

航空發動機用曲軸鋼の撰定並に其將來に就て

高 瀬 孝 次*

ON THE SELECTION OF CRANKSHAFT STEEL FOR AERO-ENGINE
AND ITS FUTURE REQUIREMENTS.

By K. Takase.

SYNOPSIS—: Owing to the marked increase of aero-engine power, number of revolution, compression ratio, etc., crankshaft should inevitably bear the vibrational and duplicated over-stresses. The crankshaft should, therefore, not only be of the best chemical composition, most properly heat-treated, the latest metallurgical procedure being applied, but also of the most perfect design, in addition to the minimum weight and size.

The writer has published a part of this investigation in the "Tetsu To Hagane" Vol. XIX, No. 4. In this paper, in order to select the most suitable steel for the future, the notch effect in regard to the endurance properties and the influence of heat-treatment of these steels have been investigated.

An investigation of crankshaft steel on the relation between the mechanical test results and the endurance properties by fatigue test have also been executed, and the writer has introduced a new method for determining the endurance limit in stead of laborious fatigue test.

As a conclusion, the writer has suggested future requirements for the aero-engine crankshaft steel, considering all the facts above mentioned.

緒 言

近年航空機の飛躍的進歩に伴ひ、航空發動機用曲軸鋼の撰定上考慮すべき要求條件は益々複雑となり、且厳格なものとなつて來つゝあり、將來一層此傾向が甚だしくなるものと覺悟しなくてはならぬ。就中發動機發達の趨勢として馬力、壓縮比、回轉數等が著しく向上しつゝある傾向から判斷すれば、必然的に曲軸に生起する振動的繰返應力は過大となり、材料は之に對し充分の耐久性を保有しなくてはならなくなつた。之と同時に極力容量を小にし輕量ならしめねばならぬ。従つて撰定すべき鋼材は化學的成分の點に於て最優れたものを比較研究すべきは勿論、使用狀態に於ける熱處理の最適當である事等材料冶金學的研究の肝要であると共に、一方曲軸製作上並に設計上に於ても最理想的に實施しなくてはならない。

この目的に應じた研究の一部は先に雑誌、鐵と鋼、第 19 年第 4 號(昭和 8 年 4 月)「航空發動機用曲軸鋼の撰定並に其使用狀態に就て」(参照)に發表したが、本論文に於ては更に之が研究を追加補足し、將來曲軸用鋼材撰定上正當に進むべき方針に就き論述するものである。

I. 曲軸鋼の種類と使用現況

從來航空發動機用曲軸鋼として使用されたものは、各國共 $Ni\sim Cr$ 鋼であつて、化學成分の點で分ければ其種類

頗る多いが概ね次の範圍に含まれてゐる。

Ni 3~5% Cr 0.8~1.8%

但 W 1.0% 以下、 Mo 0.6% 以下、 V 0.3% 以下を含んだものもある。

之を金質の性質の上から大別すれば概ね Cr 1.0% 以下の油焼入鋼と Cr 1.0% 以上の空氣焼入鋼とあつて近年は後者の方が多く使はれてゐる。從來の使用例は「鐵と鋼」第 19 年第 4 號に記載してある。

又之等 $Ni\sim Cr$ 鋼を機械的性質の上から大別する時は概ね次の様に區分する事が出来る。

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1. 87kg $Ni\sim Cr$ 鋼 | 3. 100kg $Ni\sim Cr$ 鋼 |
| 2. 94kg $Ni\sim Cr$ 鋼 | 4. 115kg $Ni\sim Cr$ 鋼 |

現在は逐次抗張力の高いものを使用する傾向にある、目下 94kg $Ni\sim Cr$ 鋼は相當多く使用されてゐる、近き將來に於ては 100kg $Ni\sim Cr$ 鋼及之以上強力な鋼が多く使用されるであらう。

尙之等のものでも星型空冷式發動機用のものと、V 型水冷式發動機用のものとがあつて、此兩者に於ては曲軸の構造が全く異なる爲に製造方法、負荷狀態も著しく相違してゐる。星型のは構造簡單であつて、或る發動機に限り相當折損した事があるが現今では餘り此種の重大な故障が無い、反之 V 型大馬力發動機用のは形狀も複雑であり、製造困難であつて、且破損の故障も相當に多い。何れも將來一層強度を大にし、形狀を小さくすると共に重量の輕減

* 陸軍航空技術研究所

が必要となるのは必至の趨勢であるので、鋼材としては基礎的に成分や熱處理の研究が肝要となるのも止むを得ない事である。

II. 曲軸の強度に関する研究

従來曲軸の折損した實例は相當に多いが之が原因を精細に觀察すれば材料の強度不足と見做さるべき事もあり、設計も製作加工上の不備も加はつた場合があると見るべきである。何れの破斷も疲労破斷であつて之が破斷機構を深く研究觀察して確實な原因を探求しなくてはならない。従來の様に靜力的荷重計算方式で強度の充分か否かを見る程度では到底安心は出来ない。故に將來發動機が大馬力となつたり、其他の酷な要求が甚しくなつた場合にも、曲軸としては自信を以つて強度の安全性を確保するのは必要缺くべからざる事である。結局金質上の改善、熱處理上の研究、工作上の容易な事及之に最も注意する事等の條件を吟味して、而も最輕量なものを撰出すべきである。

本論文に於ては主に曲軸として適當な特殊鋼の化學成分上の研究と共に熱處理の最適状態をば、耐久性の見地から之を檢討したもので之が爲には、切溝の影響 (Notch-effect) を各鋼種毎に行ひ其影響を鋭敏に受易い鋼と其熱處理状態とを比較して、最適とする條件を實驗研究した。又鍛造の要領に就ては従來鍛鋼品の纖維の走向に關し著しく重視する傾向があつた。之點に關して筆者の「分離破斷と疲労破斷との關係」の研究結果から考へる時は、餘り之も重要視する事には賛成出来ないのではないかと思はれる。次章に於て之が論據を述べたいと思ふ。

尙一般鋼材の抗張試験結果を、直接に曲軸などの疲労破斷に關係あるものとして強度計算の基礎にする事は適當ではないと思ふ。本論文では間接的に之等の値が耐久度に如何なる影響あるかを特に研究する事とした。

III. 曲軸鍛造方式の検討

従來一般的に信ぜられた鍛造方式は専ら其鍛鋼品の纖維走向が所謂 flow してゐる事即ち力のかゝる方向に直角に通つてゐる事を理想としてゐる。勿論かくする事は曲軸の實用上から云へば折損を防止する上に有效であると思へるのも至當であらう、併し之を精細に觀察するに纖維の走向は決して機械工作上的の形状

に完全に沿ふ事はなく、寧ろ疲労破斷の基點となる A 點の如き局部では機械作業により纖維が普通遮斷せられるものである。従つて非常に高價な施設と工作を取てしなくては強度上非常に危険であると考へてゐるのは必ずしも妥當でないと思はれる。何となれば曲軸の破斷は殆んど總て疲労破斷であり、疲労の局部では分離破斷であり、分離破斷は總て一點の隅角部の弱點に應力集中を來すので、理想的に云へばこの點の隅角に沿ふて纖維を流すべき筈であるのに、其局部に於ける纖維は所謂 flow せしめても多く遮斷されるので、如何に周到な鍛造方法によつても目的を達する事は出来ない理である。故に莫大な設備費と作業の犠牲を強要する事には特に研究を要するものと思へる。

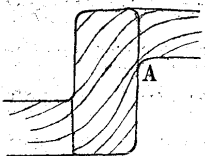
IV. 曲軸鋼の熱處理と疲労耐久性

従來の曲軸用鋼材の熱處理は油中焼入又は空氣中冷却後焼戻 (油中又は空氣中冷却) を施したものが多し。焼入後焼戻温度を種々に施した場合各種曲軸用特殊鋼の硬度 (抗張力は硬度に概ね正比例す) と衝擊値との關係を示す時は第 4 圖其 2 及其 3 に示す様である。この曲線から見られる通り焼戻温度約 $650^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ に於けるものは何れの鋼でも硬度が最低く、衝擊値が大である。而して實用的の焼戻温度は普通 $550^{\circ}\text{C}\sim 630^{\circ}\text{C}$ が多い。鋼の使用状態としてはこの温度の範囲にあるのは従來一般に要求された傾向として、抗張力と衝擊値とを併せ有する事を重視したものであると思はれるが、一方疲労試験の結果によれば 500°C 若しくは之れ以下の或範囲の方が耐久度大である事が知られてゐる。故に將來の傾向としては焼戻温度の若干低い方を採用すべではないかと思ふ。この様にすれば規格上の衝擊値の規定は當然相當に緩和すべきであると思ふ。

焼戻温度別に各種鋼材の耐久度の比較は第 4 圖其 1 を参照すれば一般趨勢が分る。尙之等の試験結果は第 VI 章に記載してある。

V. 分離抗張試験

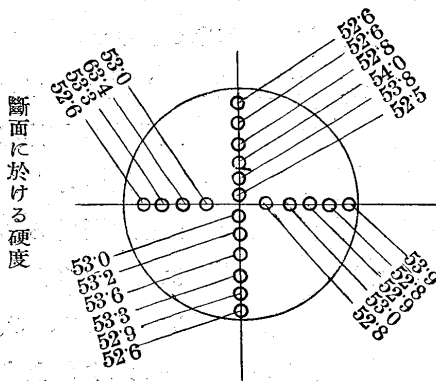
曲軸鋼として使用される様な強靱鋼では如何なる成分の鋼と、如何なる熱處理状態を撰ぶ事が最耐久度大であるかを知る事は非常に肝要である事は勿論であるが、之が正しい目標を得る爲の實驗として疲労試験以外に分離抗張試験を行つて見た。この實驗の方法や結果の大要は、日本航空學會誌第 1 卷第 1 號に記載されてゐる。



第1表 分離抗張試験 材料 94kg Ni~Cr 鋼 試験片溝の角度 60°

熱處理 °C	平行部		溝底部		溝底徑と 平行部と の面積 の比 %	最大 荷重 kg	抗張力 kg/mm ²	伸 l=65mm		斷 收 縮 後 徑 mm	面 率 %	ロ ッ ク ウ エ ル 硬 度								
	徑mm	斷面積 mm ²	徑mm	斷面積 mm ²				mm	%			C								平均
燒入 850 油冷	18'00	254.4	丸棒試験片		100.00	52,400	205.9	69.1	6.3	17.09	9.9	(此試験片にて斷面に於ける硬度を測定す)								* 圖
	20'00	314.16	18'04	255.50	81.0	36,200	141.6					54.5	54.7	54.5	54.9	54.6	54.9	54.7		
	20'00	314.16	14'00	153.80	49.0	14,850	96.6					54.2	54.2	54.3	54.1	53.9	54.6	54.2		
	20'00	314.16	15'98	210.60	63.9	25,100	125.1					54.7	54.2	54.2	54.1	54.1	54.1	54.1	54.2	
	20'00	314.16	12'18	116.55	37.1	14,200	121.7					52.0	51.8	51.8	51.7	51.7		51.6		
	20'00	314.16	8'93	62.60	19.9	8,500	135.7					51.8	51.9	51.5	52.0	52.1	52.2	52.0		
燒入後 燒戻 100 油冷	18'00	254.4	丸棒試験片		100.0	52,400	205.9	69.1	6.3	17.01	9.9	54.7	54.6	54.2	54.4	54.5	54.9	54.6		
	20'00	314.16	18'06	256.00	81.5	33,800	132.0					53.9	54.1	54.9	54.8	54.8	54.1	54.4		
	20'00	314.16	16'00	201.00	64.0	24,500	121.8					54.2	54.1	54.0	54.0	54.1	54.5	54.2		
	20'00	314.16	13'98	153.50	48.9	13,350	87.0					51.9	51.8	51.8	52.0	51.9	52.0	51.9		
	20'00	314.16	11'60	105.70	33.7	11,200	105.9					51.7	52.1	51.9	52.0	52.9	52.0	52.1		
	20'00	314.16	9'24	67.10	21.4	8,700	129.7													
燒入後 燒戻 210 油冷	18'00	254.40	丸棒試験片		100.0	49,150	193.1	73.8	13.5	14.11	38.6	53.9	53.5	53.1	52.9	53.2	53.1	53.3		
	20'00	314.16	18'03	255.10	81.5	45,700	179.0					53.6	53.3	53.0	53.5	53.0	53.0	53.1		
	20'00	314.16	16'00	201.00	64.0	36,300	180.5					52.8	53.6	53.0	53.3	52.8	53.8	53.2		
	20'00	314.16	14'00	153.80	49.0	21,500	139.8					50.7	51.0	51.0	51.0	50.3	50.7	50.8		
	19'99	311.00	12'10	115.00	37.0	24,700	214.8					50.0	50.1	49.3	49.0	48.7	50.4	49.6		
	20'00	314.16	8'85	61.50	19.6	14,000	227.7													
燒入後 燒戻 320 油冷	18'00	254.40	丸棒試験片		100.00	43,150	169.5	74.1	14.0	12.90	48.7	48.2	48.6	47.9	47.2	48.0	48.3	48.0		
	19'90	311.00	18'03	255.10	82.1	44,150	173.0					48.7	48.8	48.9	48.7	47.6	48.5	48.5		
	19'90	311.00	16'00	201.00	64.6	35,350	175.8					47.8	48.1	46.4	48.9	47.6	48.4	48.2		
	19'90	311.00	14'00	153.80	49.5	25,420	165.3					46.0	46.2	46.6	46.4	46.1	46.5	46.3		
	20'00	314.16	12'06	114.30	36.4	20,100	175.9					46.2	46.3	64.0	46.6	46.5	46.5	46.4		
	20'00	314.16	9'25	67.20	21.4	12,400	184.5													
燒入後 燒戻 400 油冷	18'00	254.40	丸棒試験片		100.0	38,650	151.8	73.3	12.8	13.36	44.9	44.1	45.1	45.0	44.2	44.8	44.7	44.7		
	19'95	312.50	18'10	257.10	82.3	42,650	165.7					45.1	44.1	44.0	44.0	45.0	44.4	44.4		
	19'90	311.00	16'00	201.00	64.6	34,500	171.6					44.1	44.3	44.0	44.9	45.0	45.0	44.6		
	20'00	314.16	14'00	153.80	49.0	23,100	150.2					42.0	42.3	41.8	42.0	42.0	41.9	42.0		
	20'00	314.16	12'03	113.70	36.2	21,300	187.5					41.8	41.5	41.4	42.0	41.0	41.7	41.6		
	20'00	314.16	9'08	64.80	20.6	12,000	185.4													
燒入後 燒戻 500 油冷	18'00	254.40	丸棒試験片		100.0	30,500	119.8	76.3	17.4	12.26	53.6	36.9	36.4	36.5	37.0	36.7	36.4	36.7		
	19'95	312.50	18'00	254.40	81.4	35,350	138.9					36.2	31.6	36.8	36.3	35.9	36.1	36.3		
	19'95	312.50	15'97	200.10	64.3	32,300	161.3					36.3	36.0	36.2	36.1	36.4	36.1	36.2		
	19'95	312.50	14'00	153.80	49.2	25,800	167.8					34.3	35.0	34.7	34.9	35.0	34.7	34.8		
	20'00	314.16	11'96	112.40	35.8	20,600	183.4					35.0	34.8	35.0	35.1	35.0	34.8	35.0		
	19'95	312.50	9'18	66.20	21.1	12,800	193.4													

備考 燒入 850°C 油冷 *圖



但鋼の燒戻温度の低い場合と高い場合とでは強度と靱性の保有量が異つてゐて、何れの場合が耐久度の見地に於て有効であるかは疲労試験以外にこの分離抗張試験結果によつても判別する事が出来ると思ふ。

1. 實驗其 1 先づ 94kg Ni~Cr 鋼に就て燒入の儘のものと燒入後燒戻温度を 100°C 乃至 500°C 迄の状態で分離抗張試験を行つた。この結果は第 1 表第 1 圖の様に

なつた。從來燒戻温度の高い時の研究は多く行はれ又其性質も相當に知られてゐるので、本試験では低温の場合を特に研究したのである。又耐久度は低温燒戻の場合には高い傾向にある事が明であるから、其限界温度を見定める必要もあると思ひ本試験を行つたのである。但試験片は丸棒であつてその徑 20mm 溝の角度 60° に一定した。

試験の結果から次の様に興味ある事實を推定する事が出来た。

a. 燒入の儘のもの及燒戻 100°C のものでは丸棒の抗張力に比して切溝の深くなるに従つて其抗張力は逐次低下して遂に 50% の切溝に至つて極小の値に達する。之以上深くなつた場合には深くなる程抗張力を増す。

燒戻温度 200°C 以上 400°C 迄の範囲では切溝の深くなる爲に抗張力の低下する割合が逐次減じ、500°C に至つて切溝の爲抗張力の低下する事なく切溝の深さに正比例して直線的に抗張力を増す。

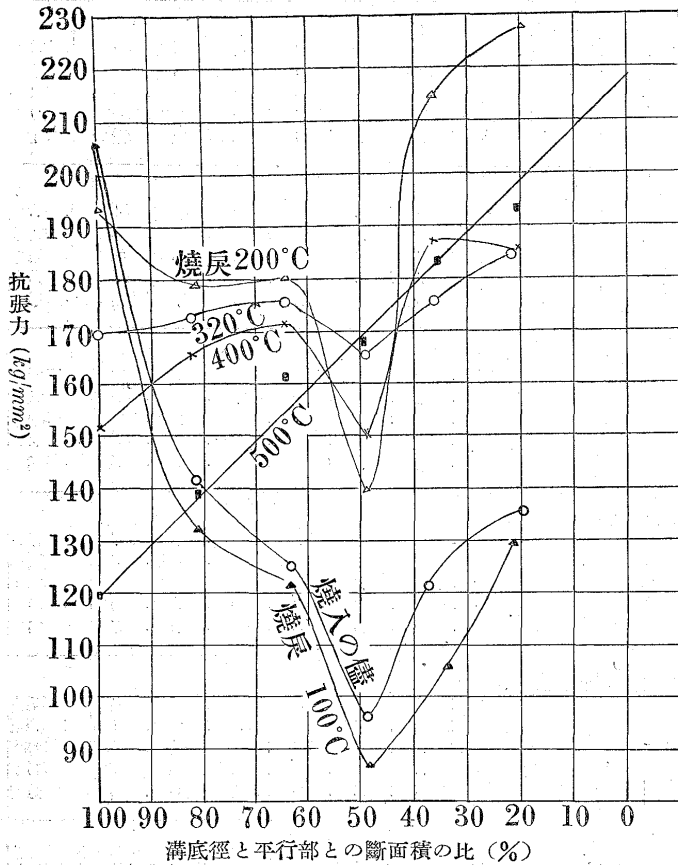
第1圖 分離抗張試験

材料 94kg Ni~Cr 鋼 15889

試験片 溝の角度 60°, 平行部徑 20mm

区分	焼戻温度 °C	伸 %	断面収縮率 %	区分	焼戻温度 °C	伸 %	断面収縮率 %
●	焼入の儘	6.3	9.9	○	320	14.0	48.7
▲	100	6.3	9.9	×	400	12.8	44.9
△	200	13.5	38.6	■	500	17.4	53.6

備考 伸及断面収縮率は丸棒試験片の場合とす



- b. 焼戻 500°C に於ける丸棒抗張試験の断面収縮率が 53.6% であつて 400°C に於けるものは 44.9% である。この結果によれば断面収縮率約 50% 以上の材料では分離抗張試験を行へば切溝の深くなる程抗張力が正比例して増大し、極限值たる分離抗張力は丸棒抗張力の約 2 倍になる。
- c. 焼入の儘のものや焼戻の低い鋼材の試験片に切溝を付けたものの抗張試験の際抗張力の低下する事實は次の様に説明する事が出来る。即ちかゝる熱処理状態では切溝を付けた試験片自身が著しく硬脆であつて如何なる力を受けても變形と歪りとは生じ難い状態にあると見做されるが故に、若しこれに對して引張試験を行つたとすれば、溝の底に著しく大なる偏心的應力の集中を生じ易くなり、或局部から破斷を始め試験片全斷の破斷荷重を低下する事となるものと思ふ。或一定の深さのものに於て最低極限のある事は其深さの状態で偏心的應力集中の影響の最大である事を

示すものである。尙或深さ以上に達する時は偏心的荷重よりも溝底断面に平均に變形や歪りを阻止する様な状態で受ける荷重の爲に、溝の深くなればなる程その影響が強化されて逐次抗張力を増すものと解釋出来る。

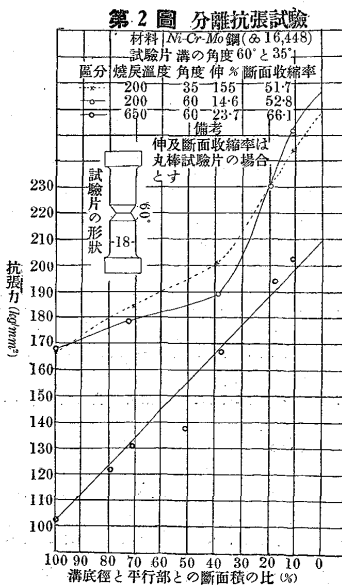
尙この實驗から明に次の事實を認める事が出来る。

a. 特殊鋼の焼戻温度の低く硬度の高い方が耐久試験の結果は良好である事は既に知られてゐるが、焼入状態や焼戻温度の餘り低い時は組織上不安定であつて、殊に Notch effect を鋭敏に受ける爲に實際には焼戻温度適當のものに比し却つて耐久度が劣る事は本實驗の結果推定されると思ふ。

この點に於て 94kg Ni~Cr 鋼では 500°C 附近の焼戻が最適當ではないかと思はれる。將來或鋼種の最適當な焼戻温度を決定する爲には、本試験の様な分離抗張試験を行つて、溝の深さと抗張力との關係が直線的に上る温度を定めその最低温度を焼戻温度とする事は、疲勞耐久度を考慮した最合理的な方法の様に考へられる。

b. 從來一般材料に要求された事は強度と靱性とを兼ねる事であつて、この要求は或程度迄耐久性の點では正しいと思はれる、併し靱性を過大に要求する時には耐久性を低下するので其安全限界を見定める事は從來は不明であつた。將來分離抗張試験を行つて上記の結果を得られる様な焼戻温度を決定する事は將來すべての強靱鋼にも適用出来るのではないかと思はれる。若し之事實正しければ差當り規格等の要求としてはこの温度に相當した機械的試験結果によつて總ての數値を決定すべきであらう。

2. 實驗其 2 分離抗張試験中偏心的荷重のかゝる事は



試験片の把持部を把握する時の不具合により垂直に引張られない事に原因するかも知れない疑もあるので、第2圖に示す様な把持部を有する試験片に就いて同様な分離抗張試験を行つて見た。試験に供せられた鋼は Ni~Cr~Mo 鋼であつて成分は第2表に記載してある。

本鋼に低温焼戻(200°C)を行つた場合と高温焼戻(650°C)を行つた場合との分離抗張試験結果は第2圖に示してある。この結果によれば把持部の影響極めて少く實驗其1の場合と殆んど類似の影響のある事が分つた。

焼戻温度 650°C では溝の深さに正比例して抗張力の増大する事も前と同様である。又 200°C 焼戻の場合溝の角度を 35° と 60° に區別して比較した結果何れも大差のない事が分つた。

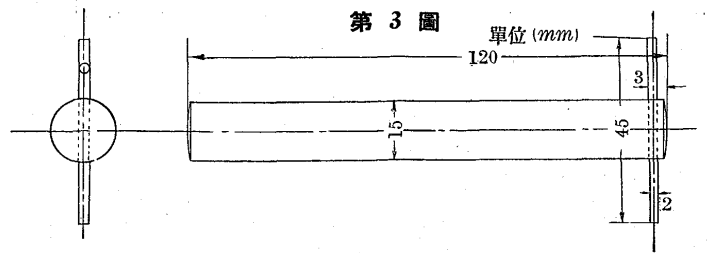
VI. 疲勞試験と耐久性

本論文では第2表に示す様な各種鋼材を研究に用ひた。之等鋼材の一般的機械試験性質を記載すれば第2表の通りである。

尙参考として現用各種曲軸鋼の規格と變態點とを比較する爲第3表に示した。第2表中 Ni-Cr-Mn 鋼と云ふのは Ni-Cr-Mo 鋼 (CN 12 鋼と稱し、Ni 3%, Cr 3%) の代用であつて、Ni を半減し Mn を増したものであり、Cr 6% 鋼は Ni の量を全く Cr を以て置換したものである。

1. 實驗其1 連續衝擊曲げ試験による疲勞耐久性 (Amsler Universal Hammer Machine)

第3圖に示す丸棒の試験片の中央に衝擊曲げ荷重を加へつゝ破斷迄の回数を測定し耐久度を比較した、但打擊活量を一定とし鏈の位置を 5cm と定めた。(鏈の位置を曲臂の曲率半径 R=5cm とす) 勿論本實驗は多くは材料の疲勞限度以上の過負荷による耐久度の比較であつて、一般の曲軸



鋼が發動機の運轉中に於て受ける様な形式の衝擊力と同様に見做されるを以て實際になるべく近き荷重に對する耐久度を知る事が出来ると思ふ。

各種鋼材(第2表及第3表参照)の種々の熱處理状態に於て行つた試験結果は第4表其1乃至其3並に第4圖に示してある。第2表は本研究に用ひた鋼材の分析成分及實驗した機械的諸試験結果であり、第3表は之等曲軸用鋼の規格を比較對照するに便ならしめたものである。

これ等の試験結果を通覽する時は總ての鋼材に於て焼戻 650°C 乃至 700°C の温度では硬度最低く、衝擊値は最高く、耐久度は最低い。而も各鋼種共この温度では殆んど同程度の耐久度である事が分る。この結果から見る時は特殊鋼として成分上如何なる高級のものを使用しても 650°~700°C 附近で焼戻を行つた場合には性能上大差はない事が明かであるからかゝる温度を撰んで使用してはならぬ。故に高級の特殊鋼を使用するには焼戻温度を低くする事は必要であつて普通 500°C 附近がよいと思はれる。従つて衝擊値は若干低く共かゝる温度であれば耐久性を著しく大ならしめる事が出来ると思ふ。

以上實驗された耐久度を吸收エネルギー(kgcm/cm²)とし

第2表 供試曲軸用鋼(化學成分並各種熱處理に對する機械的性質)

鋼種	化學成分								機械的性質						熱處理
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	其他	降伏點 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸%	斷面 收縮率 %	衝擊值 kgm/cm ²	ブリネル 硬度	
94kg Ni-Cr 鋼	0.29	0.22	0.48	0.016	0.019	3.49	1.07	—	91.3	103.8	21.0	61.8	11.2	304	燒入 850°C 油冷 燒戻 600°C 油冷
102kg Ni-Cr 鋼	0.29	0.18	0.38	0.018	0.011	3.22	1.29	W 0.37 Mo 0.42	104.2	117.6	19.0	66.3	13.4	348	燒入 830°C 油冷 燒戻 600°C 油冷
Ni-Cr-W 鋼 (BMW)	0.21	0.20	0.38	0.010	0.019	4.11	1.71	W 0.61	—	—	—	—	16.3	287	燒入 850°C 空冷 燒戻 600°C 空冷
Cr-V 鋼	0.37	0.29	0.49	0.01	0.03	—	1.51	V 0.25	—	—	—	—	8.3	277	燒入 850°C 油冷 燒戻 600°C 空冷
Ni-Cr-Mo 鋼 (佛製 CN12)	0.28	0.21	0.13	0.014	0.021	2.83	3.13	Mo 0.42	124.5	137.2	18.3	57.5	6.91	395	燒入 850°C 空冷 燒戻 600°C 空冷
Ni-Cr-Mo 鋼 (日特製 CN12)	0.24	0.13	0.39	—	0.006	2.91	3.00	Mo 0.58	98.6	113.0	23.2	67.1	16.7	326	燒入 850°C 空冷 燒戻 600°C 空冷
Mn-Cr 鋼 (マクロン)	0.23	0.15	1.40	0.010	0.005	0.14	0.90	—	—	—	—	—	22.5	250	燒入 850°C 油冷 燒戻 600°C 空冷
Ni-Cr-Mo 鋼 (タハード)	0.19	0.16	0.73	0.013	0.005	3.17	1.75	Mo 0.57	—	—	—	—	18.5	320	燒入 850°C 空冷 燒戻 600°C 空冷
Ni-Cr-Mn 鋼	0.22	0.24	0.99	0.010	0.004	1.46	3.30	Mo 0.67	118.8	128.0	15.7	57.2	10.0	383	燒入 920°C 空冷 燒戻 600°C 空冷
6% Cr 鋼	0.32	0.20	0.56	0.017	0.022	—	5.60	Mo 0.50	113.2	122.8	18.7	61.3	9.53	351	燒入 870°C 油冷 燒戻 600°C 油冷

第3表 各種曲軸用鋼(化學成分並機械的性質)

鋼種	化學成分								機械的性質					
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	其他	降伏點 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸% 斷面收縮率%	衝擊值 kgm/cm ²	ブリネル 硬度	
86kg Ni-Cr 鋼	0.25~0.32	0.35 以下	0.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	2.50~3.50	0.60~1.00	—	70以上	86以上	18 以上	50以上	12以上	250~302
94kg Ni-Cr 鋼	0.32~0.40	"	"	0.030 以下	0.030 以下	3.0~4.0	0.7~1.3	—	78以上	94以上	15 以上	40以上	9以上	270~321
102kg Ni-Cr 鋼	0.20~0.35	"	"	0.030 以下	0.030 以下	2.7~3.5	1.0~1.4	W 1 以下 V 0.25 以下 Mo 0.60 以下	—	102以上	17 以上	40以上	8以上	293~341
Ni-Cr-W 鋼 (BMW) 甲	0.17~0.30	"	"	0.030 以下	0.030 以下	3.5~4.5	1.0~1.7	W 0.5~1.1	100以上	115以上	13 以上	40以上	8以上	標準約 350°
Ni-Cr-W 鋼 (BMW) 乙	"	"	"	0.030 以下	0.030 以下	"	"	"	90以上	100以上	15 以上	45以上	9以上	
Cr-V 鋼	0.25~0.35	"	"	0.030 以下	0.030 以下	"	1.0~1.5	Mo 0.65 以下	75以上	90以上	15 以上	50以上	9以上	250~320
Ni-Cr-Mo 鋼 (CN 12)	0.25~0.35	"	"	0.030 以下	0.030 以下	2.5~3.5	2.5~3.5	Mo 0.5~0.7	80以上	110以上	15 以上	45以上	8以上	300~350
Ni-Cr-Mo 鋼 (Tahard)	0.19	0.16	0.73	0.013 以下	0.005 以下	3.17	1.75	Mo 0.57	(實際の分析及試験結果を示す)			18.5	320	

鋼種	熱處理		變態點				備考
	燒入溫度	燒戻溫度	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₃	Ar ₁	
86kg Ni-Cr 鋼	燒入 820°~870°C 油冷	燒戻 550°C~620°C 水又油冷	710	760	460	360~410	變態點は其一例を參考に記載せるものにして、上記の成分範圍に於けるものに就ては何れも若干の變更はあるものとす。
94kg Ni-Cr 鋼	燒入 820°~880°C 油冷	燒戻約 600°C 以上水又油冷	710	770	410	330	
102kg Ni-Cr 鋼	燒入 800°~850°C 油冷	燒戻 500°~600°C 水又油冷	735	800	435	380~340	
Ni-Cr-W 鋼 (BMW) 甲	燒入 800°~850°C 空冷		715	775	410	350	
Ni-Cr-W 鋼 (BMW) 乙	燒入 830°~870°C 空冷	燒戻 500°~600°C 油冷又空冷	715	775	410	350	
Cr-V 鋼	燒入 850°~900°C 油冷	燒戻 550°~630°C 油冷					
Ni-Cr-Mo 鋼 (CN 12)	燒入 850°~950°C 空冷	燒戻 600°C 以上油冷又空冷	735	790	310~330	180~280	
Ni-Cr-Mo 鋼 (Tahard)	燒入 850°C 空冷	燒戻 600°C 空冷					

第4表 其の1 各種曲軸鋼、耐久性能

(Amsler Hammer Machine R=5cm による吸収エネルギー)

熱處理	破斷回数	吸収エネルギー kgcm/cm ² (×10 ⁶)	同平均	ロックウエル C 硬度	熱處理	破斷回数	吸収エネルギー kgcm/cm ² (×10 ⁶)	同平均	ロックウエル C 硬度
Mn-Cr 鋼(マクロン& 2101)									
燒戻300°C 空	72,660	2,045	2.388	36.7	燒戻400°C 空	170,230	4,830	6.355	39.6
	98,050	2,730				283,300	7,880		
" 400°C 空	73,860	2,060	2.430	32.4	" 550°C 空	194,310	5,400	4.290	3.86
	72,530	2,025				114,560	3,180		
" 500°C 空	47,160	1,315	1.338	29.5	" 600°C 空	162,120	4,700	3.500	34.2
	48,820	1,360				81,080	2,300		
" 600°C 空	28,560	0,800	0.825	24.1	" 650°C 空	79,050	2,210	1.936	28.4
	30,490	0,850				59,460	1,661		
" 700°C 空	28,200	0,791	0.623	20.3	" 700°C 空	38,440	1,080	1.170	28.9
	16,330	0,455				45,160	1,259		
" 750°C 空	29,390	0,957	0.850	22.8	" 750°C 空	152,710	4,270	3.120	37.7
	26,660	0,742				70,910	1,970		
" 850°C 空	21,830	0,612	0.612	21.1	" 900°C 空	160,940	4,510	5.525	42.6
	35,360	1,000	0.984	24.0		233,430	6,540		
" 950°C 空	34,360	0,968			94kg Ni-Cr 鋼(&15913 Aw 20)				
Ni-Cr-Mo 鋼(タハード& 8979)									
燒戻300°C 空	229,700	6,380	5.150	39.6	燒戻500°C 空	48,260	1,400	1.6465	33.2
	139,050	3,920				64,850	1,893		
					" 650°C 空	46,510	1,356	1.2025	27.7
						34,720	1,050		
					" 750°C 空	145,480	4,270	3.705	38.1
						93,100	3,140		

94kg Ni-Cr 鋼 (大同製、高周波電爐鋼)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度	熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻510°C 油	140,460 151,170	3,916 4,185	4,051	37.2	燒戻700°C 油	37,310 32,950	1,044 0,9867	1,0153	28.5
// 600°C 油	57,080 75,670	1,504 1,980	1,742	30.7	// 760°C 油	32,990 49,610	0,9345 1,4050	1,1698	30.8
// 660°C 油	65,620 71,330	1,828 1,977	1,903	29.7	// 850°C 油	408,010 186,820	11,560 5,360	8,460	48.2

100kg Ni-Cr 鋼 (⊗ 1608)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻300°C 空	220,470 279,290	6,234 7,901	7,068	4.56
// 400°C 空	145,710 185,620	4,122 5,250	4,686	40.2
// 500°C 空	185,820 94,020	5,190 2,660	3,925	38.2
// 600°C 空	86,980 78,710	2,460 2,224	2,342	30.8
// 750°C 空	53,370 68,530	1,510 1,940	1,725	28.7

第4表 其の2 各種曲軸鋼、耐久性表

(Amsler Hammer Machine R=5cm による吸收エネルギー)

Ni-Cr-Mo 鋼 (佛 CN 12)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒入850°C 空	722,720	20,00		49.6
燒戻200°C 空	373,340	9,740		47.2
// 300°C 空	673,940	19,020		47.5
// 400°C 空	344,250	9,511		44.2
// 500°C 空	401,760	11,100		43.2
// 550°C 空	305,760	8,454		43.0
// 600°C 空	129,880	3,591		38.9
// 650°C 空	90,280	2,480		29.1
// 700°C 空	50,530	1,388		25.4
// 750°C 空	38,910	1,100		21.3

Ni-Cr-Mo 鋼 (CN 12 ⊗ 8999)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻500°C 空	191,670 274,960	5,430 7,870	6,650	41.8
// 550°C 空	234,350 258,130	6,660 7,030	6,845	40.5
// 600°C 空	147,840 164,550	4,175 4,650	4,410	37.2
// 700°C 空	46,760 46,320	1,360 1,312	1,336	27.3
// 750°C 空	67,540 54,290	1,880 1,580	1,730	30.0
// 800°C 空	154,890 115,120	4,515 3,370	3,940	37.6
// 850°C 空	275,650 131,640	8,240 3,780	6,010	45.8
// 900°C 空	232,160 140,190	6,800 4,135	5,470	46.5

Ni-Cr-Mn 鋼 (高周波電爐鋼 ⊗ 1103)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻550°C 油	107,150 103,300	2,998 2,873	2,936	41.1
// 600°C 油	76,730 98,640	2,3075 2,894	2,601	38.2
// 650°C 油	48,730 57,200	1,3645 1,6100	1,487	31.2

Ni-Cr-Mn 鋼 (高周波電爐鋼 ⊗ 1103)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻600°C 空	190,660	5,371		39.7
// 700°C 空	59,020	1,668		28.7
// 750°C 空	56,200	1,584		29.9
// 800°C 空	55,370	1,549		40.4

6%Cr 鋼 (⊗ 20326)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒房500°C 油	171,910	4,873		41.3
// 600°C 油	130,390	3,721		36.1
// 700°C 油	33,830	0,9533		24.2
// 750°C 油	26,080	0,7347		21.7

第4表 其の3 各種曲軸鋼、耐久性表

(Amsler Hammer Machine R=5cm による吸收エネルギー)

6%Cr 鋼 (⊗ 20322)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻500°C 油	188,570	5,380		42.2
// 600°C 油	123,410	3,454		36.7
// 700°C 油	34,740	0,9923		25.9
// 750°C 油	23,960	0,6710		21.4

Ni-Cr-W 鋼 (BMW) (⊗ 15367)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻500°C 空	169,040 115,840	4,69 3,22	3,955	33.7
// 550°C 空	53,500 144,320	1,50 4,05	2,775	34.0
// 600°C 空	95,180 76,430	2,665 2,145	2,405	31.1
// 650°C 空	63,410 54,040	1,780 1,527	1,654	25.5
// 700°C 空	52,600 45,450	1,477 1,277	1,377	30.1
// 750°C 空	130,650 67,830	3,710 1,960	2,835	37.1
// 800°C 空	126,050 153,950	3,545 4,320	3,933	38.4
// 900°C 空	158,180 155,820	4,400 4,365	4,383	37.0

Ni-Cr-Mo 鋼 (日本樂器
Viberac)

熱處理	破斷回数	吸收エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均	ロックウエル C 硬度
燒戻500°C 空	83,850 131,990	2,405 3,649	3,027	37.3
// 600°C 空	80,950 74,780	2,269 2,132	2,201	32.1

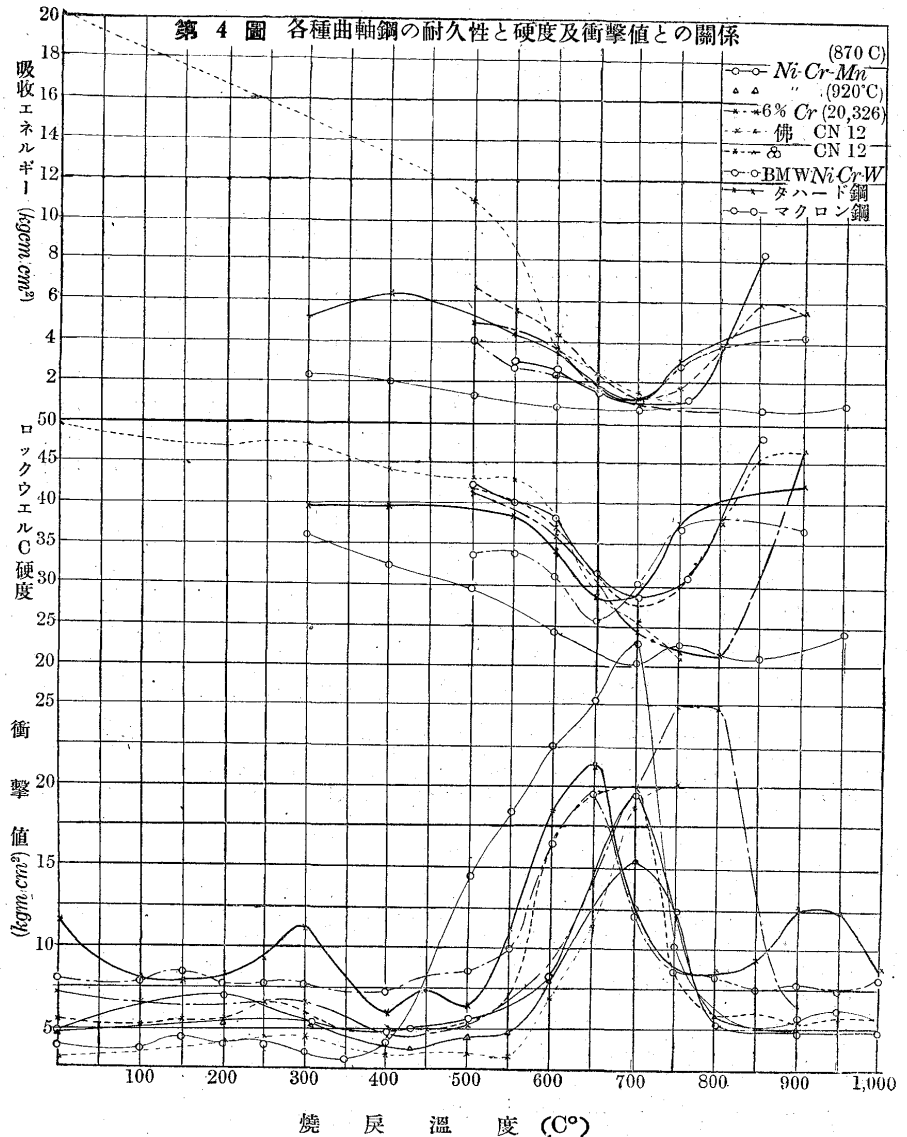
て示した値と、鋼材全部に互りロックウエル C 硬度との關係を示す時は第 5 圖の通りである。この關係で明かな事實は

- a. 硬度の高いものは概して耐久度は大である。故に耐久度の高いものを選定するとせば硬度並に抗張力の高いものを選ぶべきである。
- b. 硬度の低いものでは鋼種に關係なく耐久度の差が少く、硬度の高いものでは其差が著しい。
- c. *Ni-Cr-Mo* 鋼 (CN 12) は硬度の高い状態で使用すれば非常に耐久度大である。
- d. *Mn-Cr* 鋼や *Cr* 鋼 (*Cr* 1.8%) 等は *Ni* を含んだものに比し同程度の硬度のものでも耐久度に於て劣る。
- e. *Ni-Cr-W* 鋼 (BMW 鋼) は硬度が比較的低い状態でも相當耐久度が大である。
- f. 如何なる特殊鋼でも硬度を低くして使用すれば優劣が失くなる。

尙各種特殊鋼 (3 種を比較す) の種々の熱処理を行つた時の状態に於ける衝擊値 (Charpy) の異なるに應じて耐久度 (Hammer Machine による吸収エネルギー $kgcm/cm^2$ で示す) が如何に影響されるかを示せば第 6 圖に示す様になる。同圖から次の事實を知る事が出来る。

- a. 總ての鋼を通して衝擊値の低いものの方が概して耐久度は大であるが、衝擊値の低い範圍では耐久度の差は相當に大きく而もかかる差は鋼種によつて著しく異なる事が分る。
- b. *Ni-Cr-W* 鋼では衝擊値が比較的に大となつても耐久度は相當に大であり、衝擊値が變化しても餘り耐久度に變化を與へない様である。

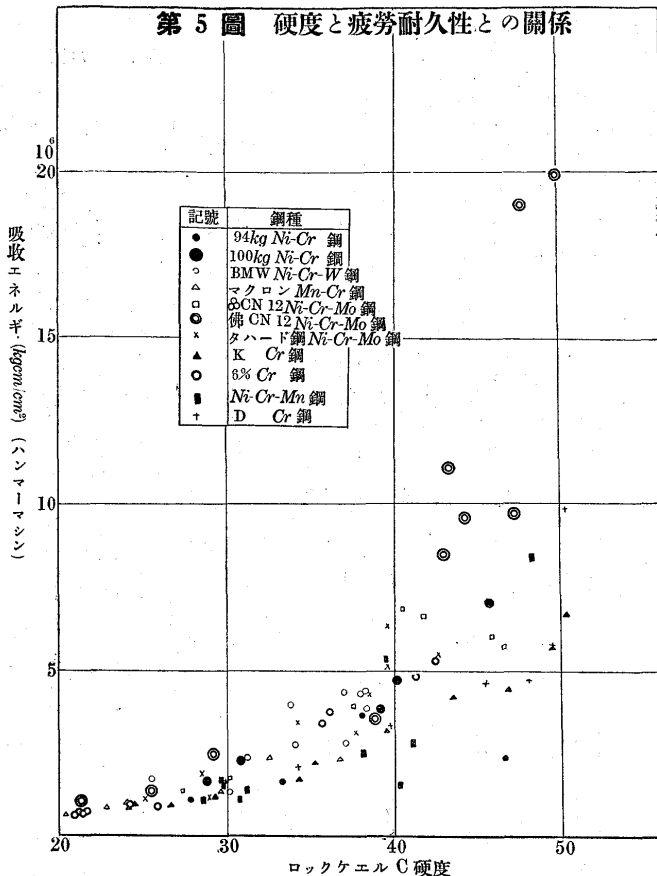
以上論述せられた結果を総合して各種特殊鋼 (曲軸用に供し得ると認められる鋼) の焼戻温度別の状態、硬度、衝擊値の變化と對照して耐久度 (Hammer Machine による吸収エネルギー $kgcm/cm^2$) の變化する狀況を示す時は第 4 圖の結果が得られる。



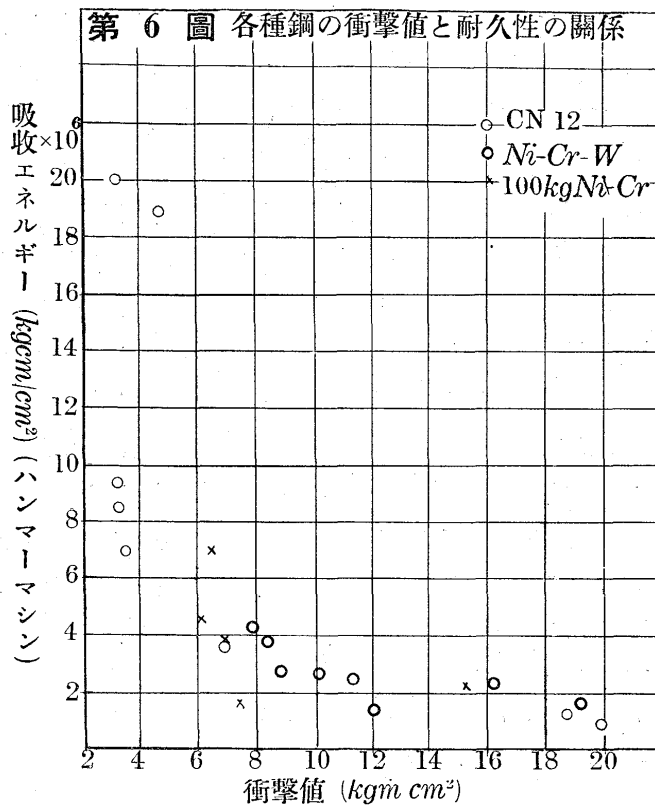
この結果によれば前述の事實を一層深く確認する事が出来る。参考の爲に前述以外の事實を各特殊鋼に就いて要約すれば、

- a. *Ni-Cr-Mo* 鋼 (CN 12 鋼) は強力な曲軸用として研究する必要がある。但 600°C 以下 (600°C 以上では無効) の焼戻温度、例へば 500°C 附近を撰ぶを可とする。かくすれば衝擊値の如きは規格に示される數値よりも著しく低い事があつても耐久度に於ては寧ろ安心であらう。尙又 600°C 焼戻としても他の鋼に比し安全性は相當大であらう。
- b. 今回研究された 6% *Cr* 鋼は CN 12 鋼に餘り劣る事なく之が代用として使用される見込がある、本鋼の特徴は焼戻温度が 700°C~800°C の廣い範圍に於て熱すれば最靱性に富んでゐる故熱處理作業に便である外、機械的加工も容易であり、且變態點以上での焼入効果が充分である爲に曲軸としても相當有效であらう。

第5圖 硬度と疲労耐久性との關係



第6圖 各種鋼の衝撃値と耐久性の關係



c. マクロン鋼は強度、耐久度共に低く、強馬力發動機曲軸には不適當であらう。自動車用曲軸其他の加工容易である事を主眼とする構造用鋼として適當すると思はれる。

d. Ni-Cr-Mo 鋼 (タハード鋼)、及 Ni-Cr-W 鋼 (BMW 鋼) は同様の性質を有してゐるが前者の方幾分靱性に富み耐久度も稍大である。故に Ni-Cr-Mo 鋼で曲

軸を試作し研究する價值があらう。

e. 何れの特種鋼でも總て 650~750°C の範圍の燒戻溫度を撰ぶと假定すれば、Hammer Machine で求めた耐久度では何れも同程度で最劣る事は明瞭であるから、將來はかゝる溫度は絶対に撰ぶべきではない。

曲軸としての製品から採取した試験片の耐久度を見る爲

第5表 曲軸より採取せる試験片の耐久性 (Amsler Hammer Machine, R=5cm)

種別	試験片の採取位置	破断回数 N	吸収エネルギー $kgcm/cm^2$ ($\times 10^6$)	同平均 ($\times 10^6$)	ロックウエル C 硬度	化學成分			
						C	Ni	Cr	W
NC ₂ 曲軸鋼 (300馬力用曲軸)	轉軸	49,550 61,610	1.3870 1.7150	1.5510	28.6 28.7	0.49	2.22	0.93	—
	曲軸臂	23,870 25,950	0.7930 0.7218	0.7574	28.4 28.8				
Ni-Cr-W 曲軸鋼 (外國製 450馬力用曲軸)	第3~4轉軸	137,770 189,940	4.0720 5.7300	4.9010	36.1 36.2	0.18	4.11	1.66	1.00
	第2曲軸臂	120,160 172,960	3.4820 5.1300	4.3060	35.9 36.2				
Ni-Cr-W 曲軸鋼 (内地製 450馬力用曲軸)	第2~4轉軸	196,910 145,050	5.7470 4.2220	4.9845	38.1 37.8	0.17~0.30	3.5~4.5	1.0~1.7	0.5~1.1
	第2曲軸臂	119,690 153,940	3.4830 4.4980	3.9905	38.0 38.0				
同上	第4~5轉軸	157,060 150,250	4.4550 4.2320	4.3435	36.0 35.8	0.14	4.23	1.82	0.78
	第3~4曲軸臂	111,560 113,100	3.1460 3.1690	3.15575	36.2 36.0				
同上	第2~3轉軸	106,770 93,560	2.9910 2.6200	2.8055	42.1 42.6	0.21	3.96	1.43	0.89
	第1曲軸臂	127,150 84,820	3.5610 2.3750	2.9680	41.5 42.1				
參考 Ni-Cr-W 曲軸鋼 (内地製 700馬力 曲軸用彈性軸)	彈性軸	71,030	1.9840	1.9275	31.2	0.17~0.30	4.10	1.83	0.78
		72,170	1.8710		31.1				

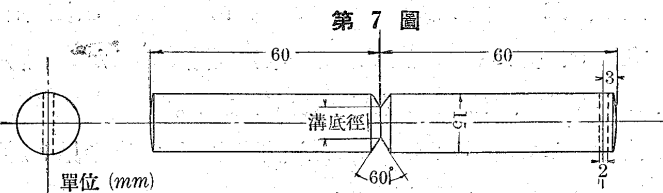
に今日迄折損した各種發動機用曲軸の實體から試験片を採取して、Hammer Machine による破断迄の耐久度を測定し比較した結果は第5表に示してある。之等の値と硬度との比較も對照して見る時は次の如き事實を認められる。

即ち Ni-Cr-W 鋼の同一成分のもので硬度の高いものでも低いものに比し特に耐久度の劣るものがある。之理由は鋼材の切溝影響が特に著しかつたものと推定される。又曲軸彈性軸の一例で焼戻温度の特に高い爲に耐久度の著しく低いものがある事が知られる。即ちかかる破損は焼戻温度の過高な事に歸する事が出来る。又 Ni-Cr 鋼 (NC₂) では成分の關係で硬度も低く耐久度も著しく低い事が明かである。之故障は成分上の不適當から起つたものと思ふ。

何れの曲軸も折損したものであつて金質として何等の異状のない者もあるのは、機械仕上の不備や取扱の不適當や酷使に基く過負荷等が原因して折損に至つたものであらう

2. 實驗其 2 切溝試験片による Amsler Hammer Machine の耐久性

本實驗に用ひた試験片は第7圖に示す様なもので Amsler Hammer Machine の試験片の中央に 60° の溝を附して、其切込みの深さを變化し、溝底の徑を 14, 13, 12, 11, 10, 9mm となし、之に對し Hammer Machine によ



る破断回数を求め同様な丸棒に就ての耐久度とを比較した
 試驗要領は實驗其 1 と同様にし只鈍の位置を種々に區分した。供試鋼材は Ni-Cr-Mo 鋼(タハード鋼)と Cr-V 鋼であつて成分は第6表の通りである。前者は後者に比し著しく強靱性大である。

第 6 表

鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	熱處理
Ni-Cr-Mo鋼	0.19	0.16	0.73	3.17	1.75	0.57	—	燒入 850°C 空冷、 燒戻 200~650°C 空冷
Cr-V 鋼	0.37	0.29	0.49	—	1.51	—	0.25	燒入 850°C 油冷、 燒戻 420~570°C 空冷

實驗の結果は第7表乃至第11表並に第8圖乃至第16圖に示されてゐる。この結果から次の事を知る事が出来る。

a. 何れの鋼に於ても切溝が極めて浅い場合であつても

第 7 表 切溝の耐久性に及ぼす影響

Ni-Cr-Mo 鋼(タハード)燒入 850°C 空冷、燒戻 200°C 空冷

鈍の位置 cm	溝底の徑 cm	溝底徑と平行部徑との斷面積の比%	破断回数 N	吸 收 エネルギー $kgcm/cm^2 (\times 10^3)$	ロック ウェル C 硬度	備 考
5	1.500	100.0	239,320	66,500	44.9	ロックウェル硬度は平均値を示す
	1.447	93.1	10,970	3,315	45.8	
	1.410	88.4	6,410	2,039	45.6	
	1.358	82.0	3,710	1,272	45.8	
	1.208	64.9	1,130	0.4397	46.0	
(破断せず)						
3	1.500	100.0	10,547,260	1054,500	45.5	"
	1.456	94.3	81,110	8,600	45.6	
	1.411	88.4	54,690	6,190	45.9	
	1.356	81.8	37,100	4,550	45.9	
	1.215	65.6	13,100	1,996	46.0	

第 8 表 切溝の耐久性に及ぼす影響

Ni-Cr-Mo 鋼(タハード)燒入 850°C 空冷、燒戻 650°C 空冷

鈍の位置 cm	溝底の徑 cm	溝底徑と平行部徑との斷面積の比%	破断回数 N	吸 收 エネルギー $kgcm/cm^2 (\times 15^5)$	ロック ウェル C 硬度	備 考
5	1.500	100.0	68,700	19,310	27.8	ロックウェル硬度は平均値を示す
	1.479	97.2	13,970	3,990	29.4	
	1.455	94.2	9,090	2,681	29.2	
	1.393	86.3	5,040	1,622	29.6	
	1.219	75.0	2,420	0.8971	29.1	
3	1.500	100.0	1,622,650	162,220	29.5	"
	1.479	97.2	95,370	9,805	29.8	
	1.456	94.2	58,080	6,242	28.4	
	1.391	86.1	26,370	3,456	27.7	
	1.300	75.2	16,070	2,164	28.8	

第 9 表 切溝の耐久性に及ぼす影響

Cr-V 鋼 燒入 850°C 油冷のまま

鈍の位置 cm	溝底の徑 cm	溝底徑と平行部徑との斷面積の比%	破断回数 N	吸 收 エネルギー $kgcm/cm^2 (\times 10^3)$	ロック ウェル C 硬度	備 考
5	1.501	100.0	54,130	15,010	40.8	ロックウェル硬度は平均値を示す
	1.394	86.2	2,360	0,759	40.0	
	1.303	75.4	650	0,2392	40.4	
	1.203	64.3	330	0,1424	40.8	
	1.109	54.6	150	0,0762	39.4	
	1.012	50.0	110	0,0611	40.2	
	0.892	35.3	80	0,0629	39.8	
	3	1.501	100.0	857,740	96,000	
1.398		86.8	51,960	5,980	41.5	
1.307		75.9	16,490	2,170	39.3	
1.199		63.8	5,270	0,8246	41.8	
1.111		54.8	1,380	0,2515	40.4	
1.009		45.2	470	0,104	39.4	
0.912		36.9	240	0,0649	40.6	

第 10 表 切溝の耐久性に及ぼす影響

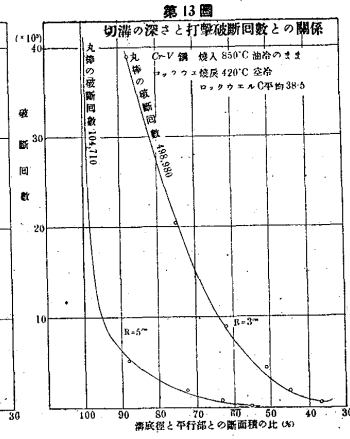
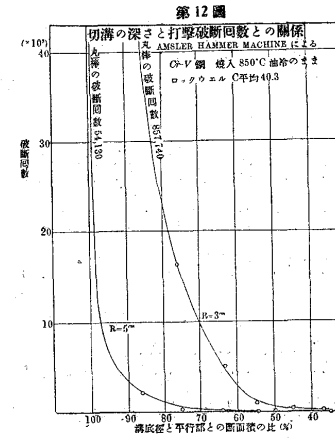
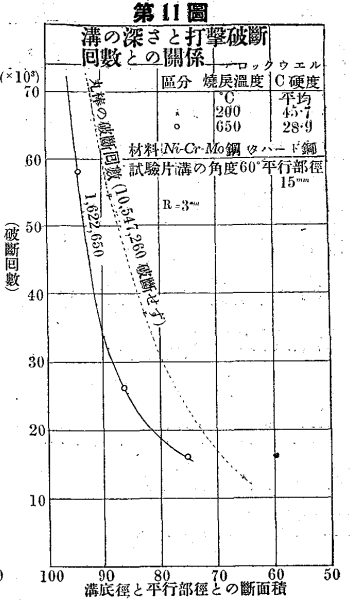
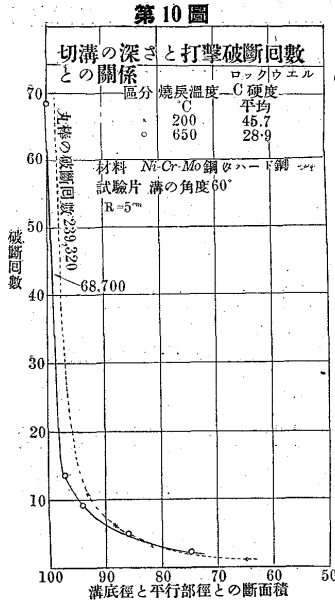
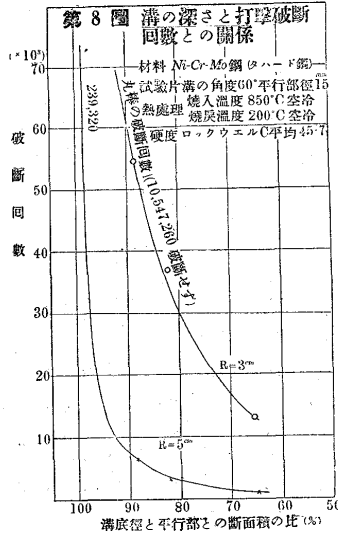
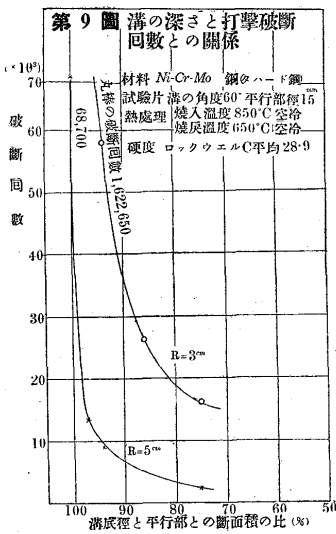
Cr-V 鋼 燒入 850°C 油冷、燒戻 420°C 空冷

鈍の位置 cm	溝底の徑 cm	溝底徑と平行部徑との斷面積の比%	破断回数 N	吸 收 エネルギー $kgcm/cm^2 (\times 10^3)$	ロック ウェル C 硬度	備 考
5	1.500	100.0	104,710	30,360	39.4	ロックウェル硬度は平均値を示す
	1.405	87.9	5,380	1,704	37.7	
	1.277	72.5	1,990	0,764	39.0	
	1.192	63.2	770	0,3388	37.8	
	1.113	55.1	200	0,1690	37.5	
3	1.500	100.0	498,980	49,900	38.4	"
	1.394	87.5	38,020	4,352	39.2	
	1.296	74.7	20,480	2,745	39.2	
	1.181	61.9	8,930	1,444	37.8	
	1.073	51.2	4,440	0,9825	38.3	
	1.006	45.0	1,790	0,4500	38.1	
	1.909	36.7	600	0,1634	40.1	

第 11 表 切溝の耐久性に及ぼす影響

Cr-V 鋼 焼入 850°C 油冷、焼戻 570°C 空冷

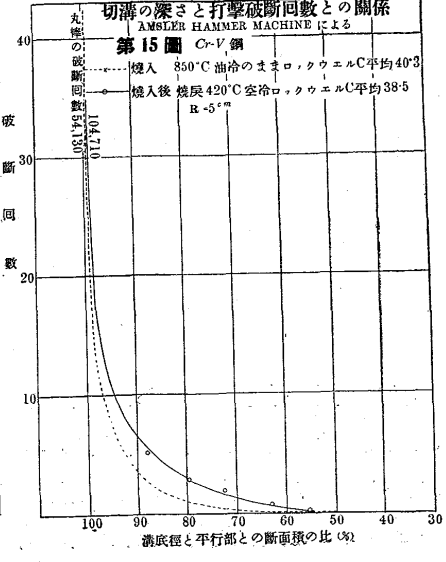
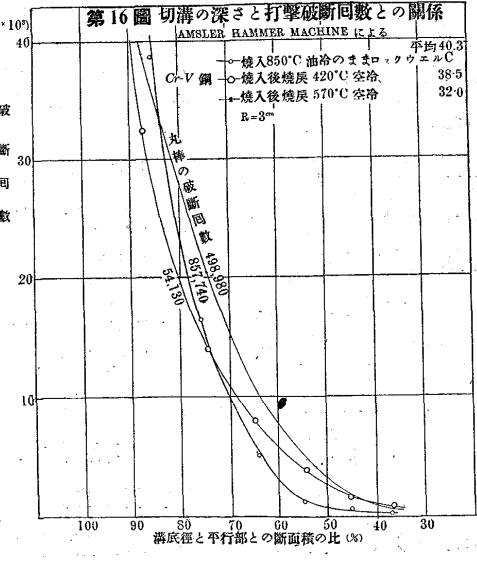
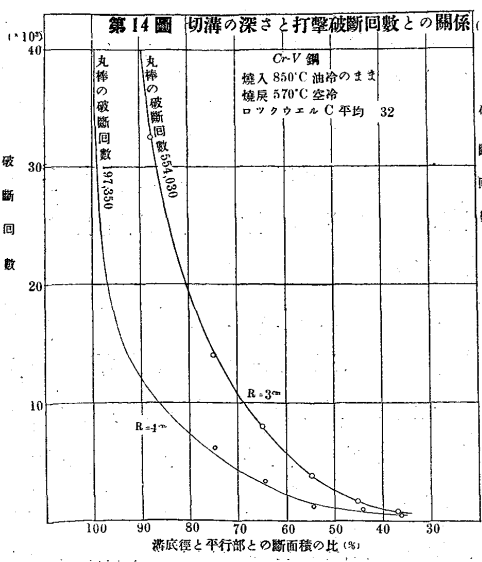
鏡の位置 cm	溝底の径 cm	溝底径と平行部径との断面積との比%	破断回数 N	吸エネルギー kgcm/cm ² (×10 ⁵)	ロックウェル C 硬度	備考
4	1.500	100.0	197,350	35.050	31.9	ロックウェル硬度平均値を示す
	1.404	92.1	13,620	2.710	31.9	
	1.296	74.7	6,280	1.494	31.2	
	1.204	64.4	3,400	0.9372	32.2	
	1.107	54.5	1,350	0.4450	31.4	
	0.997	44.2	1,100	0.4460	31.2	
0.903	36.3	610	0.2990	31.7		
3	1.500	100.0	554,030	62.170	33.6	"
	1.402	87.6	32,470	3.685	33.4	
	1.295	74.6	14,090	1.875	32.5	
	1.209	65.0	8,130	1.251	33.4	
	1.109	54.6	3,970	0.720	30.6	
	1.009	45.3	1,770	0.355	29.9	
0.708	36.7	870	0.1584	32.8		



耐久性には著しく影響を及ぼし、深くなるにつれて其低下する程度が極めて急激である。但溝底の径 13mm (溝の深さ 1mm) 以下では大差はなく折損し易い。

b. Ni-Cr-Mo 鋼と Cr-V 鋼を比較するに上記の如き溝の影響は前者の方比較的著く受ける。即ち耐久度の低

低下は硬度の高いもの程著しい事が分る。併し切溝のないものを比較すれば著しく前者の方の耐久度は大である。この事實から當然判断される事として鋼材の撰擇上注意すべきは良い鋼を使用しても又強靱な鋼を使つても、仕上、加工等に充分注意しなくてはならぬ事である。



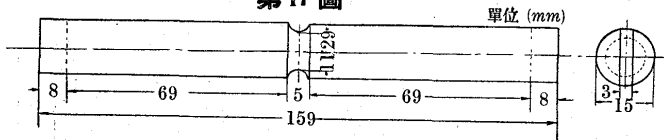
c. 實際の曲軸等の如き機構形狀に就て考へる時は局部的に著しく大きな應力の集中を來す場合は當然考へられる。依つて同一の金質でも瑕瑾や鋼滓の存在は勿論楔溝、研磨疵、焼割れ、熱處理の不等齊等によつても耐久性に影響を及ぼす事の大なるは極めて明であつて何れも注意すべきである。

3. 實驗其 3 松村式疲勞試験機による耐久試験

供試材は第 2 表に示すもの、外第 19 圖中に示してある様な成分のものに就ても試験した。

本實驗に用ひた試験片は第 17 圖に示す棒であつて、試験の要領は普通行はれる通りであつて 180 度宛反轉して繰返打撃を行つた。

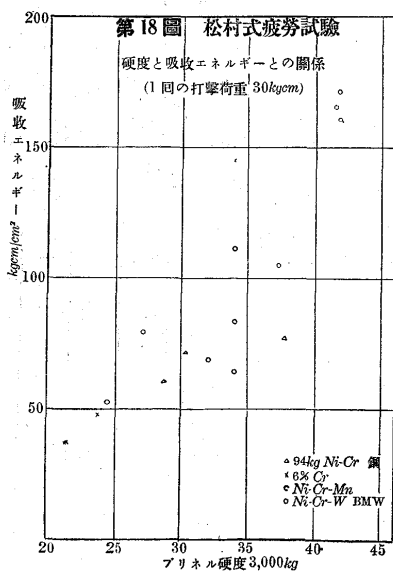
第 17 圖



但 1 回の打撃荷重は 30kg.cm(又は 20kg.cm)とし破斷に至る迄の回数を測定し之を以つて耐久度を示す事とした。

或る鋼種に就き焼戻温度別に行つた實驗結果は第 18 圖乃至第 23 圖に圖示してある。

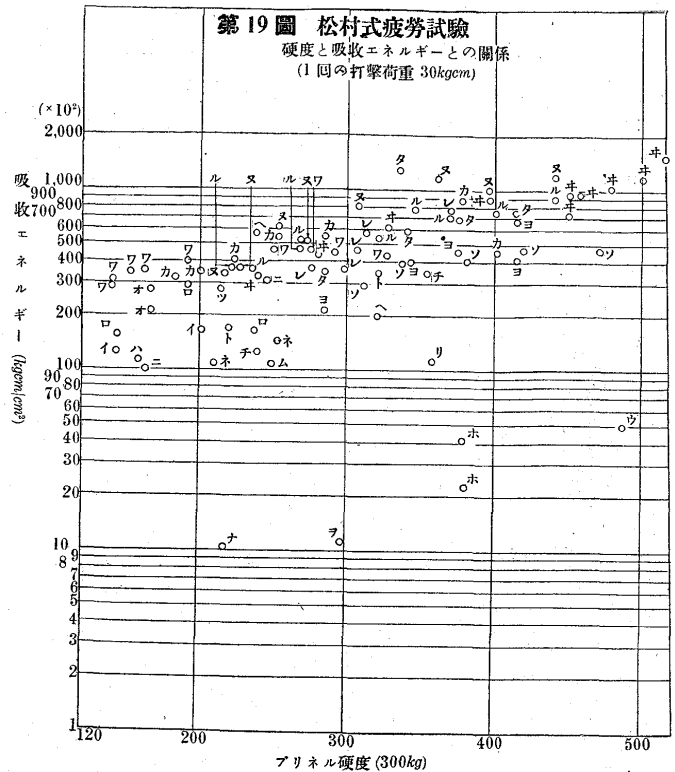
この實驗に於ても其 2 の實驗結果と同様に衝擊値の高い者は耐久性乏しく、低いものは之に反してゐる。同様の事實が第 18 圖乃至第 23 圖に於ても明かである。併し



第 22 圖で見られる様に焼入の儘の状態では硬度が高く共耐久度が低い事實がある。

この理由は前述の様に焼入の儘の状態では不安定な内力の潜在等が原因となるか、又は、切溝の影響が鋭敏な爲に衝擊的の耐久度に於ては劣る事が了解される

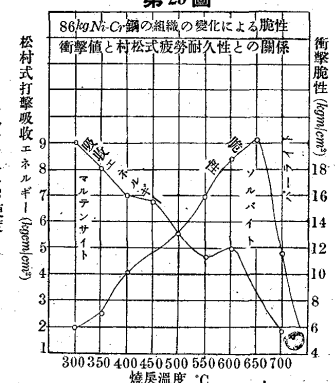
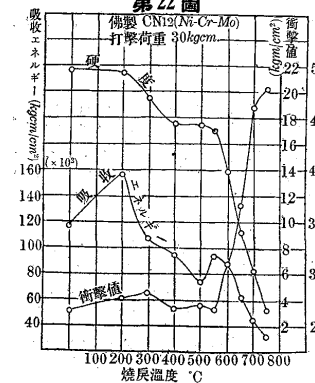
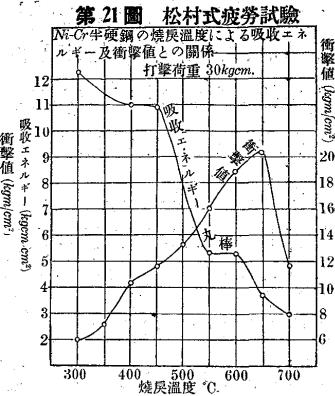
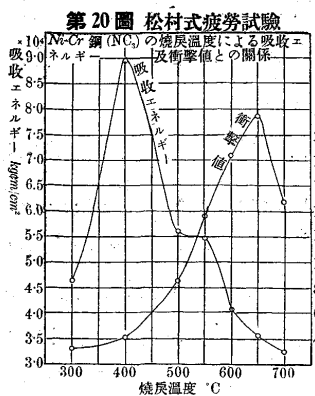
又第 23 圖の結果から明かに看取される事は、衝擊値で示された脆性の同じ状態の比較即ちマルテンサイト組織のものとパーライト組織のものとの兩者に於ける衝擊脆性は同一であつても、耐久度(吸収エネルギーで示す)を比較すれ



記 號	鋼 種	化 學 成 分				
		C	Si	Ni	Cr	W 其他
丸	炭 素 鋼	0.27				
イ	ハ	0.45				
ホ	ヘ	0.77				
ト	表面硬化角鋼	0.08		2.86		
リ	Ni	0.09	0.19	0.18		
ヌ	Ni-Cr	0.34	0.22	2.76	0.57	
オ	Ni-Cr	0.30	0.30	4.20	1.30	
ワ	Ni-Cr	0.14	0.13	2.33	0.45	
カ	Ni-Cr	0.34	0.20	1.36	0.70	
ヨ	Ni-Cr-Mo	0.86	0.27	2.81	0.66	Mo 0.74
レ	Ni-Cr	0.15	0.32	2.49	0.68	
ソ	Si-Cr	0.52	0.91		1.24	Mo 0.35
ツ	FWV	0.36	1.82	13.57	12.33	2.86 V 0.20
ネ	Si-Cr	0.32	2.88		12.42	
ナ	高 Cr	0.40	0.36		13.66	
ラ	高 C-Cr	1.25	0.60		19.86	
ム	V 11	0.59	2.51	13.10	12.60	11.04
ウ	W-Cr	0.57	0.10		3.13	15.89
キ	CN 12 (佛)	0.28	0.21	2.83	3.13	Mo 0.42

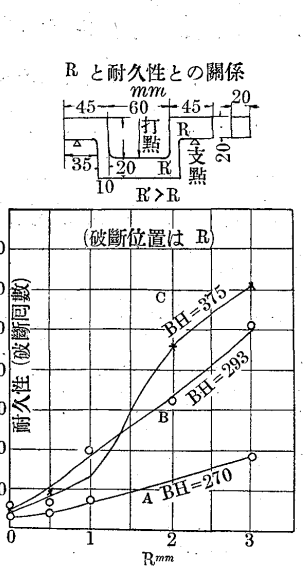
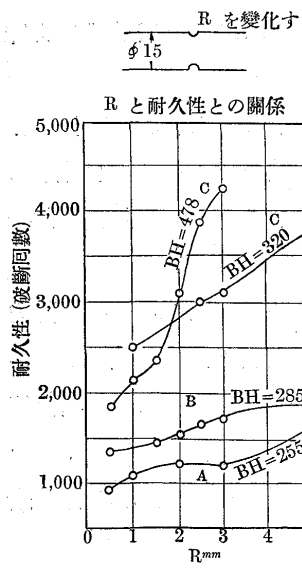
ば著しい差のある事實も注意すべきである。故に衝擊値のみ低く共耐久度の高い事があるから材料の使用状態として何等懸念する必要がない。

尚松村式疲勞試験に於て其試験片の中央切溝の丸味 (r) を種々に變へた實驗がある、(玉置正一氏、鐵と鋼第 20 年第 10 號参照) この結果によれば r の増すと共に耐久度の増す事が述べてある。(第 24 圖参照) 殊に脆性の大きな材料であればある程 r を大にしないでならない、然らざる時は耐久度の低下する程度が著しいので、曲軸の設計



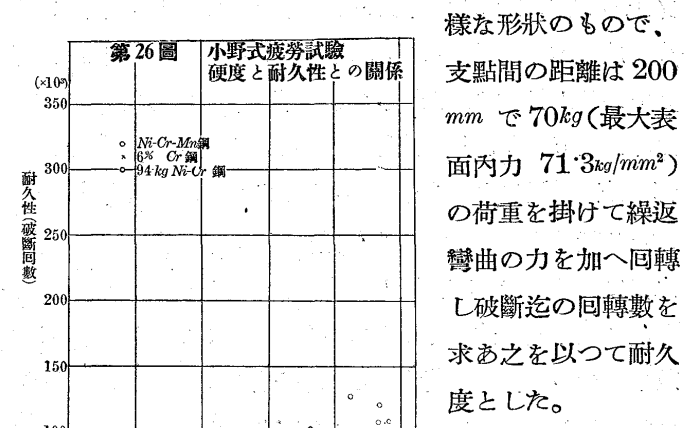
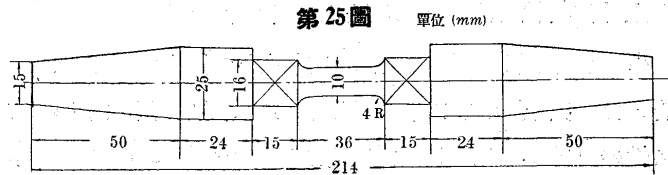
第 24 圖

記號	C	Cr	Ni	Mo
使用鋼種	A 0.48	—	—	—
	B 0.39	0.75	2.78	—
	C 0.25	1.71	3.03	0.42



上では局部的應力の集中し易い曲軸臂の隅角部の r は極力大にしなくてはならぬと共に仕上等の圓滑にすべき理由も明であらう。

4 實驗其 4 小野式疲勞試驗機による耐久試驗
 實驗に用ひた鋼材は Ni-Cr-Mn 鋼, 6% Cr 鋼, 94kg Ni-Cr 鋼の 3 種であつて熱處理を種々に變へた場合の變化と破斷回數との關係を求めた。試験片は第 25 圖に示す



様な形狀のもので、支點間の距離は 200 mm で 70kg (最大表面内力 71.3kg/mm²) の荷重を掛けて繰返彎曲の力を加へ回轉し破斷迄の回轉數を求め之を以つて耐久度とした。
 第 26 圖はこの實驗から得られた結果を圖示したものである。此結果によれば硬度に殆んど正比例して耐久度の増す事も實驗其 1 及其 2 の結果と同様である。尚又硬度の大なる。材料では耐久度の差の大である事も前同様である。

VII. 總 括

將來の曲軸鋼に對する要件

以上論述した事項と實驗結果を總括し考察するならば將來の航空發動機用曲軸に對し考慮すべき諸要件は次の様に種々ある。勿論發動機の性能向上に應じて其曲軸に著しく過大な負荷があつても、充分の耐久性を保有しなくてはならぬと共に出来るだけ軽くなくてはならない。

1. 將來進歩した發動機の曲軸として以上の目的を達する爲には化學成分に於て現在使はれてゐるもの以上に高級な鋼の研究が必要である。即ち一層強靱な特殊鋼の一としては研究の結果 Ni-Cr-Mo 鋼 (CN 12) が有望である事が分つた。或はこの Ni の量を Cr を以て買換した 6% Cr 鋼も相當良い性質を有してゐるので實用に供する様研究すべきである。
2. 馬力の小さい發動機の曲軸には今日迄使用してゐた 94kg Ni-Cr 鋼、又は Cr-Mo 鋼でも良いと考へられる。
3. 各種發動機に使用すべき曲軸鋼の種類はなるべく少くし (2~3 種に限定) その中から撰定し、然る後強度上安全な設計を爲す様に耐久性の安全限界を計算によつて確め

た寸法其他を決定する事としなくてはならぬ。

4. 發動機が決定し曲軸鋼の成分上の撰定が定まつた場合には、其鍛造方法や熱處理に對する取扱要領に對して耐久性の見地からは合理化する事が大切である。即ち鍛造作業上の方法に就ては、從來一般に知られた様に其纖維の走向を成るべく曲軸の形狀に沿はしめる様にすることは最も肝要であると見做されたが、實際の曲軸が破斷する時は常に疲勞破斷であり、その疲勞破斷の現象は筆者の意見では局部の分離破斷によるものである事は事實である。従つて如何なる鍛造方法を講じても其纖維走向は曲軸局部の隅角を忠實に沿ふて走る事は決して有り得ない事が明であるから、この作業方法を採用しても理想通りに行ふ事は出来ず効果は少い、従つて莫大なる設備と作業費を費す程重要ではないかと思はれる。之よりも寧ろ焼戻温度の撰擇を適當ならしめる事の如きは一層重大な事柄であらう、即ち焼戻温度の適否によつて耐久性を大ならしめ破斷を防止し得る事があるのは注目すべきである。

5. 從來行はれた材料の機械的試験結果と曲軸鋼の耐久強度との關係に就き吾人の觀察を次の様に新にする必要があると思ふ。例へば

a. 機械的試験結果の抗張力や硬度の高い状態の熱處理を撰ぶ事は概ね耐久性の點では安全であるが、筆者の實驗から得られた見解によれば普通の抗張力よりも分離抗張力としての値の大なる熱處理状態を撰ぶ方が概ね耐久的に大であるので重大なる意義があると思ふ。

例へば特殊鋼の焼入の儘の状態では硬度抗張力も高い事は事實であるが或焼戻したものに比し耐久度の乏しい事がある、焼戻を適當に行つたものの分離抗張力は焼入の状態のものより大であつて耐久度は分離抗張力に概ね比例してゐるからである。

b. 伸 斷面收縮率、衝擊値等は同じ傾向の性質即ち韌性度を示してゐるが之等を餘り重視する時は耐久度を著しく低下するので注意を要する。場合によつて衝擊値の低い

方が耐久度の大である事も珍しくないから、材料の規格に示された衝擊値の價値に就ては耐久度との關係を充分會得して検査を行ふべきである。

但之等の値の高い事は一面材料の工作の容易であることを示す事勿論で疲勞破斷の際に於て、同じ抗力、硬さの材料を比較した場合には韌性の大なるものの方が良好であるから、この様な意味で輕視出来ない譯である、特に曲軸の耐久度と韌性との關係は所謂 Notch effect 即ち切溝に對する感度に支配される事を忘れてはならない。

韌性の大なる材料である程之の影響に對し鋭敏でないから安全である事も重要な事柄である。

換言すれば Notch effect を鋭敏に受けない事は脆い状態でない事を意味するので結局韌性の大なる状態は矢張安全な理である。

6. 機械作業の點に就て言へば最後の仕上工作に最注意を傾ける事が肝要である。殊に重要部分の隅角部の仕上は最丁寧に研磨し圓滑に仕上、應力集中をなるべく避ける工夫を爲すべきである。

7. 設計に就て言へば、隅角部の丸味(r)は出来るだけ大きくする事、殊に強力な鋼を採用すればする程其注意が肝要である。(其他の例で云へば齒車の齒の付根の r 等の形式は從來標準化されてゐたとしてもなるべく大きな丸味を附して仕上を丁寧にすべきである)。

8. 尙曲軸の強度計算を行ふに際しては隅角部の問題や負荷重の形式と分離破斷の機構を考慮して後、之に應ずる強度計算を行ひ、形狀寸法の撰定と共に鋼材の撰定を誤つてはならぬ。

尙強度計算には耐久度を主眼とする場合には直接に靜力的抗張力及之に附隨の値(降伏點、彈性界、比例界)等を其儘基礎として採用出来ない。又疲勞限度の値も直接其儘適用出来ない。負荷重の形式、分離破斷の機構、並に Notch effect の關係等を考慮し耐久度の安全を確保する様な式を樹て計算する必要がある。