

# 鐵 と 鋼 第十四年 第八號

昭和三年八月二十五日發行

## 論 說

### 鋼の機械的性質に對する溫度の影響 (II)

(昭和二年十一月日本鐵鋼協會第三回講演大會講演)

佐々川 清

#### 第二章 高溫度に於ける衝擊的牽引試験

**概 論** 低炭素鋼に就きて高溫度にて牽引試験を行ふとき鋼の抗張力は  $300^{\circ}\text{C}$  附近に於ては常溫に於けるよりも却つて大にして、それ以上の溫度になれば急激に減少し、高溫度に於ては極めて小なり、延伸率は之に反し抗張力の極大を示す溫度にては著しく減少して所謂青熱脆性なる現象を呈し、それ以上の溫度になれば次第に増大し、甚しき高溫度に於ては 100% になることあり。

既に第一章に述べたるが如く屈曲衝擊抗力は之と全く異り常溫或はそれ以下にては極めて脆弱なるも常溫以上にて靱性を有す、溫度の上昇と共に衝擊値は次第に低下し  $500^{\circ}\text{C}$  附近にて極小、 $650^{\circ}\text{C}$  附近に極大あり、極大を超へれば漸次減少する傾向を有す。斯の如く鋼の抗張力、延伸率と衝擊値とは溫度の上昇に際して全く異なる變化を來すものなるが、此の牽引試験を衝擊的に行ひたる場合は果して普通の牽引試験の結果に一致すべきか、或は屈曲衝擊試験と同じ傾向を採るべきかが、吾人の知らんとする問題なりき。牽引試験に於て其の速度の極めて緩徐なる場合即ち靜的荷重を加へし場合に於ては粘性限界の如き特種なる性質あることを知りたるにより (Revue de Metallurgie 1925. 12月、佐々川清、鐵と鋼昭和2年4月) 更に牽引速度の最大なる場合、即ち衝擊的牽引試験を試みたるものなり。

牽引試験を衝擊的に行ふ場合には普通の牽引試験の場合の如く、最大抗張力と延伸率との關係曲線即ち歪力と歪曲線を畫くことは困難にして破斷に要せし勢力を測る外方法なし (衝擊試験に於て歪力と歪の關係曲線を畫くことは最近各所にて研究せられつつあり、Welter, Körber & Storp 等は鏡装置<sup>(25)</sup>を用ゐて衝擊中の力の變化を畫かしめ靜的並に動的試験の比較研究を行ひたり、但装置猶複雑にして未だ完全なるものに非ず)

然れども衝撃試験に於て破斷に要せし勢力を普通の牽引試験に要せる勢力（曲線にて圍まれし面積を以て測る）或は屈曲衝撃勢力と比すれば以て其の差異を知るに充分なるべし。常溫に於ての牽引試験につき其の牽引速度の影響即ち靜的と衝撃的牽引の比較につきては Branil; Blount, Kirkaldy & Sankey, Mailander; Körber & Sack 等數多の研究ありしを見れども、高溫度に於ける衝撃的牽引試験につきては其の例極めて乏しく纔かに Körber & Sack 氏のそれを見るのみなり。

吾人は Charpy 式衝撃試験機を應用し、之を改造して試験桿を目的溫度に熱したる儘、即ち溫度低下の誤差を極小にして、牽引的衝撃試験を試みんとせり、實驗は炭素量異なる3種の炭素鋼（フェライト鋼、フェライト、パーライト鋼、パーライト鋼）ニツケル、クロム鋼（ソルバイト鋼）及び不銹鋼（オーステナイト鋼）等につき行ひたり。

吾人の實驗裝置 吾人の實驗に用ゐたるは Charpy 式 30 kgm. 衝撃試験機にして振子の後部に螺子を切り、之に試験桿をねじ込み試験桿の他端には鋼片をつけ振子が落下するとき之が試験機に附せる特別なる突き出しに當り試験桿は切斷され振子に残れる勢力は振子の上昇角度にて測定し、振子の最初有せし勢力との差により試験桿に吸収せられたる勢力（衝撃値）を計算し得る様にせり、第二十七、二十八、二十九及び第三十圖は此の裝置を示す。

試験桿の寸法次の如し

中央部は特に細く直徑 6.4mm 長さ 50 mm 標點距離 45 mm にして此の部分が衝撃に際し働く様にせり。

試験桿を熱し且つ衝撃破斷の瞬時迄目的の一定溫度に保持せんが爲特別なる加熱裝置を施せり（第二十七、二十八圖参照）即ち試験桿は電氣爐にて熱せらる、電氣爐は長は試験桿の中央部の2倍半あり、鐵管にして之に石綿及びアランダムを巻き、其の上にニクロム線を中央部は粗く兩端に密に巻けるものなり、900°C 迄の熱度に堪ふ。電氣爐の重量は全く試験桿の一端に附せる鐵片に掛り、衝撃に際し、此の電氣爐の爲の勢力の損失無き様に防ぐ、試験桿切斷せる時は試験桿の半分と共に地上に落ち、試料の他の半分は振子と共に上昇す。

試験桿は第二十九圖の如き位置（振子の最高位置）にて電氣爐に電流を通じて熱せらる、溫度は第

25) Welter:—Zeitschrift für Metallkunde XVI p. 6. 1924; XVI p. 213. 1924; XVII p. 109. 1925.

26) Körber & Storp:—Mitteilung K. W. I für I. F. VII p. 81. 1925.

27) A. Elmondore:—American Soc. for Testing Materials. June. 1922.

28) H. F. Moore:—

29) Margerum:—

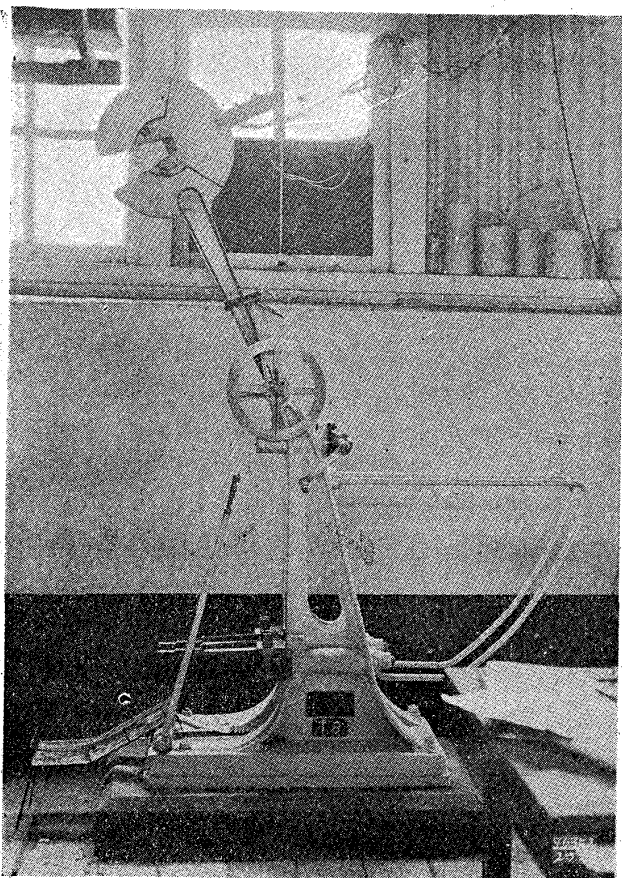
30) Brevil:—Revue de Mécanique 1908.

31) Blount, Kirkaldy & Sankey:—Inst. of Mech. Eng. May, 1910.

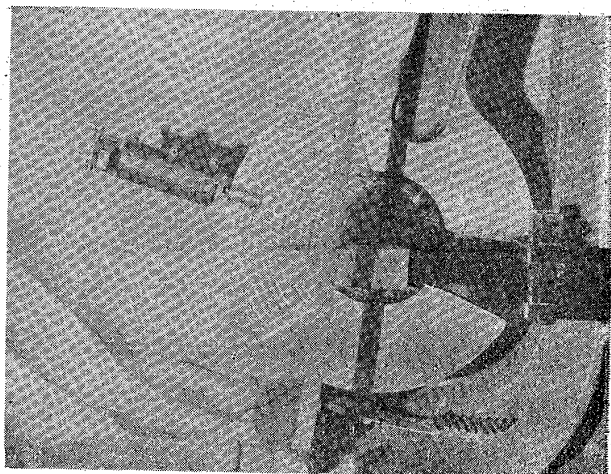
32) Mailander:—Stahl u. Eisen p 1108. 1923.

33) Körber & Sack:—m.t. K. W. I für I. F.

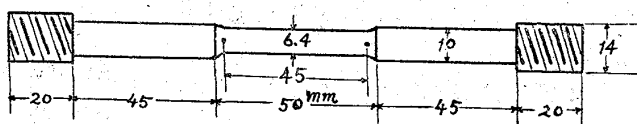
第二十九圖



第三十圖



第三十一圖



二十七圖(附卷后)の如き位置にて Pt 及 Pt-Rd の熱電對にて測定せらる、目的は温度に一定時間(15分)熱せる後、熱電對は除かれ電流は切られ振子落下し試料の一端に附せる鋼片は突き出しに當り試験棒切斷す。電流を切りてより試料切斷迄2秒なり、猶電氣爐の一端には石綿を詰めたるにより温度の低下は極めて少なし。

第二十九圖は装置全部及び試験棒加熱の方法を示し、第三十圖は試験棒の正に切斷せられんとする位置を示す。

此の方法に依れば従來の高温度に於ける衝擊試験の缺點なる試験温度不精確を除き得るなり。

衝擊切斷に要せる勢力は次の式により計算し得。

$$(P_0 + p)d(1 - \cos r) = (P_0 + P')d'(1 - \cos \alpha) + II_1 + II_2 + T$$

$P_0$  = 振子の重量

$p$  = (電氣爐+鋼片+試験棒の半分)の重量

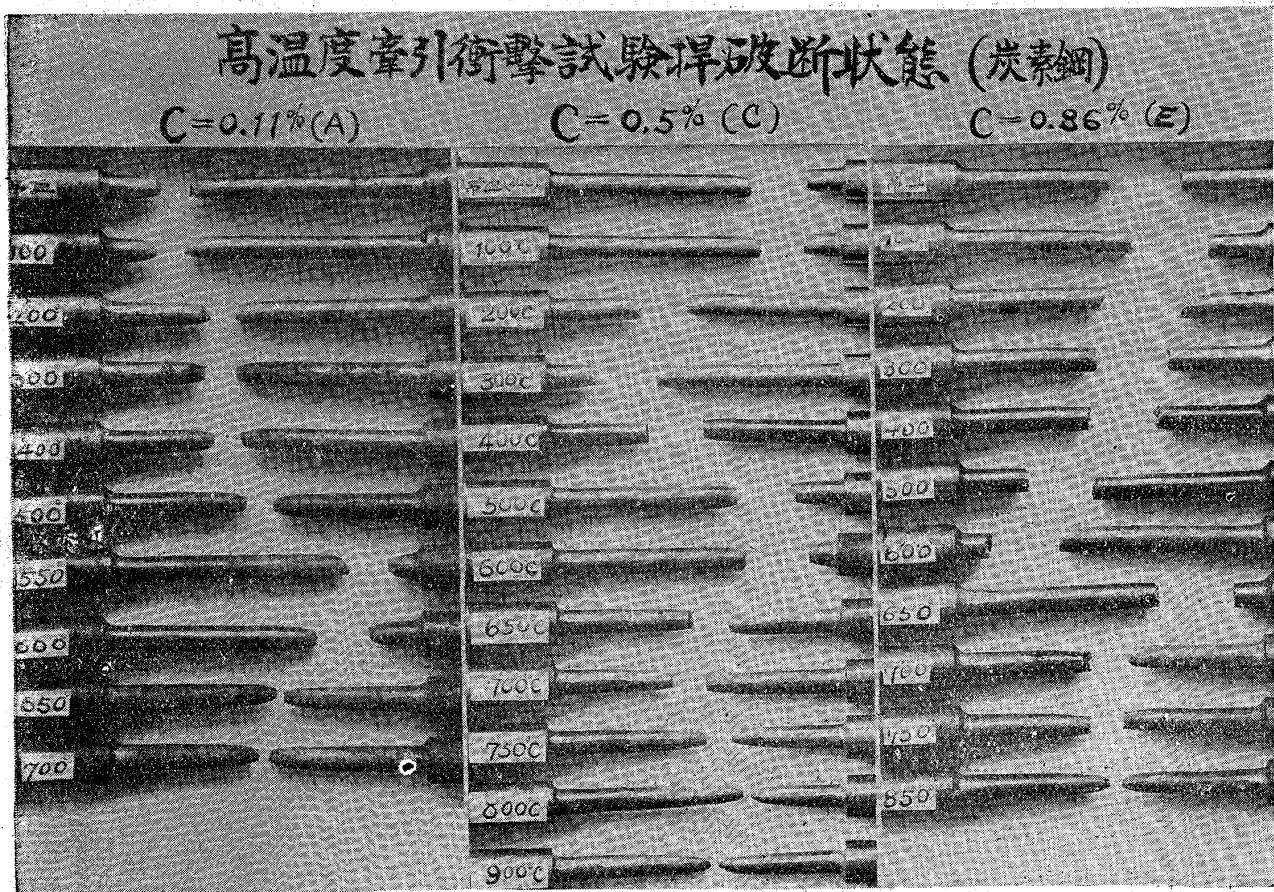
- $p'$  = 試験桿半分の重量
- $d, d'$  = 衝撃前後の重心の位置(支點より)
- $r$  = 振子最高位置の角度
- $\alpha$  = 衝撃後上昇せる振子の角度
- $II_1, II_2$  = 機械的摩擦及び空氣抵抗による損失
- $T$  = 試験桿切斷に要せし勢力(衝撃値)

上式より衝撃後振子の上昇する各角度に對する衝撃値を計算し表を作れり。

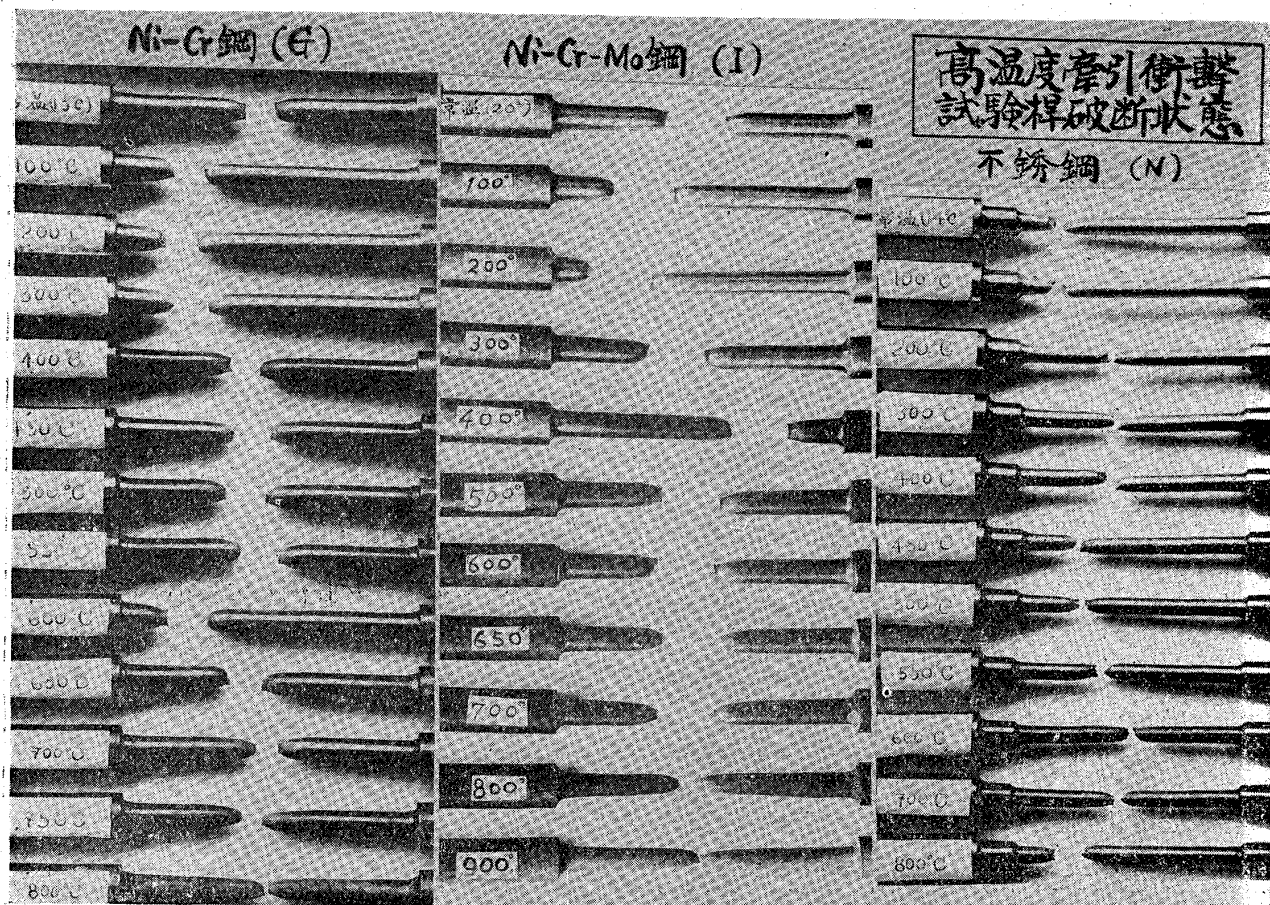
試験に供せし鋼材 實驗に供せし鋼材の分析成分並に熱處理は次の第六表の如し、本表中炭素鋼は焼鈍状態にて試験せるが故に(A)極軟鋼はフェライト、(C)半硬鋼はフェライトとパーライト、(E)硬鋼はパーライト組織を有す、二種のニツケルクロム鋼は調質せる緻密なるソルバイト鋼にして其の内(I)は少量の Mo を含有す。不銹鋼(N)は 1,200°C より焼入して完全なるオーステナイトの状態に保てり。

試験桿の寸法は前述せるが如くなるが不銹鋼(N)は此の寸法にては 30 kgm の試験機にて切斷不可能なるにより試験桿の寸法を減じ標點間の直径及び長さを小にして  $L=33.3\text{mm}$   $d=4.6\text{mm}$  となせり

第三十二圖



第三十三圖



第六表 (第一第三表参照)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	熱處理
極軟鋼(A)	.11	.12	.05	.017	.008	-	-	-	-	950°C焼鈍
半硬鋼(C)	.50	.19	.31	.021	.031	-	-	-	-	900°C焼鈍
硬鋼(E)	.86	.29	.41	.020	.031	-	-	-	-	-
ニッケル クロム鋼(G)	.25	.11	.36	.027	.026	3.72	.71	.18	-	820°C油焼 650°C油戻
ニッケル クロム モリブデン鋼(I)	.29	.29	.71	.026	.015	2.40	.78	.21	.73	-
不銹鋼(N)	.39	.07	.38	.046	.011	9.07	16.64	-	-	1200°C水焼

(佛式標點寸法の  $L = \sqrt{66 \cdot 67 S}$  なる式より算出せり、 $L$  は標點間距離、 $S$  は断面積なり)

**實驗結果** 實驗結果は第七表乃至第十二表に一括す、試験桿破断の状態は第三十二及第三十三圖寫真に見るが如し、衝撃牽引試験に於て吾人の測定せしは次の各項なり。

1. 破断に要せし勢力、 $T$  試験桿の破断に要したる全勢力を  $\text{kgm}$  にて表はしたるもの。
2. 比勢力、 $T'$  破断に要せし全勢力を破断に際し勢力を吸収したる部分 (即ち直径小なる中央部) の體積にて除したる數値  $\text{kgm}$ 。
3. 延伸率  $A\%$  45mm の標點間の延伸率を  $\%$  にて表はせるもの。
4. 平均張力、 $T/A$  單位面積に吸収せられし勢力を延伸率にて除したる數値にして  $\text{kg/mm}^2$  にて表はさる。牽引試験に於て歪力と歪の曲線にて圍まれし面積は破断に要せし勢力を表はすものなるが故に逆に勢力を延伸率にて除して平均抗張力に類似せるものを計算により出したるなり。
5. 断面收縮率、 $C\%$  破断せる部分の收縮率なり。

6. 收縮率、 $C\%$  破斷せる部分より 15mm 距りたる部分の收縮を測定せり、局部的收縮を蒙ること  
 少なき部分の收縮率なりとす。

比勢力（即ち衝擊値）、延伸率、断面收縮率及び平均張力と溫度との關係曲線は第三十四圖及び第三  
 十五圖に一括せり、同圖中には第一章に述べたる、屈曲衝擊曲線をも併記せり屈曲衝擊に要せし勢力  
 の數値は試片の切斷單位面積にて表はし牽引衝擊値は單位容積に吸收せられし勢力なるを以て直ちに  
 其の數値を比較することは困難なるも、これ等の溫度に對する關係に就ては勿論比較し得るものな  
 り。

A. (フェライト)鋼 衝擊値は常溫にて最大にてそれより溫度上昇すると共に低下し 250°C を  
 超へて低下度急にして更に 500°C 以上にて極めて脆性を呈し 570°C にて極小に達す、その値は常  
 溫のその 1/3 に過ぎず極小を超へて激増し 620°C 附近にて極大に達す、750°C 以上にては鋼が柔  
 軟になる爲、試験桿が加熱中に曲り前述せる方法にては試験困難なりしにより、中止せり延伸率は  
 500°C 迄略ぼ同様なるも 550°C にて急減し常溫の半分に足らず。衝擊値に比例して極小を超へてよ  
 り激増す、断面收縮率も亦延伸率と同様の傾向を取る、平均張力は常溫より 500°C 迄減少し 550°C  
 にて急に増し、それより又減少す。

C. (フェライト、パーライト)鋼 衝擊値曲線を見るに 200°C より低下するも 300°C と 400°C  
 の間は殆ど變化なし、400°C を超へて急激に低下し 600°C 附近に極小、700°C 附近に極大を有す、極  
 大點以上の溫度にての衝擊値の低下は餘り大ならず、延伸率及び断面收縮率は衝擊値の極小點に相當  
 する 600°C に極小値を有し、それより溫度の上昇するに従ひ増大す、断面收縮率は 800°C を超えて  
 100% 近くなる、平均張力は常溫より高溫に到るに従ひて減少し 500°C に極小 650°C に極大を有し、  
 極大を越へて急減す。

E. (パーライト)鋼に於ては衝擊値曲線は前2鋼と略ぼ同様の傾向をとり 630°C 附近に極小、730°C  
 附近に極大を示す延伸率、断面收縮率は 500°C 附近迄は殆ど變化なきも、650°C 附近に極小點あり、  
 それより溫度の上昇と共に急激に増加し断面收縮率の如きは 850°C にて 100% に近し、平均張力は  
 常溫に於て最大にして、それより高溫にて低下するも 650°C に再び極大を見、それ以上の溫度にて  
 急激に減少す。

G. ニツケルクロム鋼 (ソルバイト鋼) 調質せるニツケル、クロム鋼に於ては 衝擊値は常溫より  
 300°C 附近迄可成急に低下し 300°C 乃至 400°C 間にてはその低下度少きも、400°C を超へて 550°C  
 附近の極小點まで再び急激なる低下を見る、極小を超へれば衝擊値の増大あり、720°C 附近にて極大  
 に達す、此の中の増加率は炭素鋼に比し緩漫なり、極大點以上にて稍減少するも、其の程度微弱な  
 り、延伸率は 400°C 附近にて少しく増加するも 550°C の衝擊値の極少點に相當して矢張極小を示  
 し、それより高溫にて増大す、断面收縮率曲線も亦同じ傾向をとる、平均張力曲線は炭素鋼の場合と  
 同じく、溫度の上昇に比例して低下し 400°C を超えて變化少なく 650°C に極大を示し、それより急

減す。

Mo を有する I. ニツケル、クロム鋼は前者と稍趣を異にし衝撃曲線に於ては 400°C 附近の變化なく、常温より極小温度なる 600°C 迄略ぼ直線的に減少す、延伸率も亦然り、極小を超へての變化は前鋼と同じ傾向なり、平均張力は常に低下す、但常温より 600°C 迄の低下度は、それ以上の温度に於けるよりも小なり。

N.(オーステナイト)鋼 オーステナイト組織を有する不銹鋼はその衝撃値は常温より 400°C 迄は急に、それより 600°C 迄は緩に 700°C を超えて又急激に減少す、但他の組織の鋼の如き極大極小はなく變化は連続的なり、800°C になれば延伸率にも急減を來す、平均張力も亦初めは急に 200°C を超えて次第に緩に減少するを見る。

高温度に於ける牽引衝撃試験成績

第七表 (A)炭素鋼(C=0.11%)

温度 °C	衝撃勢力 T kgm	單位面積 の衝撃勢力 T' = T / A kg/cm <sup>2</sup>	延伸率 A %	平均張力 T/A/100 kg/mm <sup>2</sup>	断面收縮率 C %	收縮率 (破断部分) C' %
常温(20)	19.62	15.82	37.10	42.76	75.30	24.30
100	18.20	14.65	35.85	40.90	75.60	24.30
200	17.40	14.05	37.70	39.40	74.60	24.25
300	16.32	12.32	35.30	34.95	75.50	22.70
400	13.59	10.90	35.40	30.80	76.20	21.30
500	11.20	9.00	32.15	28.00	76.30	20.60
550	7.71	5.64	17.85	33.10	64.50	8.71
600	11.90	9.61	30.20	32.00	75.30	9.10
650	16.95	13.62	44.00	31.00	81.30	26.15
700	15.82	12.25	39.70	30.90	83.50	25.80

第九表 (E) 炭素鋼(C=0.86%)

温度 °C	T kgm	T' kg/cm <sup>2</sup>	A %	T/A kg/mm <sup>2</sup>	C %	C' %
常温(20)	15.95	12.85	12.90	102.5	19.4	11.85
100	15.59	12.60	13.80	91.4	19.6	12.25
200	15.08	12.18	14.40	84.6	21.3	13.65
300	12.78	10.30	12.30	83.8	19.93	13.65
400	12.26	9.89	12.78	77.9	22.9	10.85
500	11.12	8.98	11.97	75.0	25.4	9.10
600	7.70	6.20	8.07	77.0	20.0	6.65
650	6.26	5.03	6.34	79.5	21.3	6.65
700	16.98	13.70	18.80	72.9	50.6	13.25
750	18.30	14.95	25.70	57.4	70.2	18.80
850	16.70	13.45	55.90	26.0	93.5	30.90

第八表 (C) 炭素鋼(C=0.5%)

温度(°C)	18.12	14.72	21.65	68.0	45.30	19.17
100	18.57	15.10	23.40	64.5	46.50	16.50
200	17.19	13.96	24.00	58.2	46.50	16.50
300	13.34	10.96	19.60	55.9	44.50	15.35
400	13.65	11.05	22.47	49.2	50.60	17.34
500	10.20	8.31	18.45	45.1	47.50	8.00
600	6.24	5.06	16.15	49.9	46.60	9.89
650	16.01	13.09	25.15	59.2	53.35	17.50
700	17.25	14.00	31.50	44.5	65.02	17.90
750	16.96	13.65	46.35	36.4	77.00	22.00
800	15.59	12.67	47.20	26.9	92.15	30.90
900	14.88	12.10	46.70	25.9	95.30	26.40

第十表 (G) ニツケルクロム鋼

温度(°C)	20.3	16.5	22.2	74.4	69.7	76.0
100	18.1	14.7	23.1	63.7	62.0	72.8
200	15.4	12.5	20.5	61.0	66.7	12.8
300	14.5	11.8	22.6	52.5	66.7	11.2
400	14.1	11.5	24.6	47.0	70.0	9.4
450	12.1	9.9	21.4	46.3	73.3	9.4
500	8.8	7.2	15.1	47.7	68.8	6.0
550	8.3	6.8	15.7	45.6	68.8	9.4
600	8.9	7.3	15.1	48.4	66.7	6.3
650	17.3	9.2	19.2	47.9	66.7	12.8
700	12.1	9.9	24.9	39.8	84.0	9.4
750	11.9	9.7	27.5	35.3	90.8	12.8
800	11.6	9.5	35.5	26.8	84.0	28.9

第十一表 (I) ニツケル・クロム・モリブデン鋼

温度 °C	T <sub>Kg/m</sub>	T' <sub>Kg/m<sup>2</sup></sub>	A %	T/A <sub>Kg/mm<sup>2</sup></sub>	C %	C' %
常温 (20)	20.85	16.81	14.98	112.3	58.2	10.78
100	17.88	14.60	13.94	104.7	62.0	8.00
200	16.95	13.67	13.36	102.3	59.4	10.78
300	16.12	13.08	13.95	93.9	63.2	8.63
400	14.63	11.65	12.90	90.4	62.4	7.63
500	11.67	9.42	11.40	82.6	58.2	5.99
600	10.31	8.35	11.06	75.6	60.2	7.10
650	11.73	9.67	15.80	61.1	68.8	7.20
700	13.58	11.30	21.50	52.9	76.1	8.70
800	13.73	11.56	36.40	31.8	84.2	11.65
900	13.87	11.20	45.80	24.5	87.9	21.80

第十二表 (N) 不銹鋼

常温 (20)	24.2	44.7	45.7	97.6	66.2	33.4
100	21.2	38.4	42.2	81.4	66.7	29.6
200	18.5	33.5	48.1	69.7	68.6	29.6
300	16.5	29.8	43.9	67.9	62.9	29.6
400	16.1	29.0	43.5	66.7	69.2	29.6
450	15.9	28.7	46.2	63.5	66.7	31.5
500	15.6	28.2	46.3	60.9	67.9	29.6
550	15.4	27.8	43.0	64.6	60.4	28.0
600	14.8	26.8	44.5	60.2	62.9	28.0
700	13.5	26.6	44.5	54.8	72.8	29.6
800	8.6	16.5	28.5	54.4	72.8	22.3

N鋼の普通試験棒は、アチチス断不能ナリ、特標点間、直径及長さ、 $d = 4.6mm$ 、 $l = 33.3mm$  ナリ  
 $(L = \sqrt{66.67S}$  ナル式ニヨル)

第三章 高温度に於ける機

械的諸性質の比較

高温度に於ける牽引衝撃、屈曲衝撃試験結果の比較

前述せる牽引衝撃試験によりて得たる牽引衝撃値、温度曲線と第一章に示せる屈曲衝撃値温度曲線とを比較するに(第三四圖及び第三五圖参照)

極軟鋼に於ては兩曲線共に温度の上昇と共に低下し 550°C 附近に極小を見るも牽引の場合の方、極小への低下度急激なり、620°C 附近にて極大に達する事は殆ど同じ、極大を超えて屈曲試験の場合は其の低下極めて急なるに對し牽引試験にては大なる差なし。

半硬鋼並びに硬鋼に於ては牽引試験にては常温にて常に最大値を有し 200°C 附近より低下し始め 300°C を超えて又緩漫になり 450°C 附近より急に減少して極小點に達す、之に反し屈

曲の場合には其の傾向全然異り常温にて極めて脆弱なるものも 200°C 附近に到れば却つて韌性を増す、200°C より 450°C 附近迄は殆ど一定にして其の後又脆くなる、600°C 附近の極小の温度は略ぼ同様なり但し牽引の場合は其の低下度急なり極小を超えて急激に増大して極大に達することは兩者共に同じ、極大を超えて屈曲の場合は衝撃値の低下率大なるも、牽引の場合は其の量小なり、猶常温より極小迄の屈曲衝撃抗力は炭素含有量により著しく其の値を異にするも牽引の場合は殆ど大差なし。

調質せるニツケルクロム鋼に於ては屈曲試験の場合は常温より 350°C 迄は衝撃値殆ど變化せざるに對し、牽引試験にては常温より 300°C 迄は直線的に低下す、400°C を超えて低下して極小に達すること、それより又極大點に向け上昇すること等は同じ傾向を有すニツケル、クロム鋼にては炭素鋼の場合に比し、牽引試験に於て極大、極小間の曲線の變化急激ならず、屈曲試験の場合に比するも遙に緩漫なり、極大を超えて衝撃値の低下無きことは炭素鋼の場合と同様なり。

オーステナイト組織なる不銹鋼に於ては牽引、屈曲共に常温より次第に低下するも 400°C を超えて減少率少なくなる、牽引の場合は高温度になるに従ひ再び低下し始むるも屈曲試験にては700°C 迄は一定、700°C を越えて急激なる低下を見る。

牽引衝撃抗力と屈曲衝撃抗力の温度に關する曲線にて最も著しき相違の點は次の如し。



1. 常温より極小点迄：-フェライト鋼にては、其の傾向同様なるもパーライト鋼にては低温にて屈曲衝撃値は極めて弱きに對し、牽引衝撃値はフェライト鋼のそれと大差なし、牽引衝撃値は一般に温度の上昇に従ひ低下の傾向あるも屈曲衝撃値は或温度迄先づ上昇し然る後低下す。
2. 衝撃値の極小及び極大を示す温度は略ぼ同じ、但し牽引衝撃の場合は稍低温に現はる。
3. 極大を超えて屈曲衝撃値は急激に減少するも牽引衝撃にては其の低下度極めて緩漫なり。

高温度に於ける衝撃的牽引試験と普通速度の牽引試験との比較 (以下衝撃的牽引に對し、普通速度の牽引は單に牽引試験と稱すべし) 普通速度にての高温度に於ける牽引試験に關する研究は從來無數に行はれ、其の試験方法の如き今更ら之を喋々するの要なきを以て、前述の衝撃的牽引試験に用ゐたると同種の鋼につき行はれたる高温度の牽引試験結果のみを列記すべし、第十三、第十四表及び第三十六、第三十七圖之なり、最大抗張力、延伸率、断面收縮率及び破斷に要せし勢力を書き並べたり。弾性限は測定の方法により、結果に差多きを以て茲には記せず、表中最大抗張力と延伸率とを相乗じたる積を以て破斷に要せし勢力とせり、實際の勢力は牽引試験にて得られる。歪、歪力曲線にて圍まるる面積を測定すべきが正當なるも、低炭素鋼にて實驗の結果、此の面積と最大抗張力と延伸率との積なる數値とは其の差甚だしくは大ならず、且之等の數値と温度との關係は略ぼ相似なる曲線を得るを以て便宜

第十三表

鋼種 温度 °C	(A') 軟鋼 C=0.10%				(C') 半硬鋼 C=0.50%				(E') 硬鋼 C=0.90%			
	最大抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	破斷に要せし勢力 kg/cm <sup>2</sup>	最大抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	破斷に要せし勢力 kg/cm <sup>2</sup>	最大抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	破斷に要せし勢力 kg/cm <sup>2</sup>
常温 (20°)	33.0	43.3	71.6	14.3	59.7	23.2	31.7	13.7	79.4	9.0	8.9	7.1
97	32.4	32.7	67.1	10.6	57.9	23.0	39.4	13.3	78.4	11.2	12.1	8.8
210	41.6	25.3	59.7	10.5	60.5	16.3	31.9	9.8	80.5 <sup>(190°)</sup>	8.8	11.3	9.1
280	40.4	27.3	60.6	11.0	67.0	23.4	30.2	15.7	90.7	10.8	12.1	9.8
380	37.9	38.8	67.9	14.5	58.9	28.2	50.3	16.6	61.8 <sup>(400°)</sup>	23.0	43.1	14.2
480	17.9	46.2	86.4	8.3	41.1	31.0	66.4	12.7	45.8 <sup>(500°)</sup>	24.2	46.8	11.1
575	11.5	52.7	90.8	6.1	21.9	41.3	81.7	9.0	26.6	26.2	70.1	7.0
670	7.14	59.5	97.0	4.25	12.2	45.5	84.5	5.55	16.0	30.0	64.5	4.8
800	4.06	81.5	99.2	3.3	8.57	72.5	99.7	6.2	9.63	56.2	99.7	5.4
900	4.36	49.3	98.7	2.15	6.34	80.5	99.8	5.1	5.72	75.3	99.9	4.3
1000	3.99	76.3	99.1	3.05	3.94	84.2	100.0	3.3	3.11	78.8	100.0	2.5

井口武英氏、金属研究 大正十四年 p. 1087  
試験片、直径 12.5mm 標点間距離 60mm

第十四表

鋼種 温度 °C	(H') 二ヶルクロム鋼 C=0.37% Ni=3.5% Cr=0.9				(N') 不銹鋼 C=0.39% Ni=9.07% Cr=16.64			
	最大抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	破斷に要せし勢力 kg/cm <sup>2</sup>	最大抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	破斷に要せし勢力 kg/cm <sup>2</sup>
常温 (18°)	89.85	22.5	59.2	20.2	86.0 <sup>(18°)</sup>	59.3	65.1	51.0
200	83.43	20.1	58.7	16.7	81.8	64.5	65.1	52.7
300	81.17	19.3	55.8	15.7	84.0	61.0	65.1	51.0
350	83.50	19.0	54.8	15.9	75.2	61.8	67.2	46.0
400	81.24	22.3	58.7	18.3	70.7	70.0	70.5	49.0
450	73.98	23.3	66.0	17.2	71.8	65.0	71.7	46.7
500	55.62	25.8	80.4	14.4	—	—	—	—
600	41.29	30.0	89.2	12.4	67.8	50.0	57.8	34.0
700	19.97	45.0	92.9	9.0	61.2	35.5	39.9	21.5
750	17.43	67.0	91.3	11.7	48.6	21.5	27.8	10.5
800	16.59	69.0	89.9	11.4	—	—	—	—
850	10.58	61.5	97.0	6.5	34.7	8.3	14.1	2.9
900	8.32	60.0	96.0	5.0	33.6	9.0	12.0	3.0
950	7.20	60.0	99.2	4.3	23.7	4.98	7.8	1.2
1000	5.51	61.3	99.1	3.3	—	—	—	—
1000	4.72	68.9	99.9	3.2	14.1	6.3	8.5	8.9

\* 直径 0.533" 標点間距離 2", 試験片、1) 成  
金、2) 成

第十五表

温度 °C	最大抗張力 Kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	断面收縮率 %	同上の得たる 勢力 Kg/cm <sup>2</sup>	最大抗張力 延伸率 Kg/cm <sup>2</sup>
常温	3450	35.9	74.2	12.15	124.0
100	3340	35.7	76.8	11.59	119.0
200	31.60	29.3	76.7	8.56	95.0
300	32.70	19.8	71.8	6.07	65.0
400	33.80	25.4	75.7	7.87	86.0
500	27.60	30.4	79.9	7.61	83.0
550	22.30	31.1	87.4	6.24	69.0
600	16.20	34.9	90.1	4.98	57.0
650	12.20	35.7	92.9	3.62	43.5
700	9.30	35.9	95.7	2.78	33.5
800	5.30	47.4	96.4	1.88	25.3

を以ても明瞭なるべし、第十五表に示す數字は衝撃牽引試験の場合と同一寸法即ち直径6.4mm、標點距離45mm、の佛式試片を用ゐて牽引試験を行ひたる試験結果なるが、其の他の牽引試験に用ゐたる試験桿は第十三及第十四表に示すが如く、直径、0.533吋、標點距離2吋のものなり、従つて抗張力、断面收縮率には大差なきも延伸率は衝撃牽引試験の場合と比較するには牽引試験にて得たる數値の3/4を採る必要あり勢力の數値も亦然りとす。

炭素鋼：一 高温度に於て普通速度の牽引試験を行ふ場合 低炭素鋼が300°C附近に於て最大抗張力の極大、延伸率の極小を生じて、所謂青熱脆性なる現象を呈すること、それ以上の温度にて抗張力は急減し、延伸率、断面收縮率は増大すること、900°C附近に於て多少の抗張力の増加と急激なる延伸率、断面收縮率の減少を見ること等は著明の事實にして今更贅言を要せず、第十三表の牽引試験結果及び第三六圖の炭素鋼の牽引曲線を見ても明かなり。

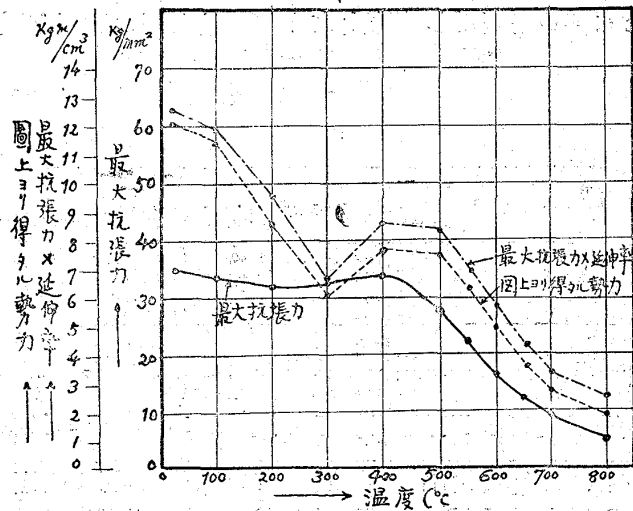
炭素含有量が増すも矢張り上述の現象あり、但し炭素量多きときは、900°C附近に於ての延伸率の減少は無し、井口武英氏は各種炭素鋼につき、高温度の牽引試験を行ひ、牽引温度、炭素含有量と抗張力及び延伸率との關係曲線を求めたり (三九圖) (四十圖)

上後者を以て破斷に要せし勢力とせり、従つて表中の數値は破斷に要せし實際の勢力よりは大きなり。然れ共勢力が温度の函數として如何に變化するか、其の傾向を知るには充分なり。

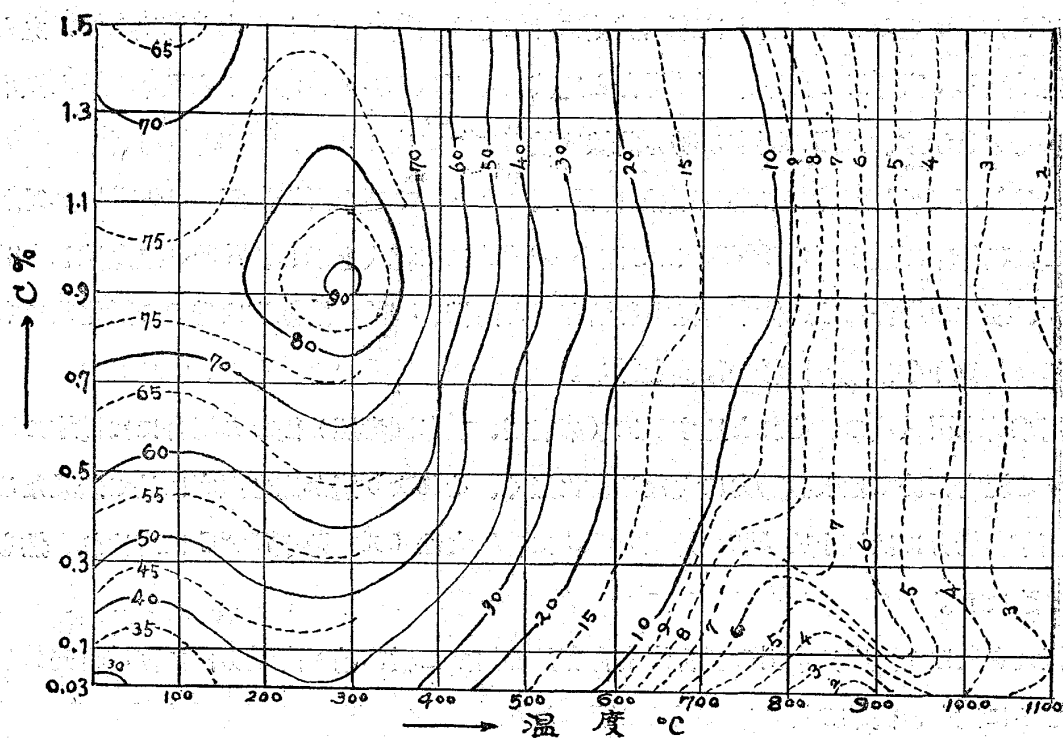
第十五表並びに第三十八圖は衝撃牽引試験に用ゐしと同一成分の低炭素鋼より採取せる同一寸法の試験桿にて普通速度の牽引試験を高温度にて行ひたる試験結果なり。

歪、歪力曲線圖上より得たる勢力と計算にて得たる値とは多くとも10%以上の差無き事、温度に對する關係が相似なること等は之

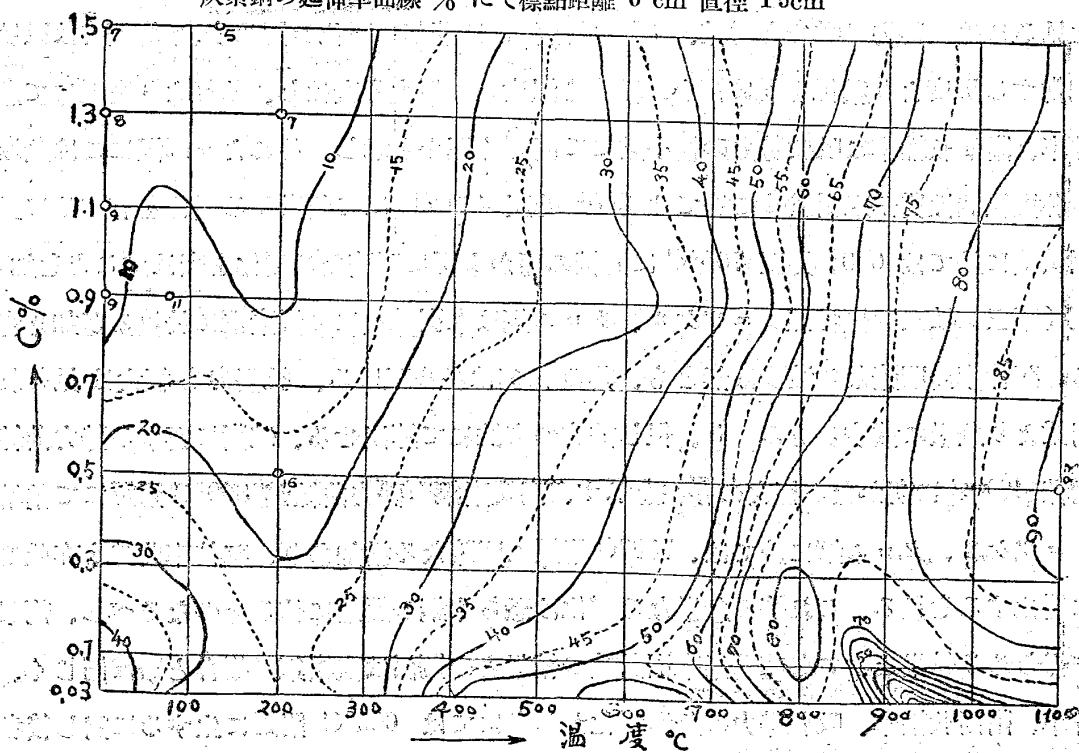
第三十八圖



第三十九圖  
炭素鋼の抗張力曲線  $\text{kg/mm}^2$ にて



第四十圖  
炭素鋼の延伸率曲線 % にて標點距離 6 cm 直徑 1.5cm



氏の實驗結果より見るも、900°C 附近の延伸率の減少は低炭素鋼のみに限らるゝを知る。

従來の研究に於て牽引破斷に要する勢力の測定は餘り其の例を見ざるも、衝擊試験に於ては衝擊勢力を測ることが主要なるを以て吾人は牽引試験に於ても亦破斷に要せし勢力を算出して、之と溫度との關係を曲線として畫き以て衝擊牽引の場合と比較せんと試みたり、第三十六及第三十七圖中の點線は其の吸收勢力を示す、破斷に要する勢力曲線は軟鋼に於ては 200° 乃至 300°C に極小 400°C 附近に極大を表はし、それ以上の溫度にては急激に低下、900°C にて最小値に達し 1,000°C にて稍大なり。半硬鋼にては延伸率の最小なる 200°C にて極小 400°C にて極大を示し、700°C 迄急減し、800°C にて稍上昇す、硬鋼の場合には延伸率の極小を見ざると同様、300°C 附近迄は勢力の變化なきも 400°C にて極大に達し以下半硬鋼と同様の傾向を採る。

今之を衝擊的牽引試験の、それと比するに（第三四、三五圖参照）衝擊の場合には前述の極小、極大に相當する溫度に於ては吸收勢力に大なる變化無く、それより遙か高き溫度に於て急激なる變化あり、即ち衝擊の場合には極小は 550° 乃至 600°C に、極大は 650° 乃至 750°C に現はれ、然も其の變化極めて明瞭なり。

曲線の極大を表はす溫度は牽引の場合炭素含有量の増すに従ひ稍々高溫方向に移る傾向あるも餘り明瞭ならざるに對し、衝擊の場合には極めて明かなり。

牽引試験に於て最大抗張力が 350°C 附近にて極大を示し、延伸率、斷面收縮率が極小を表はすことは前述の如くなるが、衝擊牽引試験に於て最大抗張力に相當する、平均張力、延伸率、斷面收縮率等の曲線を見るに吸收勢力の場合と同様、350°C 附近には著しき變化を認めず、平均張力は吸收勢力の極小に相當する溫度より稍低き所に極小、稍高き溫度にて極大を表はし、それより高溫にて急激に下る、延伸率、斷面收縮率は吸收勢力の極小點にて同じく極小を示し、それより高溫にては急激に増大す、即ち各機械的性質が牽引試験に於ては 300° 乃至 400°C にて急激なる變化を有するに對し、衝擊的牽引試験に於ては 600° 乃至 700°C に同様の而かも更に明瞭なる變化を表はすことを知るなり。

合金鋼（第三五及三七圖参照）ニツケル、クロム鋼は牽引試験にて炭素鋼に於けるが如き青熱溫度に於ける、延伸率の明瞭なる減少は無きも、其の傾向は多少現はる、抗張力も極大は見られざるも 400°C 附近より急激に減するものなり、但し前述の方法にて算出せる、破斷に要する勢力曲線は、炭素鋼と同様 400°C に明かなる極大の存在を示す、高炭素鋼の勢力曲線が 800°C 附近にて稍増大すると同様、ニツケル、クロム鋼に於ては、750°C 附近に明瞭なる増加あり、延伸率曲線も亦此の溫度にて急激に變化するを見る、これ等の急激なる變化は恐らく鋼の變態に依るものなるべし、衝擊的牽引試験にて得らるる結果と、これ等普通牽引試験の結果との關係は炭素鋼の場合と略ぼ同じく、平均張力、延伸率、斷面收縮率、吸收勢力の急激變化が前者にては 600°C 附近に生ずるに對し後者にては 350°C 附近に見らる。牽引試験にて總ての機械的性質が鋼の變態點にて急激なる變化を來すに對し衝擊の場合には何等の變化を認めざるは極めて興味ある事實なり。

オーステナイト組織なる不銹鋼に於ても牽引試験にて抗張力が  $550^{\circ}\text{C}$  より急激に減少し始め、延伸率、断面收縮率、吸収勢力が  $350^{\circ}\text{C}$  附近より、低下するに對し衝撃牽引に於ては断面收縮率、平均張力、延伸率等の變化は高溫度に到る迄極めて少く(平均張力は常溫より  $200^{\circ}\text{C}$  迄は低下)  $800^{\circ}\text{C}$  に到り漸く延伸率の低下あること、吸収勢力も  $300^{\circ}\text{C}$  迄は先づ減少するも、其の後  $700^{\circ}\text{C}$  に到らざれば急激なる低下を來さざるを以て見れば後述するが如く牽引速度の差異のため普通牽引にて  $350^{\circ}\text{C}$  迄に起る機械的性質の變化が、衝撃的の場合には、 $700^{\circ}\text{C}$  附近迄延引せられしものと解し得らるべし。

**高溫度に於ける屈曲衝撃試験と牽引試験との比較** 第一章第二十圖は炭素含有量と衝撃溫度とを兩軸にとれる屈曲衝撃勢力の等高曲線なり、今之を第三章第三十九、第四十圖に掲げし炭素量、牽引溫度を兩軸にとれる最大抗張力及び延伸率の等高曲線と比較するに其の差極めて大なり。即ち最大抗張力は常溫より高溫度に到るに従ひて増大し、極大に達して後減少し、延伸率は其の反對に先づ減少し、後増大するに對し衝撃値は低溫度にては極めて脆弱なるも、常溫附近にて靱性を得、それより減少し、 $550^{\circ}\text{C}$  附近にて極小、 $650^{\circ}\text{C}$  附近にて極大値を有し、それ以上の溫度にて再び低下するも曲線に大なる變化無し、猶炭素量の増大に伴ひて極大、極小を生ずる溫度が何れも高溫度方向に移ること明瞭なり、前述せるが如く、抗張力、延伸率、断面收縮率等は鋼の變態に密接なる關係あるものなれども、衝撃抗力の變化は變態點に直接關係ありとは思はれず、即ち低炭素鋼の高溫度に於ける極大點は  $A_1$  點より  $150^{\circ}\text{C}$  も低溫にあり、高炭素鋼に於ては却つて  $A_1$  點以上にあり、又  $A_2$  變態點は炭素量の増加に伴ひて低溫度に移るものなるが、衝撃抗力に於ける極大點は炭素量の増加と共に却つて高溫に移るのを見る、低炭素鋼に於て收縮率が  $A_1$  及び  $A_2$  兩變態點に相當する溫度にて變化することは Dupuy 氏によりて明瞭にせられたる事實なるが (Revue de Met. 1921) 衝撃抗力の高溫度に於ける極大點は唯一にして極大點以上の溫度に於ては全く異常變化を認めず、これ等の現象は後述するが如く衝撃抗力の  $600^{\circ}\text{C}$  附近の急激變化は牽引試験に於ける  $300^{\circ}\text{C}$  附近に起る青熱脆性と同一原因にて生じ其の差は試験速度の差異に依るものとすれば比較的容易に解釋し得るなり。

#### 結果に對する理論的考察

**高溫度に於ける牽引試験に就て** 高溫度牽引試験にて、 $350^{\circ}\text{C}$  附近に最大抗張力の極大及び延伸率の極小を見る所謂青熱脆性なる現象に關しては從來屢々議論せられし所なり (下記 35, 36 及び 37 の諸氏の論文參照)

Jeffries & Archer<sup>(38)</sup> 氏は溫度と其の溫度に於ける抗張力との關係は燒鈍試片にては第四十一圖の如き曲線をなす、材質の硬度は之を單に溫度の函數として見れば溫度の上昇するに従つて點線にて示す

35) H. Le Chatelier:— Contribution a l'étude de la fragilité dans la fers et les aciers. Rev. de Met. 1904 p. 266.

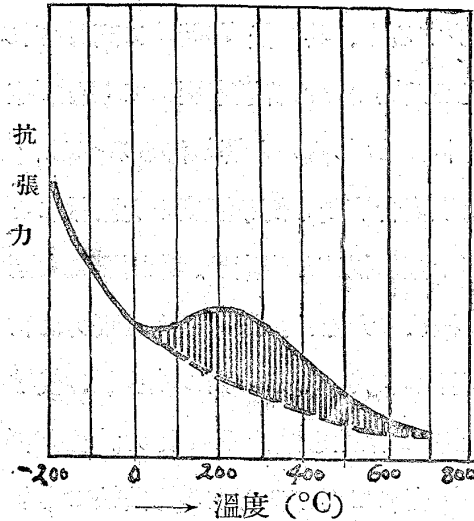
36) A. Le Chatelier:— Rev. Met. 1909 p. 914.

37) Ludwik:— Elemente der technologischen Mechanik Belin 1909 p. 49.

38) Jeffries & Archer:— Chem. Met. Eng. 1922 p. 833, 882.

曲線に沿ひて減少すべきものなれども事實に於て實線に示すが如き傾向をとるは、牽引による内部歪力に基くなりと稱へたり。

第四十一圖



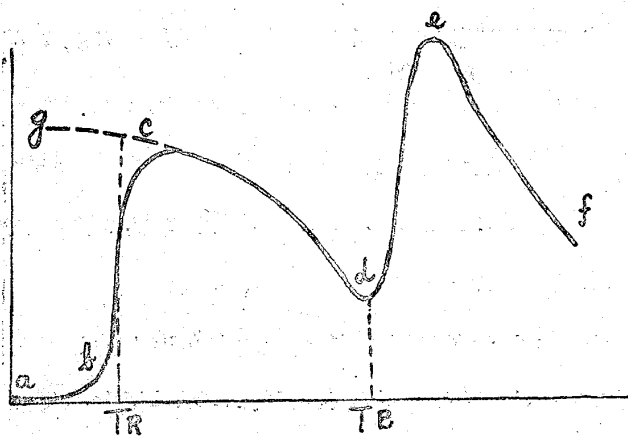
即ち青熱脆性を生ずる温度にて牽引試験を行へば牽引による相對的變位即ち内部歪が熱的影響を受け、其の最も不安定なる部分は内部歪りを生じて、安定となり、それ以上に歪り難く従つて硬度の増加を來し、延伸率、收縮率の減少を來すなりといふ。Maurer & Mailander<sup>(39)</sup> 氏、本多博士<sup>(40)</sup> 亦同様の説を稱へたり。

極大を超へて最大抗張力の急減、延伸率の増大を來すは此の温度以上に於て軟化作用を起し、牽引によりて生ずる内部歪力も熱効果の爲直ちに消失し軟化影響のみが行はるる爲なり。

最大抗張力が鋼の變態に關係あることは古來唱せらるる所なり、Rosenhain & Humphrey<sup>(41)</sup> 氏は抗張力曲線は變態點  $A_1$   $A_2$   $A_3$  各點にて、其の方向を轉ずといひ Dupuy<sup>(42)</sup> 氏は各種炭素鋼にて抗張力断面收縮率の變化を温度の函數として求め、750°C 附近にて收縮率曲線の不連続的變化を認め、之を  $A_{c1}$  變態に歸せり、猶又低炭素鋼の 900°C 附近に於ける收縮率の減少に對しては  $A_1 A_3$  間に於ては  $\gamma$  鐵が  $\alpha$  鐵の粒子を圍み  $\alpha$  鐵の完全變形前に  $\gamma$  鐵が切斷する爲と解釋せり。

高温度に於ける屈曲試験に就て 温度に關する屈曲衝擊抗力曲線は略ぼ第四十三圖の如き形をとるも

第四十二圖



のなり、曲線中 a b は低温度に於て極めて脆弱なることを示し d は高温脆性を表はす點なりとす。

Maurer & Mailander<sup>(39)</sup> 氏は温度の變化に對する鋼の脆性を分ちて青熱脆性と低温脆性とせり、同氏によれば本來衝擊抗力曲線は g c d なる形をとるものなれども鋼は低温脆性なる現象を呈する爲 a b c d の曲線に従ふなりといふ。

a) 低温脆性の原因に關し Maurer 氏説次の如し

39) Maurer & Mailander: - Stahl u Eisen 1925 p. 409.

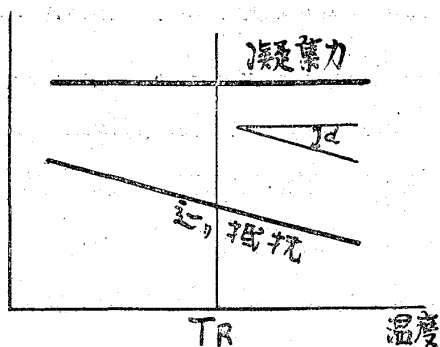
40) 本多博士: - 金屬ノ研究 大正 15 年 p. 1

41) Rosenhain & Humphrey: - Iron & Steel Inst. 1913 II p. 219.

42) Dupuy: - Revue de Met. 1921.

抑も脆性は屈曲試験に於て歪力が迂り抵抗力以上になる前に牽引歪力が材質の凝集力に打勝つとき生ずるものなり。此の場合迂り抵抗大なる爲試片は殆ど變形を生ぜず、従つて僅少なる勢力にて破斷

第四十三圖



す、鋼が低温度にて脆弱なるは鋼の分子間の凝集力及び迂り抵抗の温度に対する関係の異なるによる、温度に対する凝集力及び迂り抵抗の関係は第四十三圖の如し、此の圖に於て温度と共に凝集力が増すか、或は迂り抵抗が減少するかは別問題なるが、兎に角凝集力と迂り抵抗の曲線は或る角度 $\alpha$ をなす。

今假に温度の上昇に従ひ、迂り抵抗が減するとすれば或温度以上にては牽引歪力が凝集力に勝る前に試片に變形を

生ずるにより、試片は靱性を有するに到るなり、即ち TR 温度以下にては脆弱にして粒状断面を有し TR 以上にては靱性的破斷を得るなり、<sup>(43)</sup> Körber 氏も亦低温度にては迂り面生成速度が小になるといふ。Tammaun 氏の説を骨子として硅素鋼につき實驗を試み Maurer 氏と同様なる説を稱へたり。

低温脆性は温度の外、試片の大きさ、切込の形状、衝撃速度、鋼の成分及び豫めの處理に關係あるものなり、第一章に述べしが如く、炭素量の増大に従ひて、低温脆性の終了する温度の上昇することはパーライト組織の増すに従ひて迂り抵抗が大になるとすれば、上述の説にて解釋し得るなり。

b) 青熱脆性 第四十二圖曲線中 d に相當する青熱脆性は低温脆性とは全く其の原因を異にし、内部歪力による變形能力の減少に基くものと解せらる、Ludwik, Geffries-Archer 及び Maurer 等諸氏の説即ち之なり、即ち前述せる牽引試験に於ける青熱脆性と全く同一の原因によりて生ずるものなるも、唯衝撃試験の場合には歪力による相對的變位即ち内部歪が瞬時的に起り、直ちに試片の破壊を來すが爲熱的影響によりて、其の最も不安定なる部分が内部迂りを生じて、安定になるが爲には可成高き温度なるを要し従つて脆性影響が牽引試験の場合に比し高温度にて生ずるなり、Maurer & Mailänder<sup>(44)</sup> 氏、Greaves 氏等は屈曲試験を衝撃的及び靜的に行ひ、靜的試験に於ても、矢張り青熱脆性を生ずること、其の温度は衝撃的の場合に比し遙かに低き事等を立證せり。

青熱脆性に就ても、試片の大きさ切込、形状、豫めの處理等の影響あり、衝撃速度の影響あることは上述せる所により直ちに首肯し得らる、前章に説きたるが如く脆性の最も甚しき温度は炭素量の増すに従つて上昇するものなるが、之は後に述ぶる如く硬度高き物質が熱効果を受くること遅き一般的物理現象と見て可なるべし。

c) 青熱脆性を過ぎて曲線が急激に上昇するは(曲線中 de)高温度に於ける變形の進行より生ずる。

43) Körber:— Stahl u. Eisen XIV p. 1146.

44) Greaves:— Iron & Steel Inst. 1925 II p. 123.

再結晶及び粒子の成長と考へらる、之は牽引試験に於て 400°C 附近にての抗張力の急減と延伸率の増加を伴ふ現象と同様のものにして内部歪力の存在を許さざる程熱効果が大なるため、鋼が軟化し著しき變形を生ずるによるなり、牽引の場合との温度の差異は前述の如く變形速度の大小によるものなるべし、A. Sauveur & Lee<sup>(45)</sup> 氏の高温にて歪を與へて後硬度を測定し 580° 乃至 680°C 以上にて變形を與へたるもの以外は總て歪無き状態より硬度大なりといふ、此の温度は即ち衝撃試験にての極大に相當するなり。

d) 極大を過ぎて抗力の減少するは、試験装置の構造上、試片に與ふる變形が一定なる故専ら温度の上昇による抗張力の減少の爲なりと考へらる、檢鏡寫眞第 16、17、18、は低炭素鋼の常温、550° 及び 700°C に於ける屈曲衝撃試片の切込部を衝撃後檢鏡せるものなり、常温にては稍粒子の變形を認むるも 550°C のものは變形なく、疵は主に境界に沿ひて傳はれり、700°C のものは疵入らず、粒子が安全に變形せるを見る。

衝撃的牽引試験に就て 第三章第一に述べたる如く衝撃的牽引試験に於ては常温附近に於て、其の衝撃勢力大なるに對し屈曲試験にては鋼の成分によりては極めて脆弱なり、又前者は含有する炭素量によりて大なる差異無きに對し後者は其の差極めて著し、此の事實は屈曲衝撃試験に於ける試験片の切込の有無が脆性に對し大なる影響あること同様なり、即ち切込ある場合は其の部分の歪力は極めて大なる爲牽引歪力は容易に凝集力に勝ちて變形性を生ぜざる内に破壊を生ずるも切込無き場合は先づ變形を生じ然る後破斷に到る爲、破斷に要する勢力は大なり、上述の屈曲試片には切込あり、牽引試片には切込なき爲斯の如き差を生ぜしものなるべし。

衝撃牽引の場合破斷に要する衝撃勢力が炭素量によりて大差無きは軟鋼は抗張力少なるも、變形大なるに對し、硬鋼は抗張力強きも變形量少なきによるなるべし。

青熱脆性に關しては屈曲試験の場合と同様に解釋し得、事實青熱脆性現象は屈曲の場合と略ぼ同様なり。

極大を越へて屈曲衝撃値が急減し牽引衝撃値が其の低下度極めて緩徐なるは前者に於ては變形量一定にして破斷に要する勢力を測らざるも後者に於ては鋼の抗張力は小なるも變形量大なる爲、破斷に要する全勢力は高温に於ては大差なきなり。

炭素量の増大が屈曲及び牽引衝撃値曲線の極大、極小點を高温方向に移す事は硬度大なるものが、熱効果の影響遅き一般的物理現象と同じく一定の速度にて試験を行ふ場合、炭素量多きものは硬度大なるが故に總ての現象の進行が遅れて高温に移るものと見れば可なるべし、衝撃試験にて極大、極小の温度が炭素量に大なる關係あるを見るも牽引試験にて其の程度少なきは衝撃試験は前述の如く牽引試験に於ける機械的性質の變化を温度範圍を擴大して表はすが如き感あるものなるが故に當然なる事なり。

45) A. Sauveur & Lee :—Iron & Steel Inst. 1925 II. p. 322.



検鏡寫眞第十九乃至第二十六、は牽引試験片と衝撃牽引試験片との断面附近を検鏡せるもの、前者の  $300^{\circ}\text{C}$  のものと後者の  $550^{\circ}\text{C}$  の組織が變形少なき點に於て一致することは、之等の温度が青熱脆性に相當し、衝撃速度の差異が脆性温度を變ずるものなることを明かならしむ、前者の  $500^{\circ}\text{C}$  後者の  $650^{\circ}\text{C}$  の組織は何れも變形著しく軟化影響を蒙れる事を示すものなり。

前述せるが如く普通牽引試験に於て牽引張力によりて試片内に歪を生ずれば試片は更に大なる張力に堪ふるものなり、此の場合生ずる内部歪力は歪がすべて、外部より與へし張力に對し或安定なる方向に列びたる時最大なるべし、歪の張力により相對的變位即ち内部迂りは温度高きときは容易に行はるるものなるが、餘り高温にては再結晶或は軟化の現象を伴ふにより、或一定温度にて最大抗張力を有するに到る青熱脆性は即ち此の温度にて生ずるなり。

此の温度を超へれば内部迂りは容易なるも一方軟化の現象起る爲抗張力は減少す、歪の加へ方が速き時は軟化の現象を起す暇を有せずして破斷を來すため最大抗張力を示す温度は高く、反對に歪の加へ方が遅き時は温度の影響を充分受ける爲、抗張力の最大は低き温度に現はれ、それ以上温度が上昇すれば所謂粘性的現象を生ずるなり。

吾人の行ひたる衝撃的牽引試験 (本論文) 普通速度の牽引試験 (本論文) 及び靜的加荷重試験 (Rev. de Met. 1925 p. 753) の 3 種の試験結果はよく之を證明するものなり

#### 第四章 高温に於ける疲勞試験

概論 金屬の疲勞なる現象は古くより知られたる事實なれ共、内燃機關其の他諸機構の發達し來れる最近に於て、其の研究は著しき進歩をなし最近に於ては各國競つて此の研究に没頭しつつあり。

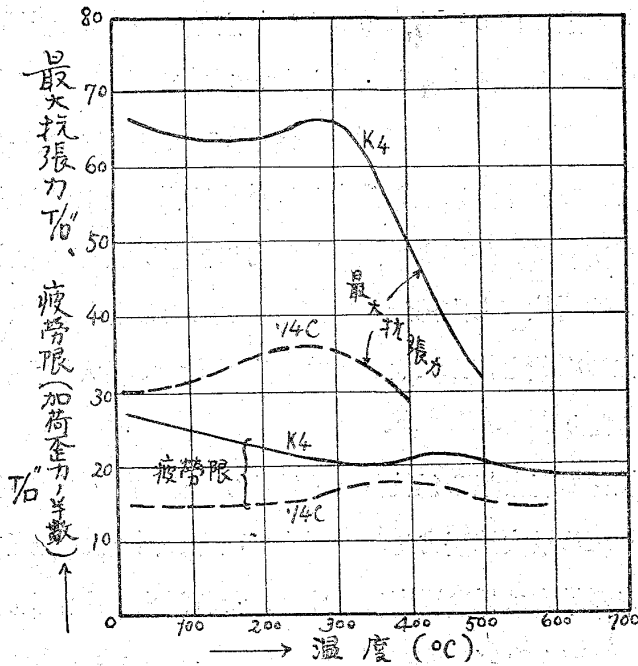
疲勞現象に關する文献は其の枚舉に暇あらず、1924 年 Mailander 氏は Stahl u Eisen XLIV p. 585~589, 624~629, 657~661, 684~691, 719~721 に 1923 年末までに現はれたる文献を網羅蒐集して列記せり、其の後も Mc Adam, Moore, Kommers, Jasper, Lessels 等諸氏の研究引續き行はれ我が國に於ても亦盛に研究せられつつあり。

疲勞限を高温に於て探究することも亦重要なことなり、<sup>(46)</sup> Lea 氏は 1924 年 Haigh 式反覆歪力試験機を用ひて研究を行ひたり。(F. C. Lea:— The effect of high temperature on the range of repetition stresses on steel. (Engineering 1924 Oct. p. 500, 532.)) 同氏は試験片を電氣爐中にて加熱し  $15^{\circ}$  乃至  $800^{\circ}\text{C}$  の温度にて 1 分間 2,000 回の反覆回数にて張力及び壓縮力を與へ  $10 \times 10^6$  回にて破斷せざる歪力即ち疲勞限を測定せり。

Lea 氏の實驗結果の一例は第四四圖の如し、(0.14C) は炭素 0.14% 鋼 (K4) は C=0.35, Cr=0.6 Ni=3.2% の鋼なり。同一の張力並びに壓縮力を與ふる場合の疲勞限は常溫より  $600^{\circ}$  乃至  $700^{\circ}\text{C}$  迄

(46) F. C. Lea:—Engineering 1924., Oct. p. 500, 532

第四十四圖

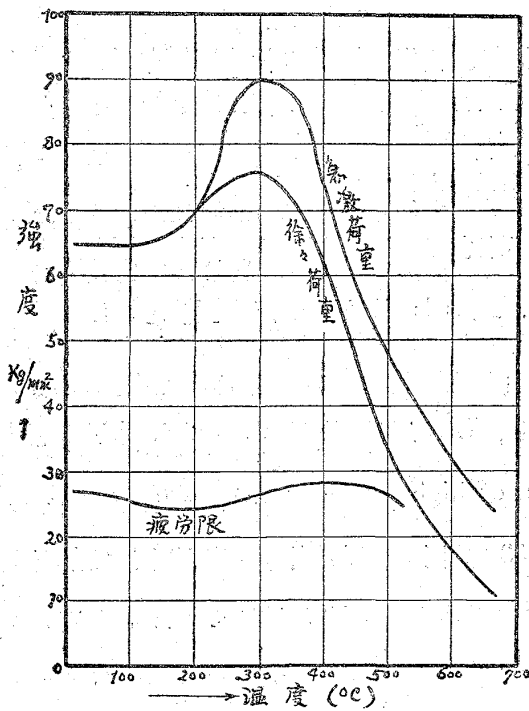


殆ど變化なしといふ。同氏の結果よりすれば高温度に於ては疲勞限は最大抗張力より却つて大なり。氏は此の説明として一方向へのみの歪力を繰返す場合は靜的荷重を加へし時の粘性限が疲勞限に相當すべきも、粘性的より(即ち歪)が或量を超へざる程度に時間が小なる場合は靜的粘性限以上の歪力を與ふるも破壊を來さず、若し分子の再粘着をなし得べき程の反覆の時間が無く且又溫度が低き時は分子間に粘性的變形を生じ破壊が生ずるなりといふ。

(47) M. L. Jasper 氏は (1925年) 加荷重速度を異にする牽引試験及び疲勞試験を試み第四

五圖の如き結果を得たり、(加荷重速度は 5 分及び 12 乃至 72 時間、疲勞試験に於ける荷重の反覆回数は 1 分間 1500) 氏の試験に於ても高温度に於ては抗張力と疲勞限の曲線が交差することを認めら

第四十五圖



る、氏は疲勞限は緩徐なる抗張試験結果よりも寧ろ急激なる試験に稍密接なる關係あるを認め反覆回数を減ずれば高温度に於て疲勞限も亦下降すべしと豫想せり。

抑も疲勞限は其の試験方法によりて著しく其の結果を異にするものにして、試験方法にも、張力及び壓縮力によるもの、屈曲力によるもの、反覆屈曲力によるもの、振り力によるもの、複合力によるもの等種々あり。

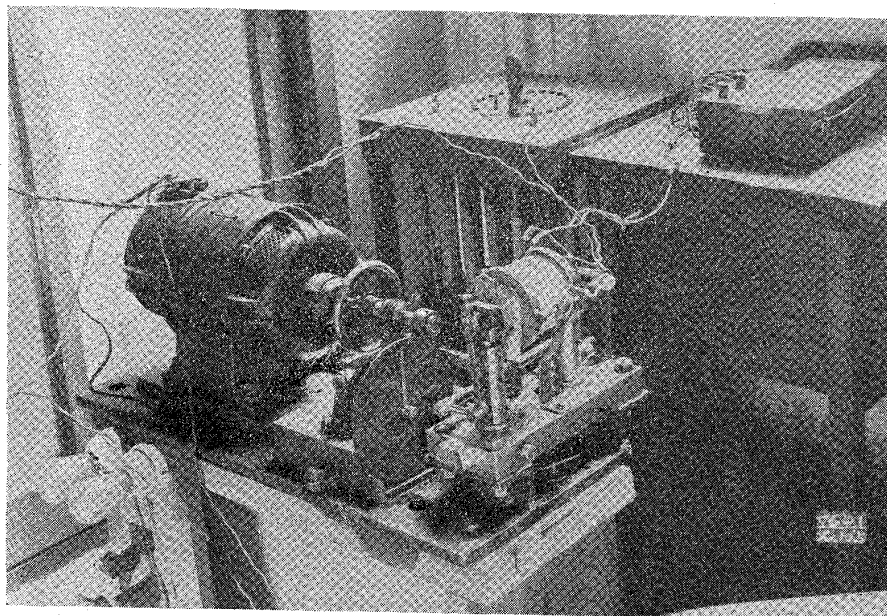
吾人の實驗は一定の反覆屈曲歪に堪ふる状態を高温度に於て測定せしものなり、實驗は吳海軍工廠製鋼部に備へらるる同部、宇留野技師の考案になる反覆屈曲試験機を高温度試験に適する様改良補正して行ひたり。同試験機は常溫にて約 86 kg/mm<sup>2</sup> の抗張力ある

鋼に 70 kg 附近の屈曲歪力を與ふべく製作せられしものにして試片の寸法最大撓曲量等次の加し。

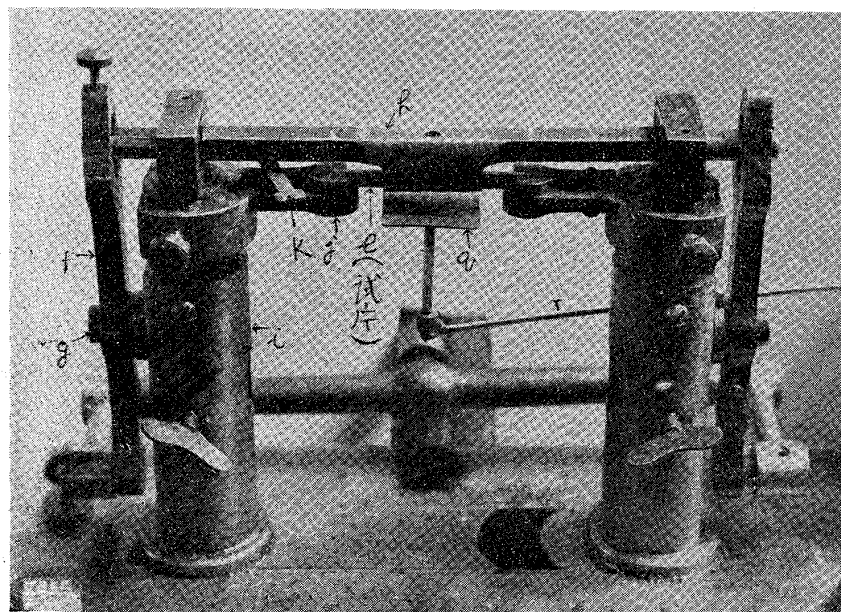
(47) M. L. Jasper: -Proc. Ame. Soc. Test. Met. Vol 25. 1925. p. 27

試片の長さ 60mm 幅及び高さ  $2 \times 5$ mm 最大撓曲量 4.5mm 1 分間の反覆回数 100 回  
 実験は實際の用途に資し且試験時間を短縮するため最大撓曲量を一定にして、試片に反覆屈曲を與へ、試片の破斷するに到る迄の回数を測定せり、従つて鋼の應ずる歪力には無關係なり。

第四十八圖



第四十九圖



**試験装置の構造** 試験装置の全體につきては第四六圖及び寫眞第四八圖に見るが如し、第四六圖に於て (a) は  $1/2$ kw の電動機にして (b)(b'), オーム及びオームギアー並びに (c) の偏心器により電動機の廻轉速度を減じ且廻轉運動を往復運動に變ず、(d) は丁形の接合棒にして (e) に傳はり (f) なる挺子の一端に往復運動を與ふ、(f) は (g) を中心とする挺子にして試片屈曲金物 (h) に所要の往復運動を與ふ、(g) の位置を變更すれば (h) の運動の往復距離を任意に變じ得、第四七圖及び第四九圖寫眞は試片の屈曲装置の細部を示す、圖上 (h) は (f) なる挺子により往復運動を受けて試片を反覆屈曲せしむる金物にして其の中央部分は常に電氣爐

中にて熱せらるるにより酸化並びに軟化を防ぐ爲ニリクロム鋼にて製作せり。中央部に熱電對を挿入する孔を有す。

(i) は (h) を保持する支柱なり、(j) は試片支持金物にして (i) なる支柱より突出せる金物あり、試片の屈曲と共に自由に廻轉し得、(k) は試片の落下を防ぐ爲の押へ金 (l) は試片にして長さ 60 mm 高さ及び幅は  $2 \times 5$ mm なり。(p) は試片の昇熱に用ゐらるる抵抗電氣爐にしてニクロム線を巻く、試片反覆

回数は電動機より續ける他のオーム及びオームギアーにより (t) なる指示板上の針を動かして測定す。

**試片取付方** 試片取付に際しては先づ挺子(f)をはすし、支持臺(m)上の溝にはめ込みたる金物(n)を引き抜けば(i)なる支柱も同時に移動す、然る後試片を支持金物(j)の間に狭み押へ金(k)にて押へ金物(n)を押し込み試片の位置を定着し(o)なる螺子により金物(n)が臺板(m)より抜け出ることを防ぐ、試片の取付が終れば電氣爐を所定位置に固着す、電氣爐の兩端には石綿を詰めて熱の逃散を防ぎ熱電對を挿入し試片に密着せしむ。寫眞第四九圖は試片を取付けたる状態を示す(圖示に便利なるため電氣爐を除去せり。)

**電動機への送電** 送電方法は第四六圖上廻路圖に見るが如く電流は2方に分れ1は(イ)より電動機を通り(ロ)を流れ電路接斷装置の(x)(z)を通り(=)に歸る。他方は(ハ)に分れ抵抗ランプ(w)を通り(ホ)より(y)なる電磁石に入り(=)に歸る。今スイッチ(s)を接續すれば(x)(z)間は斷絶せるにより電流は第2の廻路を通り電磁石をつくる、従つて(x)は電磁石に牽引せられ(x)(z)間の接續をなす、而して第1廻路に電流通じ電動機は動き始む。

**試験機の作動** 斯くして電動機に電流を通すれば電動機は1分間 1,600 廻轉の速度にて廻轉す、此の運動は前述のオーム及オームギアー及び偏心器より1分間 100回の往復運動に變ぜられ試片を反覆屈曲するに用ゐられ且又廻轉數指示器の針を動かす。

**試片破斷により自動的作動停止装置** 第四九圖に示すが如く第3電路は(ハ)より(H)に來り(=)に歸る、(H)部は(r)なる槓桿の一端が接觸して廻路をつくり得るも常には接觸せざる様に調整しあり。

電氣爐中試片の直下にはシリカ皿(q)ありて之が(r)なる槓桿の他端に乗る、試片が切斷すれば此の受皿(q)上に墜下し其の重量により槓桿の他端は(H)に接觸し(ハ)(H)(=)なる第3廻路を作る、此の廻路には抵抗少なき爲、抵抗多き第3廻路(ハ)(w)(y)(=)には電流流れ難くなり(y)の電磁石は弱まり金物(x)を離す。従つて(x)(z)間は斷絶し第一廻路の電流無くなり電動機の廻轉止まる、但し電流絶斷後尙電動機の慣性ある爲試片の往復2回轉あり。此の數を指針の表示數より減すれば、試片の破斷に要せし反覆屈曲の回數を自動的に知り得るなり。

**實驗結果** 實驗に供せし鋼材は第一章の屈曲衝擊試験に供せしと同一成分の A, B, C, D, E, F なる6種の炭素鋼なり。

炭素含有量は 0.11, 0.23, 0.5, 0.63, 0.86 及び 1.2% とす(分析成分第一表参照)鍛鍊後充分なる焼鈍を施して後、前記の試験片寸法に仕上げたり、仕上面の良、不良が試験結果に及ぼす影響大なるを以て、特に注意して厚さ及び幅はマイクロメーターにて測定せり。

實驗は常溫より 600°C に到る各 100°C 毎に施行せり、600°C 以上の試験は上述の装置にては困難なるにより行はず。

實驗結果は第十六表の如し、數値は破斷に到る迄に鋼材の堪へたる反覆屈力回數なり(以下單に反覆回數と稱す)此の反覆回數を溫度の函數として表はしたるものが第五十圖の曲線なり。

第十六表

温度 °C	A C=0.11%	B C=0.23%	C C=0.50%	D C=0.63%	E C=0.86%	F C=1.2%
常温 (20°)	818	960	838	718	554	500
100	1010	1020	768	698	528	444
200	1368	834	714	599	434	386
300	1180	678	540	434	335	248
400	554	395	402	405	450	238
500	495	417	536	515	545	300
600	528	—	—	—	—	—

極軟鋼(A)は常温に於ける反覆回数 818回にて破断するも温度を上昇するに従ひ回数の増加著しく、200°C に於ては實に 1,368 回の反覆に堪ふ、300°C を越へて急激に減少し始め400°C には 550 回の少なきに到る、500°C にて最小値 500 回に下り、600°C にて稍上昇す。

軟鋼(B)は常温に於ては極軟鋼(A)より反覆数多く 1960 回なり、但し 100°C には少し、極軟鋼の場合と同様 100°C の方常温の時より多く 1020回 を數ふ、100°C を越へて急激に減少し 400°C にて最小値 400 回に達す、500°C には稍々高し。

半硬鋼(C)は常温より温度の上昇に連れて、反覆回数の増すことなく常に減少し 400°C にて最小値 400 回に達し、それより又上昇す。

硬鋼(D)も(C)鋼と同様の傾向を採る。

共析鋼(E)は常温に於ける反覆回数少なく 550 回なり、曲線は温度の昇るに従ひ低下し、300°C に極小を有しそれより高温度にて再び上る。

過共析鋼(F)も共析鋼と同様の曲線を畫くも、極小の温度は稍高く 350°C 附近なり、反覆回数は最も少し。

第五十一圖は各温度に於ける炭素量と反覆屈曲回数との關係を表はせるもの、第五十二圖は炭素量及び試験温度を x, y 軸にとり、Z 軸に反覆屈曲回数を探りたる屈曲回数の等高曲線なり。

本試験の結果次の如き事實のあるを知る。

1. 常温に於て反覆屈曲数は極軟鋼に於ては軟鋼より少きも一般に炭素量の増大するに従つて減少す。
2. 炭素鋼の最大反覆回数は極軟鋼の 200°C にて 1,368 回に達す、炭素量多き共析鋼にては極大 560 回に過ぎず、然れども極小點に於ける値は極軟鋼にて 500 回、共析鋼にて 338 回にして其の差餘り大ならず。
3. 低炭素鋼に於ては稍高き温度に極大値を有し 500°C 附近に極小値あり、それ以上の温度にては又増加を示す。
4. 高炭素鋼に於ては、温度の上昇に従ひ反覆回数は次第に減少し極小點に到り、それより又増大す。
5. 低炭素鋼に於ける極大値を示す温度は C=0.1% 附近の炭素鋼にては 250°C 附近にあるも、炭素量増すに従つて低温度に下り、高炭素鋼にては見られず。
6. 極小點を示す温度は極軟鋼にては 500°C 附近なるも炭素量の増すに従つて低温度に移り、共

- 析鋼にては 350°C に下る、更に炭素量増すときは再び高温に移る傾向あり。
7. 本試験による鋼材の破断に到る迄の反覆回数の逆数は、牽引試験に於ける最大抗張力曲線に相似たる點あるも必ずしも比例せず。
  8. 反覆回数と温度との關係曲線にて見らるる、極大及び極小點に相當する温度の炭素量に對する關係は前述せる衝擊勢力、抗張力等の炭素量に對する關係と一致せず、寧ろ反對の傾向あり。

### 結 論

本研究は之を要約すれば次の如し。

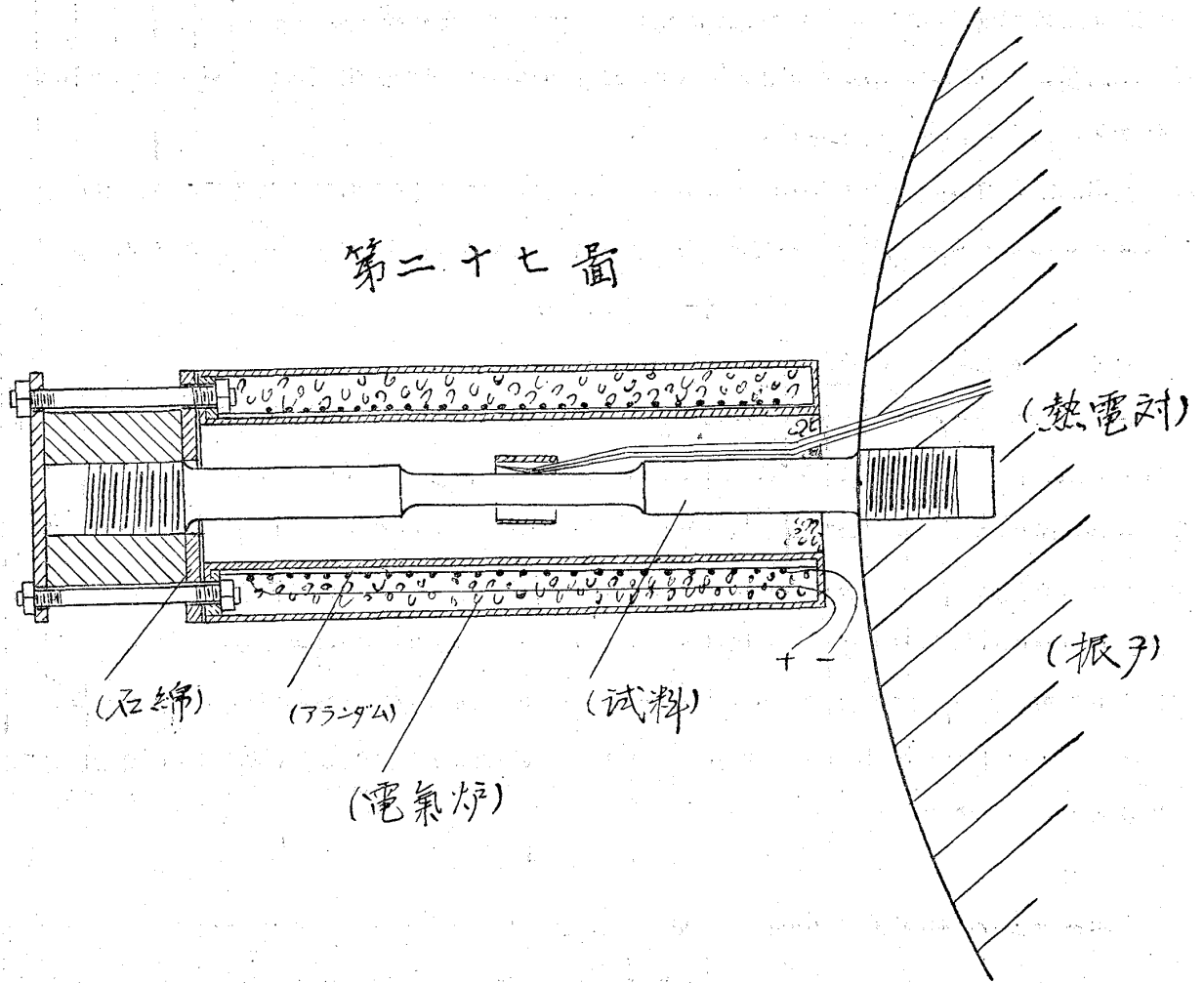
- (1) 鋼の機械的性質に對する温度の影響を研究せんとして次の如き試験方法を採れり。牽引試験、靜的加荷重による牽引試験、衝擊的牽引試験、屈曲衝擊試験、反覆屈曲試験及び檢鏡試験。
- (2) 各種試験に適當なる試験装置を考案製作し、炭素鋼及び合金鋼につき實驗を試みたり。
- (3) 各種試験方法によりて得たる結果につき比較研究を試み、鋼の機械的性質が、試験方法、温度速度及び鋼の成分、處理等により變化することを究め、其の間の理論的考案を試みたり。
- (4) 一例を擧ぐれば各種試験にて現はるる或種の機械的性質の變化は結局は試験速度の差異によりて生ずるものなること(例へば青熱脆性の如き)其の變化が化學的成分(炭素量の如き)に重大なる關係あること等を明かにせり。

### 附 記

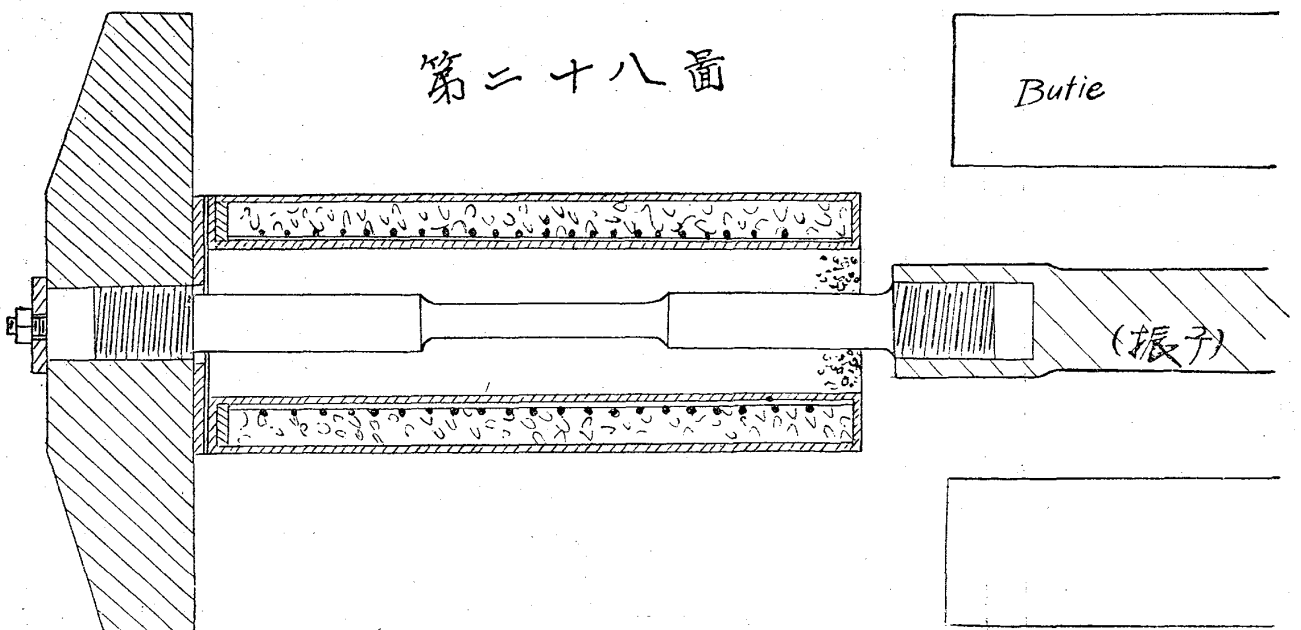
本研究論文は佛國雜誌 Revue de Metallurgie 1925. p. 753 誌上の "Essai sur la limite de viscosité a la haute température" と題する吾人の論文(同邦文昭和2年4月鐵と鋼誌上、高温度に於ける金屬の粘性)と相俟て一卷となるものなり。(終)

高温度に於ける衝撃牽引試験装置

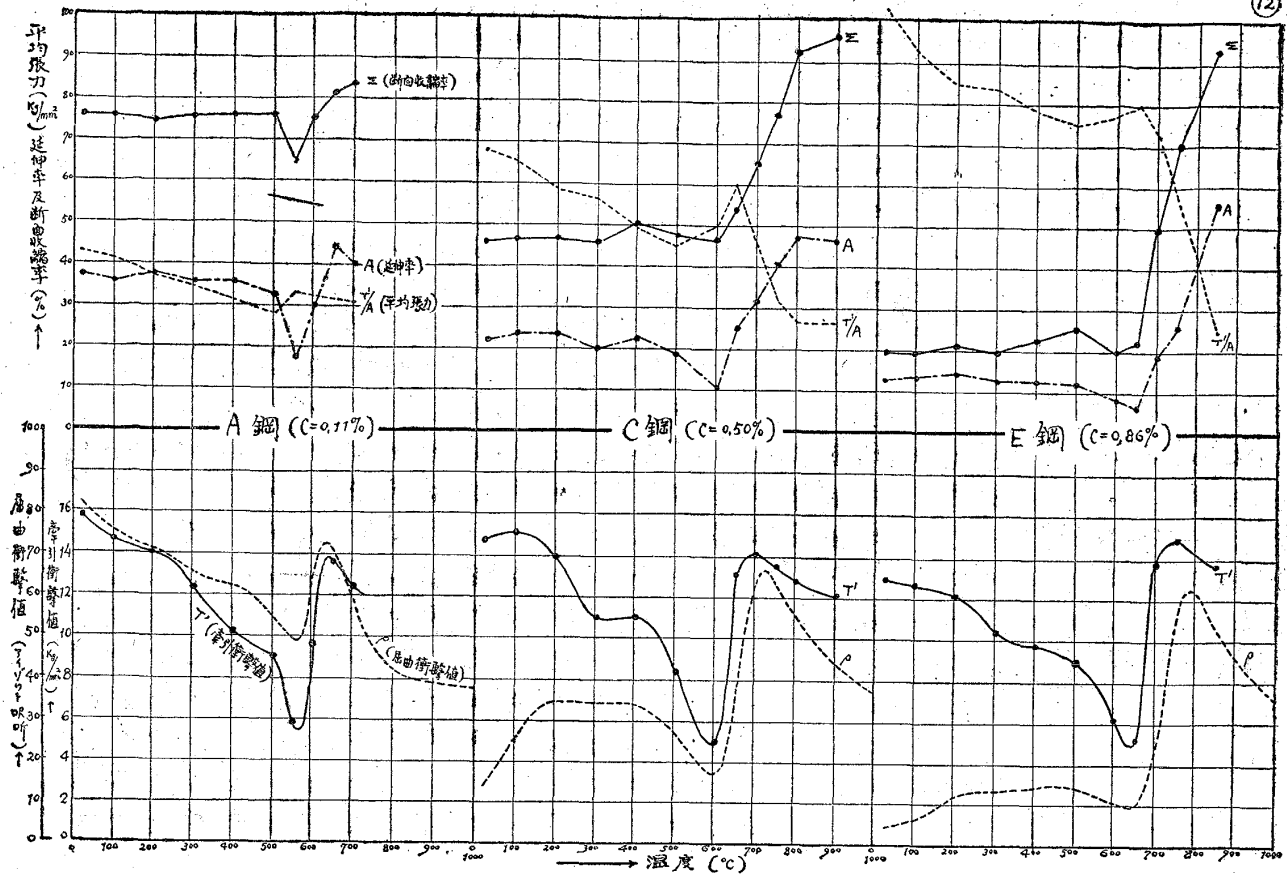
第二十七面



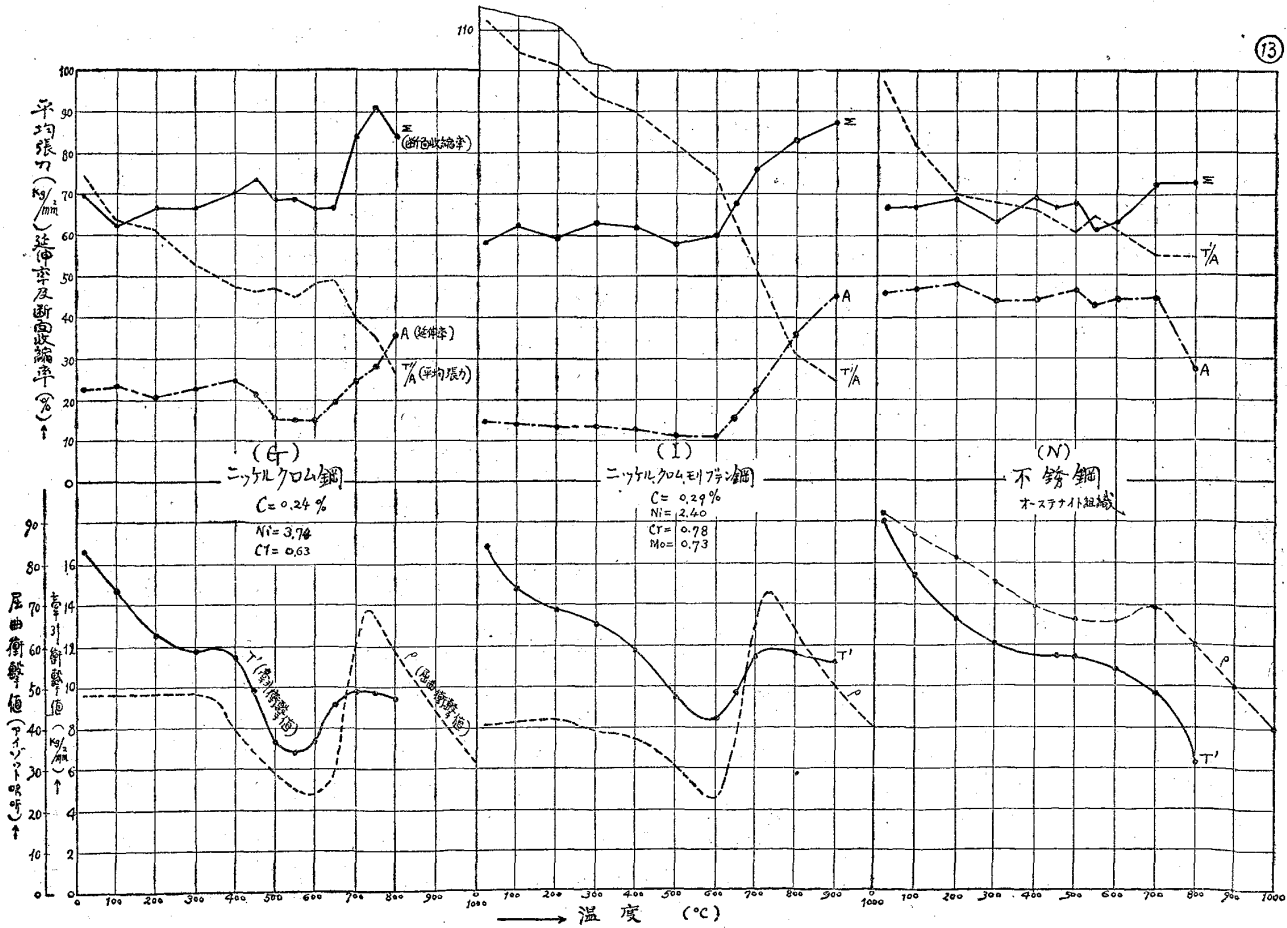
第二十八面



第三十四圖

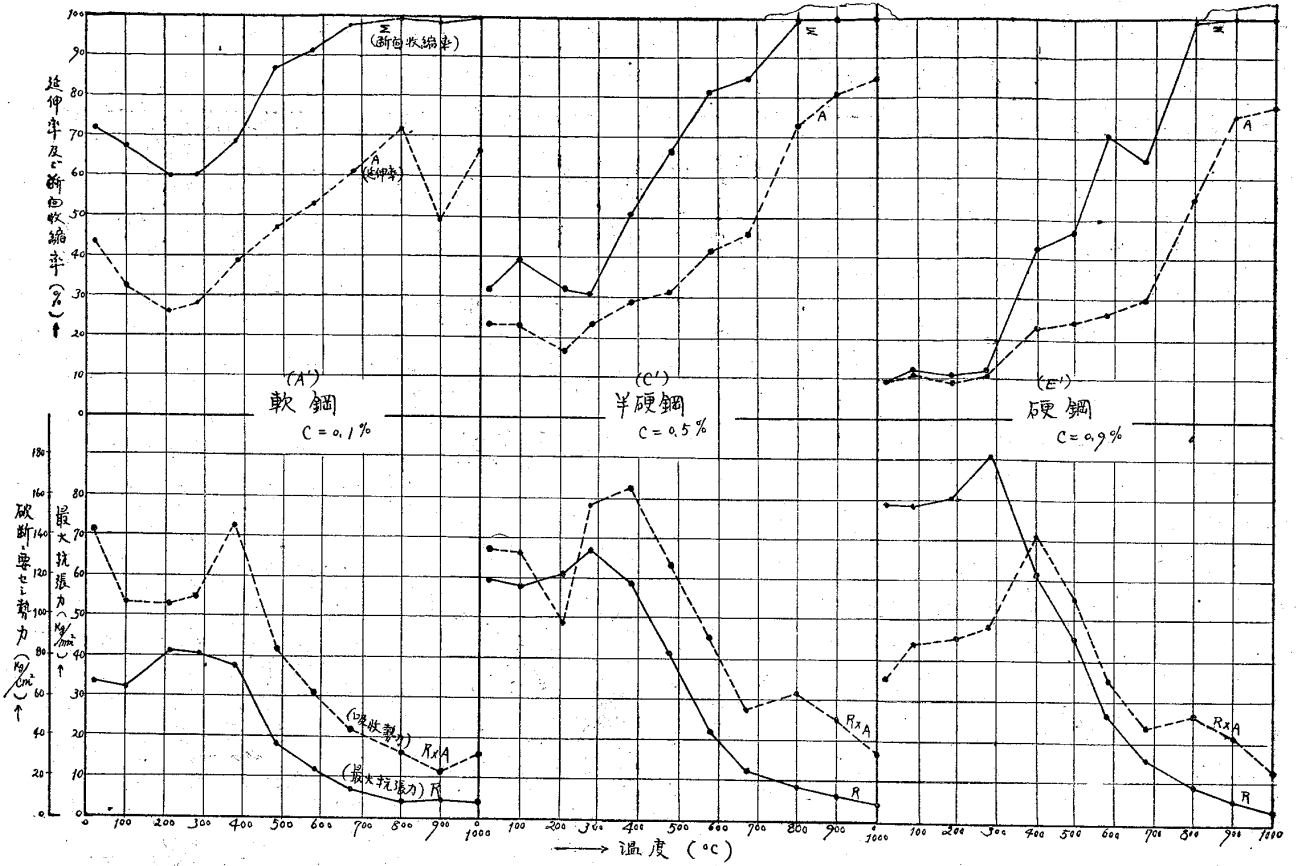


第三十五圖

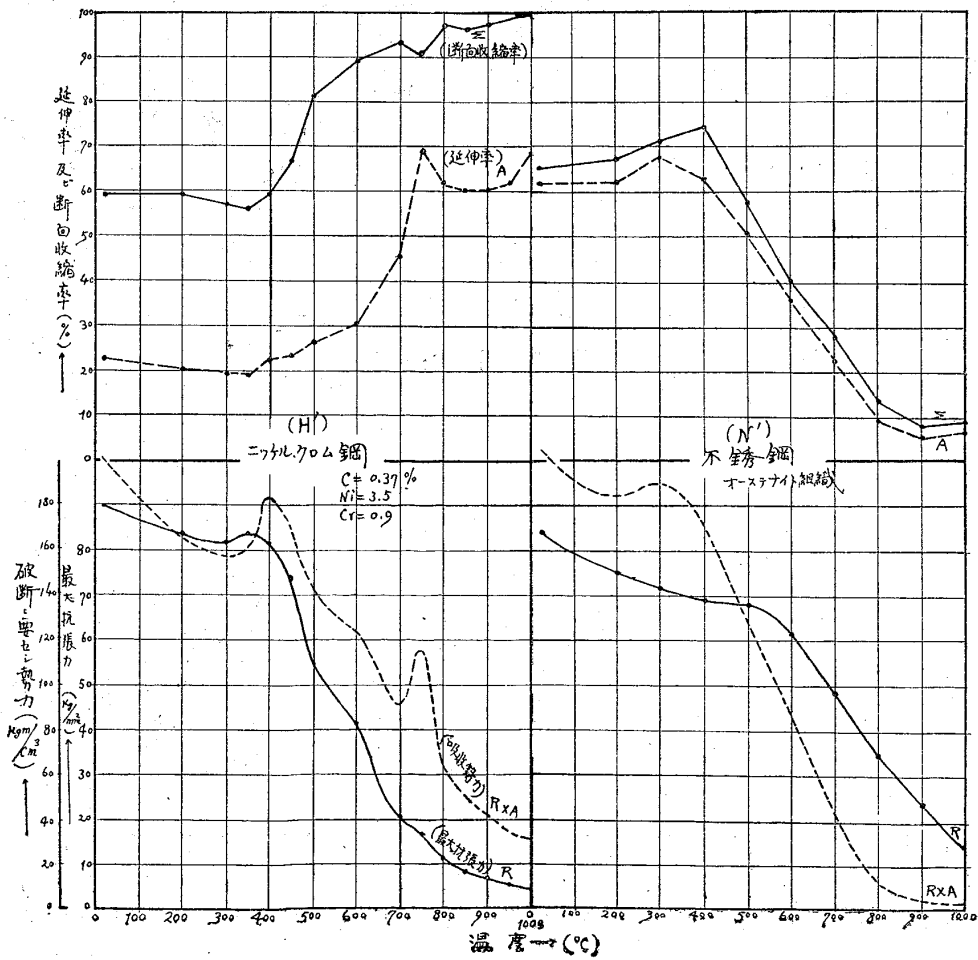




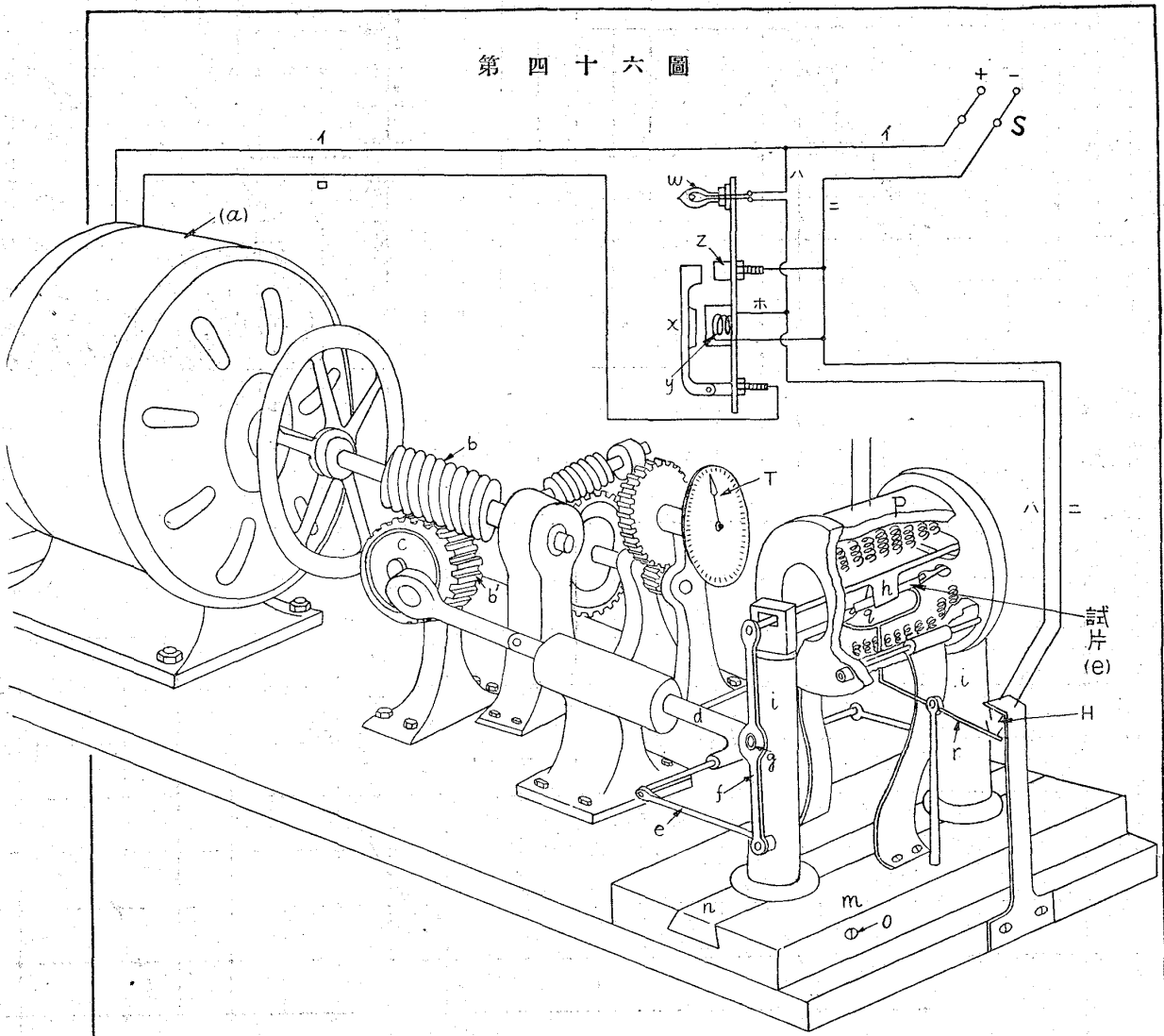
第三十六圖



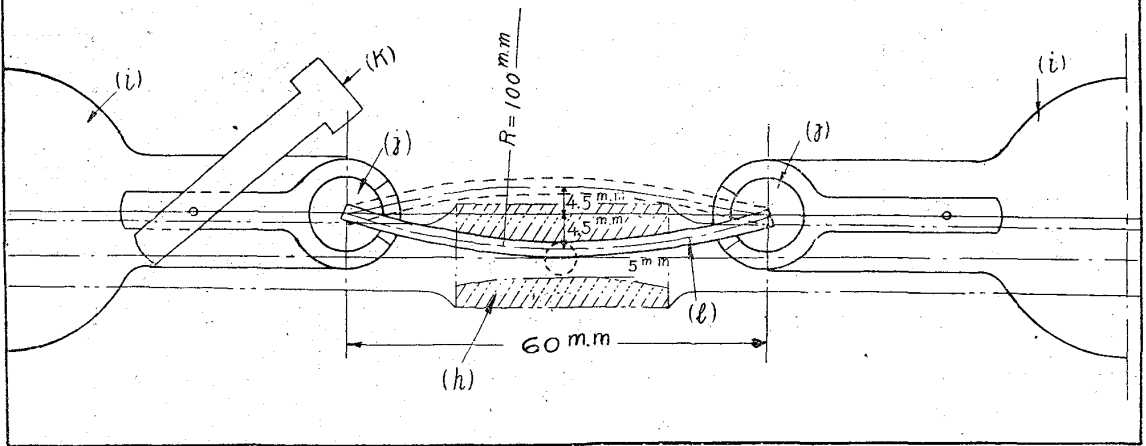
第三十七圖



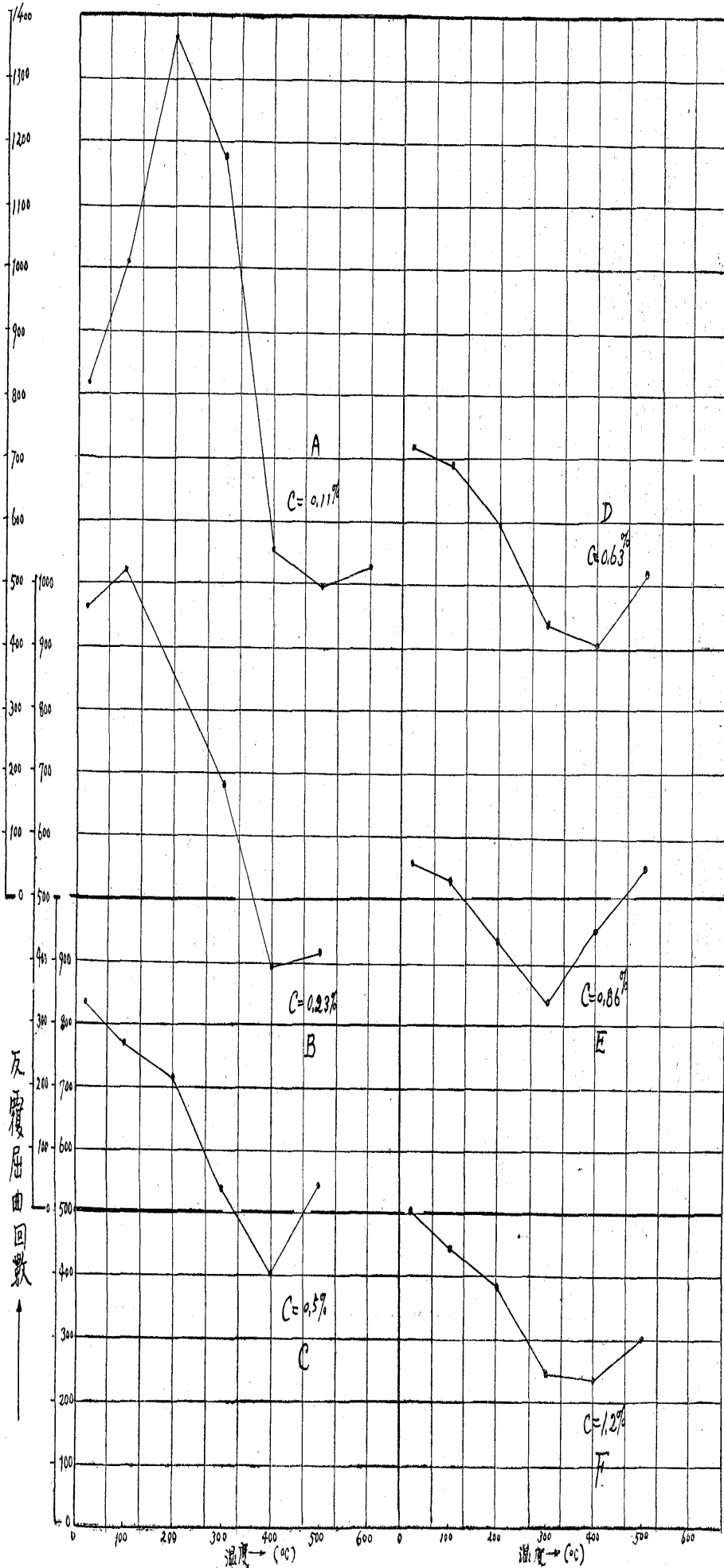
第四十六圖



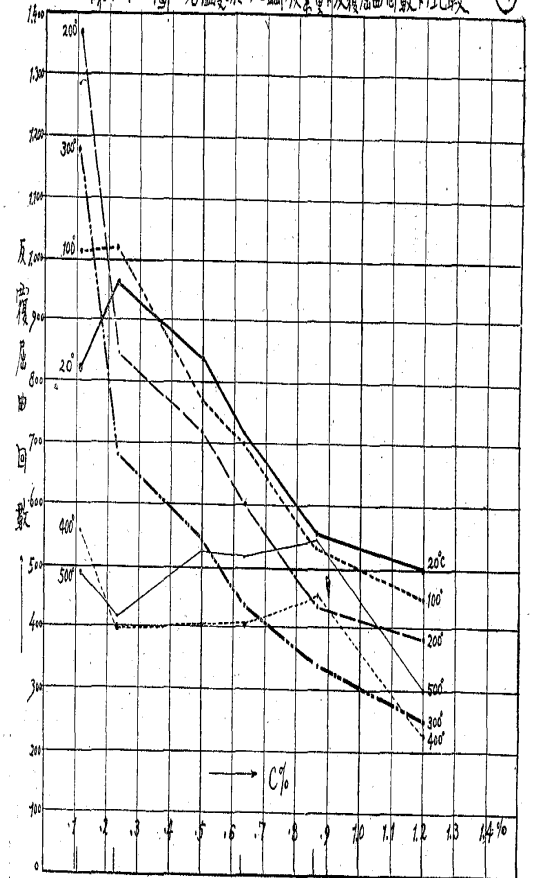
第四十七圖



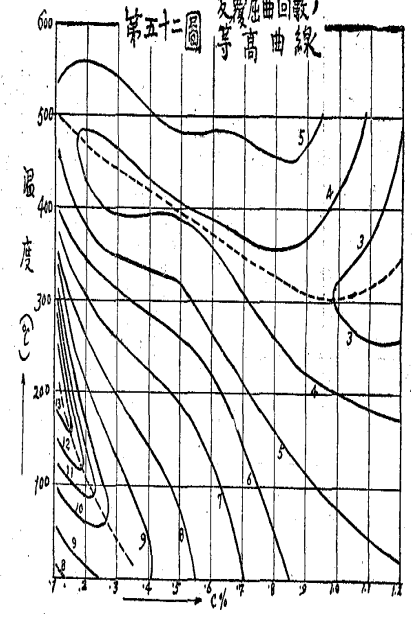
第五十圖 高温度に於ける炭素鋼の反覆屈曲試験



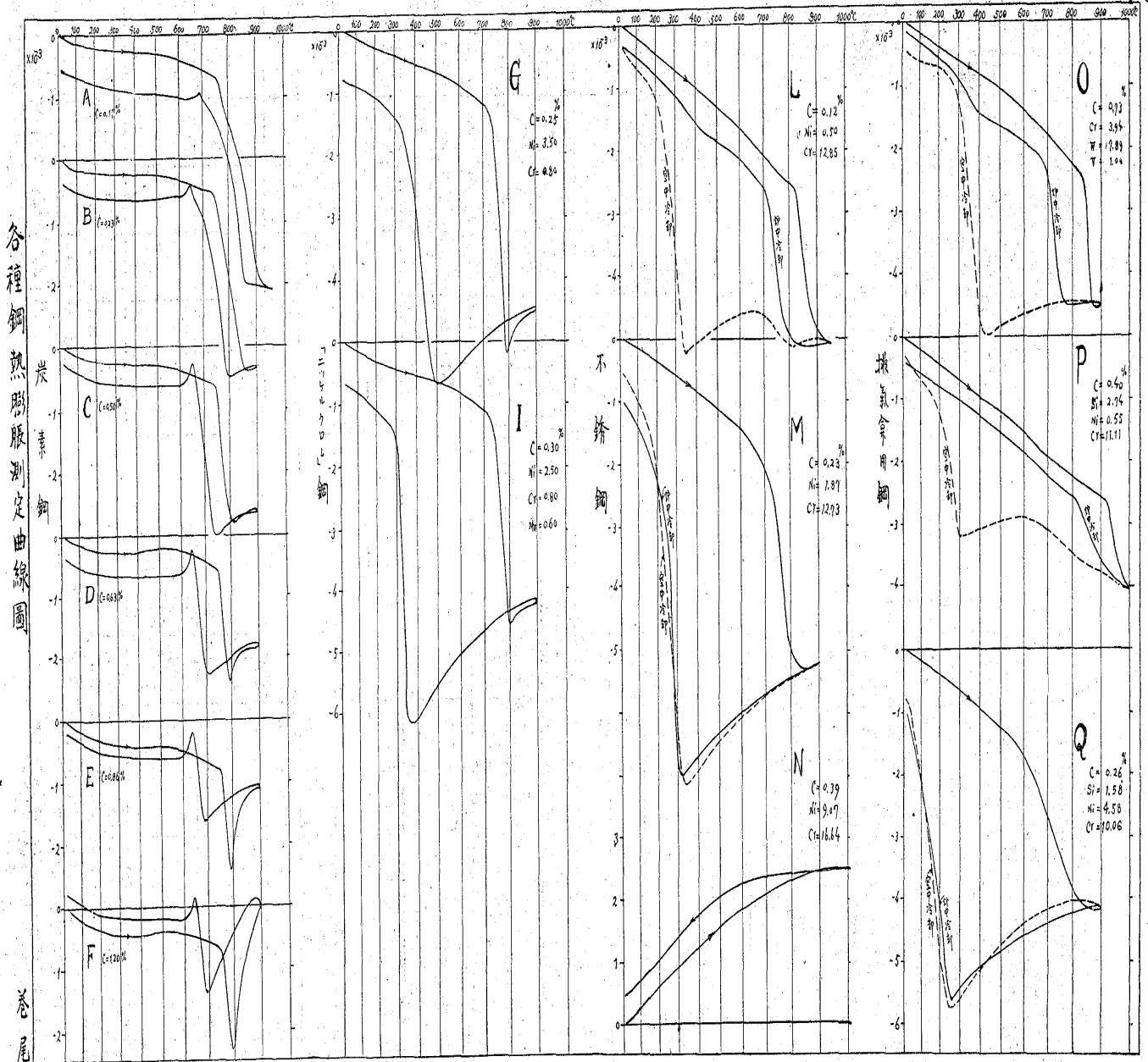
第五十一圖 各温度於ける鋼の炭素量の反覆屈曲回数比較



第五十二圖 反覆屈曲回数、等高曲線

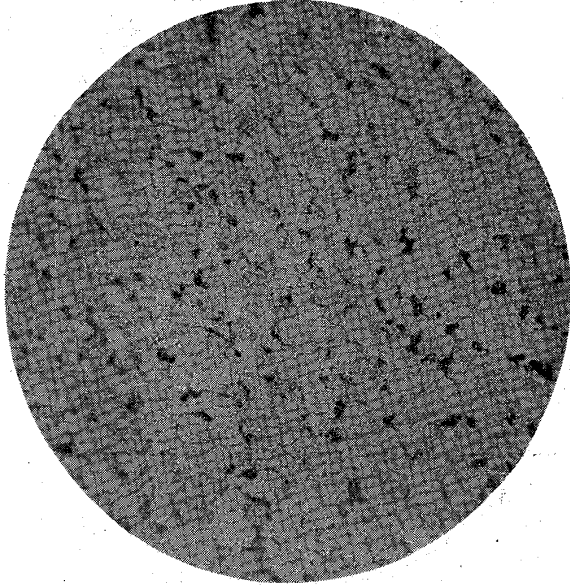


第五十三圖

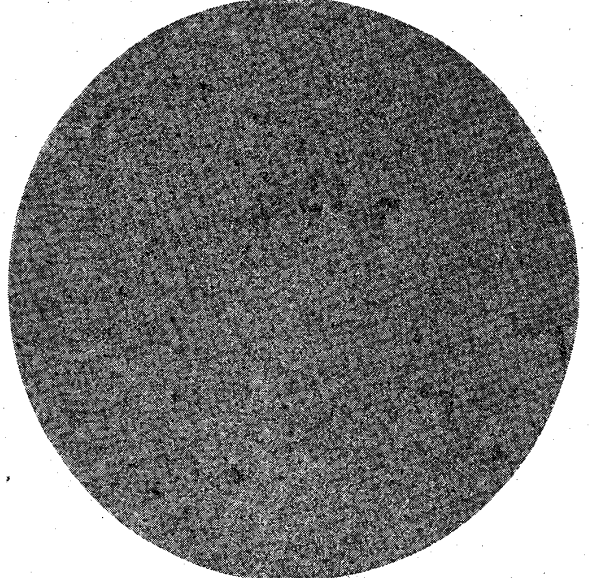


炭 素 鋼

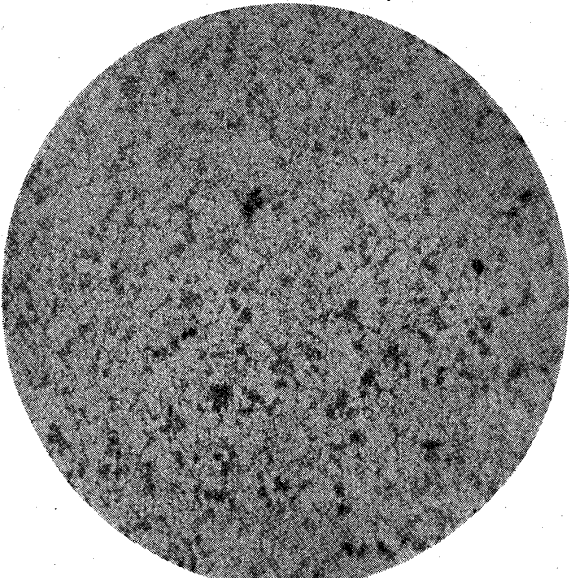
寫真第 1 A 鋼 (C=0.11%)



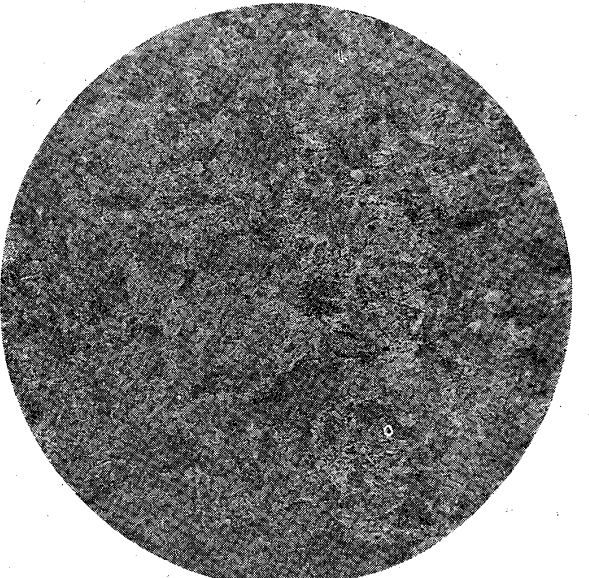
寫真第 4 D 鋼 (C=0.63%)



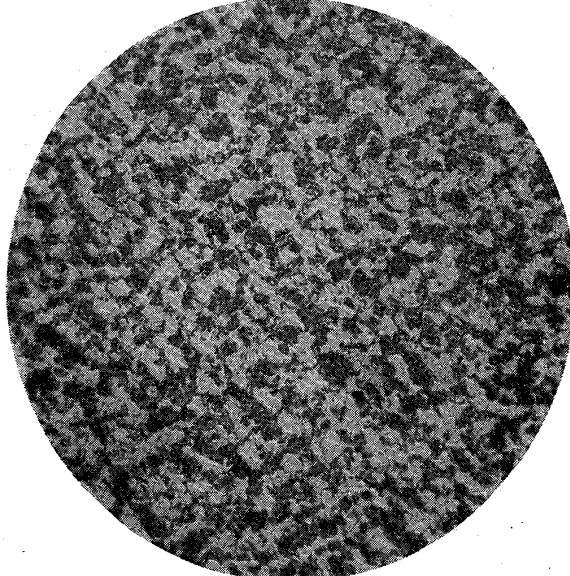
寫真第 2 B 鋼 (C=0.23%)



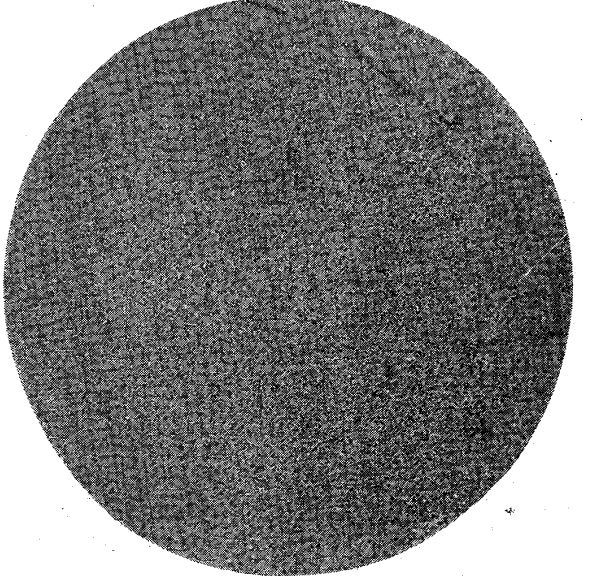
寫真第 5 E 鋼 (C=0.86%)



寫真第 3 C 鋼 (C=0.5%)



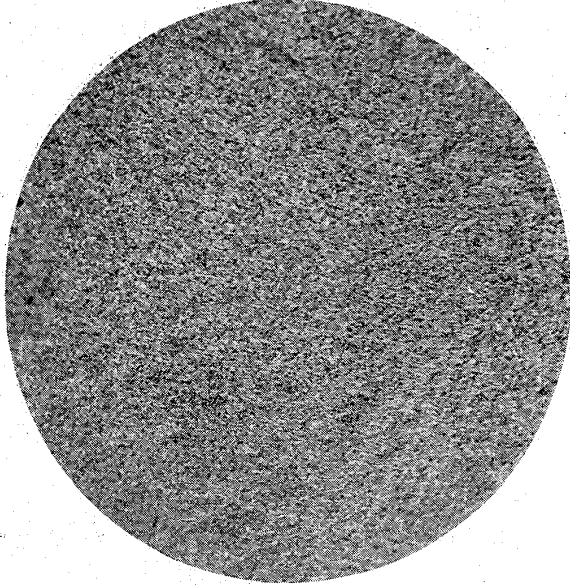
寫真第 6 F 鋼 (C=1.2%)



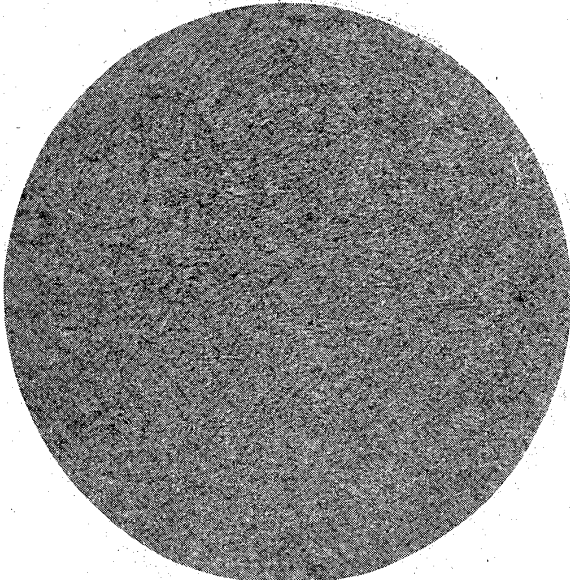
(硝酸 1% 腐蝕 × 100)

ニッケル、クロム鋼

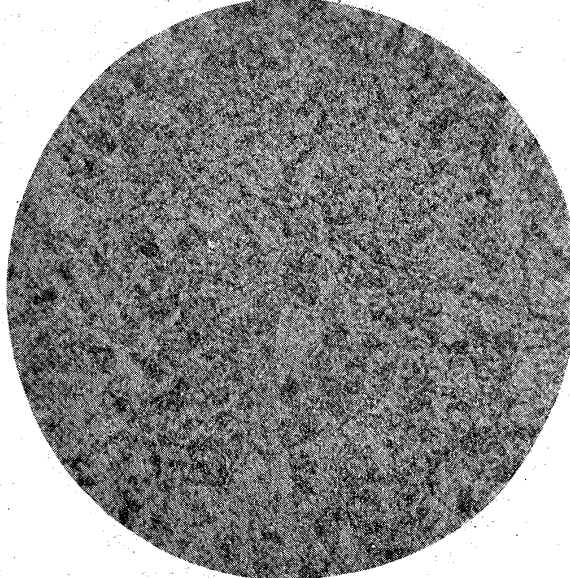
寫眞第 7 G 鋼



寫眞第 8 I 鋼



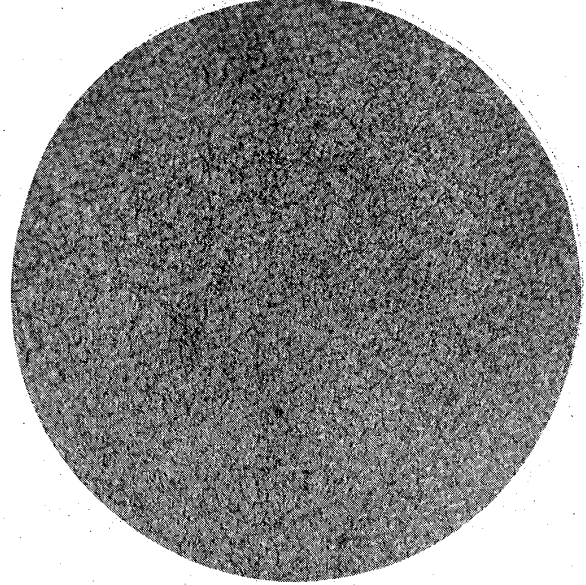
寫眞第 9 I 鋼 焼鈍状態のもの



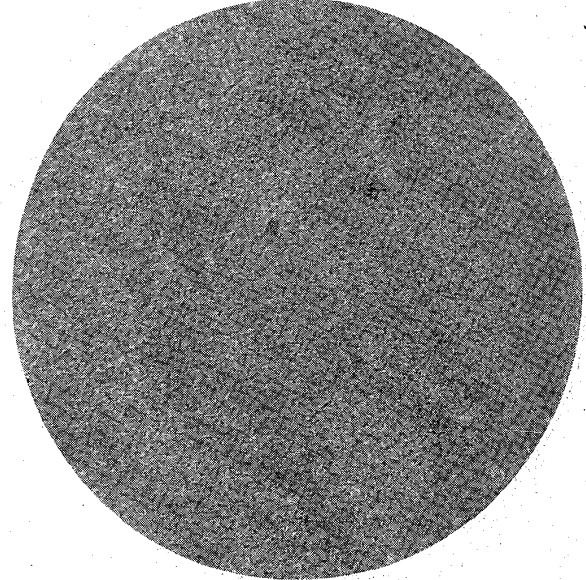
(硝酸にて腐蝕×400)

不 銹 鋼

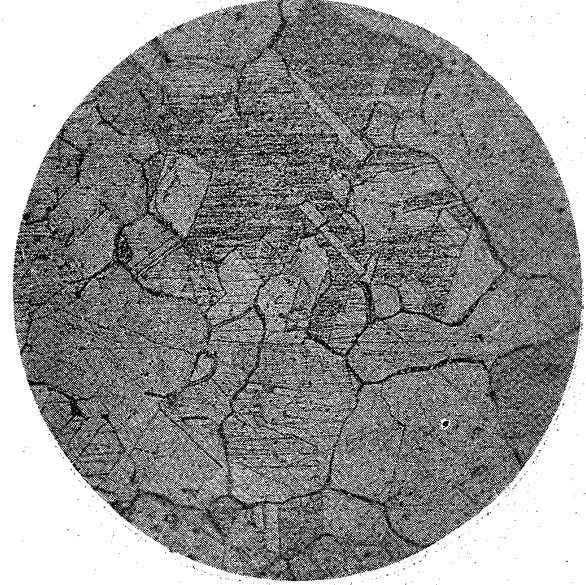
寫眞第 10 L 鋼(鹽酸腐蝕×400)



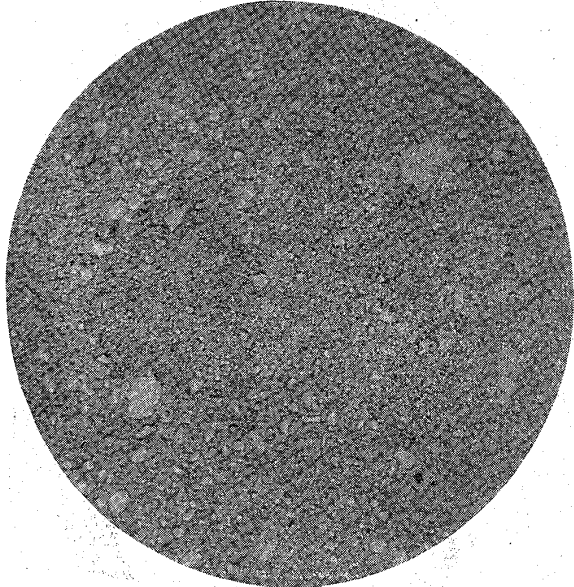
寫眞第 11 M 鋼(鹽酸腐蝕×400)



寫眞第 12 N 鋼(グリセリン王水にて腐蝕×100)



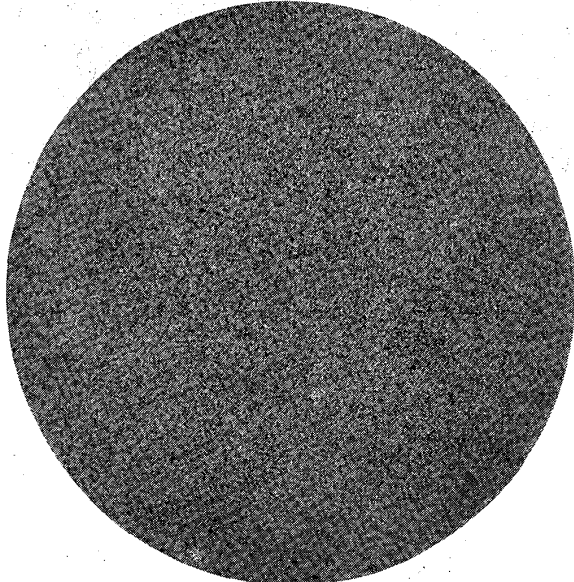
排氣管用鋼  
寫真第 13 O 鋼



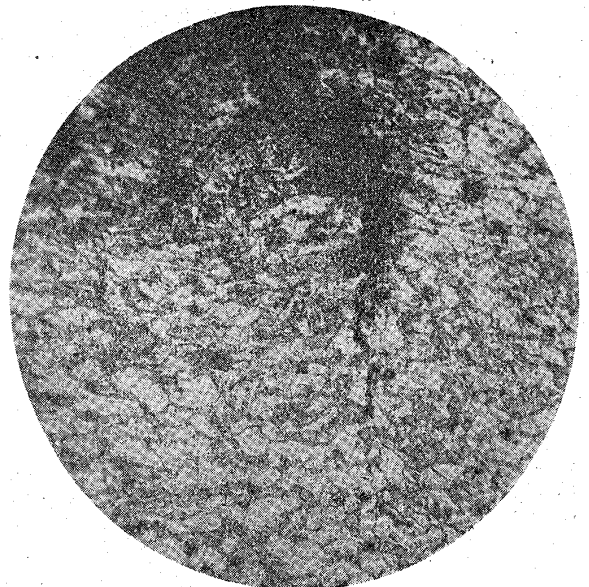
寫真第 14 P 鋼



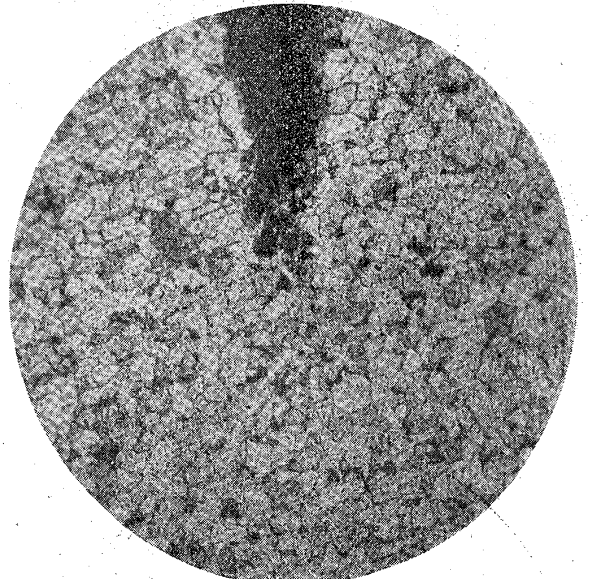
寫真第 15 Q 鋼(硝酸にて腐蝕×400)



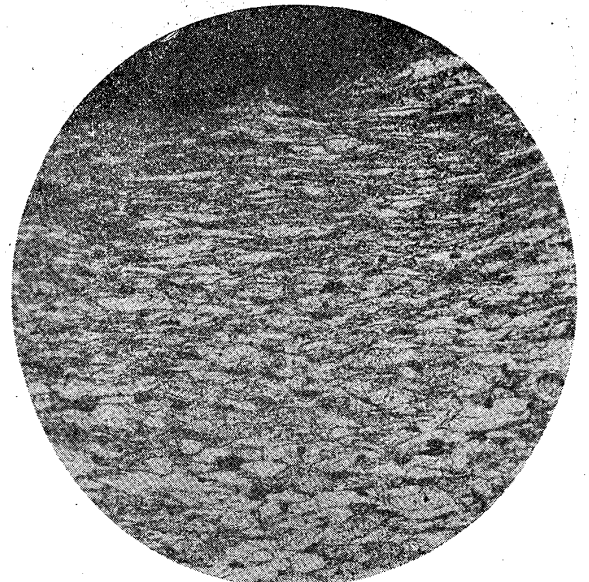
屈曲衝擊試片  
(衝擊後の切込部)  
低碳素鋼 ×100  
寫真第 16 常溫



寫真第 17 550°C



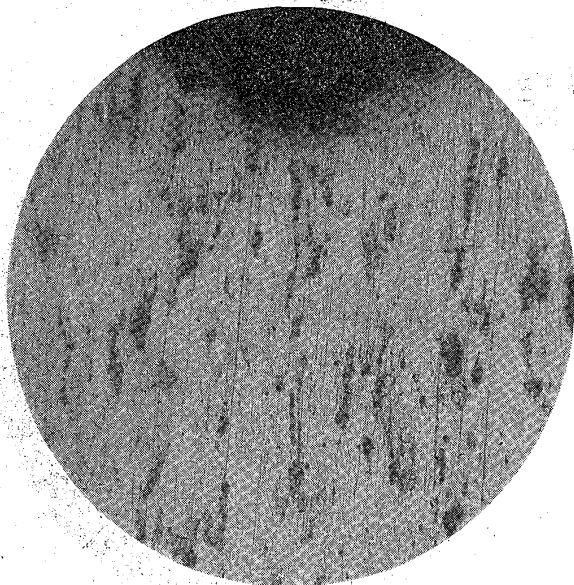
寫真第 18 700°C



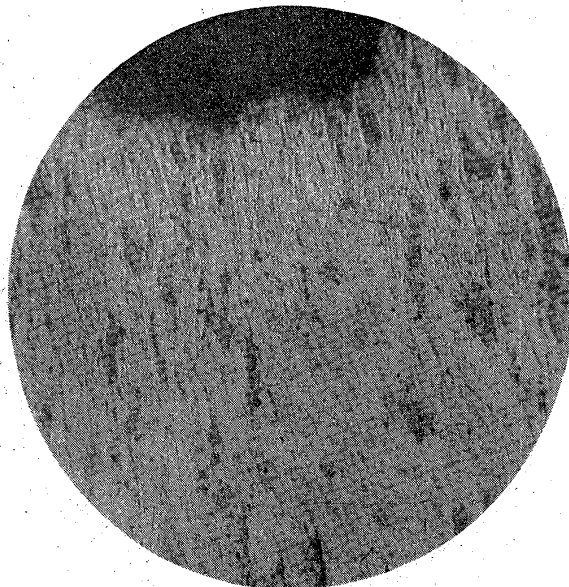
牽引試片切斷部縱斷面  
低炭素鋼

×200

寫真第 19 常溫



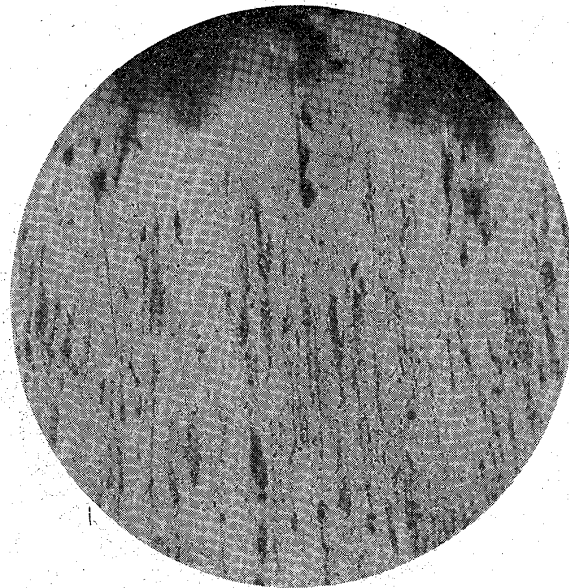
寫真第 21 500°C



寫真第 20 300°C



寫真第 22 800°C





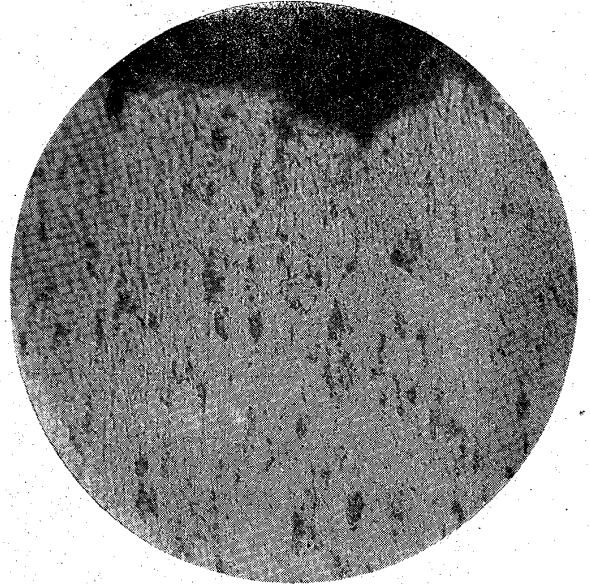
牽引衝擊試片切斷部縱斷面  
低炭素鋼

×200

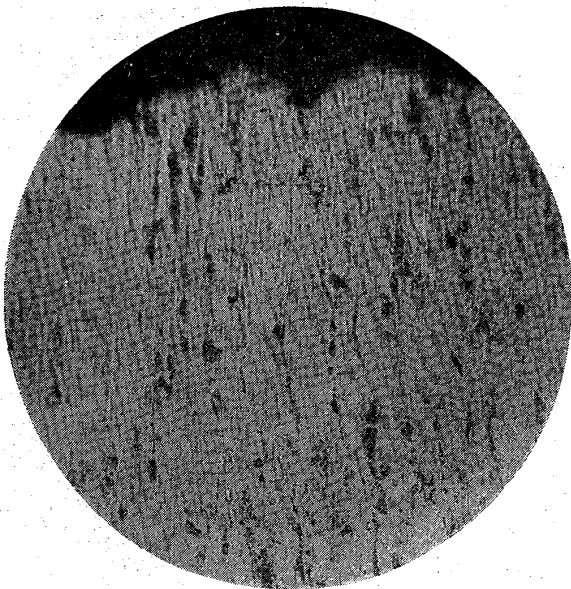
寫真第 23 常溫



寫真第 25 550°C



寫真第 24 300°C



寫真第 26 650°C

