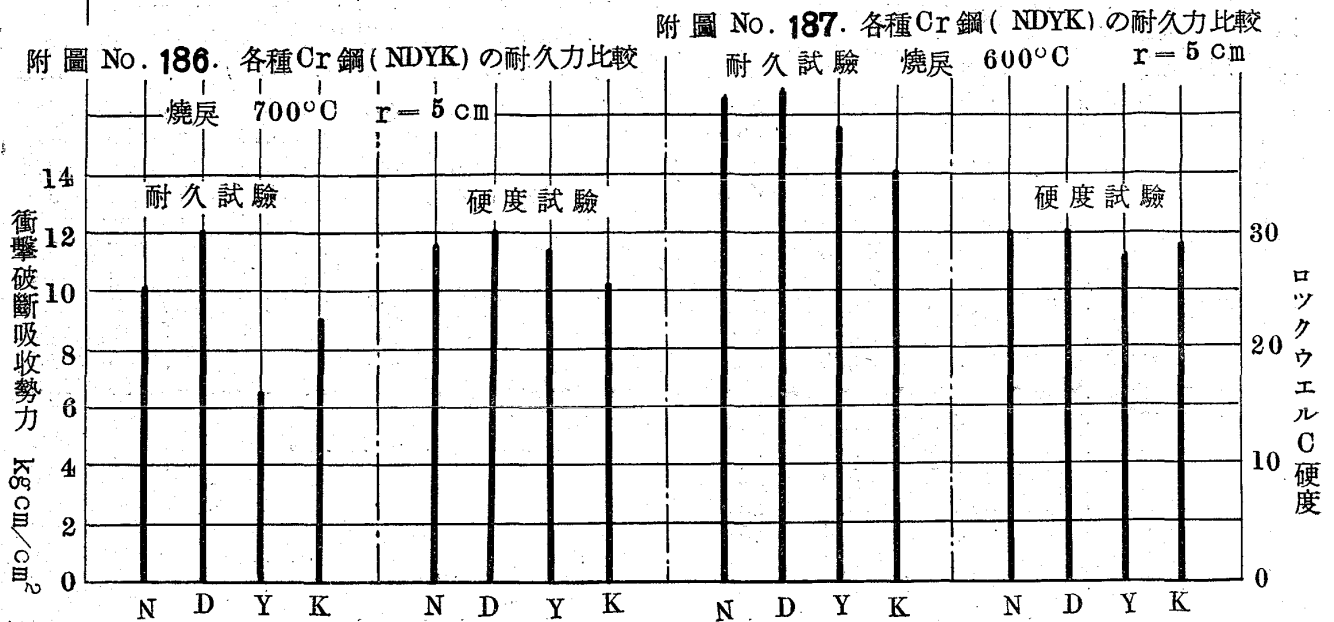
(d) 各種 Cr 鋼の打撃耐久性の比較(N.D.Y.K
の比較)

前記 N.D.Y.K の Cr 鋼を Hammer Mach-
ine により打撃耐久性を比較して見た。此場合熱
處理は次の通りに一定した。

燒 入 825 C (油中冷却)
{ 燒 戻 600°C (油中冷却)
" 700°C (")

而して打撃活量に關係ある r を 5, 4, 3 の 3 種
に區分した。

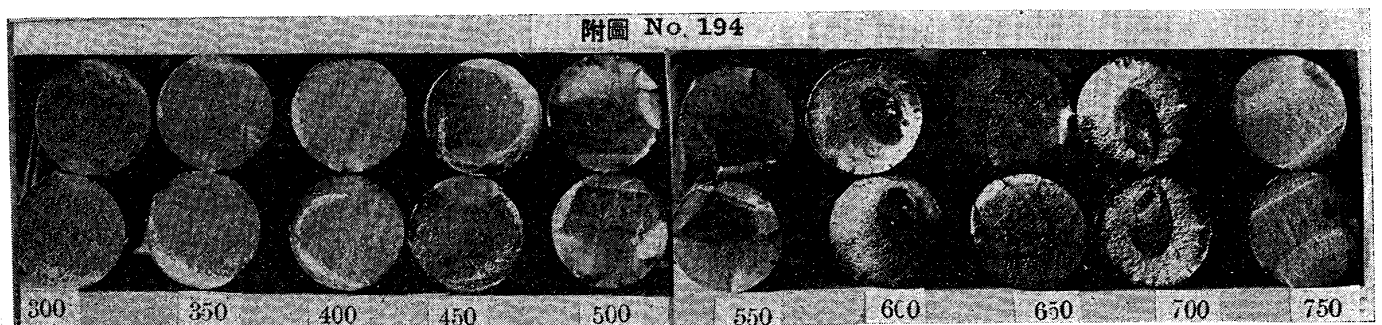
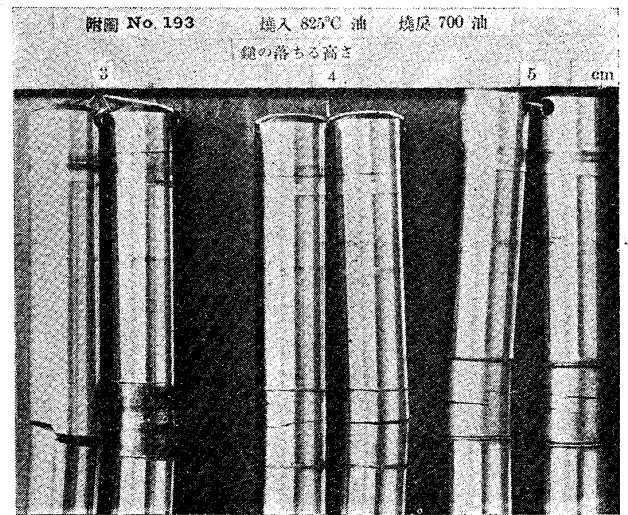
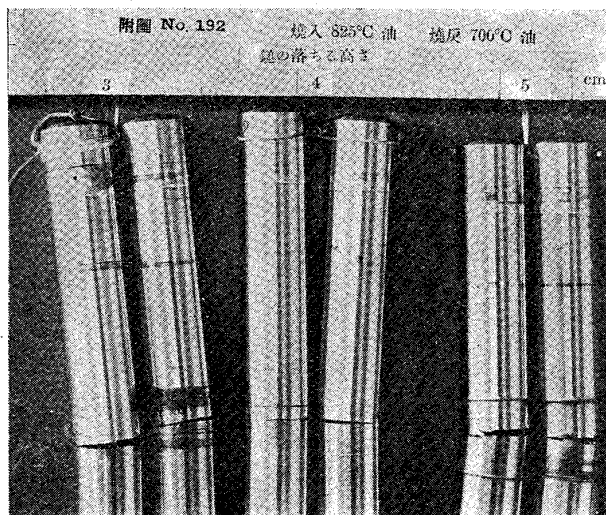
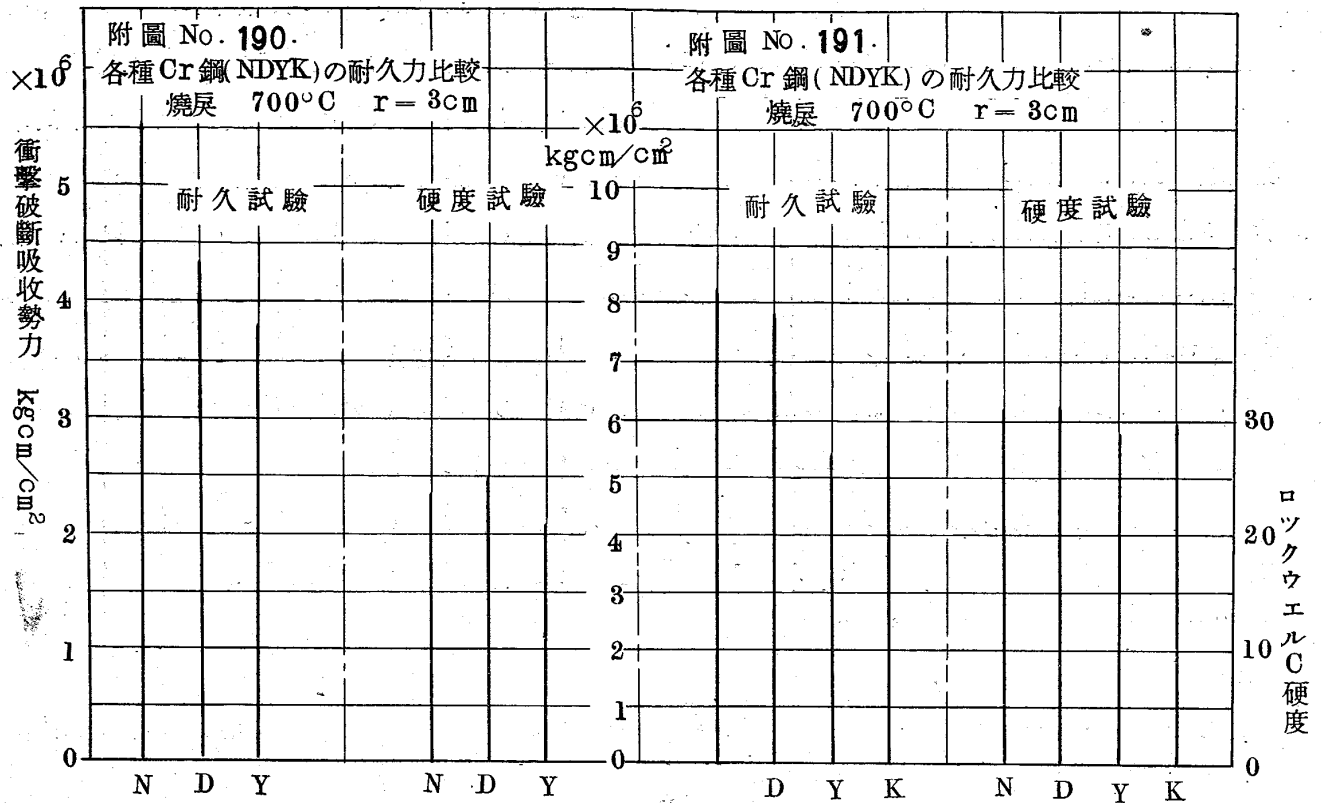
鋼區分	焼 戻 温 度	ローラー 半徑 (cm)	打撃活量 E kgcm		破断回数 N $\times 10^5$		$\frac{E \times N}{A} \times 10^6$		ロックウェル C 硬 度	
N	700°C	5	49.1	49.1	0.4015	0.3643	1.117	1.010	24.5	23.6
D	"	"	47.6	44.0	0.4481	0.5694	1.209	1.419	27.7	26.2
"	"	"	47.3	41.3	0.4096	0.3802	1.104	0.890	23.4	22.4
Y	"	"	47.1	48.8	0.2470	0.2351	0.684	0.649	18.9	18.4
K	"	"	48.8	48.8	0.3281	0.3488	0.9190	0.9135	21.4	24.2
"	"	"	49.1		0.3271		0.9220		22.6	
N	600°C	5	46.1	47.6	0.6294	0.6103	1.643	1.652	31.0	28.8
D	"	"	47.6	47.4	0.5554	0.7901	1.499	2.121	31.2	
"	"	"	46.8	52.3	0.5552	0.5701	1.471	1.687	28.3	
Y	"	"	48.8	48.8	0.5877	0.5520	1.622	1.528	29.6	27.3
K	"	"	48.8	48.8	0.4965	0.6011	1.381	1.673	28.5	29.8
N	700°C	4	30.4	31.0	1.1320	1.1482	1.950	2.005	24.7	25.2
D	"	"	30.9	30.5	0.9199	0.9320	1.611	1.612		
Y	"	"	31.3	31.1	0.7660	0.7599				
K	"	"	31.5		1.004		1.7986		21.3	
N	600°C	4	31.0	32.4	2.1651	2.4003	3.790	4.380	31.3	29.3
D	"	"	30.5	31.1	1.7727	1.7068	3.015	3.005		21.9
Y	"	"	31.3	31.3	2.0955	1.7797	3.700	3.142	28.3	29.4
K	"	"	31.3		2.1026		3.744		32.0	
N	700°C	3	17.4	17.6	6.1763	5.1757	5.930	5.170	22.1	23.8
D	"	"	17.14	17.65	4.0256	4.6450	3.910	4.641	25.9	23.4
Y	"	"	17.45	17.45	3.9665	3.6073	3.920	3.560	20.5	20.7
N	600°C	3	17.6		8.1607		8.119		30.7	
D	"	"	17.4	17.4	7.3027	8.2999	7.240	8.195	31.8	30.0
Y	"	"	17.6	17.6	4.0422	4.6088	4.010	4.575	27.6	29.3
K	"	"	17.6		6.5567		6.5676		29.0	



この成績の比較を明にする爲附圖 No. 186 乃至 No. 191 に破断迄の活量 $(E \times N)/A$ と使用した試験片のロックウェルC硬度を対照した結果を示した。この結果を通覧して N 鋼は耐久性大で Y 鋼は比較的劣つてゐる。之等何れも同一成分であつて斯る差を生じてゐる原因は不明であるが成分の上から云へば、Y 鋼のみは比較的 C 量低く Cr

量多く、鋼滓及燐の僅に多い事等に基因するのではあるまいか。

破断の景況:— 燒戻温度によつて破断の景況を異にしてゐるが、700°C 燒戻の場合には破断の際に離れる事少く、之以下の場合には離れる事が多い。龜裂は概ね中央槌打部に起り其中心に生ずる事が多いが、槌の幅の兩端には加工の爲に出来る



凸部を起點として龜裂を惹起することもある。之等の景況は附圖 No.192 (N) 及 No.193(Y)に示してある。

焼戻温度別に破断面の景況は附圖 No.194(D)に示してある。本鋼は焼戻 550°C 乃至 700°C 迄は破斷の爲に離れず強いて引離した断面を示してある。破斷機構に就いては後述する。

(e) *Ni-Cr* 鋼(100kg *Ni-Cr* 鋼)の焼戻温度による影響。

本鋼の成分は次に示す通りである。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Mo
0.29	0.18	0.33	0.018	0.011	3.22	1.29	0.37	0.42

熱処理は次の通りである。但しローラーの r は 5cm とした。

焼入 830°C 焼戻 300°C 乃至 750°C

この関係を曲線に示す時は附圖 No. 195 に示す通り破斷回数は大體硬度に比例し衝撃値に反比例してゐる。但し 750°C 焼戻では硬度も衝撃値も共に低く且耐久性も少く脆性大である。

尙参考の爲焼戻 750°C (2) の試験片では破斷回数より約 5,000回以前に表面に龜裂を生じた事を知る。即ち龜裂發生後は斯の如き脆性状態では速に破斷するものと思はれる。

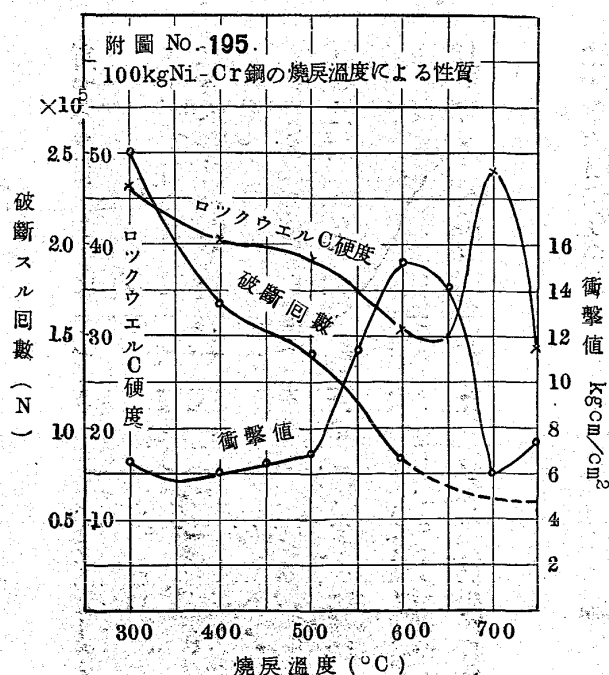
(f) *Ni-Cr-Mo* 鋼

本鋼の成分は次の通りである。(佛國 Jacob Halzer 會社製)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.28	0.21	0.12	0.014	0.021	2.83	3.13	0.42

試験片は焼入(温度 850°C 空中)の後焼戻 750°C 迄とした。

焼戻温度	1 分間の 回 轉 數		破斷回数 $N(\times 10^5)$		同 平 均	$\frac{E \times N}{A} (\times 10^6)$		同 平 均	ロック ウェル C 硬度
300°C	319	319	2.2047	2.7927	2.4987	6.2340	7.9010	7.0675	46.0
400°C	319	319	1.4571	1.8562	1.6567	4.1220	5.2500	4.6870	40.2
500°C	317	319	1.8582	0.9402	1.3992	5.1900	2.6600	3.9250	38.2
600°C	319	319	0.8698	0.7871	0.8235	2.4600	2.2240	2.3420	30.8
750°C	319	320	0.5337	0.6853	0.6090	1.5100	1.9400	1.7250	28.7

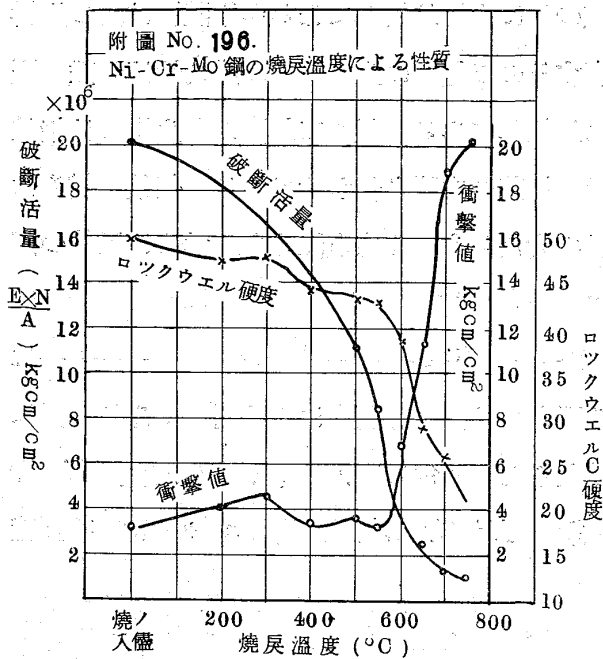


Amsler Hammer Machine による破斷回数と他の金質性能との関係は次の通りである。

($r = 5\text{cm}$)

熱処理	1 回 分 轉 の 數	破斷 回数 $N(\times 10^5)$	$\frac{E \times N}{A} (\times 10^6)$	衝撃値 kgm/cm^2	ロック ウェル C 硬度	ブリ ネル 硬度
焼入 850°C の儘	319	7.2272	20.00000	3.14	49.6	503
焼戻 200°C	320	3.7334	9.74000	4.10	47.2	515
300°C	319	6.7394	19.02000	4.57	47.5	478
400°C	"	3.4425	9.51800	3.37	44.2	457
500°C	"	4.0176	11.10000	3.68	43.2	447
550°C	319	3.05760	8.45400	3.34	43.0	450
600°C	"	1.29880	3.59100	6.91	38.9	395
650°C	318	0.90280	2.48000	11.23	29.1	325
700°C	"	0.50530	1.38800	18.81	25.4	280
750°C	319	0.38910	1.10000	20.20	21.3	240

この関係を曲線で示す時は附圖 No. 196 に於ける様に焼戻温度の高まると共に硬度は低下し



550°C 以上では其降下程度が急である。之と同様に Hammer Machine による耐久力は之に殆んど平行し 500°C 以上では急に降下する。之と反対に衝撃値は 550°C 迄は大差なく之以上で急に大となる。即ち衝撃値の大となる事は耐久性に乏しい事は明であつて工作上許せば、使用上は 500°C~550°C 附近で処理する方が良い筈である。

附圖 197(a)

CN12 鋼(Ni-Cr-Mo)(佛國製)連續衝擊屈撓試験

r=5cm

焼入 950°C 空放



r=5cm

焼入 950°C 空放

破断の景況。焼入の儘のものと 600°C 迄の焼戻状態のものは破断に際しては附圖 No.197 a.b に示す様に逐次表面に龜裂を生じて離れるに反して 650°C 乃至 750°C 焼戻のものは離れない。

(g) Ni-Cr-W 鋼 (BMW 曲軸鋼乙)

本鋼の成分は次の通りである。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W
0.21	0.20	0.38	0.010	0.019	4.11	1.71	0.61

焼入温度 850°C (空中放冷) の後焼戻を行ふ。其温度は 500°C 乃至 700°C とした。前同様に破断回数と其他の金質性能の關係は次の通りである。但、r=5cm

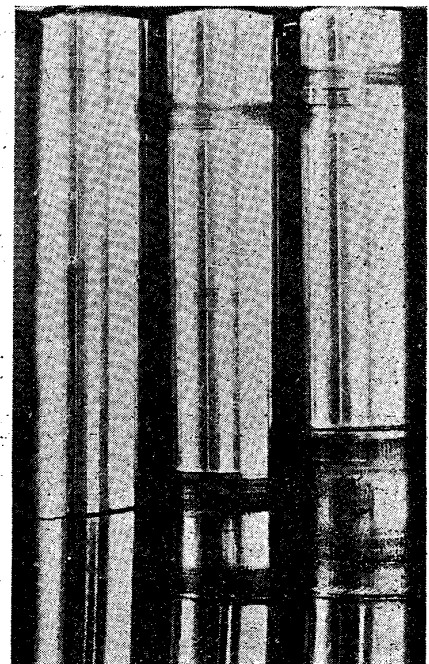
熱處理	1 分間の回轉數	破断回数 N (×10 ⁵)	$\frac{E \times N}{A}$ (×10 ⁸)	同平均	ロックウェル C 硬度	衝擊値 kgm/cm ²
焼入 500°C	320	1.6904	4.690	3.955	34.4	8.67
"	"	1.1584	3.220		33.0	
550°C	"	0.5350	1.500	2.780	33.6	10.14
"	"	1.4432	4.050		34.4	
600°C	"	0.9518	2.665	2.405	30.9	16.30
"	"	0.7643	2.145		31.3	

附圖 197 (b)

CN12 鋼(Ni-Cr-Mo)(佛國製)

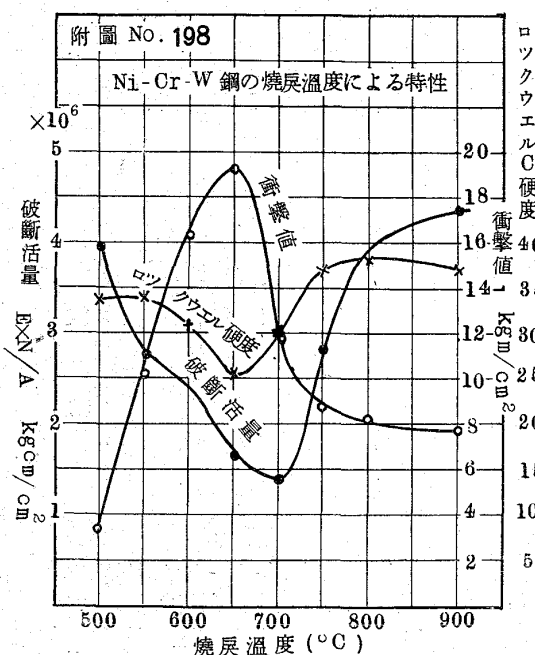
連續衝擊屈撓試験

r=5cm 焼戻温度(°C)空放(焼入 950°C)
650 700 750 (空放)



650°C	320	0.6341	1.780	1.654	25.6	19.30
"	"	0.5404	1.527	1.527	25.4	
700°C	"	0.5260	1.477	1.377	29.1	12.00
"	"	0.4545	1.277	1.277	31.1	
750°C	"	1.3065	3.710	2.835	37.3	8.94
"	"	0.6783	1.960	2.835	36.8	
800°C	"	1.2605	3.545	3.933	38.1	8.31
"	"	1.5395	4.320	3.933	38.6	
900°C	"	1.5818	4.400	4.383	37.3	7.84
"	"	1.5582	4.365	4.383	36.7	

この関係は附圖 No. 198 に示す通り 700°C で最低破斷回數にあり乍ら硬度は 650°C で最低で



衝撃値は最高である。700°C 以上では空中で焼入される爲に急に破斷回數上昇し耐久性大となる。この曲線でも明であるが衝撃値の大なる點では耐久性に於て乏しい事が分る。尙 800°C 乃至 900°C の範圍で焼入する事は使用上適當であるものと推定される。

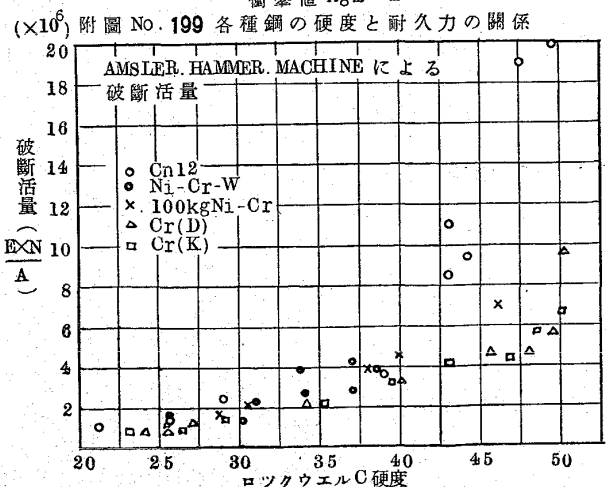
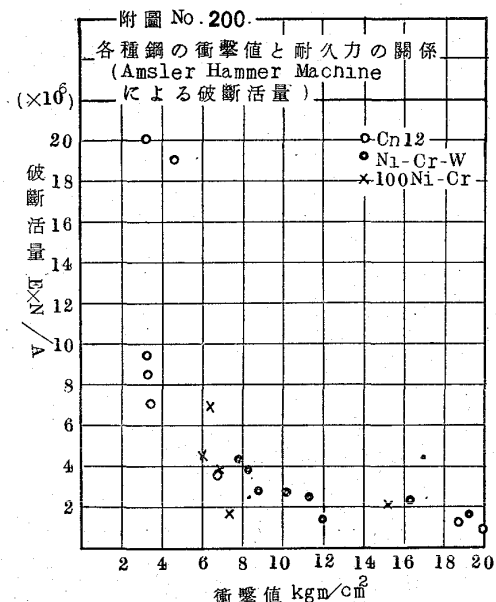
第4節 硬度衝撃値及耐久力の關係

繰返震動を受ける材料として耐久性を主眼とするならば硬度及衝撃値の何れを重視すべきやは前述の諸試験の結果から自ら判斷し得られるが更に約言すれば

(1) 松村式疲勞試験では全破斷回數は硬度と衝

撃値の積に大體比例してゐるが本試験は溝の影響を有するので龜裂の生ずる迄の耐久性は分離抗張力に比例してゐる、従つて龜裂の發生迄では細粒脆性の状態の方耐久性が大である。但龜裂侵入は靱性の大きなものゝ方が深くある爲めに以後の回數は多い。

(2) ————— に依る耐久性は同じく硬度に正比例してゐるが更に明瞭ならしめる爲に Cr 鋼、Ni-Cr 鋼、Ni-Cr-Mo 鋼及 Ni-Cr-W 鋼に就てロックウェル C 硬度



別に耐久性を比較する時は附圖 No. 199 に示してある通りである。之と反對にシャルピー式衝

撃値を横軸に之等鋼の耐久性を比較する時は附圖 No. 200 に示す様に衝撃値に反比例して耐久性の増減してゐる事が分る。

(3) 上記強靱鋼の性態を比較するにロックウェル C 40 以上で耐久性の著しく高いのは CN 12 鋼 (Ni-Cr-Mo 鋼) であつて 30 乃至 40 の範圍では Ni-Cr-W 鋼は比較的秀れてゐる。尙 Cr 鋼は幾分之等に比して劣つてゐる。

(4) 使用上工作上の問題を別にするならば震動耐久性に重點を置くならば變態點以下の細粒脆性附近の狀態で使用する事は差支無いものと思惟される。變態點を越して粗粒脆性を呈する様な材料 (Ni-Cr 軟鋼の如き) では脆性は恐るべきであるか空氣焼入鋼の如きは變態點を越して焼入された狀態では何等差支ない。

第 5 章 W. Kuntze 氏の Trennfestigkeit の論說に就て

獨逸國立材料試驗所報告 (Mitteilung aus dem Staatlichen Materialprüfungsamt, 氏 Berlin Dahlem) 中に論及せられた W. Kuntze の Berechnung der Schwingungsfestigkeit aus Zngfestigkeit u. Trennfestigkeit に関する内容の大要に就き拔萃する事とし筆者の説と對照論議し疲勞計算の基礎に資せん。

氏の論文中、溝付試験片による所謂分離抗張力と普通の抗張力から震動に依る抗力を計算する公式を提出論議しあるもので先づ該抗張力と加工の程度に應じての變化曲線は附圖 No. 201 に示してある。同曲線の ST_0 と ST_{II} の間は直線的に増大し ST_{II} 以上に於ては Grain の震盪現象を惹起するものと考へられる。之から ST_{II}/ST_0 の比を求めこの係数を Verfestigungsfaktor と名付

ける。この値は材料の加工に應ずる良否の境界を決定し得られるもので、これから震動疲勞の公式を誘導した、即ち

$$S = S_1 \frac{ST_{II}}{ST_0} \dots \dots \dots (1)$$

S : 實際の震動抗力

S_1 : 粘靱性體の安全震動應力限界

$$\text{之から } S_1 = S \frac{ST_0}{ST_{II}} \dots \dots \dots (2)$$

を求められる、 S_1 は狀點や彈性界には關係なく抗張力に關係がある。而して別に實驗的に次の式から求められる。

S_1 は抗張、抗壓の場合と 屈撓の場合に於て若干異つてゐる。

$$S_1 = \sigma_B^n - \sigma_B \dots \dots \dots (3)$$

σ_B : 抗張力

n : 實驗的恒數で粘性體の總ての結晶體にも適用される。

抗張 抗壓 震動には $n=1,079$

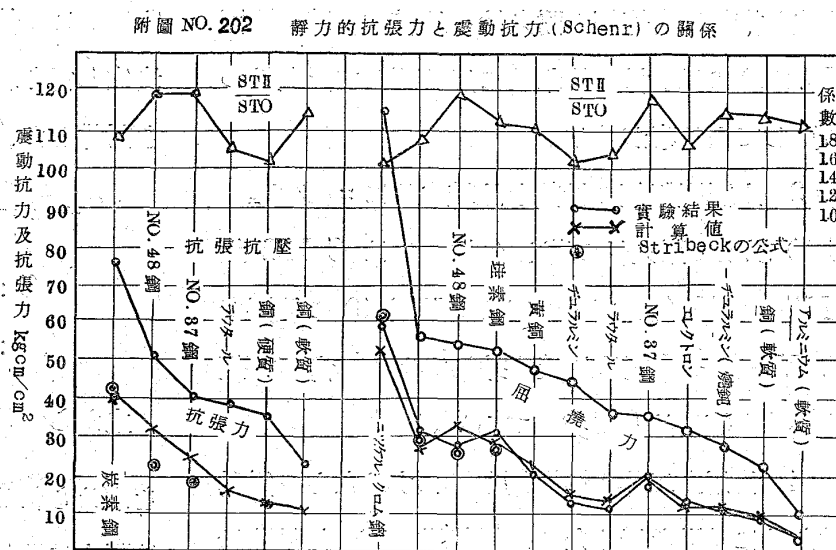
屈撓震動には $n=1,074$

$$\therefore S = (\sigma_B^n - \sigma_B) \frac{ST_{II}}{ST_0} \dots \dots \dots (4)$$

附圖 No. 202 には各種材料から求めた計算の値と實際 Sohenck 式疲勞試験機から求めた結果の疲勞限界とが一致してゐることを示してゐる。附表には數值的に一致しある事が明記してある。

以上 Wkuntze 氏の論文によつて震動に依る耐久力は實驗的に求めず公式から計算によつて求められる筈なるが尙筆者は本論に敷衍する事とするならば

(1) 公式から求めた S の値は平均應力であつて局部に集中する考慮を缺いてゐる事、即ち筆者の論では實際の部品の負荷狀態では局部に大なる



材 料	著 者 名	震 動 試 験			静 力 抗 張 試 験				計 算 値			
		震動 抗力 S kg/mm ²	弾性界 0.003% σ_E kg/mm ²	抗張力 σ_B kg/mm ²	分離抗張試験			抗張力 kg/mm ²	公式(2) より得 たる震 動破断 界 S ₁ kg/mm ²	試験恒数		公式(4) より得 たる震 動抗力 S kg/mm ²
					ST ₀ kg/mm ²	ST _{II} kg/mm ²	ST _{II} ST ₀			公式(4) よ り n	平均 n	
炭素鋼 (0.7)	K. Memmler u. K. Laute	40.7	41.3	74.5	126.5	164	1.30	72.5	31.3	1.081	1.079	39.4
鋼 第 48		31.2	23.0	49.2	87.0	155	1.78	49.5	17.5	1.078		31.6
鋼 第 37		24.0	20.0	39.5	72.0	128	1.78	38.0	13.5	1.079		24.0
ラ ウ タ ル		14.7	11.5	38.0	58.0	68	1.17	39.0	12.6	1.079		14.7
銅 (硬)		11.8	8.6	34.5	84.5	89	1.05	34.9	11.2	1.080		11.7
銅 (軟)		9.5	2.0	22.4	44.0	69	1.57	23.7	6.1	1.078		9.7
ニッケルクロム鋼	K. Matthaes	57.0	86.0	114.1	227.0	245	1.08	114.1	52.8	1.080		52.0
鋼第 37 (調質)	P. Ludwik	31.0	29.8	55.7	117.0	154	1.32	54.2	23.5	1.087		25.8
鋼 第 48		27.0	34.8	53.9	87.0	155	1.78	49.6	15.2	1.061		33.3
珪 素 鋼		31.0	33.0	52.4	98.0	150	1.53	50.0	20.3	1.082		27.4
$\alpha + \beta$ -黄銅	R. R. Moore	20.4	(7.2)	46.4	55.0	80	1.45	43.8	14.1	1.069		22.5
デュラルミン 681 b (調 質)	R. Wagner P. Ludwik D. V. L. 平 均	12.0 14.0 14.0 13.3	18.5	47.5 40.8 42.4 43.6								15.6
ラ ウ タ ル	R. Wagner D. V. L. 平 均	10.0 13.4 11.7		32.5 37.6 35.1								12.6
鋼 第 37	P. Ludwik	19.0	22.6	35.0	72.0	128	1.78	38.0	10.7	1.074	1.074	19.0
エレクトロン A. Z. M.	I. G. Farben P. Ludwik D. V. L. 平 均	13.0 11.0 15.5 13.2	7.4	28~32 31.3 33.6 31.6								11.5
デュラルミン 681 b (焼鈍)	R. Wagner P. Ludwik 平 均	10.0 12.0 11.0	8.1	26.0 27.1 26.6								11.7
銅 (軟)	H. F. Moore U. Jasper P. Ludwik 平 均	7.0 7.0 9.0 8.0		22.8 22.4 22.6	44.0	69	1.57	23.7	1	1.065		9.4
アルミニウム (軟)	K. Memmler U. K. Lante	3.2	2.6	9.5	18.0	265	1.47	8.7	2.2	1.092		2.5

分離抗張力が生じて龜裂を發生する事實を注目する。

(2) 材料の理想的使用の見地から見れば單に S のみに依つて良否を判斷すべきでは無い、例へば龜裂生じて後の破壊の急激でない事や工作上の便利をも充分考慮に入れねばならない。尙材料自身の品質上から見ても其他の性質の良い事を無視してはならぬ。従つて衝擊値や断面收縮率の様な特性をも知らなくてはならぬ。單に Trennung のみで解決すべきでない。

(3) ————氏の論文で求められた震動に依る耐久限界は勿論試験片について得られた平均應力である故に實際上の機械部品の局部應力の集中點に就ての安全性を留意するならば更に其の 1/2 の値を以て安全疲勞限界と認むべきである。

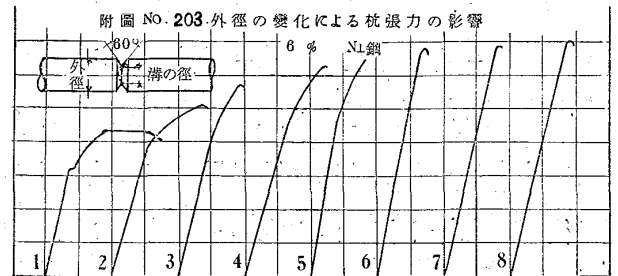
結 論

以上各種特殊鋼に就て疲勞破斷の見地から實驗した結果次の様な結論を摘録する事が出来る。

(1) 航空機の各種鋼成部分の様な震動的繰返荷重を受けるものは局部的に過負荷の状態で疲勞し遂に破斷に至る現象を觀察し得られる。先づ常態に於て靜力的に局部の變位變形を伴はない所謂分離抗張力 (Trennfestigkeit) の存することが知れる、この値は慣用抗張力に關係を有してゐて、大體韌性の大きな鋼で断面收縮率の 55% 以上を有してゐる状態では約 2 倍であつて收縮率の少ないものは約 1.6 倍附近にある、但し疲勞破斷ではこの分離抗張力が變化して一局部から分離破斷を生ずるのである。

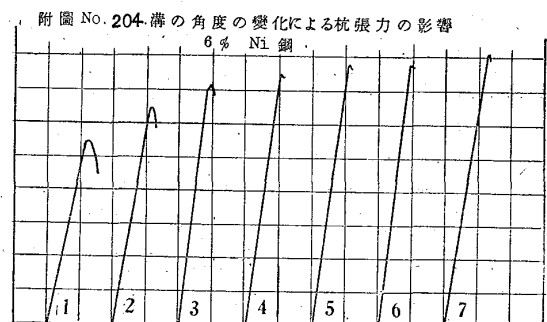
(2) 實際の部品の疲勞破斷の經路を探究するに局部負荷狀況は變形變位を伴はないと言ふ事實は恰も溝付試験の際に溝底一定とし外徑を増す時の

極限或は角度を變化した極限の Stress-Strain 曲線の場合 附圖 No. 203 及 No. 204) に酷似



	1	2	3	4
外 徑	15 mm	19 mm	23 mm	27 mm
溝 の 径	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
溝の角度	60°	60°	60°	60°
荷 重	9,635 kg	12,920 kg	14,570 kg	16,300 kg

	5	6	7	8
外 徑	31 mm	35 mm	37 mm	43 mm
溝 の 径	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
溝の角度	60°	60°	60°	60°
荷 重	16,690 kg	17,440 kg	17,470 kg	18,010 kg



	1	2	3	4
外 徑	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
溝 の 径	7 mm	7 mm	7 mm	7 mm
溝の角度	150°	120°	90°	60°
荷 重	2,711 kg	3,239 kg	3,600 kg	3,844 kg

	5	6	7
外 徑	15 mm	15 mm	15 mm
溝 の 径	7 mm	7 mm	7 mm
溝の角度	45°	30°	15°
荷 重	3,910 kg	3,969 kg	4,063 kg

し恰も弾性的變形を爲す状態に在るものと推察される。故に部品の強度設計上には丸棒や板材試験片に依る抗張試験の様な粘性變形を阻止し寧ろ普通抗張力の 2 倍附近の荷重にも耐えと言ふ事になる、併し繰返荷重の進行と共に分離抗張力は低下する譯である。

今一般に使用されてゐる Beam Theory とし

ての公式

$$f = \frac{M}{Z} \quad Z = \frac{I}{y}$$

但 f = 抗張力 M = 屈撓モーメント

Z = 断面係數 I = 慣性モーメント

y = 中心からの距離

に於て論ずるならば f は弾性限界以内で成立する譯で從來の丸棒や板材から求めた試験片の抗張力と見做すことは不合理である。何となれば之等は粘性變形を伴ふからである。併し本曲線で示す分離抗張力は直線的に變化する故に抗張力に等しい値を其儘適用しても不合理ではないことが分る。

(3) 分離破斷の機構上龜裂の誘起は局部に於ける内力傾斜に基因する事が多い。而して該内力が+-の方向に絶えず變化し震動的に局部を弛ませる。其結果は分離抗張力が低下し容易に分離破斷を招來す。

(4) 衝撃試験と熱處理との關係を説明し、耐久力の大ならんことを望むためには衝撃値を低下しても所謂細粒脆性に屬する場合には何等差支へない。焼入後焼戻温度撰定上の指針として變態點附

近の衝撃値の大なる Sorbitic Structure を撰ぶことは耐久性に乏しい。寧ろ Troostite に近く使用の方がよい。

(5) 松村式疲勞試験と分離破斷機構に就て論じ龜裂發生は分離抗張力の大なる時が遅い、即ち耐久性大であるが衝撃値との關係を考察するに其値の大なるものは龜裂發生後其侵入度大であつて所謂 Silky Structure を呈する。但細粒脆性のもものは耐久力大であるにも拘らず、粗粒脆性のもものは之に反す。

(6) Amsler Universal Hammer Machine による耐久力と硬度並に衝撃値の關係を攻究するに硬度の大なるものゝ方が耐久性大である。又硬度同一であつて衝撃値の大なるものは安全であると考へられる。

(7) W. Kuntze 氏の提出した疲勞限界の公式 $S = (\sigma_B^n - \sigma_B) ST_H / ST_0$ の更に 1/2 を採つて安全疲勞限界とするならば實際の部品局部の設計として相當信頼し得るものと思はれる。