

鋼の疲勞と其恢復

(大正十四年十月十八日日本鐵鋼協會第十週年紀念大會講演)

藤井 寛

緒言

鋼の疲勞に關する從來の研究に依れば材料を繰返し荷重する時其荷重が材料の限界應力若くは其以下の値を有する時は荷重を如何に多く繰返すも其材料は破壊することなきが如しと雖其値以上なる時は或有限の繰返に依りて試料は疲勞し遂に破壊するに至るものとす。

而て從來の研究は主として限界應力の決定、限界應力と緊張破斷力並に彈性限との關係、限界應力と溫度上昇との關係、材料の化學成分加工法並に熱處理と緊張破斷力並に限界應力との關係等の問題に限られ未だ疲勞したる材料が如何なる條件の下に恢復するやを決定したる論文を見ず只 Rogers(1)が或程度以上疲勞したる材料は熱處理にて恢復するを得ずと稱したるもの及び本問題を豫備的に取扱ひたるものあるのみ。(2) (3) (4) (5)

本研究に於ては疲勞は如何なる物理的並に化學的現象を伴ふものなるや從て疲勞の真相は如何又疲勞したる材料は如何なる條件の下に恢復するものなるやを決定せんと企てたり。

第 1 章 材 料

材料は工業上使用する代表的鋼材を撰び之に施したる熱處理は實地に行はるものを撰びたり。
化學成分は第 1 表の如し

第 1 表

鋼種	成分	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%	Ni%	Cr%	熱處理
極軟鋼	鋼	0.06	0.008	0.46	0.078	0.04	0.02	—	—	焼鈍
軟鋼	I	0.16	0.07	0.48	0.01	0.02	0.08	—	—	同
軟鋼	II	0.22	0.012	0.66	0.062	0.05	0.28	—	—	同
半硬鋼	鋼	0.45	0.16	0.53	0.051	0.025	—	—	—	同
硬鋼	鋼	0.74	0.47	0.67	0.019	0.020	—	—	—	同
半硬鋼	鋼	0.37	0.14	0.45	0.048	0.026	—	—	—	健反淬
ニツケル鋼	鋼	0.28	0.12	0.51	0.013	0.022	—	3.29	0.115	同
ニツケルクロム鋼	鋼	0.36	0.15	0.65	0.014	0.034	—	3.3	0.71	同

(1) Rogers, Journ. Ir. & St. Inst. 1905 I

(2) Mailänder, St u. E. 12. Jun. 1924

(3) Muir. Phil. Trans. Roy. Soc. A. Vol. 193. 1900.

(4) do, do A. Vol. 198. 1903.

(5) Gough, The Fatigue of Metals 1924.

熱分析は示差法に依り温度の上昇並に下降速度は第1圖に示すよりも稍急なりしが此場合に決定したる變態點は第2表の如し。

第2表

鋼種	C %	Ac ₃		Ac ₂		A ₁			Ar ₃			Ar ₂			Ar ₁		
		始	最大	始	最大	始	最大	終	始	最大	終	始	最大	終	始	最大	終
極軟鋼	.06	850	865	790	795	745	752	—	885	855	820	770	755	720	—	—	—
軟鋼 I	.16	805	815	—	—	740	750	—	—	800	—	760	755	—	674	668	—
軟鋼 II	.22	—	—	—	—	735	745	—	—	—	—	—	—	—	670	665	—
半硬鋼	.45	—	790	—	—	730	742	790	720	700	—	—	—	—	670	660	—
硬鋼	.74	—	770	—	—	735	750	770	—	640	—	—	—	—	680	653	—
エツケル鋼	.28	—	780	—	—	730	735	780	—	730	—	—	—	—	670	633 600	—
ニツケルクロム鋼	.36	—	780	—	—	715	730	780	—	660	—	—	—	—	660	625 583	520

備考 温度は總て攝氏にて表しA₂を併記す。

熱處理は第一表に示したるが如く種々の炭素鋼を焼鈍したる場合と炭素鋼ニッケル鋼ニッケルクロム鋼を健反淬したる場合とあり。個々の熱處理を一々記載するの煩を避くる爲め符號を用ゐたるが故に以下例を擧げて之を説明すべし。

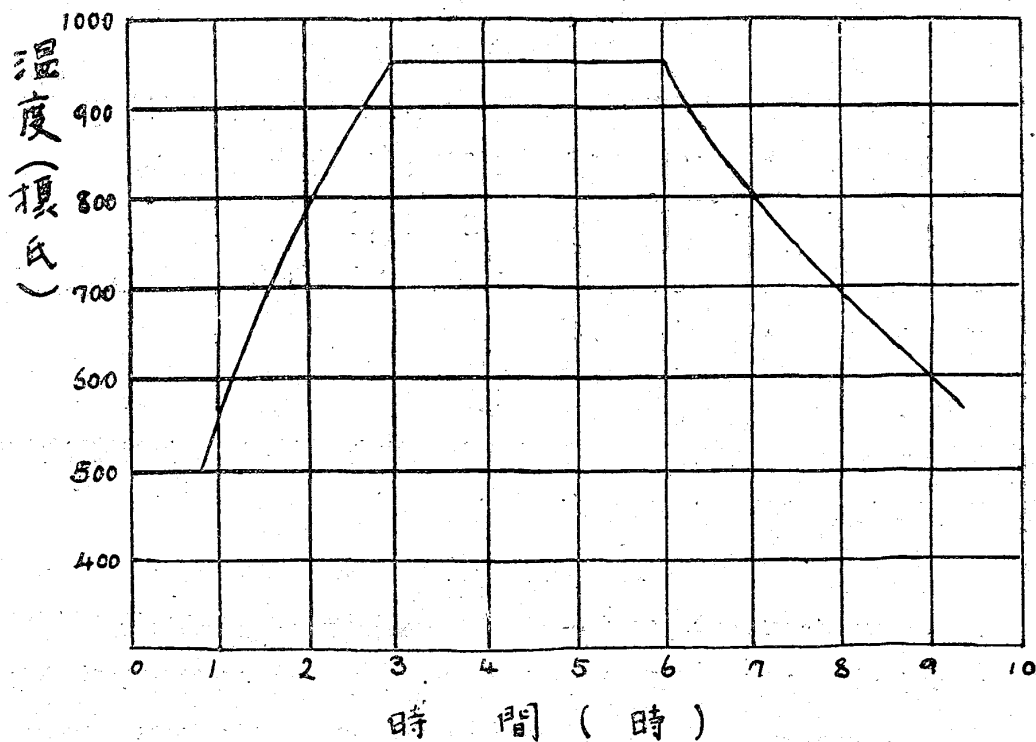
例 1. 900—15 SC, 850—30 SC.....

は熔融鉛中にて 900°C, 850°C.....に於て夫々 15 分間 30 分間.....加熱したる後爐中にて緩冷し 550°C に至りたる時取出して藁灰中に投入緩冷。

例 2. 1000—90 LC, 850—180 LC, 730—320 LC.....

前と略同様なれども藁灰中に緩冷する代りに熔融鉛中にて其儘緩冷。

第一圖



例 3. 900—360, 900—15……

前と同様なれども熔融鉛を用ひず普通の電氣爐を以て熱處理し従て藁灰槽を用ひず。

例 4. 850—300Q……

は熔融鉛中にて 850°C に 30 分間保持したる後油槽中に投入健淬。

例 5. 650—20 OQ……

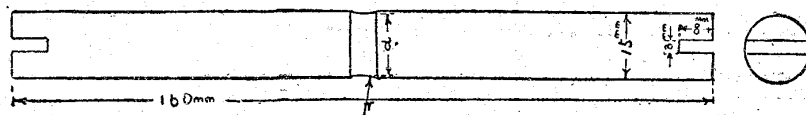
健淬したる試料を再び熔融鉛中に於て 650°C に 20 分間保持したる後油中冷却。

加熱爐内熔融鉛を入れたる鋼製坩堝は試料 20 個を容るゝ程の大きさを有し之を圍むにニクロム線を巻きたる土管を於てし後者の周圍は石棉層(厚さ數十耗)及び亜鉛板を以て包みたり。鉛の熔融したる時試料を挿入し熔融鉛の表面には木炭又はレトルト炭素を蔽ひ鉛の酸化を防ぐ。此加熱爐を用ひたる時温度の上昇並に下降する速度は第 1 圖の如し。

第 II 章 試験機試料並に試験装置

繰返應力を與ふるために松村式繰返打撃試験機を使用したるが試料は第 2 圖に示すが如し。同圖刻目の徑 d 及び曲率半徑 r は焼鈍したるものには夫々 14 耗及び 10 耗健反淬したるものには夫々 13 耗及び 5 耗としたり。其他特種の目的に對しては角形の試料を用ゐたり。

第 二 圖



示 差 熱 電 對

ニッケル環中に試料を入れ示差熱電對の一方の熱接點はニッケル中に他は試料中に在らしめ兩者間に温度の差を生じたる時其に相當する電動力を極めて鋭敏なる電流計を以て計る。

電 位 測 定 装 置

各種溶液に浸したるとき試料の電位は甘汞電極に對比して Leeds & Northrup 製電位計を以て測定したり。(第 3 圖參照)

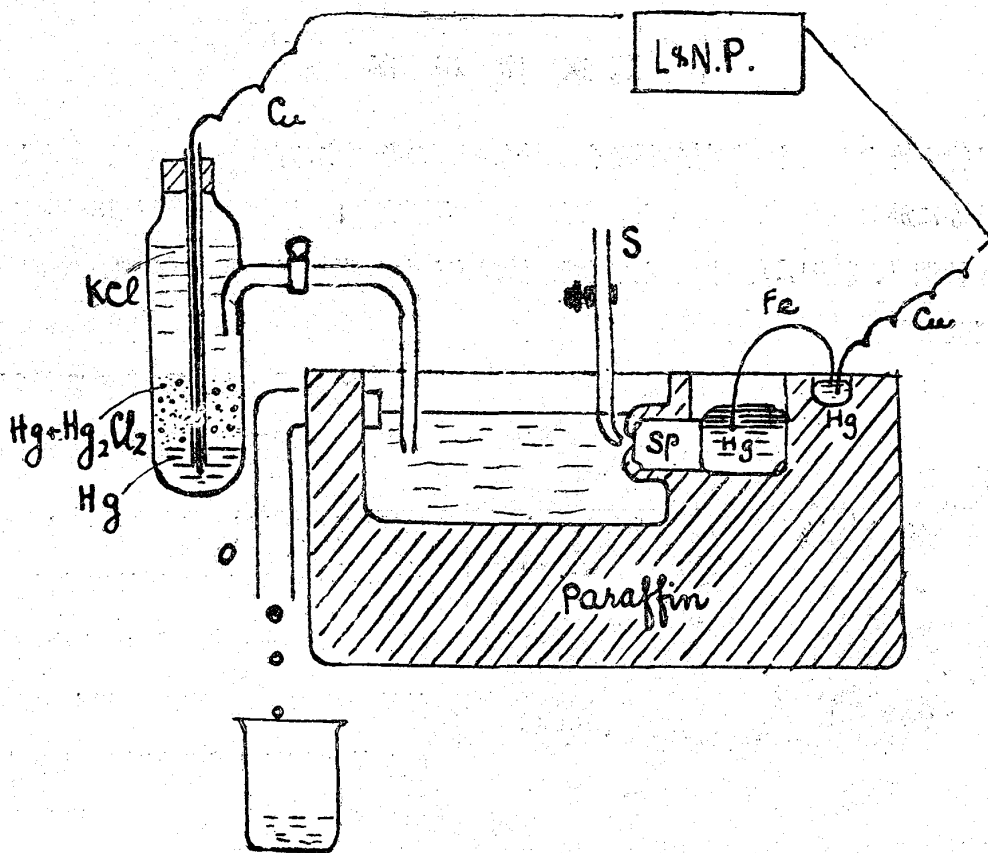
磁 力 計

東西に向へる同一水平軸を有する二個の同形起磁回線の中央に置かるゝ小馬蹄磁石を極めて細き絹絲にて吊し此磁石の上に小鏡を附着したるものなり。

繰返打撃中試料温度の測定

試料刻目に第 4 圖の如く穴 H を穿ち之より一方に約 40 耗隔りたるところに於て全圓周に沿ひ溝 G を作る。銅、コンスタンタンよりなる熱電對の熱接點を上記の孔に嵌め近み絲を以て熱接點より少し隔りたることを試料に結び付け前者が穴より脱け出るを防ぐ。更に熱電對を試料に沿ふて溝 G 迄導き

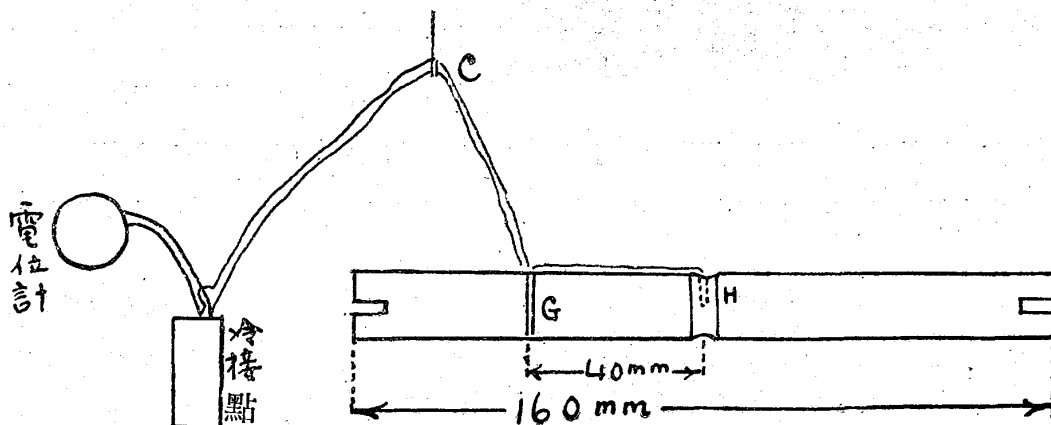
第三圖



Sは新鮮なる溶液を試料に滴下する管装置は古き液を溢れしむる管

絲にて試料に縛り適當なところCに天井より吊されたる絲Sを結び付くるを其他は第4圖の如し。

第四圖



恒溫裝置

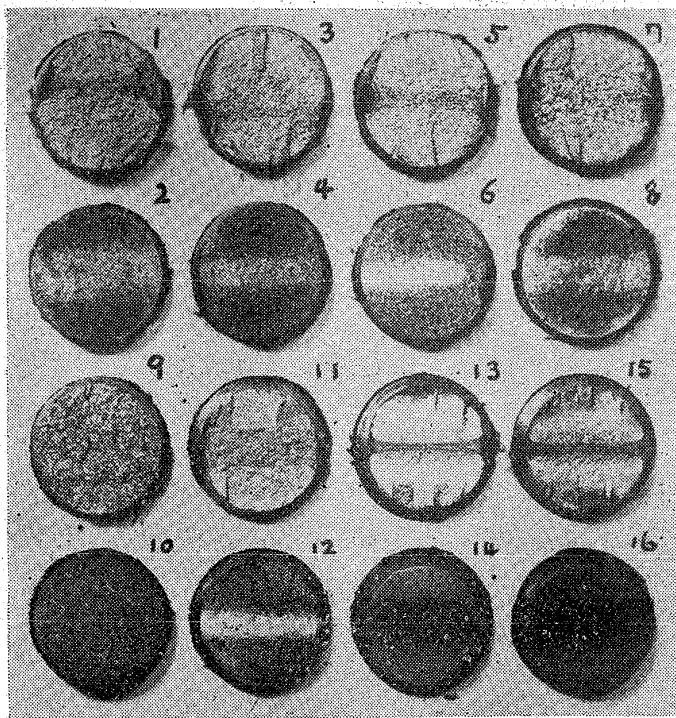
第1章に説明したるが如き加熱爐に於ては送電壓に大變化なき限り夜間坩堝内の溫度の變動は $\pm 10^{\circ}\text{C}$ に止れども夕刻電壓著しく低きが著しく高き時は往々夜間電壓の昇降あり。彼様の變動に備ふるため送電壓の昇降によりて斷續するシャント線を有する装置を用ゐたり、此裝置の要點は三段に分れ第一段は電壓の昇降によりて起磁回線の電流の増減鐵心磁力の増減をなし第二段に於ては斯くの如く鐵心磁力の増減によりて繼電器の電流を斷續し第三段に於ては此斷續によりてシャントの開閉を

なし加熱爐に至る電流を調節す。

第 III 章 疲 勞 破 面

疲勞破壊は繰返應力を受くる器械の構造部に於て断面の急變するところに起るを常とし其破面の模様は文獻實例等に於て一般に知らるゝところなり。第 5 圖奇數段 1 3 5 7 9 11 13 15 は順次焼鈍したる極軟鋼、軟鋼 I、軟鋼 II、半硬鋼、硬鋼、健反淬したる半硬鋼、ニッケル鋼、ニッケルクロム鋼繰返打撃試料破面なり。

第 五 圖



第 IV 章 疲 勞 せ る 材 料 の 腐蝕性撰擇腐蝕性

繰返打撃試料の破面を研磨して其凸凹を去り Fry (6) 肉眼及び檢鏡用溶液、Humfrey, (7) Dickenson, (7) Rosenhain (7) 各含銅腐蝕液を使用するか其にも増して良結果を得る鹽化第二銅又は鹽化銅安母尼亞 10% 溶液(7) 中に浸すを十數分にして取出し表面の銅を洗ひ流すときは第 5 圖偶數段 2 4 6 8 10 12 14 16 の如く著しき繰返應力を受くるところが特に深く腐蝕せらるゝを見る。而て是等は何れも上方奇數段の破面に相當す。同圖 6 に銅鍍金し淺く研磨腐蝕したるものは第 6 圖の

如く黒きは凹部、焼鈍したる軟鋼の組織を呈するところは凸部なり。同圖は著しく腐蝕せらるゝ部分の寫眞なるが中立軸附近も凹部(寫眞に於ける黒き面)が小くなるのみにて略同様に腐蝕せらるゝものとす。

(6) 檢 鏡 用 CuCl_2 5g, Conc. HCl 14 cc, Alcohol 25 cc, H_2O 30 cc

肉眼的檢出用 CuCl_2 90g, Conc. HCl 120 cc, H_2O 100 cc.

(S. u. E. 11 a. 18, Aug. 1921)

(7) Humfrey 腐蝕液 Ca Am Chloride 120g, Conc. HCl 50 cc, H_2O 1000 cc.

Dickenson 腐蝕液 第一液 Conc. HNO_3 10 cc, H_2O 90 cc.

第二液 $\text{Fe}_2 \text{Cl}_6$ 40g, Bu Cl_2 3g, Conc. HCl 40 cc,

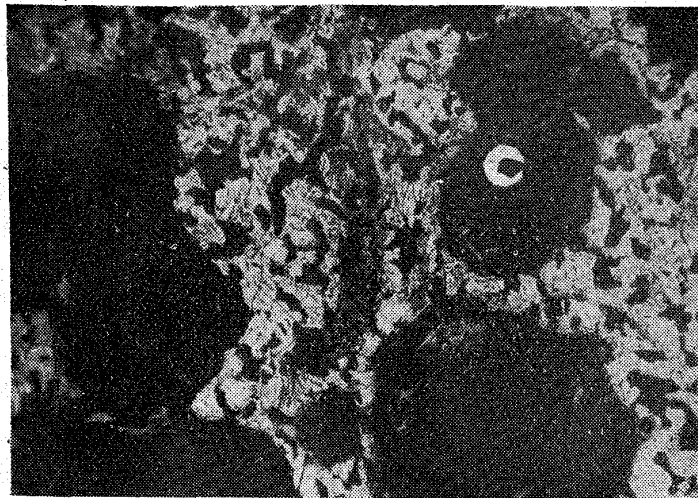
H_2O 500 cc.

Rosenhain 腐蝕液 FeCl_3 30g, Conc. HCl 100 cc, CaCl_2 10g, SnCl_2 1g, H_2O 1000 cc.

Heyn 腐蝕液 Ca Am Chloride 10g, H_2O 100 cc.

(Chem. & Met. Eng. Aug. 21, 1921)

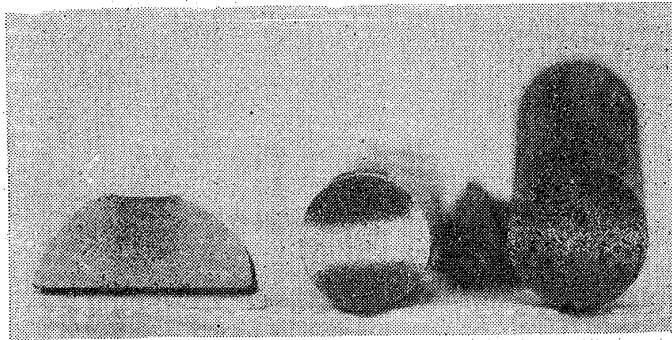
第六圖



←凹部
←フェライト
←パーライト
○附着したる銅

：繰返打撃、ブリネル試験及び屈曲を受けたる試料断面を鹽化銅アンモニア液に浸したるに第7圖の如く腐蝕せられ前者に於て撰擇腐蝕の程度最も著しきを示す。

第七圖



2 1 3

1 繰返打撃試料

2 ブリネル硬度試料

3 屈曲試料

溶解電位

第5圖に於ける撰擇腐蝕を受くる部分と然らざる部分(中立軸附近)のFry肉眼検出用溶液中に於ける電位を測定したる結果は第3表の如し

3 表の如し

A 試料に溶液を溶下し始めてよりの時間			B 著しき應力を受けし部分の電位 V	C 中立軸附近の電位 V	D 電位差 C-B V	E 備考
0時	2分	30秒	—	—	0.00794	試料は軟鋼 II にして 試験温度は 16°C とす
0	6	0	—	—	"	
0	8	0	—	—	0.00871	
0	15	0	—	—	0.006765	
0	18	0	—	—	0.005795	
0	22	0	—	—	0.005915	
0	28	0	—	—	0.006135	
0	34	0	—	—	0.005835	
0	53	0	—	—	0.007025	
0	57	0	—	—	0.007130	
0	58	0	—	—	0.007210	
1	2	0	0.24485	0.25206	"	
1	3	0	0.24627	0.25348	"	
1	5	0	0.24627	0.25348	"	
1	27	0	—	—	0.007080	

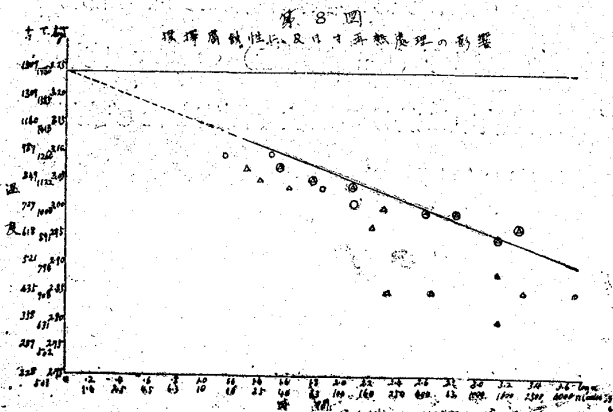
次に著しき繰返應力を受けし部分と中立軸の部分とをパラフィン容器内にて對立せしめ之に水を入れたるとき兩者間の電位差零なることを確め第4表の各試薬も少量入れて攪拌し後靜止し更に試薬を入れて攪拌後靜止し同様の事を繰返す毎に電位差を測れば第4表の如き結果を得。則ち撰擇腐蝕は電氣分解に基き攪拌後靜止する時中立軸附近が長く高電位にあるが如き溶液を用ふれば第5圖の如き撰擇腐蝕をなすものとす。

第 4 表

試 薬	攪拌の電位差		攪拌後靜止中の電位差		備 考
	中立軸附近	著しき應力を受けしところ	中立軸附近	著しき應力を受けしところ	
Fry 腐蝕液	(+)0.05	(-)	(+)0.007~0.005	(-)	攪拌後靜止する時は電位差は0.007~0.005 V となり此状態は可成長く繼續す 攪拌を歇めば直に電位差は零となる 靜止の時は攪拌中の夫と方向反對なる電流が流る。而て靜止中電位差0.007Vは非常に長く續くものとす
濃 鹽 酸	(+)0.004~0.005	(-)	(+)0.0002~0	(-)	
硫 酸 鐵	(+)0.003~0.002	(-)	同 上	(-)	
蓚 酸 鐵	(+)0.009~0.005	(-)	同 上	(-)	
鹽化第二銅	(-)0.009又は其以上	(-)	(+)0.007	(-)	

撰擇腐蝕性に及ぼす再熱處理の影響

溶融鉛を熱し繰返手撃試料破片を入れたる時恰も所定溫度なるが如くなし此溫度に一定時間保持したる後取出して藁灰槽に投入緩冷し破面を研磨其凸凹を去り鹽化銅安母尼亞液にして腐蝕したるに溫度

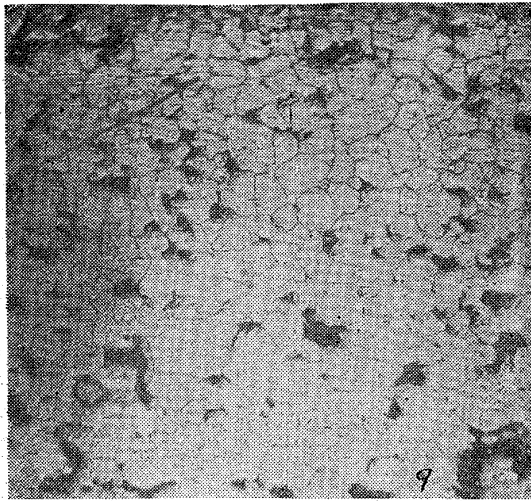


の高き程短時間にて撰擇腐蝕性を失ひ任意の加熱溫度に於て此溫度を保持する時間の長さと共に撰擇腐蝕現象は不分明となり遂に全く此現象を失ふに至る。而て此現象の殆んど消滅し尙幾分残る場合の絶對溫度及び此溫度に保持する時間(分)の對數を夫々縦及び横軸にとる時は兩者の關係は第8圖の如く直線を以て畫き得たり但圖中△○△なる印は夫々此現象の著しく残り、消滅、殆ど消滅猶幾分残るを示す。

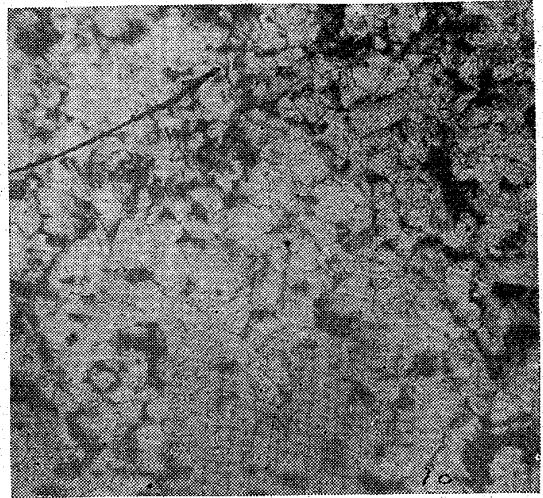
第 V 章 疲勞破れの道程

繰返荷重によりて材料組織に起る變化を試験するため四角の斷面を有する試料の打撃面に直角なる面を研磨腐蝕したる後打撃を繰返す時は組織的變化を容易に現はれずと雖尙打撃を繰す時は刻目部の或結晶に沁りを生じ更に打撃する時は今迄沁りを見ざる結晶にも沁りを見るに至り結晶界に著しき沁りを起し幅廣き幾多の黒條を呈し最後に此等の黒條の或物は明なる破れとなる、此破れが段々深くなる時は破れの底に働く力は前よりも著しくなり、破れは結晶界を縫ふ事なく己に生じたる破れの延長に進むへし。(第 9 乃至 11 圖並に第 12 乃至 22 圖参照)

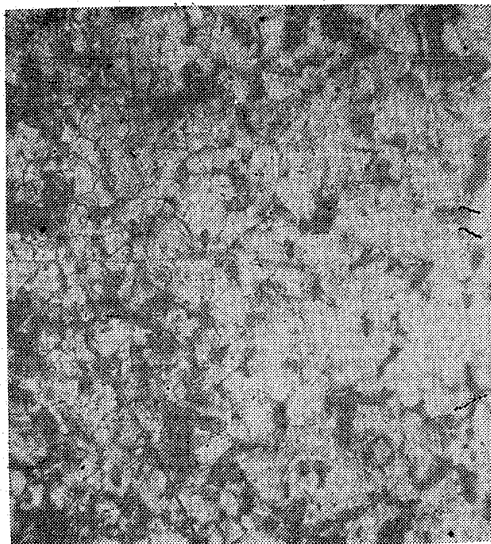
第九圖



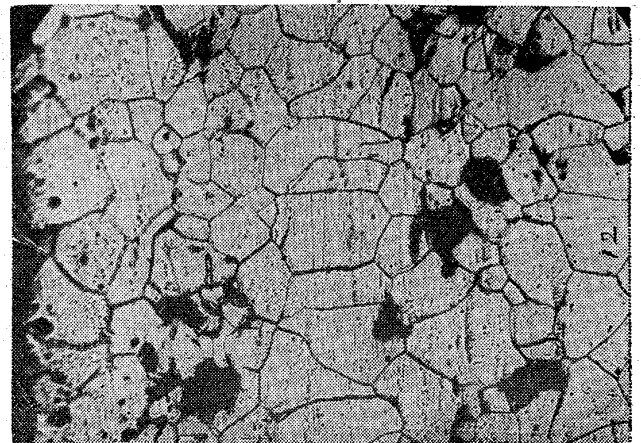
第一〇圖



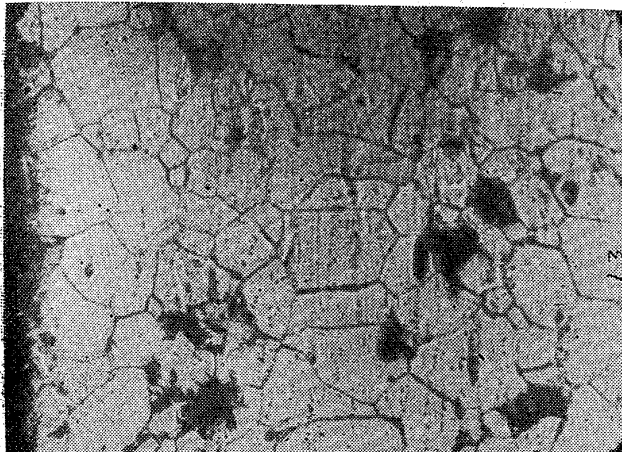
第一一圖



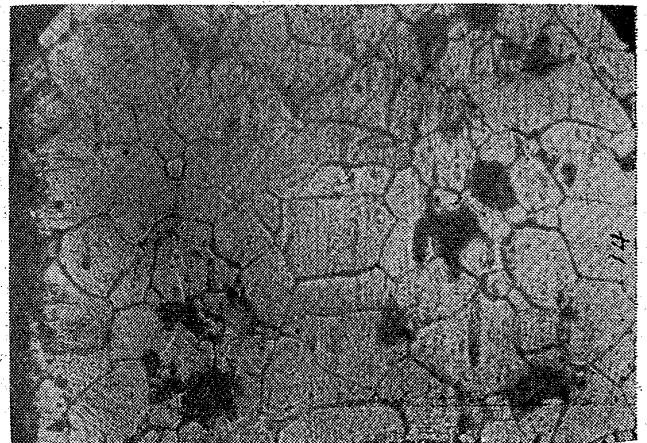
第一二圖



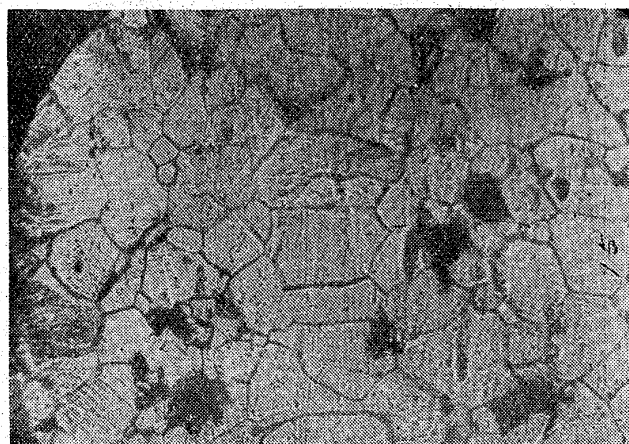
第一三圖



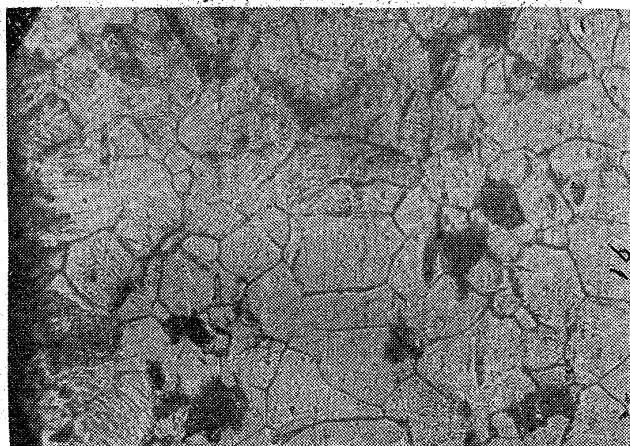
第一四圖



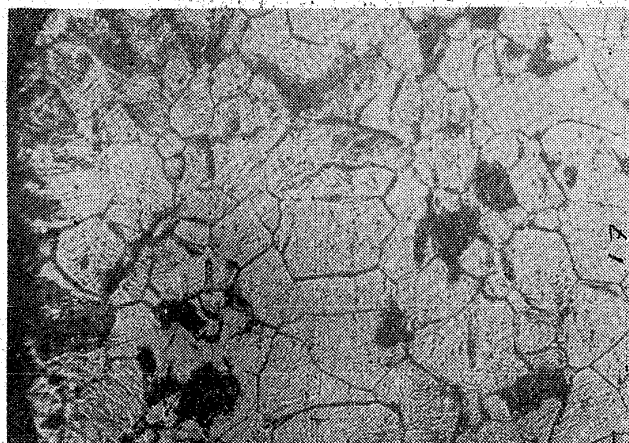
第一五圖



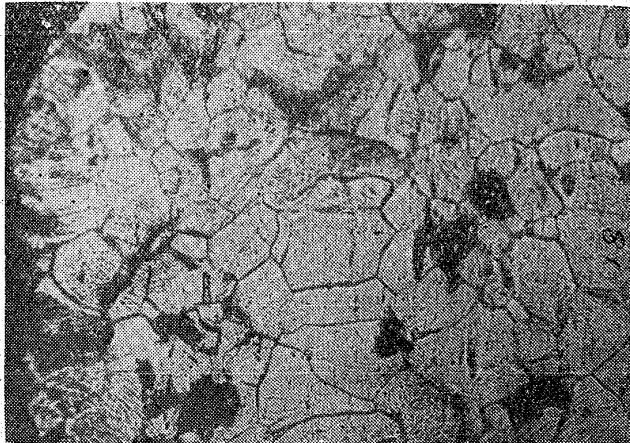
第一六圖



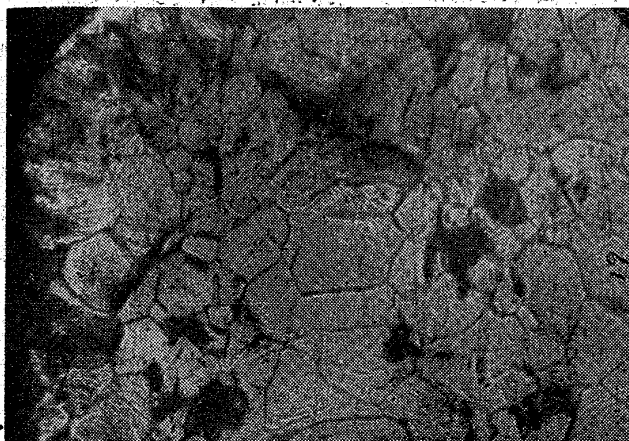
第一七圖



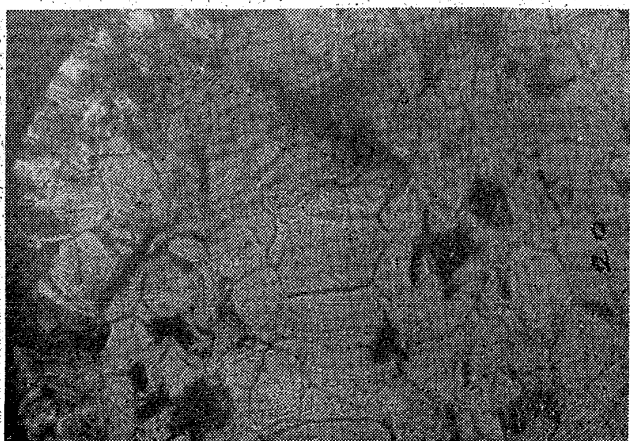
第一八圖



第一九圖



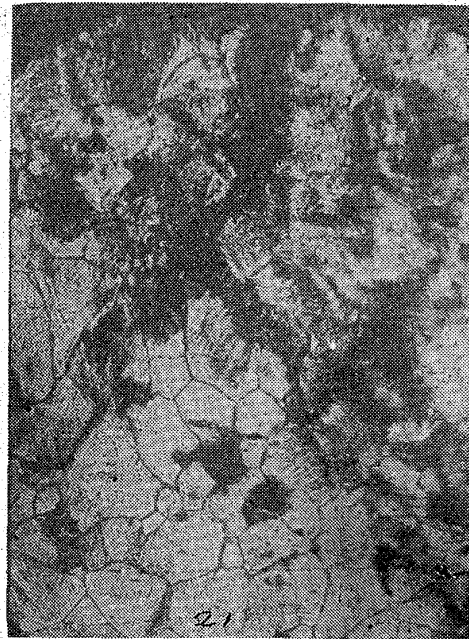
第二〇圖



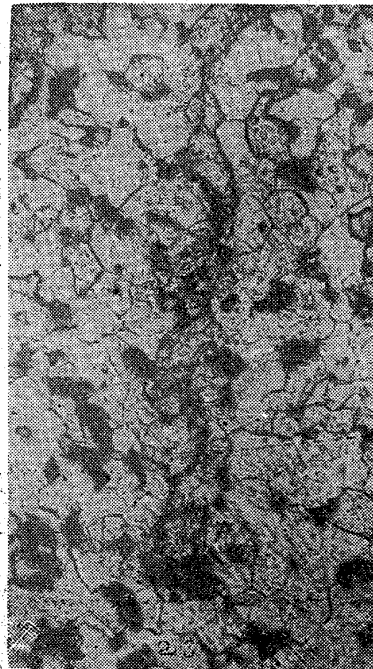
A 第 2 2 圖



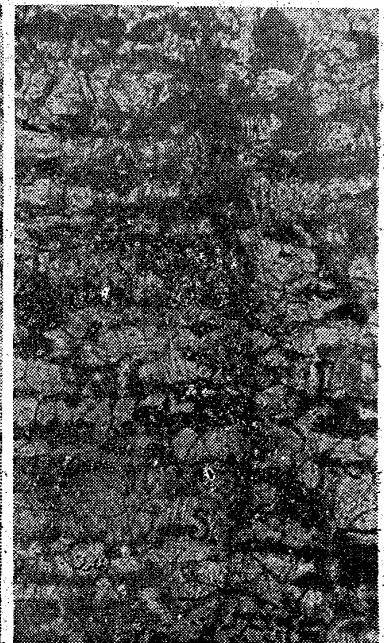
A 第 2 1 圖



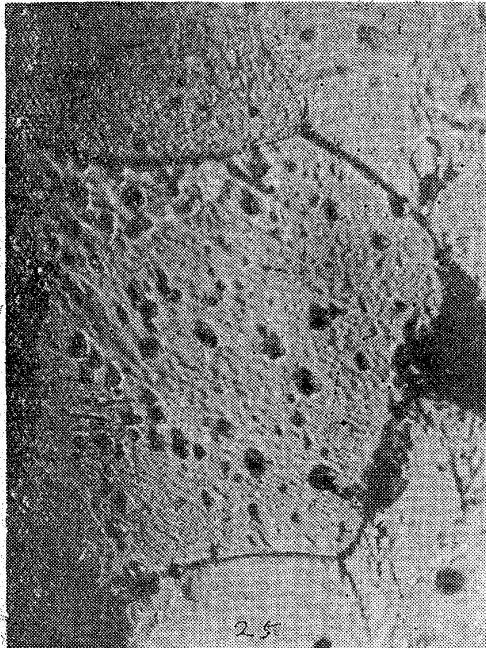
第 2 3 圖 ×80



第 2 4 圖 ×80



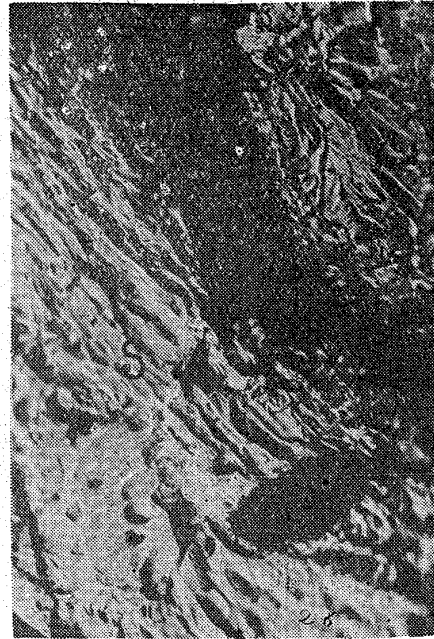
第 2 5 圖 ×750



第 2 7 圖 ×300



第 2 6 圖 ×750



第 9 圖	研磨腐蝕		×80	打撃前
第 10 圖	打撃數	11020	×80	
第 11 圖	打撃數	11475	×80	
	破壊打撃數	11510		
第 12 圖	研磨腐蝕	打撃前	×150	
第 13 圖	打撃數	400	×150	
第 14 圖	同 上	1100	×150	
第 15 圖	同 上	2000	×150	
第 16 圖	同 上	3100	×150	
第 17 圖	同 上	4000	×150	
第 18 圖	同 上	5000	×150	
第 19 圖	同 上	6000	×150	
第 20 圖	同 上	7000	×150	
第 21 圖	同 上	7420	×150	
第 22 圖	同 上	8003	×150	

但 AA 線は第 21 圖 AA 線に相當す破壊打撃數 8189

第 23 及び 24 圖は夫々疲労破れ及び衝撃破れを横切る面を研磨腐蝕したるものにして前者に於ては破れが結晶界を後者に於ては已に生じたる破れの延長に進むを認むべし。

兩者に就て注意すべきことは後者に於ては破れの兩側に此に平行なる歪像 (Strain Figure) S を見るに反し前者には之を見ず。

第 25 及び 26 圖は夫々第 23 及び第 24 圖を擴大したるものにして後者には破れに平行なる特異の歪像 S を見ると雖前者には之を見ず。

軟鋼破面 (第 5 圖 5) の凸凹を去りて研磨しピクリン酸液にて長く腐蝕したる後流水にて靜に腐蝕液を驅除す。然る時は著しき應力を受けしところは褐色となり之を検鏡するときは其内にある鋼滓は鐵鏽にて縁取らるゝを見る。之れ鋼滓の周圍が繰返應力の爲め弛緩するに依る。

第 VI 章 迂り面、腐蝕性、並に打撃動量相互の關係

こり面と腐蝕性

断面四角なる軟鋼試料の打撃面に直角なる面を研磨腐蝕し打撃の繰返によりて遂に破壊したる時之を檢鏡するに刻目の左右或範圍に亘りてこりを見る。此試料を鹽化銅安母尼亞液にて處理したるにこり面の存在する範圍のみ撰擇腐蝕を受くるを認めたり。

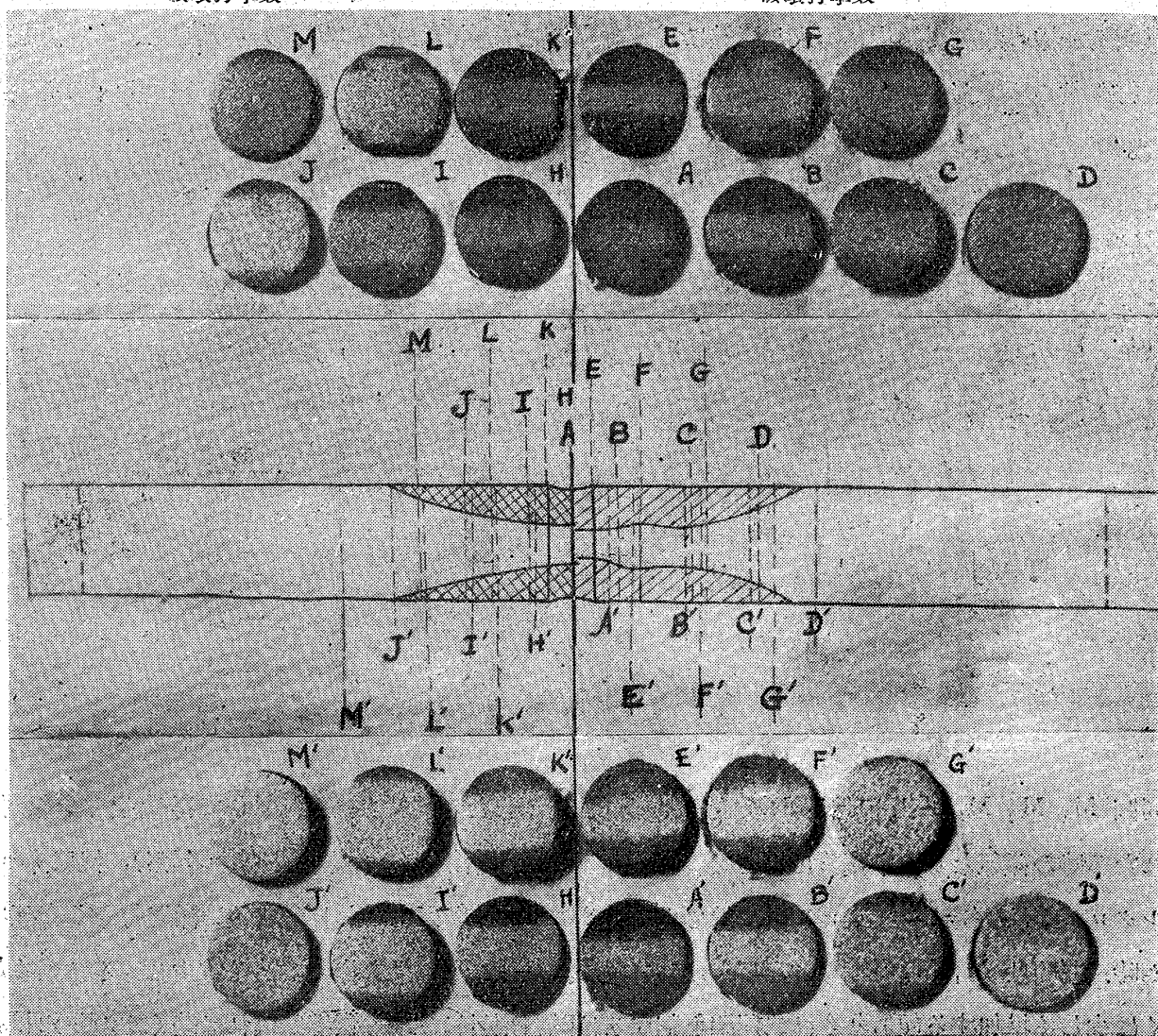
打撃働量と腐蝕性

燒鈍したる軟鋼試料を働量 17.25 及び 50 珪糧にて繰返打撃したるに夫々 28331 及び 4688 回にて破壊したるを以て第 28 圖の如く試料を僅かの間隔にて切斷し例ば働量 50 珪糧の場合には一破片は刻目より AA', BB', CC', DD' 他の破片は同じく EE', FF', GG', なる細片を得。是等を鹽化銅安母尼亞液にて腐蝕したるに同圖上下段右方の如く腐蝕され(第 5 圖及び第 IV 章参照)撰擇腐蝕を受くる部分は結局中段右方の斜線を施したる部分に相當す。働量 17.25 珪糧の場合も前と同様にして左方の如き圖を得。則ち働量大なる程撰擇腐蝕を受くる部分の分布大なるを知る。

第 28 圖

打撃働量 17.25 珪糧
破壊打撃數 28331

打撃働量 56 珪糧
破壊打撃數 4688



打撃働量と迂り面

上の兩實驗より明なる如く打撃働量大なる程迂りの發達する範圍廣し。

第 VII 章 繰返打撃並に繰返加熱處理の電氣抵抗に及ぼす影響

試料の兩端を蓄電池兩極に連絡し其中間 135 耗を隔つる 2 點間の電位差を測定するに Leeds & Northrup 製電位計を以てし此電位差と試料を流るゝ電流とより試料の抵抗を見出す。次に破壊打撃數の 10 乃至 25 % 丈打撃したる後同様に抵抗を測定し 950—189 LC, 900—15 SC なる再熱處理を行ひ再び同様に抵抗を測定したるに次の如き結果を得たり。

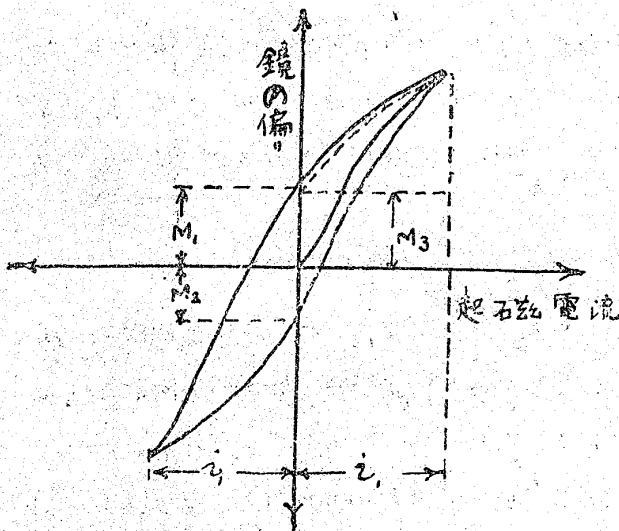
測定回数	試料溫度	繰返打撃前	繰返打撃後	再熱處理後
52	20°C	$1237 \times 10^{-7} \Omega$	$1215 \times 10^{-7} \Omega$	$1240 \times 10^{-7} \Omega$

則ち繰返應力を與ふるときは抵抗を増し再熱處理に依つて之を減するを知る。

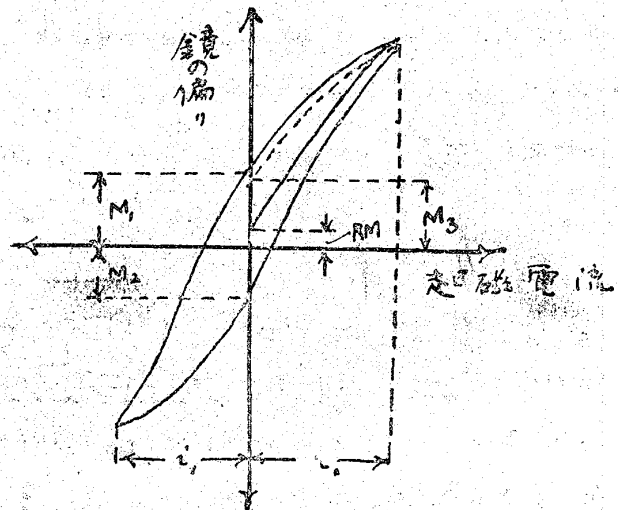
第 VIII 章 繰返打撃の磁性に及ぼす影響

試料を一方の起磁回線中に挿入し回線に電流を通じ磁氣履歴線 (第 29 圖) を畫かしめ次に試料を破壊打撃數の 10 % 丈打撃する毎に起磁回線中に挿入し前と同様にして磁氣履歴線 (第 30 圖) を畫かしむ。

第 29 圖



第 30 圖



同圖 M_1 M_2 M_3 は残留磁氣 RM を一旦磁場に置かれたる試料を繰返打撃して再び起磁回線に挿入したる時の磁氣なり。本實驗に於ては RM/M_1 は焼鈍炭素鋼, 健淬炭素鋼 ($C=0.45\%$), 健反淬ニッケルクロム鋼, 健淬ニッケルクロム鋼に就て夫々約 8. 50. 60. 90 % を示し且磁化並に繰返打撃を交互に行ふ時或期間は M_1 M_2 M_3 及び RM の値は段々減少すれども此を過ぐる時は減少せざるに至るか若くは少しく増加する傾あり。此二期間を劃するは試料刻目に生ずる發端的破れに基くものの如し。

第 IX 章 疲勞せる材料の抗張試験成績

焼鈍軟鋼試料 (第 2 圖 d=14 耗, r=10 耗) を繰返打撃し破壊打撃數の 50, 70, 80, 85% に至りたる時之を取脱して全然打撃せざるものと共に中間約 80 耗の長さを徑 12 耗に仕上げ抗張試験機に取付けマルテンスエキテンソメーターを附して應力歪圖を作り後破斷力伸長並に斷面收縮を測定したる結果は第 31 圖及び其附表の如し。同圖に於て各試料の彈性率は略同様なれども比例限界は打撃の繰返數多き程高し。(3) (4) 破斷力は其附表に見る如く何れも同様なれども打撃を豫め受けざるものは平行部の中央より切れるに反し繰返打撃を受けたるものは平行部の端に近きところにて切斷す。之れ繰返打撃によりて強くなりたる中央數廻の間を避け其影響なき部分にて切れる爲めにして従て破斷力斷面收縮等は相互相似通ひたり。((3)Muir Phil. Trans. Roy. Soc. A. Vol. 193; (4) do. do. A Vol 198)

第 X 章 發端的破れ

試料を繰返打撃する時は刻目の部分に於て結晶内並に結晶相互間に迂りを生じ鋼滓の存在せる場合には鋼滓と鋼との間が弛緩し打撃繰返が或程度を超ゆる時は遂に原子引力が作用せざる程度の空隙を生ず。則ち健康状態より疲勞状態を経て初めて破壊状態に入り發端的破れを生ずるを常とす。

發端的破れの時間測定

1. 試料温度の上昇

第 4 圖の如く準備したる試料を繰返打撃せば打撃數の重ると共に最初温度は上昇し中頃一定となり其後極めて僅少の上昇傾向を保ち最後に著しき上昇を見るや暫時にして破壊す。斯く中頃一定となりたる後極めて僅少の上昇傾向を示し始むる時は發端的破れの時なり。第 32 圖は軟鋼の場合の一例とす。

2. 朱肉塗抹

破壊打撃數の例は 40 % 丈繰返打撃したる後休止し試料刻目に朱肉を塗り付くる時は肉眼的に檢出し難き破れの内部にも克く染み込ましめ得るものなるが故に塗抹後表面に残る餘分の朱肉を全部拭ひ去り再び繰返打撃して破壊したる時破面に朱肉の附着せるは塗抹の時已に破れの生じたるを示す。

第 2 表各種鋼試料に就て發端的破れを測定したる結果並に此と其他物理的性質との關係は夫々第 5 表並に第 6 表(第 33 圖)の如し。

第 5 表

鋼種	熱處理	試料寸法	温度測定		朱肉塗抹		備考
			試験數	$\frac{IBN}{TBN} \times 100\%$	試験數	$\frac{IBN}{TBN} \times 100\%$	
極軟鋼	燒鈍	第2圖d=14mm,r=10mm	1	65	2	57	IBNは發端的破れ迄の打撃數
軟鋼 I	同上	同上	2	59	4	56	

半硬鋼	同上	同上	2	45	2	52	
硬鋼	同上	同上	2	63	2	66	
半硬鋼	健反淬	第2圖d=13mm, r=5mm	—	—	4	25	TBN は破壊打
ニッケル鋼	健反淬	同上	—	—	8	27	擊數
ニッケルクロム鋼	同上	同上	—	—	3	33	

第 6 表

鋼種	C %	熱處理	試料寸法	硬度 B.N.	$\frac{IBN}{TBN} \times 100\%$	發端的割れ迄の打撃數 (IBN)	破壊打撃數 (TBN)
極軟鋼	.03	燒鈍	第2圖d=14mm, r=10mm	* 94	57	4200	7.408
軟鋼 I	.16	同上	同上	94	56	4400	7.881
軟鋼 II	.22	同上	同上	100	—	—	8.883
半硬鋼	.45	同上	同上	—	50	5500	11.000
半硬鋼	.50	同上	同上	150	—	—	10.959
硬鋼	.74	同上	同上	220	68	5900	9.062
半硬鋼	.37	健反淬	第2圖d=13mm, r=5mm	180	25	1200	4.657
ニッケル鋼	.28	同上	同上	220	27	1600	5.827
ニッケルクロム鋼	.36	同上	同上	254	33	2300	7.032

備考 * 極軟鋼試料硬度の比較的高かりしは其中央に凝離の存在せしに依る。

ニッケルクロム鋼を第 7 表の如く熱處理して第6表に準じて試験したる結果は第7表(第34圖)の如し

第 7 表

熱處理		打 擊 數		$\frac{IBN}{TBN} \times 100\%$	備 考
健 淬	反 淬	發端的破れ迄 (IBN)	破壊迄 (TBN)		
850-300 Q	—	17000	19517	86	試料形狀 d=13mm r=5mm 打撃働量 = 30 kg.cm
"	205-240	17000	21909	78	
"	330-200Q	18000	23918	75	
"	378-200Q	16500	23288	71	
"	447-200Q	9670	17806	54	
"	502-200Q	5960	12354	48	
"	547-200Q	3900	8830	41	
"	601-200Q	2100	6603	35	
"	650-200Q	1500	4926	31	
燒鈍	880-303C	1900	3856	50	

第 XI 章 疲勞恢復試料

A 試 料

試料の化學成分熱分析等は第 1 章に記したるが如く各種鋼に施したる熱處理試料寸法、打撃働量、破壊打撃數、各種再熱處理(次節 B 参照)後の破壊打撃數は第 8 表の如し。

第 8 表

鋼 種	試料寸法	試料製作		打撃働 量 (kg.cm)	破壊打 撃數	各種再熱處理後 の破壊打撃數
		熱處理 前	熱處理 後			
極軟鋼	第2圖d=14,mmr=10,mm	950-360 900-15	—	30	6770	7408

軟鋼 I	同上	同上	—	同上	7476	7884
軟鋼 II	同上	同上	—	同上	8151	8893
半硬鋼	同上	850-180	850-30 SC	同上	10959 *	10959
硬鋼	同上	同上	同上	同上	9061 *	9062
半硬鋼	第2圖 d=13mm, r=5mm	同上	850-30 OQ 650-20 OQ	25	4657 *	4657
ニッケル鋼	同上	同上	同上	同上	5827 *	5827
ニッケルクロム鋼	同上	同上	同上	同上	7032 *	7032

備考 * を付したる破壊打撃數(行 F)は各種再熱處理したる後の夫と略同様な故行 G の値として行 F の成績を採用せり

B 恢復熱處理並に恢復率

或種鋼試料に就き破壊打撃數の平均を求め同種鋼試料を例ば其 15, 22.5 及び 30 % 繰返打撃(假に部分繰返打撃と言ふ)し全然打撃を受けざる試料と共に再熱處理を施す、然る時部分繰返打撃を受けしものの破壊打撃數が全然打撃を受けざるものの夫に對する比は疲勞恢復程度を示すものにして恢復率と稱し得べし而て再熱處理は常に二段となり。例ば 1000-90 LC, 900-15 SC; 730-320 LC, 850-30 SC; 850-180 LC, 850-30 OQ 650-20 OQ となり第一段 LC の附くものは疲勞を恢復せしむる目的の熱處理にて恢復處理と稱し得べく第二段のものは全試験を通じて同一組織を得る目的を以て施行し焼鈍極軟鋼軟鋼に於ては 900-15 SC 焼鈍半硬鋼、硬鋼の時は 850-30 SC 健反淬鋼の時は 850-30 OQ 650-20 OQ とす。

C 參考試験

a 刻目の仕上程度と破壊打撃數との關係

刻目を可及的丁寧に仕上げ極微の凸凹にても之も少くする程破壊打撃數を大ならしめ個々の成績の變動を少からしむ。

b 中途休止の影響

試料が破壊する迄打撃せず中途 1 日又は 2 日休止したる後再び繰返打撃したるに破壊打撃數は中途休止を爲ざる場合と同じ。

c 疲勞と結晶の成長との關係

極軟鋼試料を繰返打撃破壊し 650-60; 760-60; 850-60; 900-60; 920-60 SC; 940-60; 960-30 SC; 960-60 SC; 1030-30; なる再熱處理をなし刻目部を研磨し 10 % 硝酸酒精液にて腐蝕したるに次の如き結果を得たり。則ち始めの數種の熱處理に於ては異常に成長したる結晶あり。940-60 によりて成長したる結晶は肉眼的に消滅したるが檢鏡的には尙小數残り 960-30 SC に於ては異常に成長したる結晶殆どなけれども小數の稍大なる結晶あり。960-60 SC; 1030-30; に於ては異常に成長したる結晶なし。

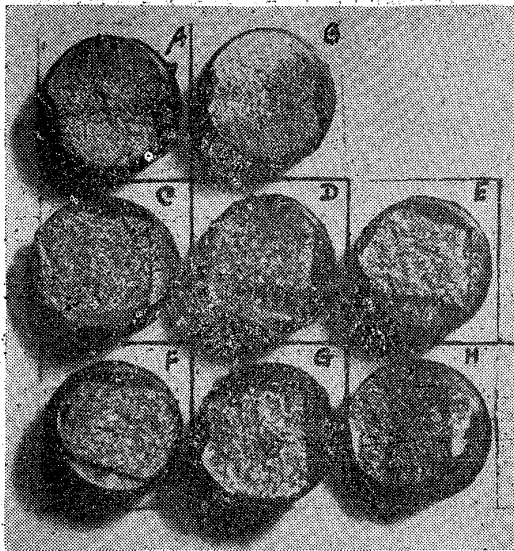
又前と同様な試料を 870-60 LC, 900-15 SC; 900-60 LC, 900-15 SC; 920-60 LC, 900-15 SC, なる再熱處理を行ひたるに次の如き結果を得たり。則ち二重の焼鈍中前の焼鈍によりて異常

結晶を消滅せしめざれば後の焼鈍 900—15 SC にて之を消滅せしむるを得ず。此事實は極軟鋼の恢復率を研究する上に重要な事柄なり。(8) (9) (10) (11)

d 疲勞材料衝擊破面と再熱處理

焼鈍軟鋼試料を繰返打撃破壊したるに其の破面は第 35 圖 A B の如く次に全然打撃せざる儘並に

第 35 圖



破壊打撃數の 80 % 丈打撃して其儘; 900—15 SC; 950—180 LC, 900—15 SC; 950—360 LC, 900—15 SC; 950—600 LC, 900—15 SC, なる熱處理後刻目部を手鋸の一撃にて破折したるもの夫は夫々 C D E F G H なり。但し C 乃至 H の右方弓形は手鋸にて折る爲めの切目にして上下兩方の弓形は C にありては剪斷破れ、D E F にありては繰返打撃によりて最も著しき應力を受けしところに當り脆性破れ、G H にありては脆性破れの代りに小き剪斷破れを見る則ち脆くなりたる材料が再熱處理に依りて再び元の靱性を恢復する事實を示す。

e 疲勞恢復の能否を確むる爲めに行ひたる試験

第 9 表

試料番号	破壊打撃數 TBN	部分繰返打撃數 PBN	LBN TBN	第1次 PBN	第2次 PBN	第3次 PBN	第4次 PBN	第5次 PBN	第6次 PBN	第7次 PBN	打撃總數 ΣPBN	備考
1	4015											
2	4585											
平均	4300											
3		1075	1/4	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1058	7508	165
4				1075	1075	1075	1075	1075	1075	272	6742	
5		720	1/6	720	724	720	721	720	720	2847	7172	139
6				720	720	720	720	720	720	330	4650	
11	5289											
12	4156											
平均	4723											
13		590	1/8	590	590	590	590	590	267		3219	119
14				590	590	590	590	590	590	4524	8066	
15		472	1/10	472	472	472	472	472	472	2405	5237	132
16				472	472	472	472	472	472	4403	7235	

軟鋼試料 (試料製作後の熱處理 = 950—180 LC, 900—15 SC, 試料寸法 = d=14 耗, r=5 耗) の破壊打撃數を求め同種試料に部分繰返打撃 (1/4, 1/6, 1/8 及び 1/10) 及び再熱處理 (950—180 LC 900—15 SC) を交互に行ふこと六回に及び初めの破壊打撃數と部分繰返打撃數の總計とを比較して後者の遙に大なるを知り疲勞恢復の可能なることを確めたり (第 9 表参照)

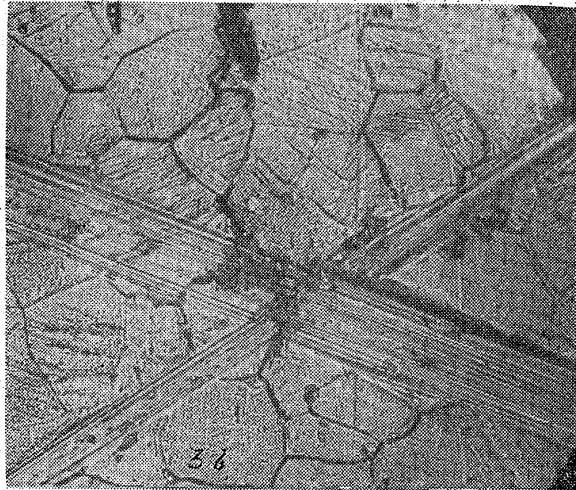
備考 第 7 次部分繰返打撃試験に於ては試料が破壊する迄打撃したり

(8) Chappel, Journ. Ir. & St. Inst. 1914, I
 (9) Körber, St. u. E. 10. Feb. 1925.
 (10) Tammann, Lehrbuch d. Metallographie 1923.
 (11) Hanemann, St. u. E. 9. Juli. 1925.

f じり面と再熱處理

角形軟鋼試料を繰返打撃したるに豫め研磨腐蝕したる面に幾多のじり面を見る。斯の如き試料を眞空内にて加熱する時はじり面は檢鏡し得ざる状態となる第 36 及び 37 圖は其一例なり。

第 36 圖



×150

第 37 圖



×150

第 36 圖は繰返打撃によりて鐵結晶内に生じたるじり面を示し第 37 圖は前圖と同一場所を再熱處理(950—120)したる後の組織を示す。

D 恢復線と一般恢復曲線

各種鋼試料に就き破壊打撃數(TBN)の各平均を求め例へば夫々の 15, 20, 30 %等の部分繰返打撃(PB)をなし或る再熱處理を施し前節に述べたるが如き方法にて恢復率を求めたり。再熱處理は二段よりなるが第一段則ち恢復熱處理の絶對溫度の對數を縦軸とし時間(分)の對數を横軸とする時は恢復率 100 %なる諸點は第 38 乃至 45 圖の如く其鋼特有の熔融點を通ずる或直線上にあるか又は其より上方に在るを以て此直線は恢復線と稱し得べし。此等の圖に於ける實測點の數字は恢復率にして 2 乃至 10 個の平均なりとす。

第 10 表

鋼種	熱處理	試料寸法 (第 2 回 10.2)	打撃 回数 処理	$\frac{PBN}{TBN} \times 100\%$						$\frac{TBN}{TBN} \times 100\%$
				10	15	17	20	22.5	30	
極軟鋼	焼鈍	d=14 r=10	30		13°			8°	5°	57
軟鋼 I					20°			13°	10°	56
軟鋼 II							19°		13°	55
半硬鋼					24°		16°		10°	50
硬鋼					27°		20°		15°	65
半硬鋼	健全	d=13 r=5	25	13°	9°					25
ニッケル鋼				13°		9°				27
ニッケル 20% 鋼				19°		13°				33

又全然打撃せざる試料は再熱處理の要なく其恢復線は縦軸と一致し發端的破れの生じたる時は其恢復は熔融溫度以下にては不可能なるべく恢復線は此溫度を通過する横線となるべし。従て恢復線の横軸となす角度と $\frac{PBN}{TBN} \times 100\%$ の關係は第 10 表及び第 46 圖の如く

く表し得べく、同圖諸曲線は一般恢復曲線と名け得べし。

備考 1. 第 46 圖中各曲線の重複するを避くる爲め横軸を目盛 20 (10 %に相當) 宛上方に移動したり。
又同圖縦軸に沿ふて記入したる 65, 50, 55, 56, 57, 33, 27, 25 なる數字は各種鋼に就て測定したる $\frac{IBN}{TBN} \times 100\%$ の値なり。

同上 2. 極軟鋼に就ても發端的破れを生じたる場合並に少しも打撃せざる場合の恢復線は夫々其鋼の熔融點を通過する横線並に縦軸なること及び $\frac{PBN}{TBN} \times 100\%$ が 15 %及び 22.5 %の時は恢復線の俯角は夫々 13° 及び 8 %なるを知りたる後には他鋼と略同様の一般復曲線を畫くを得べし。此曲線より $\frac{PBN}{TBN} \times 100\% = 30\%$ の時は之に相當する俯角は 5° なるを知る。但し此値は實測するを得ざりし故第 38 圖の如く點線にて示したり。

第 XII 章 結 論

本實驗の範圍に於ては

- a. 應力の繰返によりて材料は脆くなり、衝撃によりて極めて容易に破壊するに至る。適當の熱處理を施せば再び前の強靱なる性質を恢復す。
- b. 應力の繰返によりて衝撃抗力は著しく低下するも抗張抗力は低下せず寧ろ或程度の打撃繰返によりて破斷力並に比例限界を高むるものとす。
- c. 應力の繰返によりて結晶内並に結晶相互間に沁りを起し終に結晶界を走る破れを見るに至る。鋼滓の介在する時は周圍の金屬との接觸が弛み終に此接觸部より破れを生ず。
- d. 應力の繰返によりて材料の電氣抵抗は増し再熱處理によりて再び減ず。
- e. 應力の繰返によりて材料の殘留磁氣は漸次低下し遂に發端的割れを生ずるに至らば減少傾向は止み寧ろ少し増加する傾あり。
- f. 應力の繰返を受けたる部分は然らざる部分に比して電氣陽となれども適當の熱處理にて此性質を失ふ。
- g. 以上の事實に基き之を案するに應力の繰返を受くるときは鋼滓の周圍結晶の境界其の他の瑕瑾部に於ける破壊作用は最も活潑にして終に治癒し難き洞孔を生じ原子引力の働き難き又は働かざる状態となり、前述の如く物理的并に化學的性質の變化を伴ひ材料は疲勞状態となる。
- h. 疲勞したる材料に於て原子引力の作用せざる局部にも再熱處理の爲めに活潑なる原子運動を誘起し振幅の増加によりて引き離されたる原子間も再び引力の作用する状態となり、遂に應用繰返前の状態に復歸するに至るべし。本實驗に於ては或程度の繰返打撃を受けたる試料は適當の熱處理にて再び打撃前則ち疲勞恢復状態となることを確めたり。

更に繰返彎曲應力を受くる試料に於て如何なる物理的並に化學的變化を生ずるやは目下小野式繰返彎曲試験機を使用して研究しつつあるを以て後日此結果に就て報告するを得べし。

本研究は京都帝國大學工學部に於て齋藤松村兩教授指導の下に施行したるものにして茲に兩教授に對し深く感謝の意を表す。

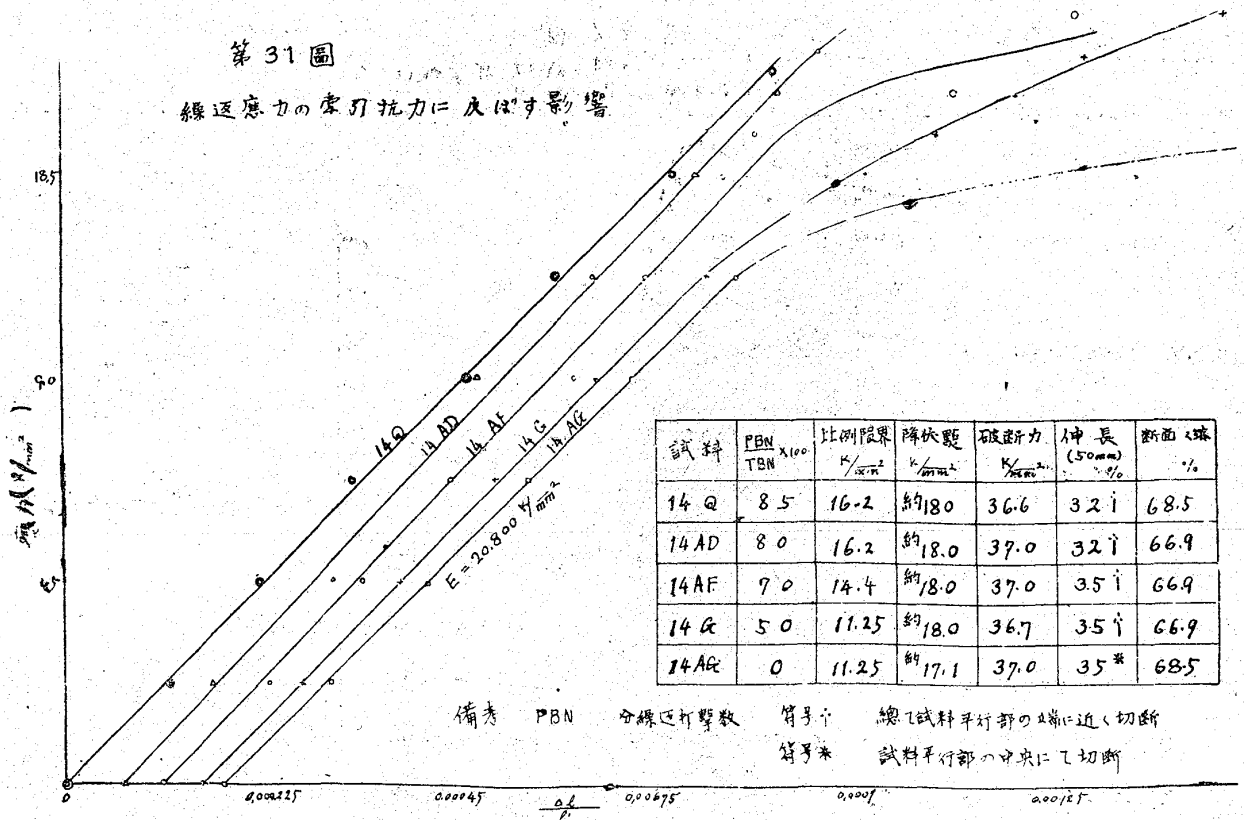
電位測定其他に關し松原教授其他の教官各位の指揮を仰ぎたる事少からず。試料並に鋼製坩堝製作は汽車製造株式會社の好意に待ちしところ多く特種鋼材料は神戸製鋼所の寄贈に係るものにして此等各位に對し深厚なる謝意を表す。

本研究中帝國學士院に於ける藤田男爵獎學金を受けたるを以て併て謝意を表す。

大正十四年七月二十日。

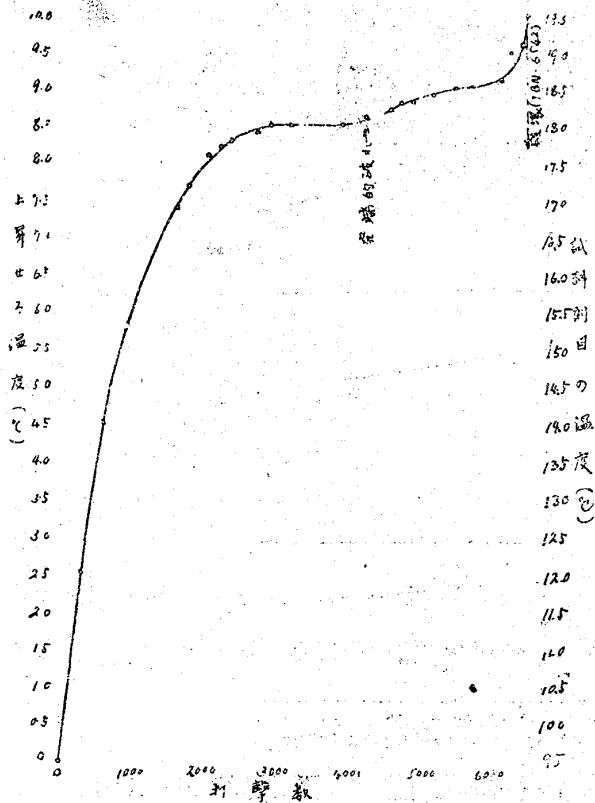
第31圖

繰返應力の索引抗力に及ぼす影響



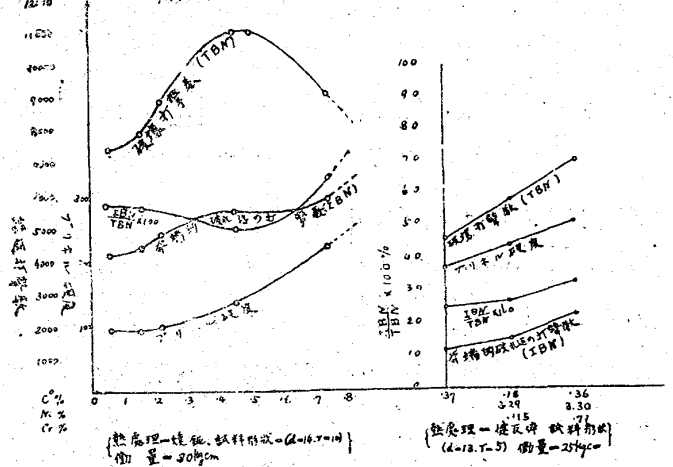
第32圖

繰返打撃と試料の自の温度上昇(鉄鋼、室内温度20℃)

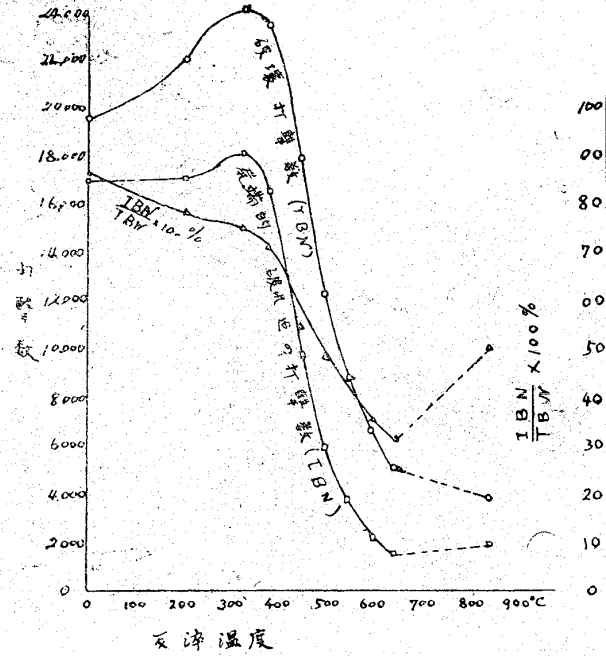


第33圖

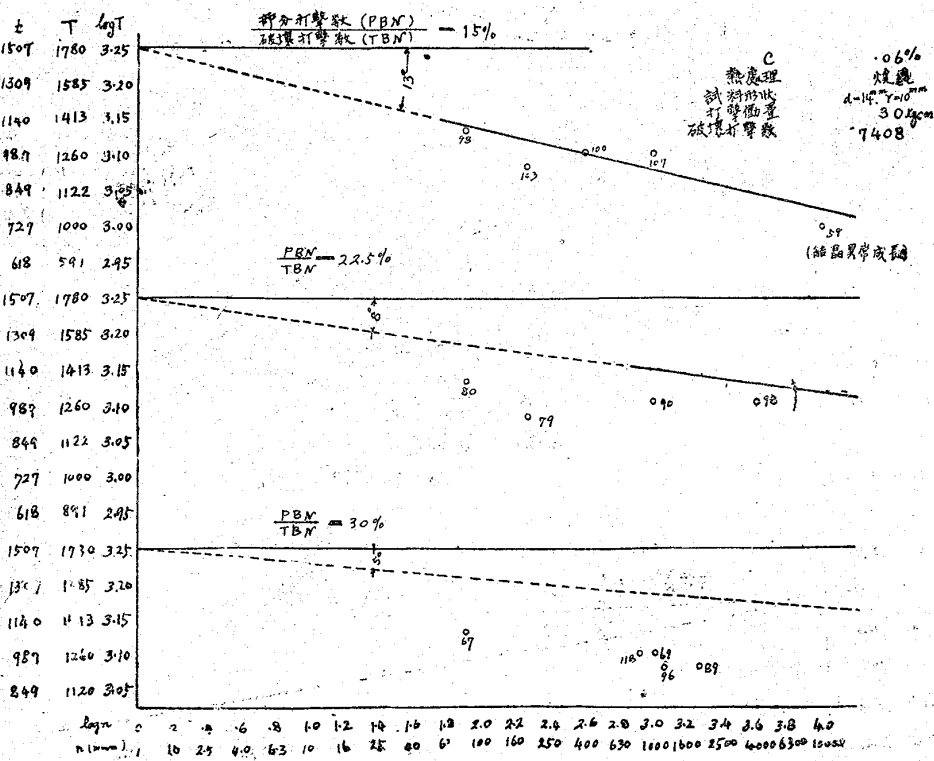
化学成分に熱處理と硬度打撃数との関係



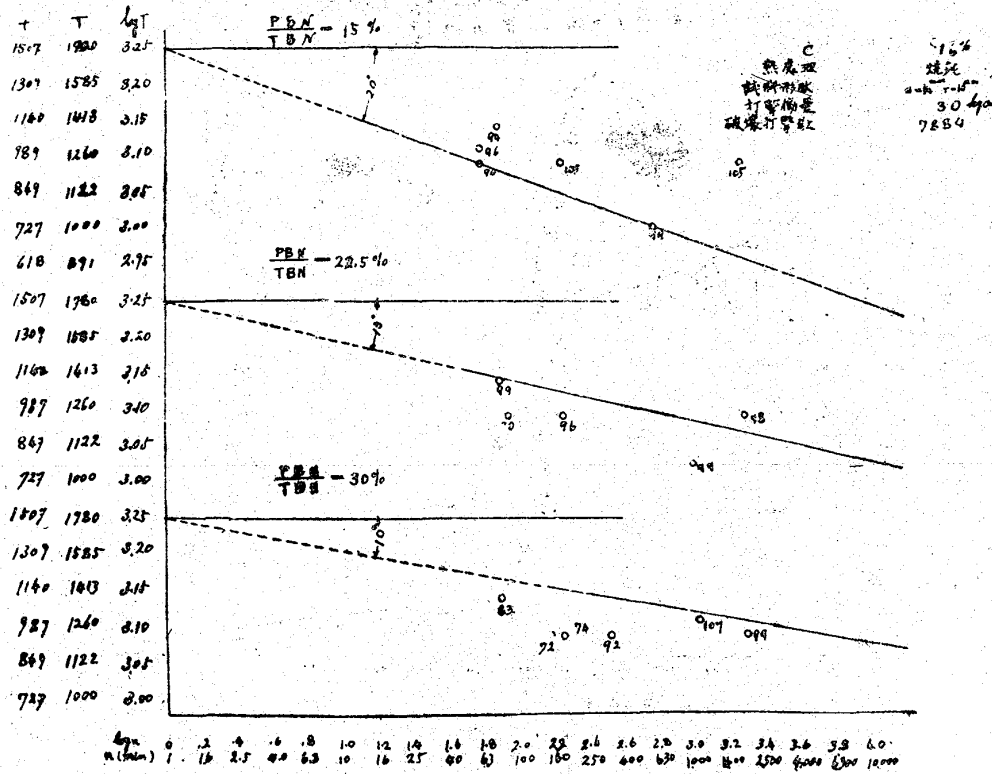
第34圖
ニッケルクロム鋼の破壊打撃数に
及ぼす反淬温度の影響



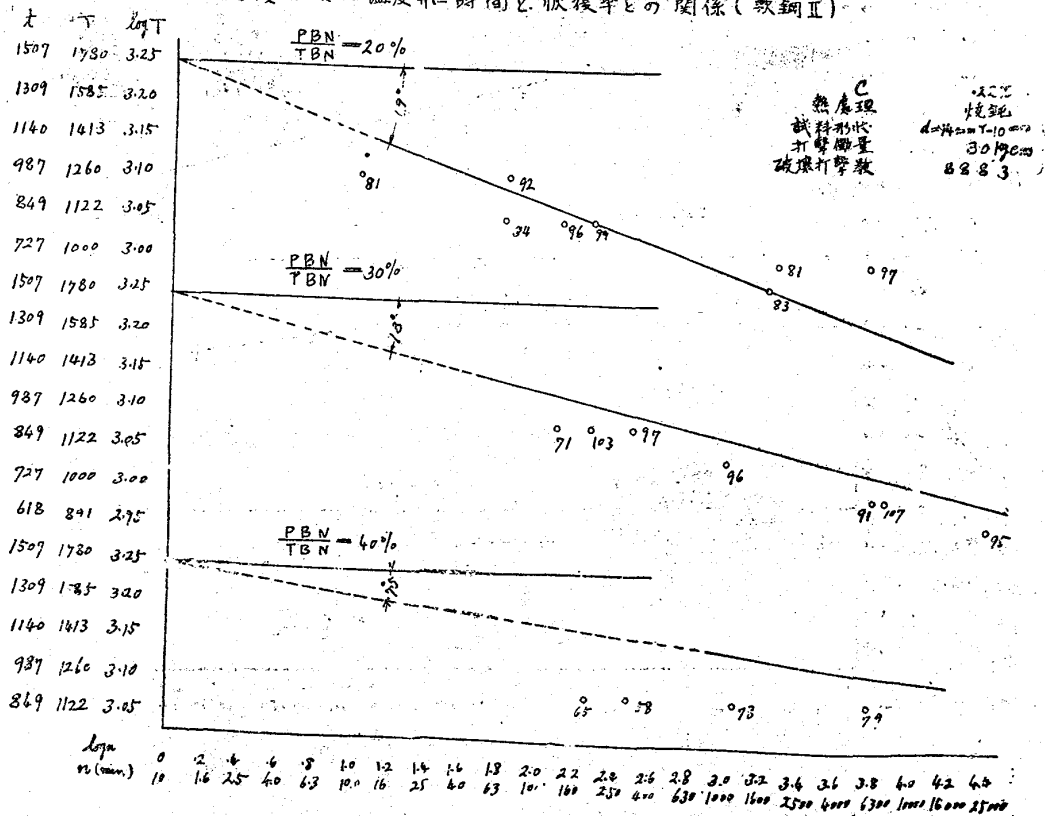
第35圖
恢復熱處理温度并は時間と恢復率との関係 (極軟鋼)



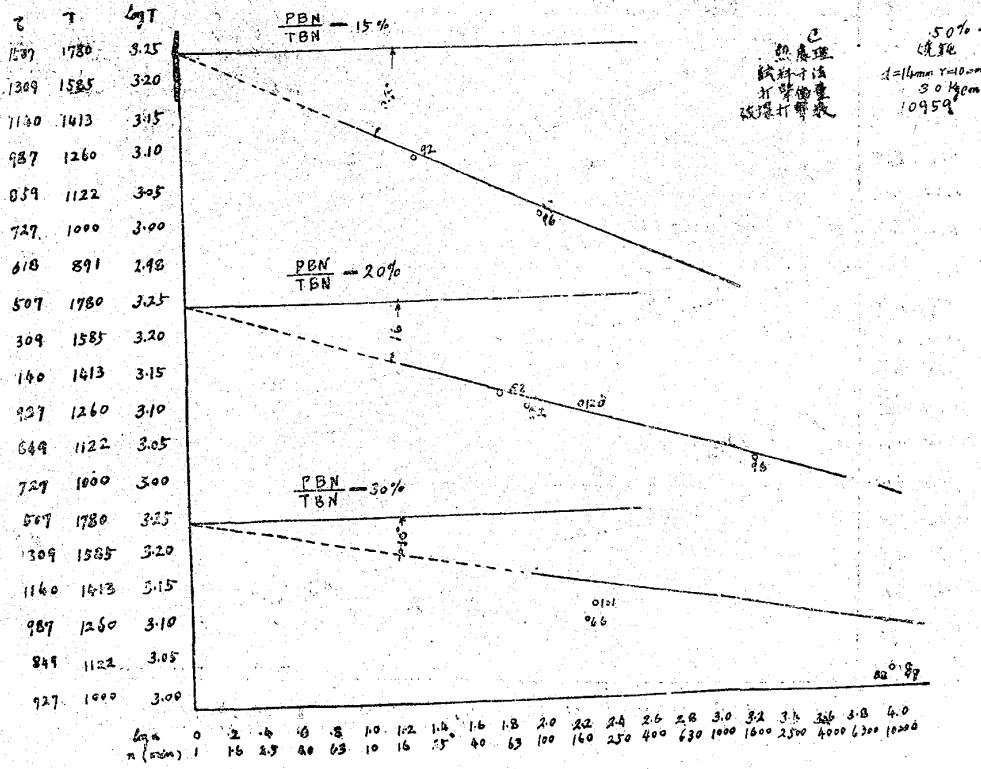
第39圖 恢復熱處理溫度并に時間と恢復率との關係(軟鋼I)



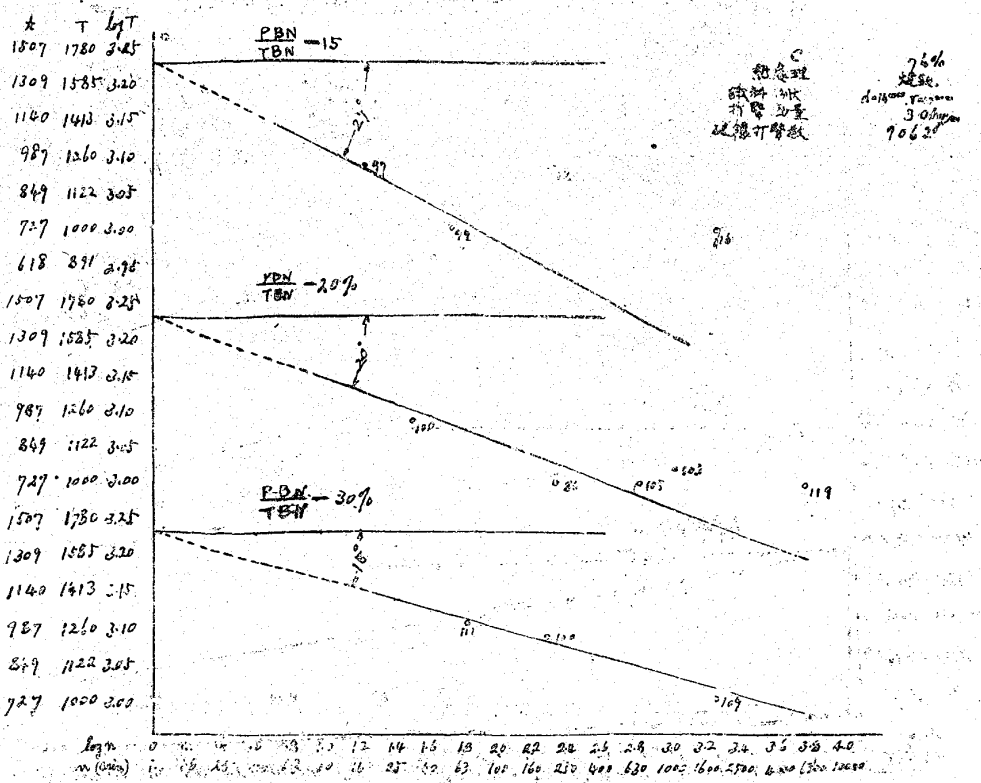
第40圖 恢復熱處理溫度并に時間と恢復率との關係(軟鋼II)



第41圖
恢復熱處理溫度并に時間と恢復率との關係(平政鋼)

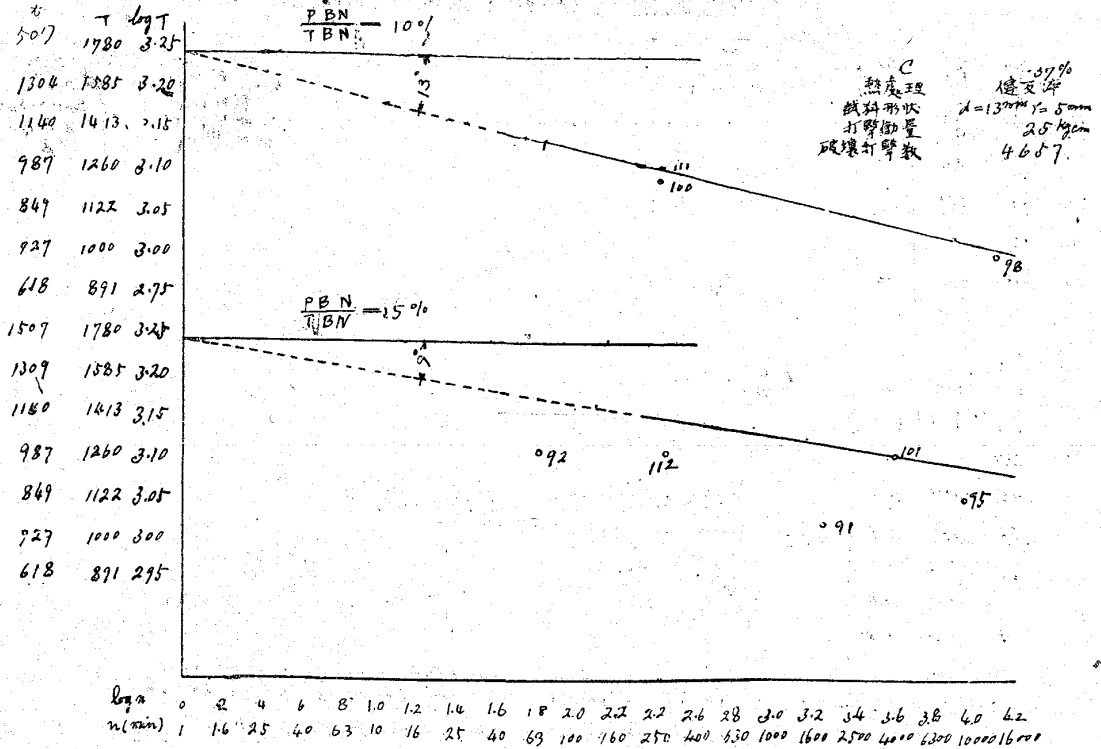


第42圖
恢復熱處理溫度并に時間と恢復率との關係(破鋼)



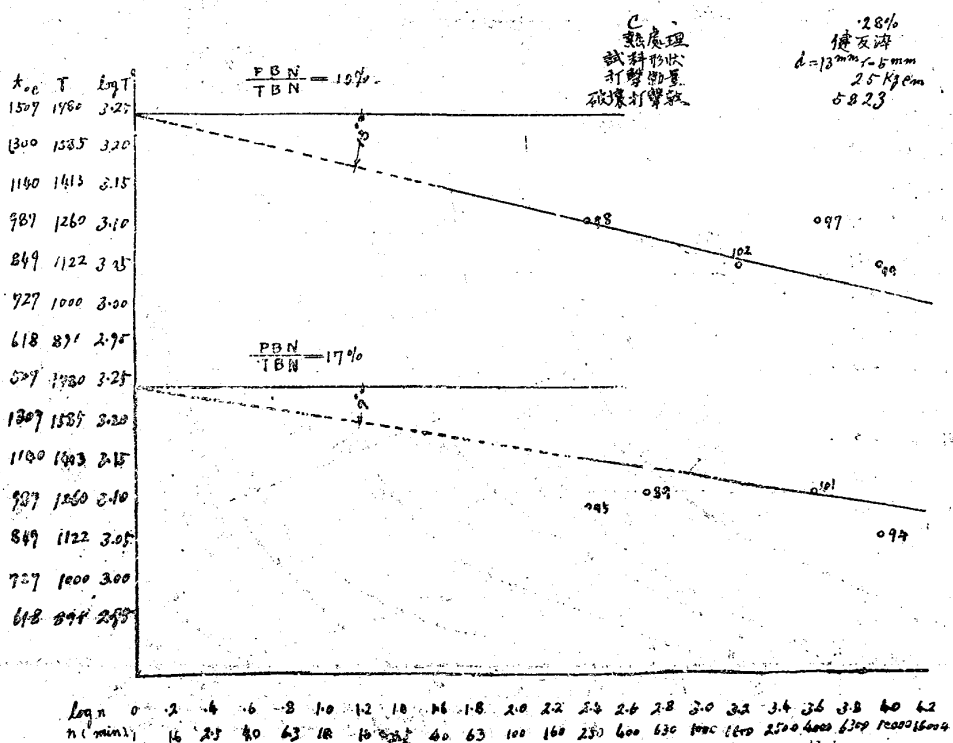
第43圖

恢復熱處理溫度中に時間と恢復率との關係 (平硬鋼)

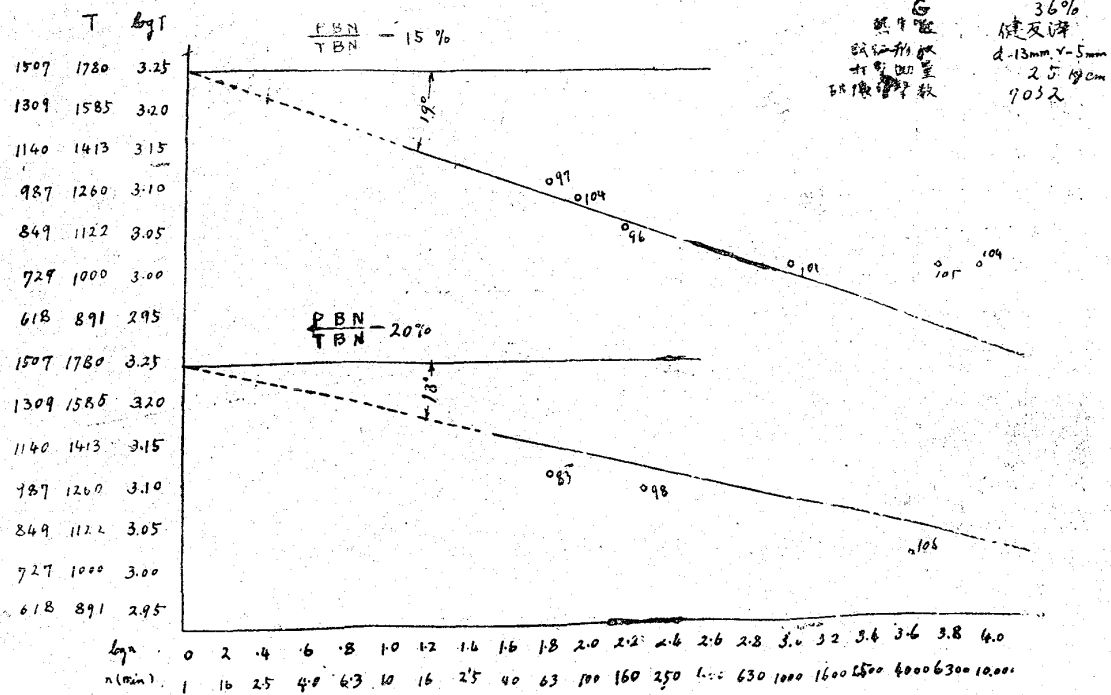


第44圖

恢復熱處理中に時間と恢復率との關係 (ニッケル鋼)



第45圖
 恢復熱處理溫度中に時間と恢復率との關係 (270-700 度)



第46圖
 PBNと恢復線の傾角との關係

