

航空發動機用曲軸鋼の撰定竝に其使用狀態に就て

(日本鐵鋼協會第10回講演大會講演)

高 瀬 孝 次*

SELECTION OF CRANKSHAFT STEELS FOR AERO-ENGINES AND THEIR REQUIRED CONDITIONS.

by K. Takase.

SYNOPSIS:—The writer has related in this paper to the characteristics of crankshaft steels for aero-engines used in the past and present, and fundamental essential ideas in designing a crankshaft with a view to select the most suitable steel for it.

The fact has also been pointed out that the results obtained from ordinary tensile tests and fatigue tests are not always applicable to the practical strength calculation in design, but it is a most important fact to consider upon the stress-concentration and consequent intercrystalline changes of properties.

Simple relation between static strength and fatigue strength being found out by introducing a new idea of "Cohesion Strength" (die Trennfestigkeit), the writer has established a formula which satisfies the actual cases. The result has been applied for aero-engine crankshaft as an example in purpose of studying it more concretely.

Necessary conditions and advices in selecting crankshaft steels for aero-engines have also been referred to as a conclusion.

緒 言

輓近に於ける航空機用發動機の進歩發達は實に目ざましいものがある。之と共に航空發動機用曲軸の研究は日を追ふて肝要な問題となつて來た。即ち從來最も優秀と考へられてゐた曲軸用鋼材を使用しても尙往々折損を免れない有様であつて、之が完成は目下の急務であると思ふ。仍つて筆者は茲に曲軸鋼の撰定竝に曲軸の強度に就て記述し參考に供する。

I. 從來竝に現在の使用狀況

從來航空發動機用曲軸鋼として一般に用ひられたものは *Ni-Cr* 半硬鋼 (*C* 0.3~0.4%), *Cr* 0.6~0.8%, *Ni* 2.8~3.2%) の調質狀態のものが大部分を占めてゐて、抗張力は僅に 85~90kg/mm² 程度で熱處理によつて、所謂焼戻脆性を有し、樹枝組織を生じ、且之が容易に消滅し難いこと、其他油焼入後の歪修正が甚だ困難なこと等種々の缺點を有つてゐる。加之航空機の發達と共に高馬力、高壓縮の發動機を要求して居り、従つて在來の曲軸鋼では抗力、耐久力及剛性の不足を感じる様になつた。

之に對して英國では Jupiter 型發動機に所謂空氣焼入の *Ni-Cr* 鋼(*Cr*1~1.4%) を使用して、前述の缺點を除いてゐる。獨逸では B.M.W. 發動機に次の様な優秀な鋼

材を使用して良好な成績を収めてゐる。

<i>C</i>	0.17~0.30%	<i>Si</i>	0.35% 以下
<i>Mn</i>	0.30~0.60	<i>Ni</i>	3.5~4.5
<i>Cr</i>	1.0 ~1.6	<i>W</i>	0.5~1.0
降 伏 點	105kg/mm ² 以上		
抗 張 力	115kg/mm ² 以上		
伸	(l=8.2√A) 12% 以上		
衝擊値(シャルピー)	9kg/cm ² 以上		

該鋼は表面硬化用鋼であつて炭素量著しく低く靱性を充分保存し、所謂焼戻脆性の影響を尠くし、抗張力 120kg/mm² 以上の空氣焼入鋼である。之は前記佛國式の *Ni-Cr* 鋼に比し著しく秀れた材料である。但し該鋼は本發動機の特徴として軸承部に轉子軸承を使用してゐる關係上此の部分に特に滲炭(深さ約 5mm)して表面硬化を施してある。該曲軸は Krupp 會社に於て鍛造、熱處理、仕上をも行ひ、非常に入念に製作してあつて學ぶべき點が多々ある。

尙航空發動機用曲軸鋼として若干の實例を列挙してその成分性質を記して見ると第1表の通りであつて、主として *Ni-Cr* 鋼が使用されてゐる。中に B.M.W. の曲軸だけが一般曲軸の型式を破つてゐる。

* 陸軍航空本部

第 1 表 各種發動機曲軸用鋼表

區 分	國 名	化 學 成 分						機 械 的 試 驗						處 理 熱	摘 要	
		炭素	硅素	滿 庵	燐 硫黃	ニッケル	クローム	其 他	彈性界 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	最小伸 (%)	斷收縮 面率 (%)	衝 撃 (シビヤル) 値			ブ 硬 リ 度 數
サルムソン 230 馬力	佛	0.30 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.50	0.03 以下	2.5 ~ 3.0	0.5 ~ 1.0		70以上	80以上	12		kgm.cm ² 12以上	250 ~ 320	焼入 900°C 油中 焼戻 600°~850°C	
イスパノ スイザー 300 馬力	"	"	0.35 以下	0.30 ~ 0.60	0.035 以下	2.75 ~ 3.25	0.7 ~ 1.0		R1 65% 以上	60~76	20				焼入 820°C 油中 焼戻 500°~650°C	
ロレーヌ 400 馬力	"	0.25 ~ 0.35	0.20 ~ 0.30	0.50 以下	0.03 以下	2.5 ~ 3.5	0.75 ~ 0.80		65~75	80~95	10~12		9 以上	246 ~ 277	焼入 850°~ 900°C 油中 焼戻約 550°C	
リバーティ 400 馬力	米	0.35 ~ 0.45		0.30 ~ 0.60	0.04 以下	1.75 ~ 2.25	0.7 ~ 0.9			82以上	16		アイゾッ ト 47以上	266 ~ 321	調 質	
カーチス D-12	"	"	"	0.50 ~ 0.80	"	1.25 ~ 1.80	0.60 ~ 0.90		77以上	90以上	16	54以上			"	
デュピター 400 馬力	英	0.35 以下				4.0 以下	0.5 ~ 1.3		79以上	95~110	17	40以上			"	
英 規 格 クローム ヴァナヂウム 鋼	"	0.35 ~ 0.40		0.60 ~ 0.80	0.04 以下	"	"	ヴァナヂ ウム 0.16~0.02	R1 75% 以上	87~102	18	50以上			焼入 850°C 焼戻 650°	英國にて使 用せしこと あり
ダイムラー 100 馬力	獨	0.23	0.21	0.18	0.012	4.96	1.43		101.3	110.3	14.2				調 質	大戦中獨逸 にて使用
ベンツ 230 馬力	"	0.13	0.31	0.48	0.014 0.026	3.21	0.87		87.2	98.8	21.2		3.6		"	"
メルセデス 260 馬力	"	0.41	0.29	0.64	0.042 0.052	2.36	0.86		88.0	93.0	13.5		3.2		"	"
マイバッハ 300 馬力	"	0.26	0.19	0.73	0.014 0.034	3.62	0.58								"	"
ベ・エム・ベ 450 馬力	"	0.10 ~ 0.20	0.20 ~ 0.35	0.40 ~ 0.60	0.02 以下	3.0 以上	0.8 以上		85 ~ 100	105~115	10~12		8~10		調 質	
"	"	0.17 ~ 0.30	0.20 ~ 0.35	0.40 ~ 0.60	"	3.5 ~ 4.5	1.0 ~ 1.6	タンクス ~ テン 0.5~1.0	105 ~ 115	115~125	9~12		9~11		"	

II. 疲労耐久力を考慮に入れた

設計上の基準

航空發動機用曲軸の設計に當り、靜力的計算式に依つて安全なりと思はるゝ強度を求め得たりとしても、疲労の境地からする時は、幾多の経験の實證する様に、必ずしも安全とは云へない。且從來は疲労を考慮に入れた適確な計算式は未だ發見されて居ないばかりでなく、或る程度迄不可解な事柄と見做れて居た。而して筆者は各種の分離破斷（變形及亡りを伴はない破斷）の事實から推論して、比較的容易に此の目的に應ずる計算方式を樹て得られると思ふ。

尙分離破斷其他に關する詳細な研究は「鐵と鋼」第 18 年第 10 號及 12 號（昭和 7 年 10 月及 12 月發行）の拙稿「特殊鋼の分離抗張力と疲労に依る耐久力に就て」參照を乞ふ。

以下順を追ふて設計上の基礎概念とも云ふべきものを略

述して見たいと思ふ。

A. 靜力的抗張試験から求めた抗張力、降伏點、比例界、弾性界、弾性係數等を直ちに實際の機構の強度計算に適用することは出来ない。その理由は次の通りである。

i) 之等試験片の破壊は粘性變形を伴ふ故に抗張力が其儘適用出来ない事は當然である。實際の疲労破斷は變形及亡りを伴はない所謂分離破斷である。

ii) 試験片の破斷は平均荷重による特殊破斷であるに反し、疲労破斷の場合には局部的な歪力集中を考慮する必要がある。

iii) 試験片の形狀は一種の理想状態であつて、之が破斷現象は實際の機材のそれと著しい差異がある。

iv) 靜力的緩速負荷の場合には實際の急速負荷の場合と全然趣きを異にす。

v) 弾性係數は平均負荷された理想的試験片から測定せ

られた値であるが、之は實物の負荷状態に於ける局部内力集中の場合には全然通用出来ない。

B. 疲勞試験から求めた耐久限界も其儘實際上の機構強度計算には適用出来ない。その理由としては

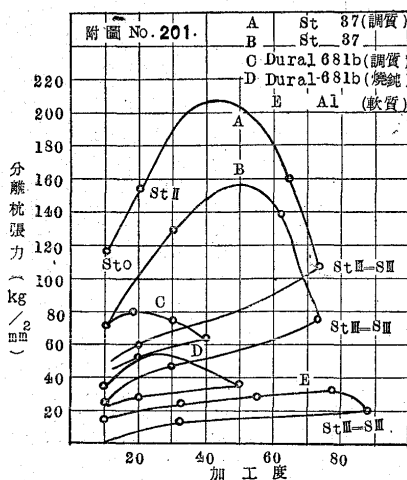
- i) 耐久試験片も理想状態の形状を有してゐる。
- ii) 實際の機構の局部内力集中を考慮に入れる必要がある故。

C. 疲勞破斷の基礎概念

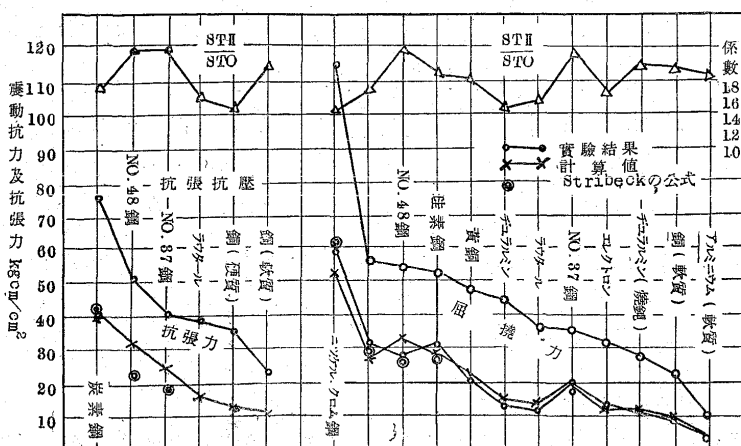
- i) 疲勞破斷は變形及びを伴はぬ所謂分離破斷である。
- ii) 分離抗張力を求める溝付試験片の極限状態では其の歪力—歪曲線から推論して局部は弾性變形をし其値は普通抗張力の2倍附近にある。而して疲勞の場合には、局部は加工に依る硬化と熱の發生等に伴ひ變質して、其の分離抗張力の値を變化し、遂に低下する結果となる。茲に於て局部の分離破斷を惹起し之が成長して龜裂となり、破斷の第一階程となる。

- iii) 繰返し負荷の場合は負荷速度が急激である事を豫想

第1圖其1
分離抗張試験中の内力震盪



第1圖其2 靜力的抗張力と震動抗力 (Schenk) の關係



的抗張力 n = 實際的恒數で粘性體の總ての結晶體にも適用される。

$$\frac{ST_{II}}{ST_0} = \text{強化係數 (第1圖其1及其2参照)}$$

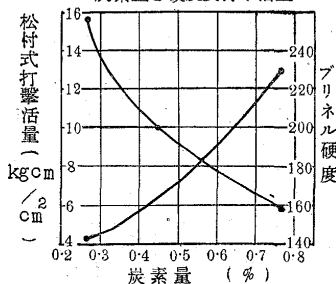
本式では σ_B が大であると耐久力も大である理となる。従つて耐久性のみを重視すれば抗張力の高いもの程宜いと云ふ結論になるが實際は然らず。次の様に種々の事實を考慮する必要がある。

a) 同一の材質でも機材構成の形状に依つて或る局部に著しい歪力集中 (Stress-concentration) を惹起する場合を考へる事。

b) 同じ材質でも其品位の良否即ち鋼滓、瑕瑾等の存在する爲めに、震動や打撃的荷重に依り著しい差がある。殊に仕上の良否、熱處理の齊一なるか否かにより、又は各種内力 (焼入、鑄造、冷間加工等による) の存在により色々の差がある。

c) 實際結果に徴して明な様に、抗張力は同一でも、松

第2圖 松村式疲勞試験
炭素量と硬度及打撃活量



村式試験機の様な打撃的荷重に依る疲勞の場合には其耐久性に著しい差がある。又硬度及抗張力に反比例する事實さへある。炭素鋼の焼鈍の場合には炭素量の高いものは低炭素のものよりも硬度

は高いが、過負荷の場合を比較する時は、前者は後者よりも速に破斷する。(第2圖参照)

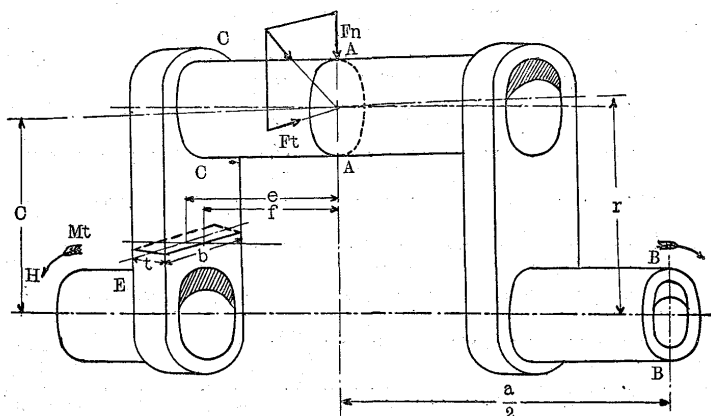
d) 一般に耐久限界は殆んど硬度、抗張力に比例するが、之以上の過負荷の耐久性 (破斷迄の) は必ずしも之れと一致しない事がある。殊に松村式の様な溝の影響のあるものは之の現象が著しい。この見地から見れば衝撃値の大なる材料の方が安全なわけとなる。

III. 強度計算の一例 (BMW 發動機 曲軸) に就て

BMW發動機の出力から各構成部分の負荷重を計算した結果、筆者は抗張力を基礎とした計算方式を棄てて特に疲勞の見地と分離抗張力の基本概念から、從來の靜力的でなく實際に近い場合の計算を行つて見た。以下順を追ふて記述する。

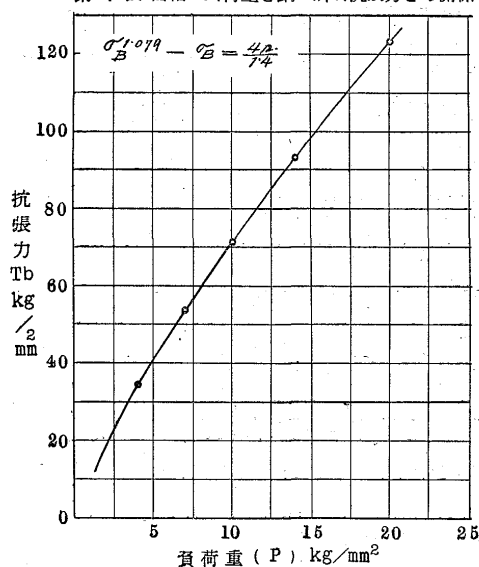
[I] 曲軸内力を第3圖の様に考へる。但し本發動機

第 3 圖



は現用 BMW450 馬力及 600 馬力の 2 種であつて前者の壓縮比 6.0 で後者のは 7.3 である。

第 4 圖 曲軸の負荷重と鋼の所要抗張力との關係



A. 曲軸によつて傳達せらるべき最大回轉力 (T_m)

$$T_m = \frac{75 \times \text{BHP} \times K}{2\pi n / 60}$$

但し K は最大回轉力と、平均回轉力との比 即回轉力比である。氣筒の數に依つて定る値である。

(1)、壓縮比 6.0 回轉數 1,530 の場合 $K=1.23$

(2)、" 7.3 " 1,650 " $K=1.24$

(1) と (2) の場合を假に 6/1,530 及 7.3/1,650 とし示す時は各の計算結果は次の通りである。

6/1,530 362kg 7.3/1,650 403kg

B. 切線方向の力 (F_t) $F_t = T_m / r \dots \dots \dots [kg]$

6/1,530 3,810kg 7.3/1,650 4,250kg

C. 切線方向の力と曲軸臂の中心線に平行方向の最大力との合成力 (F_b) $F_b = \sqrt{F_t^2 + F_n^2} \dots \dots \dots [kg]$

但、 F_n は曲軸臂の中心線に平行方向の最大力である。

6/1,530 6,975kg 7.3/1,650 8,430kg

(II) 軸徑の内力

A. 合成力 F_b により軸莖中に生ずる屈撓能率 (M_b)

$$M_b = \frac{F_b \cdot a}{4} \dots \dots [kgm] \quad \text{但 } a \text{ は曲軸串の中心と中心との距離であつて } 0.19m$$

6/1,530 314 7.3/1,650 379

B. 最大回轉力 T_m と屈撓能率 M_b との合成等價能率 (M_2)

$$M_2 = \frac{M_b}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{M_b^2 + T_m^2} [kgm]$$

6/1,530 427 7.3/1,650 466

C. 軸莖に於ける最大内力 (p) $p = M_e / Z \dots \dots [kg/cm^2]$

但 Z は斷面係數であつて $Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right)$

D は曲軸の外徑であつて 7.5cm

d は曲軸の内徑であつて 3.6cm

$\therefore Z = 39.6cm^3$

6/1,530 1,080 7.3/1,650 1,180

D. 軸莖中に於ける全截斷應力 (S_s)

$$S_s = \frac{T_m}{Z_b} + \frac{F_n}{2A} \dots \dots \dots [kg/cm^2]$$

但 Z_p は極斷面係數で $2Z = 79.2cm^3$

又 A は斷面積で $\pi/4(D^2 - d^2) = 34.1cm^2$

6/1,530 543 7.3/1,650 616

(III) 使用曲軸鋼の抗力との關係

BMW 發動機曲軸鋼 (乙) の規格に示す條件を見るに次の通りである。

降伏點 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸 % l=100mm	最小衝擊値 kg/cm ²
105~115	115~125	9 以上	9 以上

今靜力的見地のみから見て例に安全係數 8 と見る時は許容抗張力は 1,400~1,560kg/cm² となり C 項に示す p に比し安全である譯である。但筆者の論文から疲勞の安全性を考慮して計算するとせば、上記の安全性を得ることは斷じて不可能であつて次の通りとなる。

$$S = (\sigma_B^n - \sigma_B) \frac{ST_n}{ST_0} \quad S: \text{震動疲勞限界} \quad \sigma_B: \text{抗張力}$$

n : 係數 = 1.079 (抗張、抗壓) = 1.074 (屈撓)

$$\frac{ST_n}{ST_0}: \text{強化係數 假に } 1.4 \text{ と見做す}$$

$$S = (115^{1.079} - 115) \times 1.4 = 73.2 [kg/mm^2]$$

この値は平均疲勞限界と見做さるゝ故、前述の如く實際

機材局部の最危険箇所（例へば楔底、 r の部分、機械仕上の不良箇所、表面疵又は細條痕等）の存在を想像し得られる故、安全限界と見做す事が至當であらう。勿論この場合には所謂分離破斷現象の假定を信じて、負荷中では弾性的歪力一歪關係を爲すものと見做し、且つ純粹の抗張力の作用と同視するもので、其極限の場合では抗張力の約2倍の分離抗張力によつて變形及迂りを伴はず分離するならば、その途中の平均荷重の負荷される場合を考へると、極限負荷の局部では、その約2倍の荷重を豫想し得る故に、計算の便宜上 S の $1/2$ を以て安全限界（機材の實物に就て）と見做すべきものと考へられる。

今材料のける安全限界を S_0 とすれば

$$S_0 = 3,660 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

一方前に求めた p の値は、靜力的に求めたものであつて、若し極めて急激に負荷される様な實際の場合を考慮に入れるならば「負荷速度の變化による抗張力の影響」から、得られた結果を推論し、疲勞破斷の様な變形、迂りを伴はぬ時の荷重は、緩徐に負荷して破斷する場合の約2倍を要する事となる。換言すれば、普通抗張力の約2倍の荷重を豫想しなくてはならぬ。故に急速荷重は、緩徐荷重の2倍の効果あるものと見て、前記曲軸の軸莖の最大内力から計算して次の様に考へられる (p)

$$6/1,530 \quad 2,160 \quad 7.3/1,650 \quad 2,360 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

上記 S_0/p' が實際の安全係数であつて次の様になる。

$$6/1,530 \quad 1.7 \quad 7.3/1,650 \quad 1.55$$

若し假に從來使用された佛國製發動機曲軸に採用された CN_5 級の $Ni-Cr$ 鋼 ($81kg Ni-Cr$ 鋼) で BMW 曲軸を作つたとして、上記の計算を爲せば次の様に著しく不安全なものとなる。但し $\sigma_B = 80$ とする。

$$S = (80^{1.079} - 80) \times 1.4 = (113.1 - 80) \times 1.4 = 46.34 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

$$\therefore S_0 = 2,317 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

従つて上記 S_0/p' の比を求める時は次の通りとなる。

$$6/1,530 \quad 1.07 \quad 7.3/1,650 \quad 0.98$$

勿論この程度でも直ちに折斷するに至らなく共、場合に依つては一層大きな負荷状態を豫測しなくてはならぬ。故に曲軸の様な重要部分の材料撰定に當つて一般式の

$$d^3 = \frac{5.1 \sqrt{M^2 + T_m^2}}{f}$$

から f を小にとる時 d さへ大きくなればよいと考へた様

な從來の設計基礎は全然當理を缺いて居る事は明で、疲勞耐久性の見地からは f は絶對必要の値を要求される理である。今上記 3% $Ni-Cr$ 鋼の焼戻温度を $650^\circ C$ とし、て撰んだ場合には不安全である事は明瞭となつたが假に $550^\circ C$ 附近の焼戻温度を撰んだとすれば（抗力は約 95 kg/mm^2 となり）幾分安全性を増すこととなる。然るに從來鋼材規格で衝撃値を本鋼では、12 以上と指定した爲めに焼戻 $550^\circ C$ 以下の場合多く不合格となり、従つて $600^\circ C$ 以上の焼戻温度を採用した次第である。

勿論 Salmson 230 馬力發動機の場合では BMW 發動機よりも低い負荷状態にある故、幾分安全性は大である譯である。

今日曲軸鋼として $86 \text{ kg } Ni-Cr$ 鋼の代りに $94 \text{ kg } Ni-Cr$ 鋼 ($C = 0.35 \quad Ni = 3.5 \quad Cr = 1.3$) を採用し、之れを Jupiter 400 馬力 Hispano 300 馬力 Lorraine 400, 450 馬力其他試製發動機に採用してあるのは、大體適當であらう。

[IV] 曲軸串に於ける内力

A. 曲軸串に於ける等價屈撓能率 (Me)

(a) F_n に依つて曲軸串の中央斷面に生ずる屈撓能率

$$M_b = \frac{F_n \cdot a}{4} \text{ [kgm]}$$

$$6/1,530 \quad 140.0 \quad 7.3/1,650 \quad 164.0$$

(b) 端末を固定せられた「持送り」と考へ F_t なる荷重を受けた時の屈撓能率 $M_b = F_t \cdot f$

但 f は曲軸串の長さの $1/2$ で 2.6 cm

$$6/1,530 \quad 99 \quad 7.3/1,650 \quad 110.4$$

(C) 以上の内大きい値の (a) の場合の屈撓能率と最大回轉力 T_m との合成能率 (Me)

$$Me = \frac{M_b}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{M_b^2 + T_m^2} \text{ [kgm]}$$

$$6/1,530 \quad 264 \quad 7.3/1,650 \quad 300$$

B. 斷面に於ける最大内力 (p) $p = \frac{Me}{Z} \text{ [kg/cm]}$

$$\text{但 } Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad D = 7.2 \text{ cm} \quad d = 3.4 \text{ cm}$$

$$= 34.6 \text{ cm}^3 \quad 6/1,530 \quad 763 \quad 7.3/1,650 \quad 865$$

之から S_0/p' (安全係数) を求める時は次の様になる

$$6/1,530 \quad 2.4 \quad 7.2/1,650 \quad 2.1$$

C. 全截斷應力 (S_s) $S_s = \frac{T_m}{Z_p} + \frac{F_n}{2A}$

$$Z_p = 2Z = 69.2 \text{ cm}^3 \quad = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = 31.8 \text{ cm}^2$$

6/1,530 615 7.3/1,650 698

〔V〕 曲軸臂に於ける内力

A 捩回能率(Mt)と屈撓能率(Mb)

(a) 最大回轉力を傳達すべき捩回能率(Mt)

Mt=Ft.e [kgm] EE断面 但 e は曲軸串の中心から曲軸幅の中心に到る長さ 4.20cm

6/1,530 160 7.3/1,650 179

(b) 屈撓能率(Mb) Mb=Ft.C [kgm] HH 断面

但 C は曲軸串の中心線と軸莖上部間の距離

5.75cm

6/1,530 219 7.3/1,650 244

B. 曲軸臂に於ける直接伸張内力(St)

(a) $Z_p = Kbt^2$ 但、b は曲軸臂の幅 = 84cm、t は

曲軸臂の厚さ = 2.8cm、K は b/t に關する常數

で表から $0.267 \quad Z_b = 17.65cm^3 \quad Z_b = b^3t/6 =$ $33.1cm^3$ HH 軸に關する斷面係數 $Zb' = bt^2/6 = 11cm^3$ EE 軸に關する斷面係數 $Zb > Zb'$ $A = bt = 23.5cm^2$

(b) 曲軸臂に於ける直接應力

 $St = Mb/Zb + Fn/2A$ [kg/cm²]

6/1,530 786 7.3/1,650 903

(c) 曲軸臂に於ける截斷應力(Ss)

 $Ss = Mt/Zp$ [kg/cm²]

6/1,530 907 7.3/1,650 1,010

(d) 直接及截斷應力の合成最大等價應力(Se)

 $Se = \frac{St}{2} + \sqrt{\frac{St^2}{4} + Ss^2}$ [kg/cm²]

6/1,530 1,381 7.3/1,650 1,471

今假りに此の値を前同様に考へて安全係數を求めるとすれば(此の假定は或は不合理ならんも)次の様になる。

 $S_0 = 3,660kg/cm^2 \quad p' = 2,762$ 及 $2,942kg/cm^2 \therefore S_0/p'$

は次の通りとなる。

6/1,530 1.3 7.3/1,650 1.2

IV. 疲勞安全性を基礎とした材料

に必要な抗張力を求める計算

今前記安全率を1とした場合を假想して其時の耐久性を考慮した材料の強度上必要な抗張力を求める事とする。

前記耐久限界算出公式を再記する。 $S = (\sigma_B^n - \sigma_B) \frac{ST_{II}}{ST_0}$ 或る機構の計算上得られる負荷状態の靜力的荷重を p kg/mm² とすれば、前述の様に次式から安全率が求められる。

$$\text{安全率} = \frac{\frac{S}{2}}{2p} = \frac{S}{4p}$$

但、S は耐久限界で上式から求められる。安全率=1

$$\text{として } \sigma_B \text{ を求めると } \frac{S}{4p} = 1$$

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

〔I〕 本式から σ_B を算出する方法は數字的には次の如くす

$$\text{れば之を求められる } \sigma_B^n - \sigma_B - \frac{4p}{ST_{II}/ST_0} = 0$$

$$\sigma_B^n = 1 + \frac{n \log \sigma_B}{1} + \frac{n^2 (\log \sigma_B)^2}{2} - \frac{n^3 (\log \sigma_B)^3}{3} + \dots\dots$$

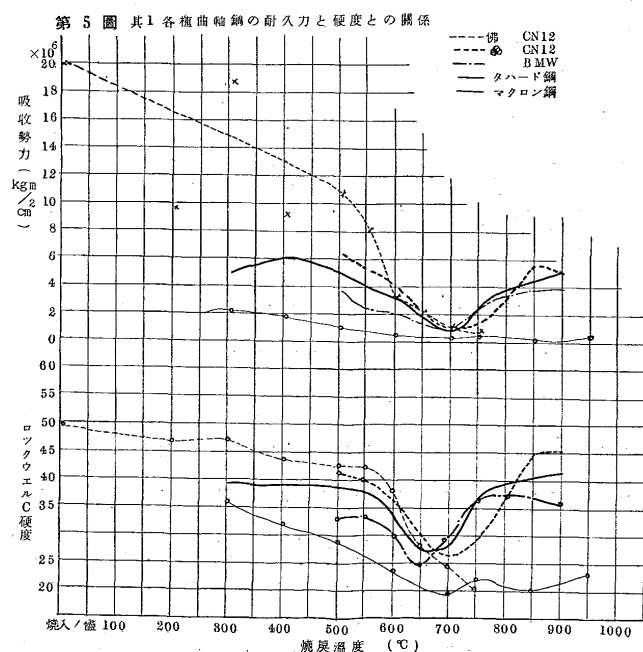
 $\log \sigma_B = x$ とすれば $\sigma_B = e^x$

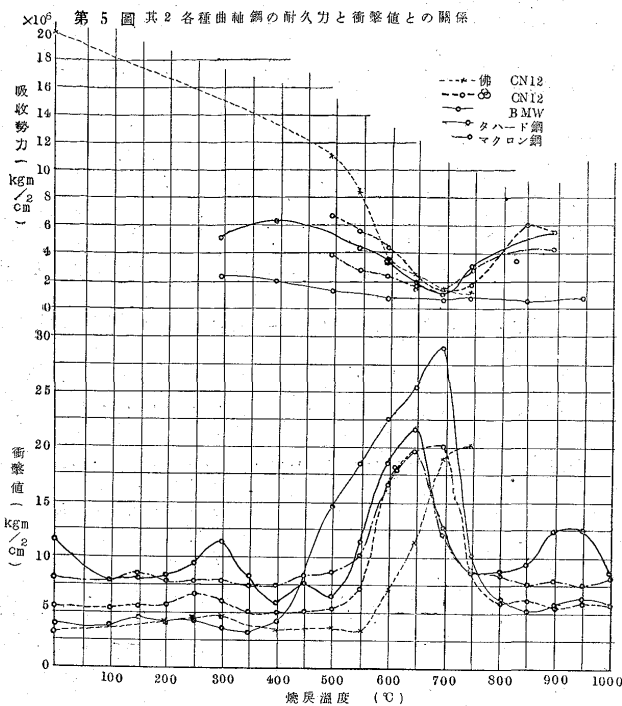
$$e^x = 1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots\dots\dots$$

$$\therefore \sigma_B^n - \sigma_B = \left(1 + \frac{nx}{1} + \frac{n^2 x^2}{2} - \frac{n^3 x^3}{3} + \dots\dots \right)$$

$$- \left(1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots\dots \right)$$

$$= (n-1)x + \frac{(n^2-1)}{2}x^2 + \frac{(n^3-1)}{6}x^3 + \dots\dots$$

但、 x^3 以上の項も之を切捨てる事が出来ない場合には、本式を解く事は困難であつて實用上の數値を之に代用すれば解ける譯である。〔II〕 今前述の様に ST_{II}/ST_0 の値を假に 1.4 とする



而して p の値を種々に變更して σ_B の値を計算する。

$$\sigma_B^{1.079} - \sigma_B = \frac{4p}{1.4}$$

今 p を $4 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ として σ_B の値を求むる時は次の通りとなる。之の關係を曲線で示すと第4圖の如くなる。

$p \text{ kg/mm}^2$	4	7	10	14	20
$\sigma_B \text{ kg/mm}^2$	35	54	72	93	123
σ_B/p	8.75	7.71	7.20	6.65	6.15

前記 BMW 曲線の最大應力を 14 kg/mm^2 とすれば、必要な材料の抗張力 σ_B は 93 kg/mm^2 以上となる。即ち本曲軸の鋼は實際上 94 kg/mm^2 以上の Ni-Cr 鋼を使用する必要がある事が理論的に證明出来る。翻つて式 $\sigma_B^{1.079} - \sigma_B = 4p/1.4$ から耐久性の大なることを望むならば、單に σ_B の大きな材料であれば差支ない譯であるが、粘靱性の見地から見て σ_B のみに頼り得ない理由がある。

鋼が衝撃値、断面收縮率及伸が大で所謂粘靱性を多分に有する場合、一度龜裂を發生せる後折斷に至る迄に、豫告を與へる意味の安全弁と考へるならば、之等の性質は相當に重要なものである。殊に硬脆な材料の龜裂發生後破斷に至る迄の時間の短いのに反し、粘靱な材料は一度龜裂が發生しても其侵入の緩徐であることは考へられる。

この外極めて大なる衝撃、例へば墜落又は撃突の様な場合に、脆いものは原形を止めぬ迄に破碎飛散し人體に危害を及ぼす様な場合を想像されるに反し、粘性大なるものは唯變形するに止る。但之は特殊な場合ではあるが。

之を要するに疲労耐久性の見地からは單に抗張力の大きいことだけを考へればよい筈であるが、事實に於ては抗張力は適當な程度に止め、而も疲労による故障を完全に防止し得る様な状態を撰ばなくてはならぬと思ふ。

第2表 各種曲軸鋼の各種状態に於ける耐久力
(Amsler Hammer Machine による。但 $r=5^{\text{cm}}$ の場合)

94 kg Ni-Cr 鋼				
熱處理	破斷回数	吸收勢力 $\text{kgcm/cm}^2 \times 10^6$	同平均	ロックウェル C 硬度
焼戻 500°C	48,260 64,850	1'400 1'893	1'6465	33.2
" 650°C	46,510 34,720	1'355 1'050	1'2025	27.65
" 750°C	145,480 93,180	4'27 3'14	3'705	38.1
100 kg Ni-Cr 鋼				
焼入 830°C	220,470	6'234		
焼戻 300°C	279,290	7'901	7'068	45.6
"	145,710	4'122	4'686	40.2
" 400°C	185,620	5'250		
"	185,820	5'190	3'925	38.2
" 500°C	94,020	2'660		
"	86,980	2'460	2'342	30.8
" 600°C	78,710	2'224		
"	53,370	1'510	1'725	28.7
" 750°C	68,530	1'940		
Ni-Cr-W 鋼 (BMW)				
焼入 850°C (空)	169,040	4'69	3'955	33.7
焼戻 500°C	115,840	3'22		
"	53,500	1'50	2'775	34.0
" 550°C	144,320	4'05		
"	95,180	2'665	2'405	31.1
" 600°C	76,430	2'145		
"	63,410	1'780	1'654	25.5
" 650°C	54,040	1'527		
"	52,600	1'477	1'377	30.1
" 700°C	45,450	1'277		
"	130,650	3'710	2'835	37.1
" 750°C	67,830	1'960		
"	126,050	3'545	3'933	38.4
" 800°C	153,950	4'320		
"	158,180	4'400	4'333	37.0
" 900°C	155,820	4'365		
Ni-Cr 鋼 (マクロン)				
焼入	72,660	2'045		
焼戻 300°C	98,050	2'73	2'383	36.7
"	73,860	2'06	2'43	32.4
" 400°C	72,530	2'025		
"	47,160	1'315	1'323	29.5
" 500°C	48,820	1'36		
"	28,560	0'80	0'825	24.1
" 600°C	30,490	0'85		
"	28,200	0'791	0'623	20.3
" 700°C	16,330	0'455		
"	29,390	0'957	0'850	22.8
" 750°C	26,660	0'742		
"	21,830	0'612	0'612	21.1
" 850°C				
"	35,360	1'000	0'984	24.0
" 950°C	34,360	0'968		
Ni-Cr-Mo 鋼 (タハード)				
焼入 850°C (空)	229,700	6'38 × 10⁶	× 106	39.6
焼戻 300°C	139,050	3'92	5'15	
"	170,230	4'83	6'355	39.6
" 400°C	283,300	7'83		

Ni-Cr-Mo 鋼 (タハード)				
熱處理	破断回数	吸收勢力	同平均	ロックウェル C 硬 度
焼入 850°C(空)	194,310	5.40	4.29	38.6
" 550°C	114,560	3.18		
" "	162,120	4.70	3.50	34.2
" 600°C	81,080	2.30		
" "	79,050	2.21	1.936	28.4
" 650°C	59,460	1.661		
" "	38,440	1.08	1.170	28.9
" 700°C	45,160	1.259		
" "	152,760	4.27	3.12	37.7
" 750°C	70,910	1.97		
" "	160,940	4.51	5.525	42.6
" 900°C	233,430	6.54		

Ni-Cr-Mo 鋼 (〇. CN 12)				
焼入 850°C(空)	191,670	5.43	6.65	41.8
焼戻 500°C	274,960	7.87		
" "	234,350	6.66	6.845	40.5
" 550°C	258,130	7.03		
" "	147,840	4.175	4.41	37.2
" 600°C	164,550	4.65		
" "	46,760	1.36	1.336	27.8
" 700°C	46,320	1.312		
" "	67,540	1.88	1.73	30.0
" 750°C	54,290	1.58		
" "	154,890	4.515	3.94	37.6
" 800°C	115,120	3.370		
" "	275,650	8.24	6.01	45.8
" 850°C	131,640	3.78		
" "	232,160	6.8	5.47	46.5
" 900°C	140,190	4.135		

Ni-Cr-Mo 鋼 (佛 CN 12)				
焼入 850°C(空)	722,720	20.00		49.6
焼戻せず				
" 200°C	373,340	9.74		47.2
" "				
" 300°C	673,940	19.02		47.5
" "				
" 400°C	344,250	9.518		44.2
" "				
" 500°C	401,760	11.100		43.2
" "				
" 550°C	305,760	8.454		43.0
" "				
" 600°C	129,880	3.591		38.9
" "				
" 650°C	90,280	2.480		29.1
" "				
" 700°C	50,530	1.388		25.4
" "				
" 750°C	38,910	1.100		21.3

V. 曲軸鋼の撰定

曲軸鋼の撰定上考慮すべき最肝要な事は繰返負荷による疲労に耐へる事であつて、之が爲めには鋼の成分と其の使用の理想的状態を撰ばなくては不可い。即ち金質、成分、鍛造及熱處理の最良方法を採用して、之等状態に應ずる機械的諸性質の重點を、何處に置くべきかを決定し、更に加工、仕上、設計上の諸點に對しても、最も満足すべき状態を撰ばねばならぬ。

今上記の諸條件の中成分並に熱處理に應ずる靜力的機械的諸性質と疲労による耐久力との關係を見る爲めに Amsler Universal Hammer Machine を以て試験し、破

断迄の耐久性を比較した。但打撃活量は之を 5cm (Hammer の位置により區分) に一定した。勿論本試験は、斯る鋼の耐久限界以上の過負荷による耐久性の比較であつて、曲軸鋼の一般耐久性を示す標準となると假定したものである。

供試特殊鋼の成分並に熱處理は第 2 表に掲げてある通りで試験成績は第 2 表並に第 5 圖其 1 及其 2 に示してある。

この結果によれば 650°C 乃至 700°C に焼戻した状態では總て硬度低く、耐久性も最乏しい。而して其の値は各種成分のものを通して殆んど同一である。故に若し斯かる特殊鋼を此の焼戻温度附近で使用するものとすれば、使用状態を誤つてみると見ねばならぬ。從來曲軸の折損した實例はこの點に起因することが多い。

尙之等の中、例へば CN12 (Ni-Cr-Mo 鋼) の様な鋼では空氣焼入が出来、硬度の大なる状態で使用した方が最良である事が分る。而して耐久性の順序は CN12 タハード (Ni-Cr-Mo 鋼) BMW 曲軸鋼 (Ni-Cr-W 鋼), Cr 鋼、マクロン鋼 (Mn-Cr 鋼) 等である。

現在航空機に使用して居る曲軸鋼中最も秀れてゐる BMW 用曲軸鋼ですら往々折損する事があるのは注意すべき事實である。將來 CN12 鋼タハード其他の鋼で一層優秀なものを研究し使用する事が肝要であらう。

今翻つて工作上から之を考察するに現用特殊鋼を普通の刃具類で切削し得る最高安全限度は、ブリネル硬度約 360 迄である。然るに現今では航空發動機用曲軸鋼としては、馬力及回轉數の増加と急激なる飛行状態に伴ふ、震動疲労の見地から、少く共ブリネル硬度 360 以上の鋼材を要求してゐると見做すべきであらう。勿論材料としては上記の如く 360 の工作限度を突破した鋼材は求められる。例へば CN12 タハード 鋼、BMW (Ni-Cr-W 鋼) でも熱處理の如何によつては充分得られる。之に對し工作上著しい困難の存すると云ふ實際問題の解決は、之を刃具の改良に俟つより外に途がない。最近 Widia (Carboloy, Tungalloy) の様なものも現はれてゐるが、脆くて使用上大なる支障があり、高速度鋼は現在以上の切削能力を期待し得ない状態にあり、従つて次の様に工作上及設計の方面にも解決を求めねばならぬ。即ち

- (イ)、曲軸臂の隅角を可及的大きくする。
- (ロ)、該部の仕上を可及的丁寧にする。
- (ハ)、隅角部の肉を厚くすること。

(=)、震動防止法を攻究すること。

結 論

1. 現在迄に使用して來た各種航空發動機用曲軸鋼に就て説述し、之が使用實例や、折損狀況に就ても述べた。
2. 曲軸鋼の破斷は凡て疲勞破斷であつて、分離破斷との關係を述べた（鐵と鋼 18 年第 10 號及 12 號参照）
3. 分離破斷の概念から強度設計に必要な基礎要件を述べ従來の誤つた概念を指摘し實物機構の設計に利用し得る公

式に就て論じた。

4. BMW 發動機曲軸の疲勞耐久性を基礎とした計算實例を掲げ従來の靜力的荷重計算から耐久性を考慮に入れた鋼の撰定を爲す事が出來た。

5. 各種特殊鋼に就て機械的諸試験結果と耐久力（Amsler Universal Hammer Machin）とを比較し鋼の撰定上の重點を如何に考慮すべきやを論じた。

昭和 8 年 1 月記

美 裝 鋼 板 の 研 究

（日本鐵鋼協會 第 9 回講演大會講演）

森 寺 一 雄

目 次

概 要

第 1 章 緒 言

第 2 章 本邦市場に於ける各種アートタルの品質比較

1. 成分及び機械的性質 2. 組織 3. 各鋼板の厚さ不同程度

第 3 章 製造法概要

第 4 章 製作上必要なる基礎的諸性質

第 1 節 熱壓延率並にその焼鈍温度

第 2 節 冷壓延率並にその焼鈍温度

第 3 節 元板の熱處理、板の厚さ及び冷壓延後の熱處理の影響

1. 實驗方針 2. 板の厚さの影響 3. 加熱時間の影響 4. 冷却速度の影響 5. 元板熱處理の影響

第 4 節 元板の熱處理と冷壓延率の影響

1. 壓延作業 2. 牽引試験 3. 反覆屈曲試験 4. 結晶粒の大きさ

第 5 節 アームコ鐵と製鐵所鋼の比較

第 5 章 結 論

概要 最近に製造販賣する様になつた製鐵所美裝鋼板（アートメタル）の製作方法並に製作に必要な種々の基礎的性質即ち熱間壓延率、冷間壓延率、焼鈍温度、焼鈍時間、冷却速度及び板の厚さ等が製品の性質に及ぼす影響を實驗し、尙本邦市場に在る各國製美裝鋼板の品質を比較したものである。

第 1 章 緒 言

美裝鋼板とは製鐵所で特に命名したアートメタルの一種

で、車輛、自動車、建築材、家具、琺瑯鐵器等に使用せらるゝものである。

アートメタルには色々の種類があるが現在製鐵所的美裝鋼板は次の 4 種の商標によりて市場に出てゐる。

赤鷲 艶付仕上最極軟 赤鳩 普通仕上最極軟

白鷲 艶付仕上極軟 白鳩 普通仕上極軟

即ち鋼質に依りて赤白に分け、赤は極めて軟質にして深絞用に適し、白は赤よりも稍硬質で一般向である。又仕上の程度に依りて鷲と鳩に分け、鷲は冷壓延した艶付鋼板で磨いた様に光澤があるから一名磨鋼板とも稱せらる。鳩は熱壓延したものであるが酸洗してスケールを除去してあるから表面の美しいことは黑板の及ぶところでない。板の厚さは BWG22 番から 10 番まで即ち 0.7mm から 3.2mm まで種々あり、廣さは 3'×6', 4'×8', 5'×10' 及び不定尺物がある。之等美裝鋼板の製造上參考として本邦市場に在る各國製アートメタルの品質を調査し、又製作上必要なる基礎的諸性質を實驗に依りて求めんとするものである。

第 2 章 本邦市場に於ける各種アートメタルの品質比較

1. 成分及び機械的性質 供試料は本邦及び歐米各國製 12 種で厚さ 16 番乃至 26 番、廣さ 3'×6' 又は 4'×8' 物である。之等の各板の内外より試片を取り化學分析、牽引試験（標點距離 50mm）反覆屈曲試験（試片の一端を