

高硬度材における疲れ強さに及ぼす表面状況の影響

Effect of Surface Conditions on the Fatigue Strength of High-hardness Steels

清 永 欣 吾* 浦 野 元 一*
Kingo Kiyonaga Motokazu Urano

吾 郷 瞭 生* 芥 川 俊 雄*
Ryôsei Agô Toshio Akutagawa

要 旨

かたさの高い AISI・D2 (かたさ H_RC61) を用いて疲れ強さに及ぼす表面あらさの影響について実験を行った。

実験には小野式回転曲げ疲れ試験機を用い、試験片平行部の表面あらさを 2μ から 0.2μ に変えて疲れ試験を行なった。その結果、かたさの高い鋼は表面あらさによる疲れ強さの低下率がかたさの低い鋼に比べて著しく大きかった。

また、同時に調べたクロムめっき、めっき後のベーキング処理の効果も非常に顕著であり、クロムめっきにより低下する疲れ強さはベーキング処理によって著しく向上することが明らかになった。

1. 緒 言

一般に比較的軟かい鉄鋼材料に比べてかたさの高い特殊鋼に関する疲れ強さのデータは非常に少なく、設計に不便を感じている。そのため本研究は特殊鋼に関する疲れ強さのデータの集積と疲れ破壊現象の理解を増すために始めたものである。

鉄鋼材料の繰返し荷重に対する疲れ強さは材質本来の強さに依存することはいうまでもないが、それらの表面状態が疲れ強さに及ぼす影響もこれにまさるとも劣らず大きいと推定される。それは多くの場合、応力が表面に大きく分布すること、および形状の影響で応力が表面に集中するためである。したがって疲れ破壊は多くの場合表面から発生、発達することが考えられる。よって表面の疲れ強さに対する抵抗性を増大することは鉄鋼材料の寿命や強さを増大することになる。

本研究は高硬度の鋼における疲れ強さに及ぼす表面状況の影響について実験した結果を報告するものである。

2. 供試材および試験方法

2.1 供 試 材

疲れ試験片に用いた素材は 6 ton 塩基性電気炉で吹製し、25 mm 角に熱間圧延したものを 850°C で焼鈍したものである。この場合の鍛造比は 80 であり、表 1 は疲れ試験片に用いた素材の化学成分である。

実験に用いた疲れ試験機は小野式回転曲げ疲れ試験機であり、試験は常温で行なわれた。この試験機に用いる試験片の寸法は図 1 に示すとおりである。焼鈍後この形状寸法におおの 0.5 mm の削りしろをつけ荒仕上げしたのち、1,050°C × 1 時間で油焼入れ、200°C × 1 時間で焼戻した。かたさは焼戻後 H_RC61 である。

この場合の機械的性質として抗折試験の結果を示す。試験片は 5 mmφ × 70 mm l、支点間距離は 50 mm、中央一点荷重により試験を行なった。その結果、かたさ H_RC61 で破断荷重 300 kg、たわみ 1.4 mm、吸収エネルギー 210 kg・mm であった。これより公称破断応力を算出すると (材料力学による) $\sigma_B = 305 \text{ kg/mm}^2$ となる。

図 2 に熱処理後の顕微鏡組織を示した。またこの鋼に含まれている介在物量の測定結果は JIS 法で

$$\begin{aligned} \text{圧延方向の面では} \quad d_A 60 \times 400 &= 0 \\ d_{(B+C)} 60 \times 400 &= 0.021 \end{aligned}$$

* 日立金属株式会社安来工場冶金研究所

表 1 試験片の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
AISI・D2	1.47	0.41	0.38	0.024	0.002	0.10	11.90	0.80	0.80

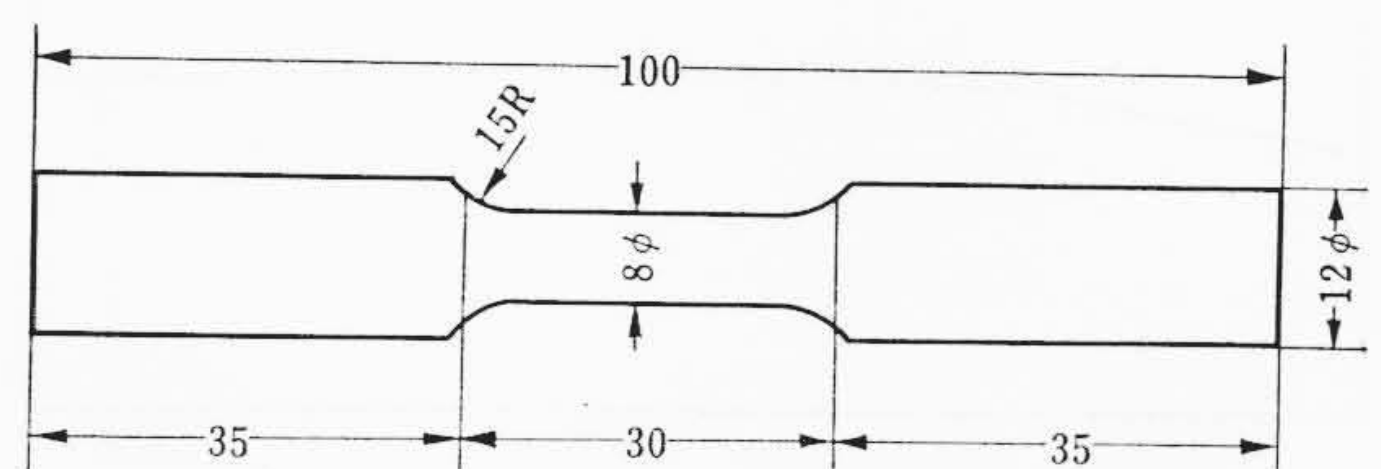


図 1 疲れ試験片寸法

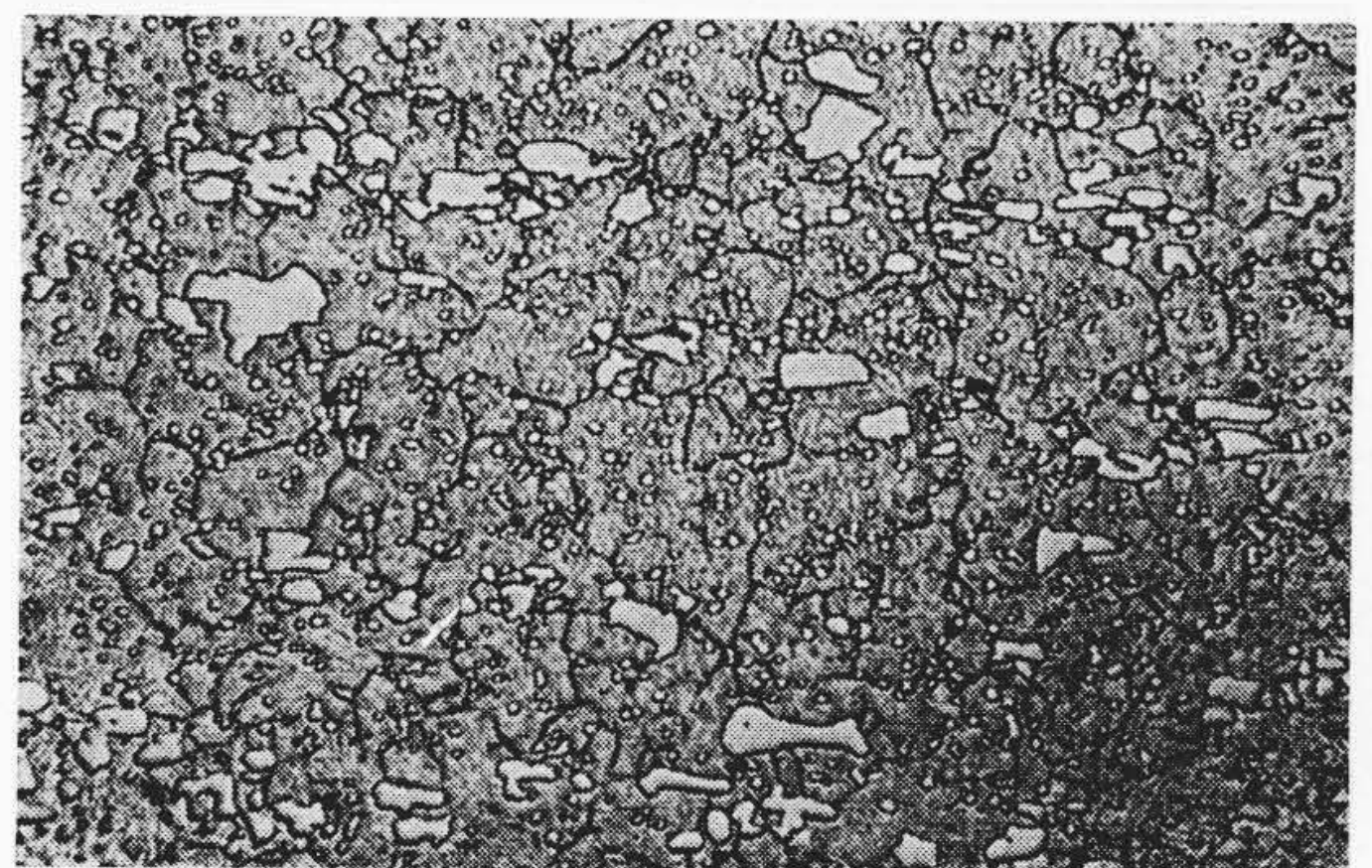


図 2 熱処理後の組織 (×400)

圧延方向に直角の面では $d_{(A+B+C)} 60 \times 400 = 0.025$
なお、測定の際観察された介在物最大径は 10μ であった。

回転曲げ疲れ試験にはこの同一成分の AISI・D2 を同一寸法で試験片の平行部のみを表面状況を変えて実施した。

2.2 試験方法

疲れ試験の平行部は次の 7 とおりに表面状態を変えた。

- (1) センタレスグラインダ (200 番) 仕上げ
- (2) 1000 番エメリーペーパー仕上げ
- (3) 1200 番エメリーペーパー仕上げ
- (4) パフ研磨仕上げ
- (5) 電解研磨仕上げ
- (6) クロムめっき仕上げ
- (7) クロムめっき後ベーキング処理をした仕上げ

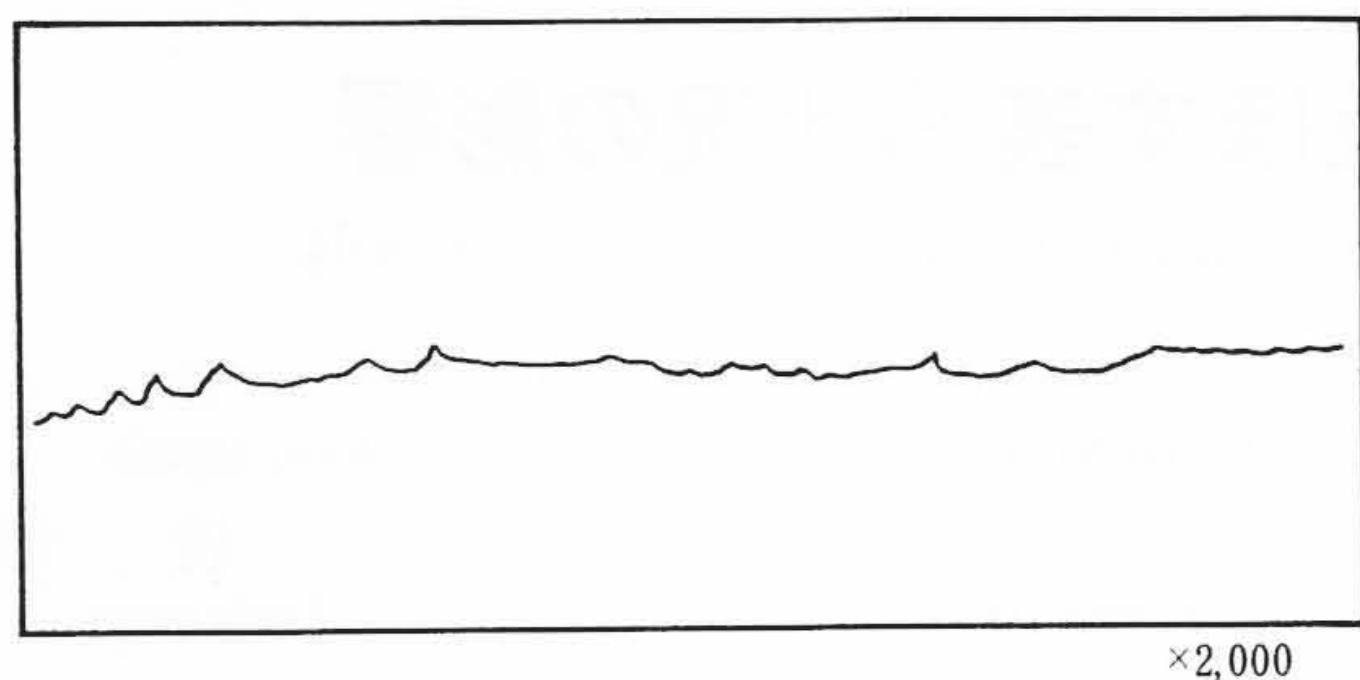


図3 センタレスグラインダ仕上げ面

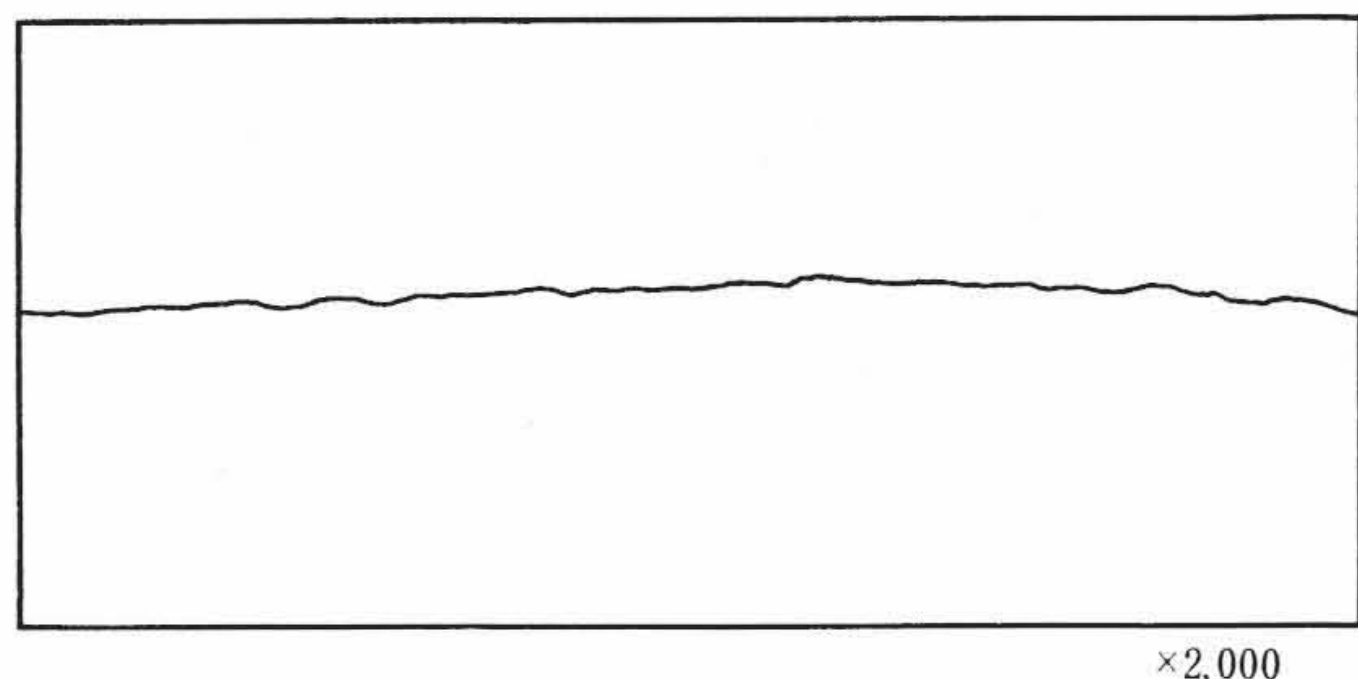


図4 1000番エメリーペーパー仕上げ面

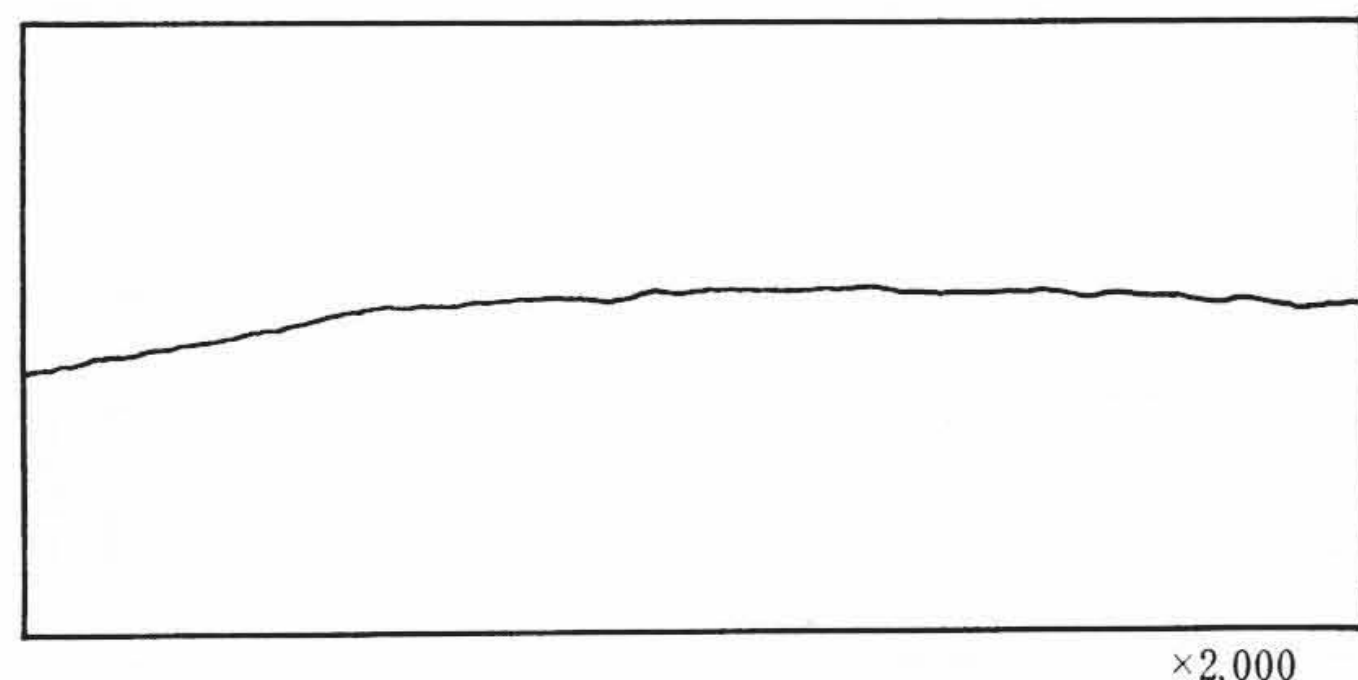


図5 1200番エメリーペーパー仕上げ面

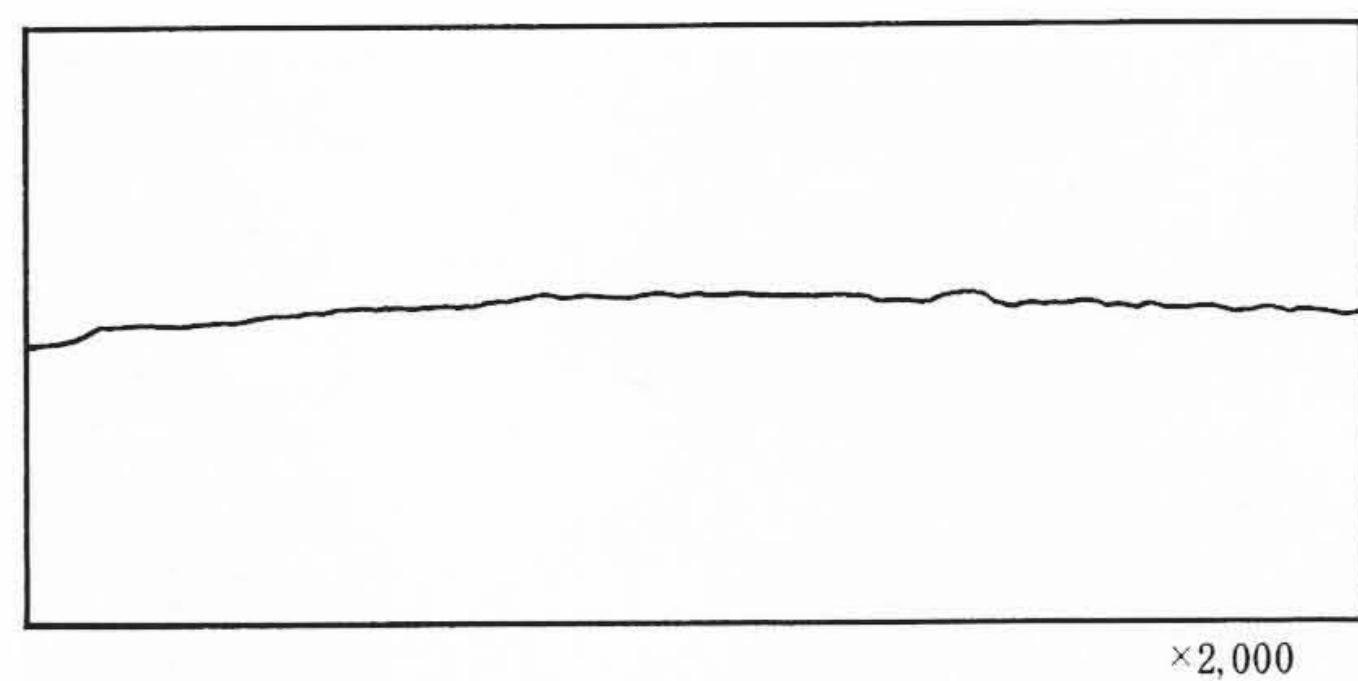


図6 バフ研磨仕上げ面

以上の各あらさの状態は小坂式蝕針式表面あらさ計であらさの最大量を試験片の縦方向に針を異動して測定した。そこでまず各あらさおよび仕上げ方法について説明する。

図3はセンタレスグラインダ(200番)仕上げのままの試験片表面平行部の縦方向のあらさである。図4はセンタレスグラインダ仕上げののち、エメリーペーパーの220番、320番、400番、500番、600番、800番で縦方向、円周方向交互にみがき、最後の仕上げはボール盤を用いて1000番エメリーペーパーで円周方向にみがき上げたものである。図5はさきの1000番エメリーペーパー仕上げののちに1200番エメリーペーパーで仕上げたものである。

図6はバフ研磨の表面あらさである。1200番エメリーペーパー仕上げののちボール盤を用い、酸化クロム液にてバフ研磨を円周方向に行なった。酸化クロムの濃度が非常に大きいためにあらさが少し認められる。

図7は本研究で採用した電解研磨の要領を示したものである。陰

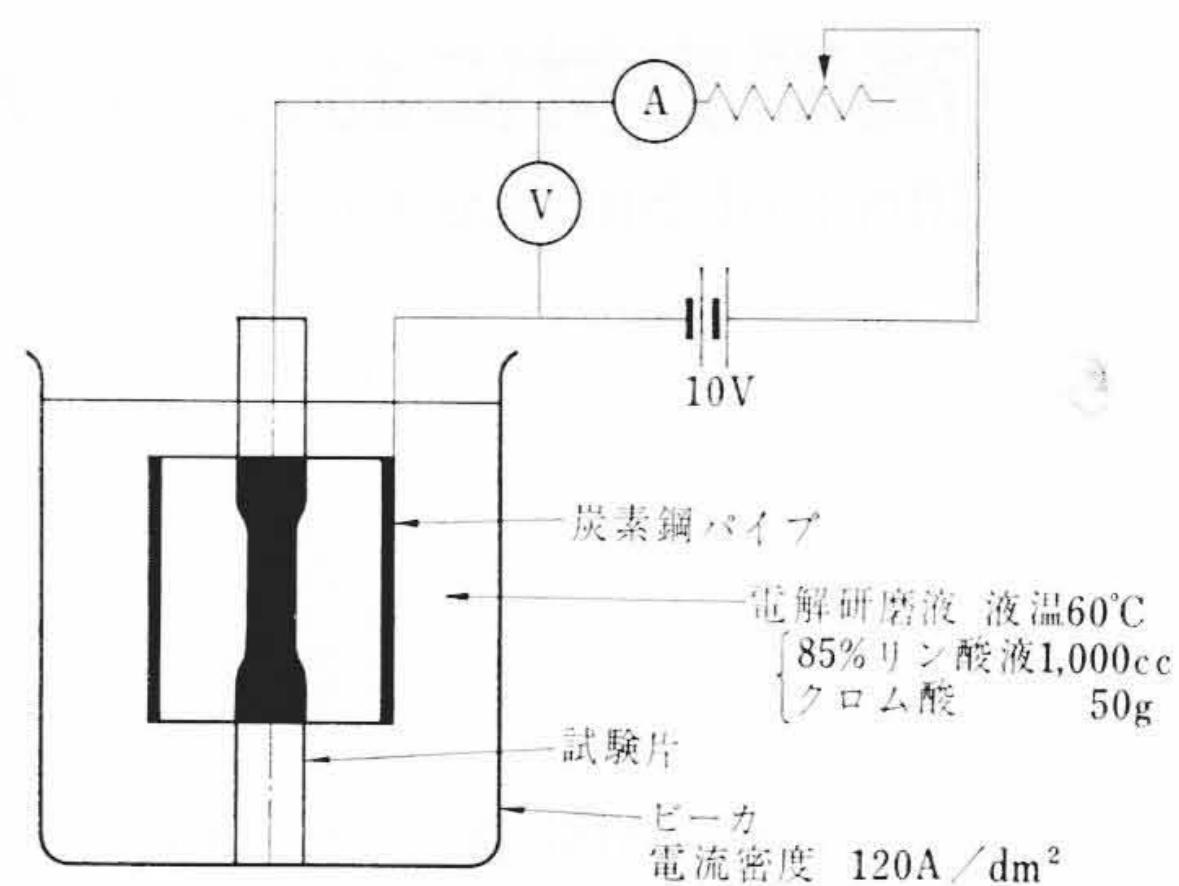


図7 電解研磨の要領

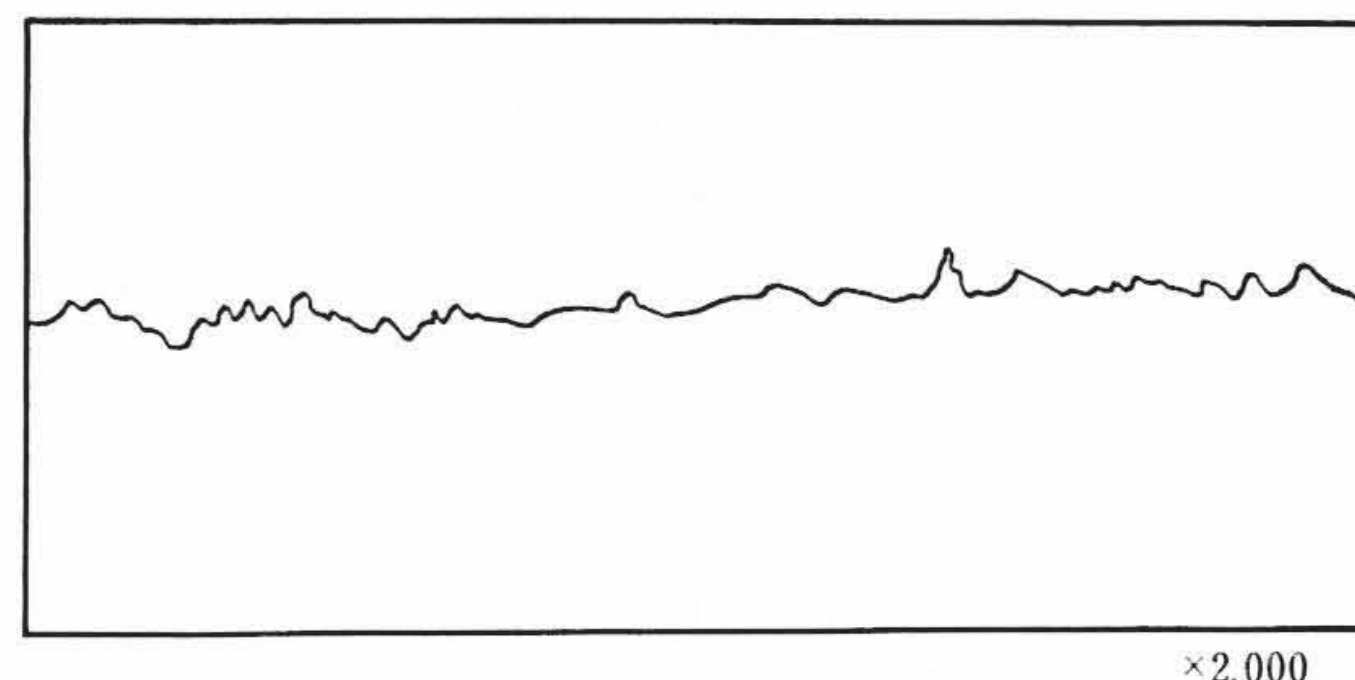


図8 電 解 研 磨 面

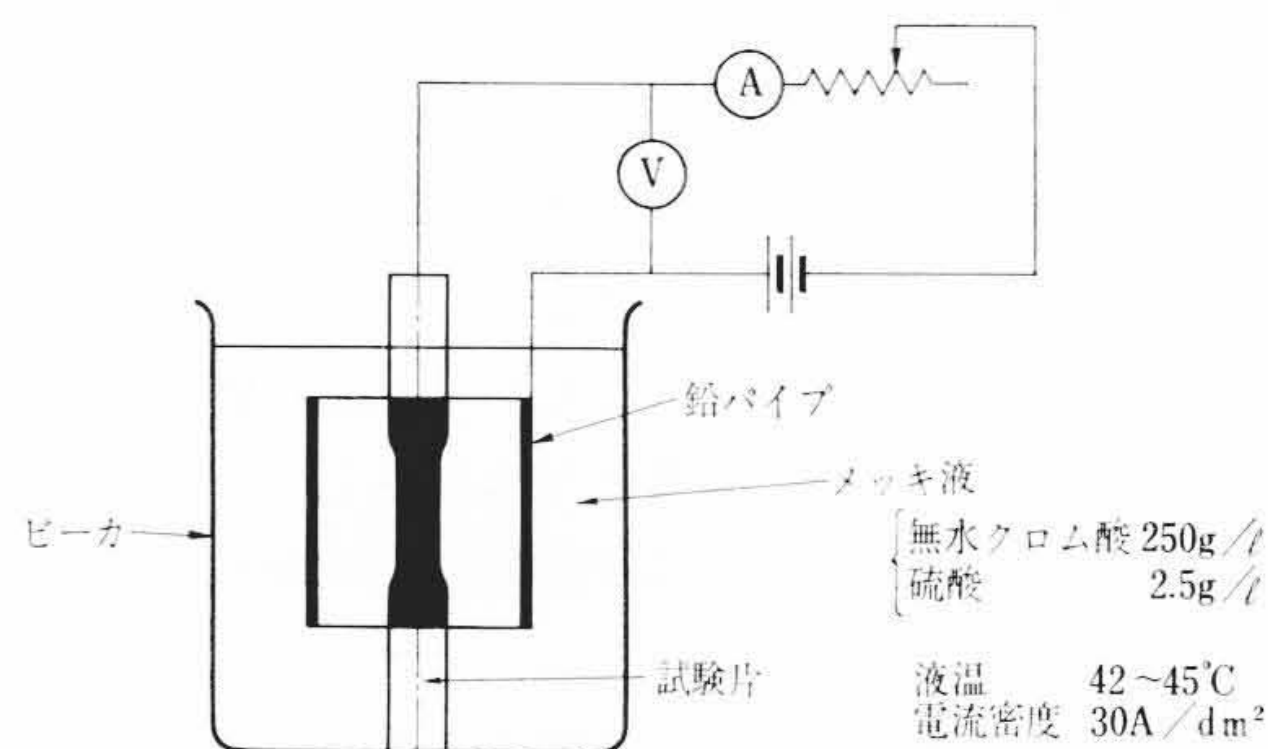


図9 クロムめっきの要領

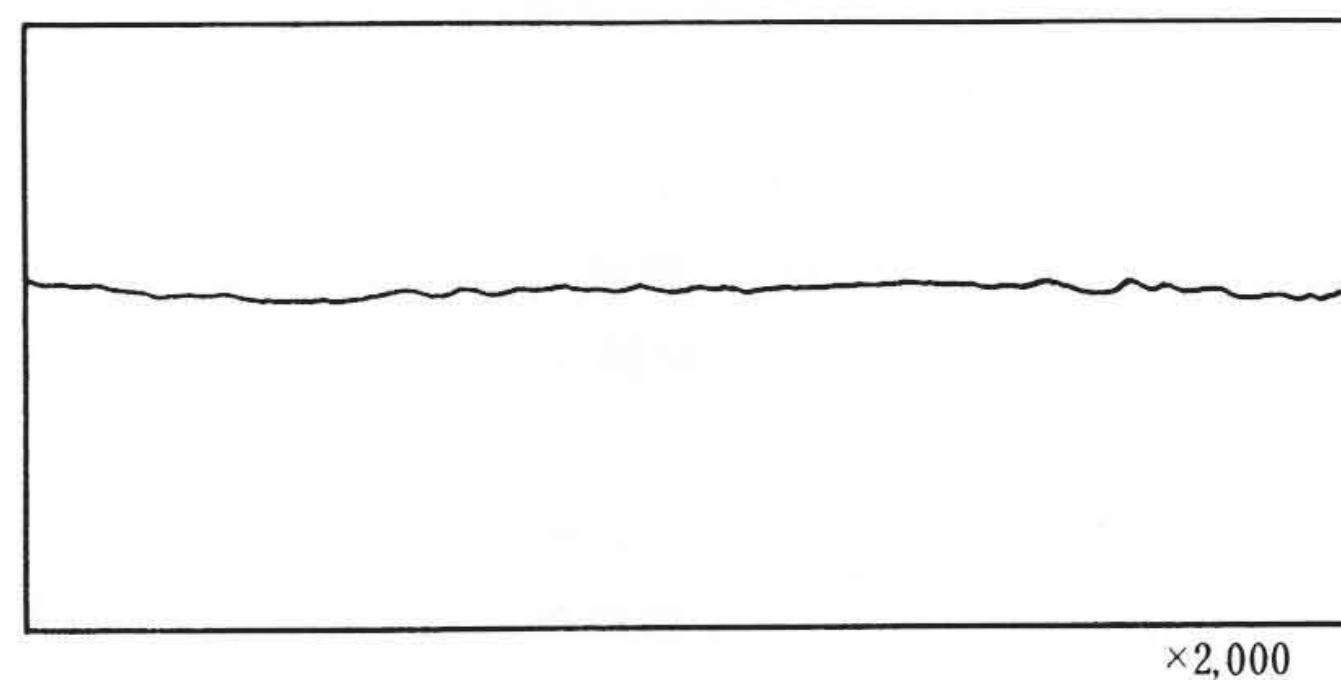


図10 クロムめっき後バフ研磨の面

極には直径 50 mm の炭素鋼パイプを用い、その中心に図示のように試験片を鉛直に立てて電解研磨を行なった。また電解研磨液には下記組成の液を使用した。

85%リン酸液 1,000 cc
クロム酸 50 g

なお、液の温度は 60°C に、電流密度は 120 A/dm² に保たれ、3 分間電解研磨で、マイクロメータで測り約 0.1 mm に研磨された。電解研磨された試験片平行部のあらさは図8に示すとおりである。電解研磨面では鋼のマトリックスの部分が溶け、炭化物介在物が浮き出てかなりあらい面になった。

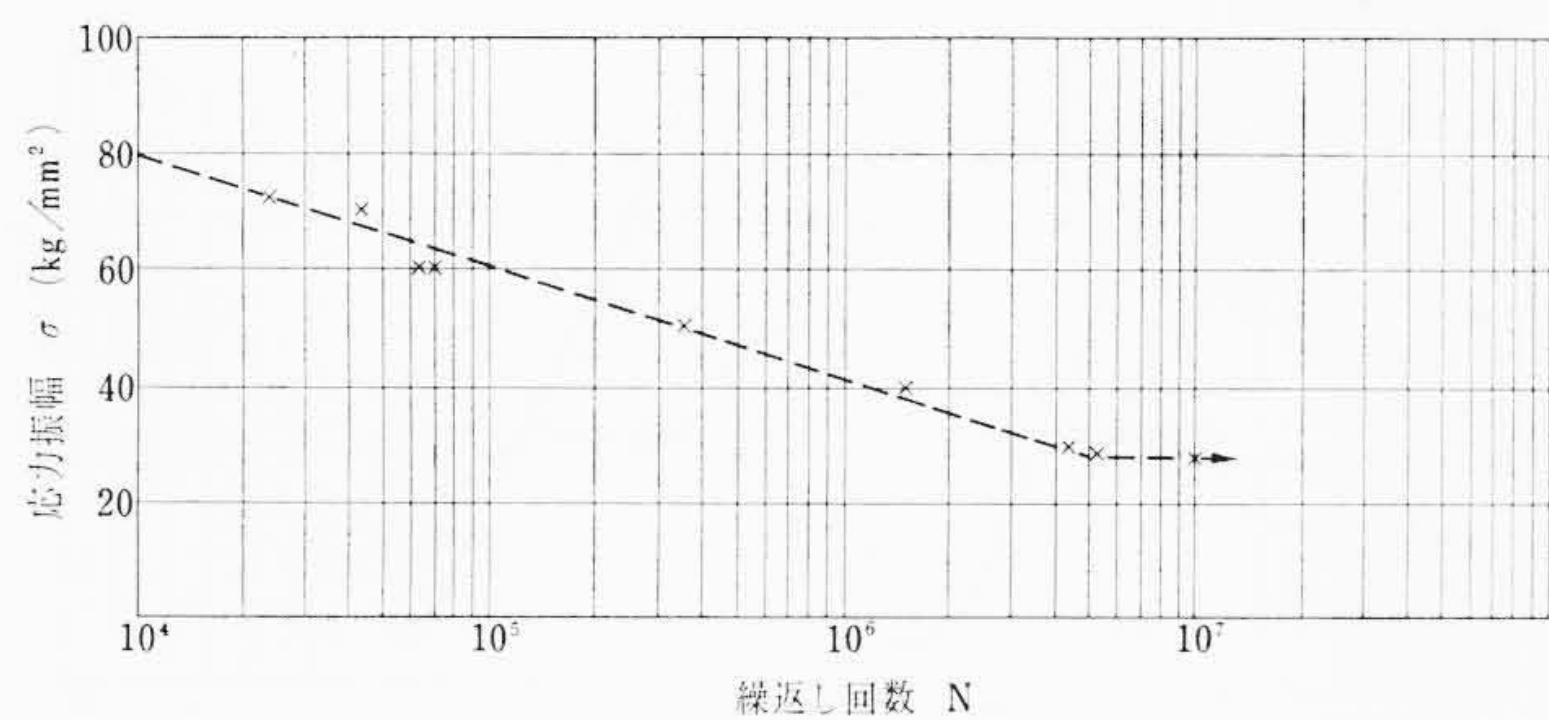


図 11 センターレスグラインダ仕上げの S-N 曲線

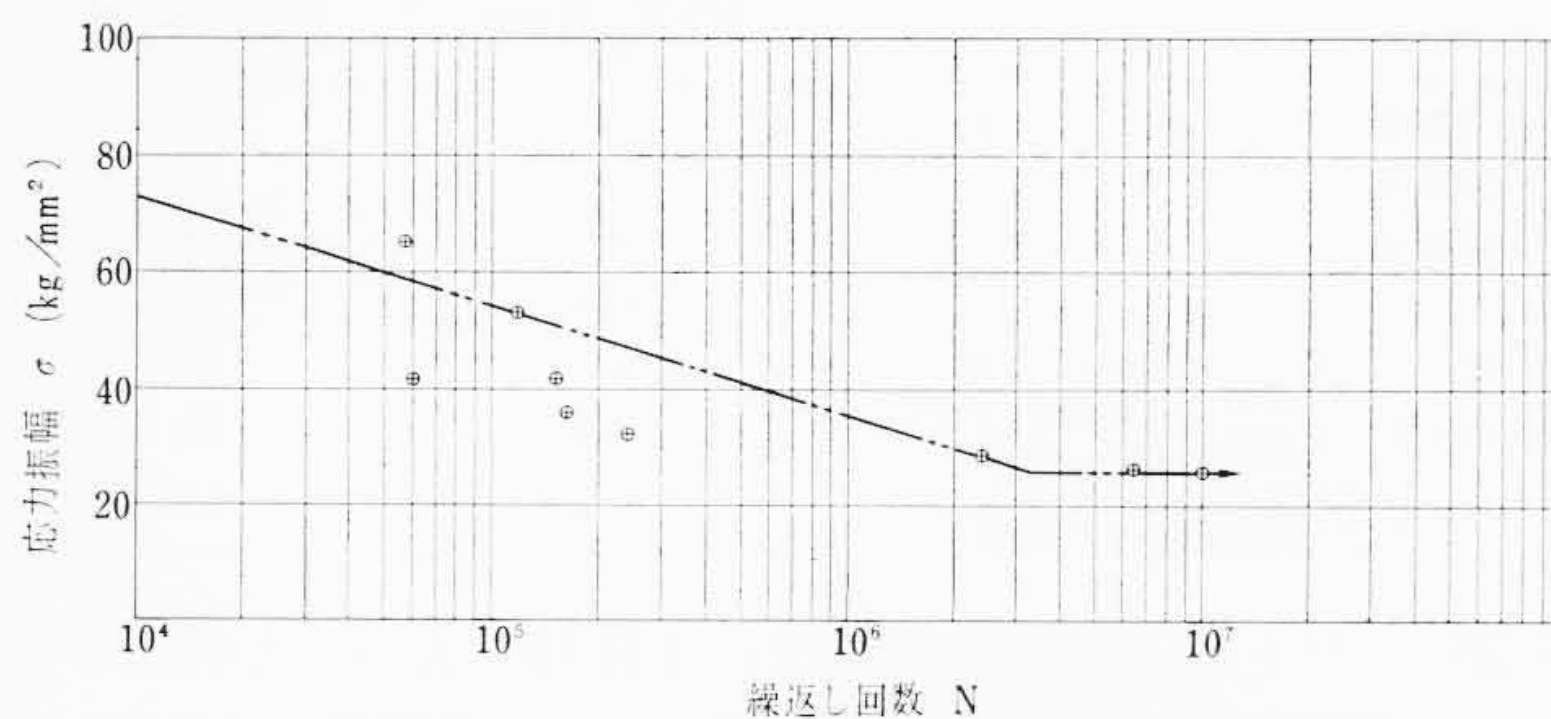


図 15 電解研磨仕上げの S-N 曲線

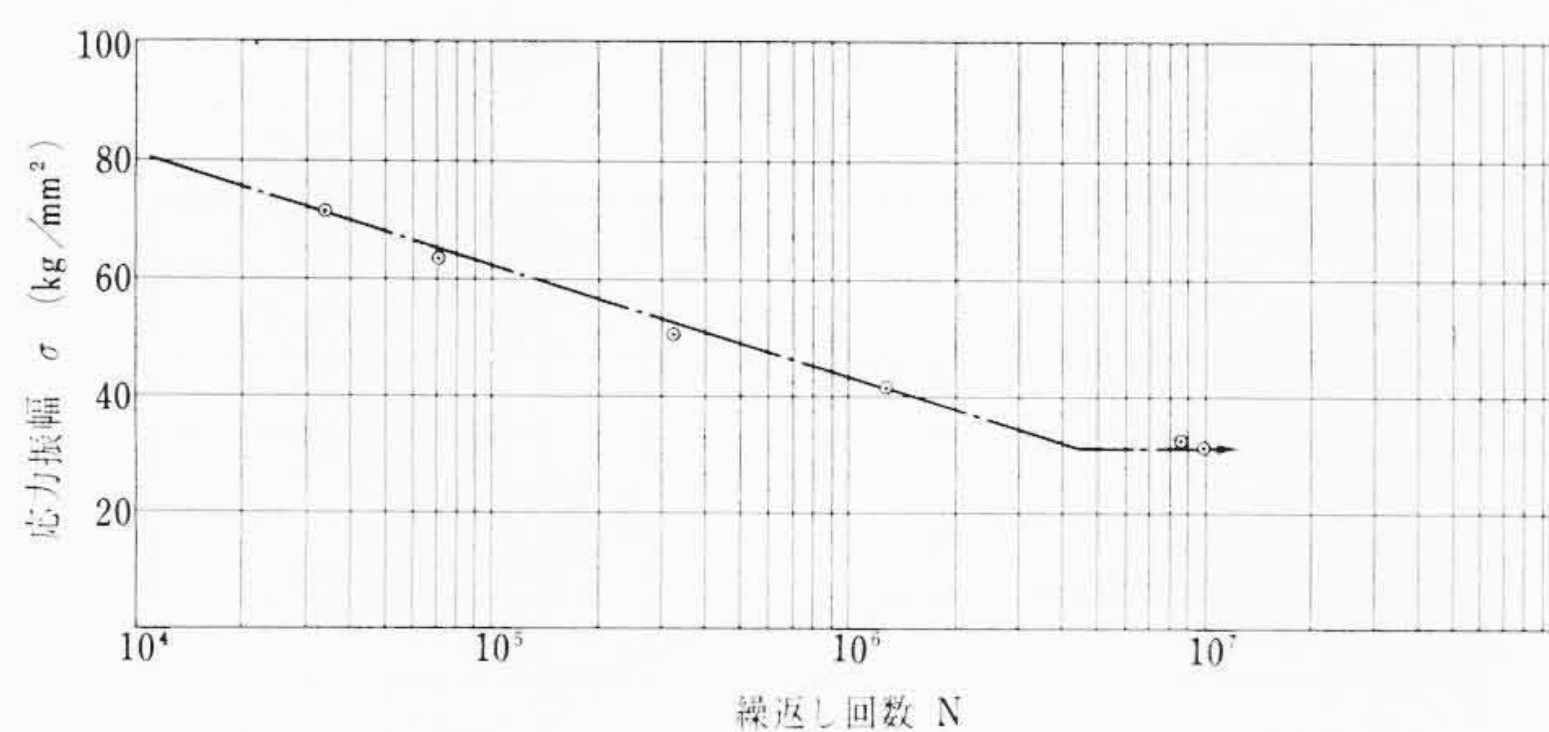


図 12 1000 番エメリーペーパー仕上げの S-N 曲線

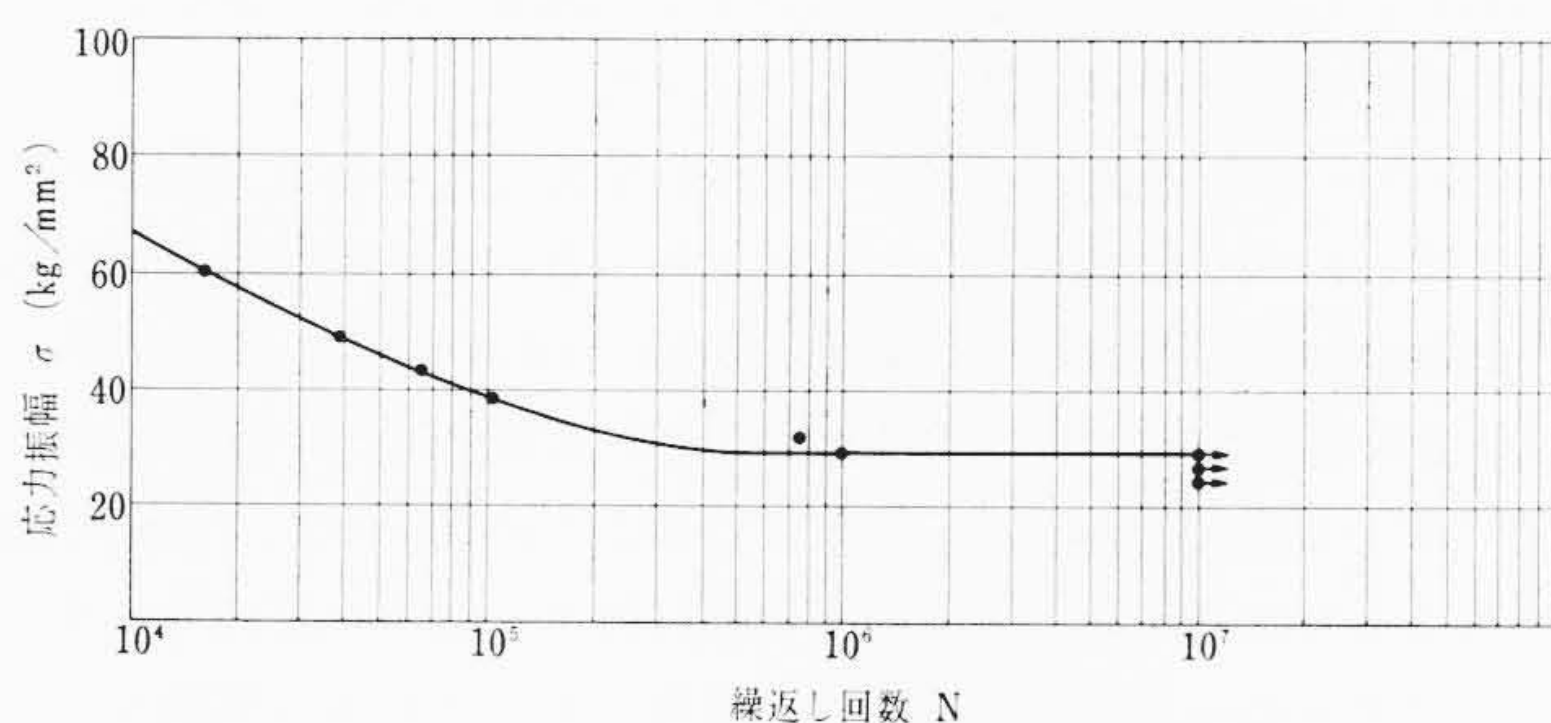


図 16 クロムめっき(バフ研磨)仕上げの S-N 曲線

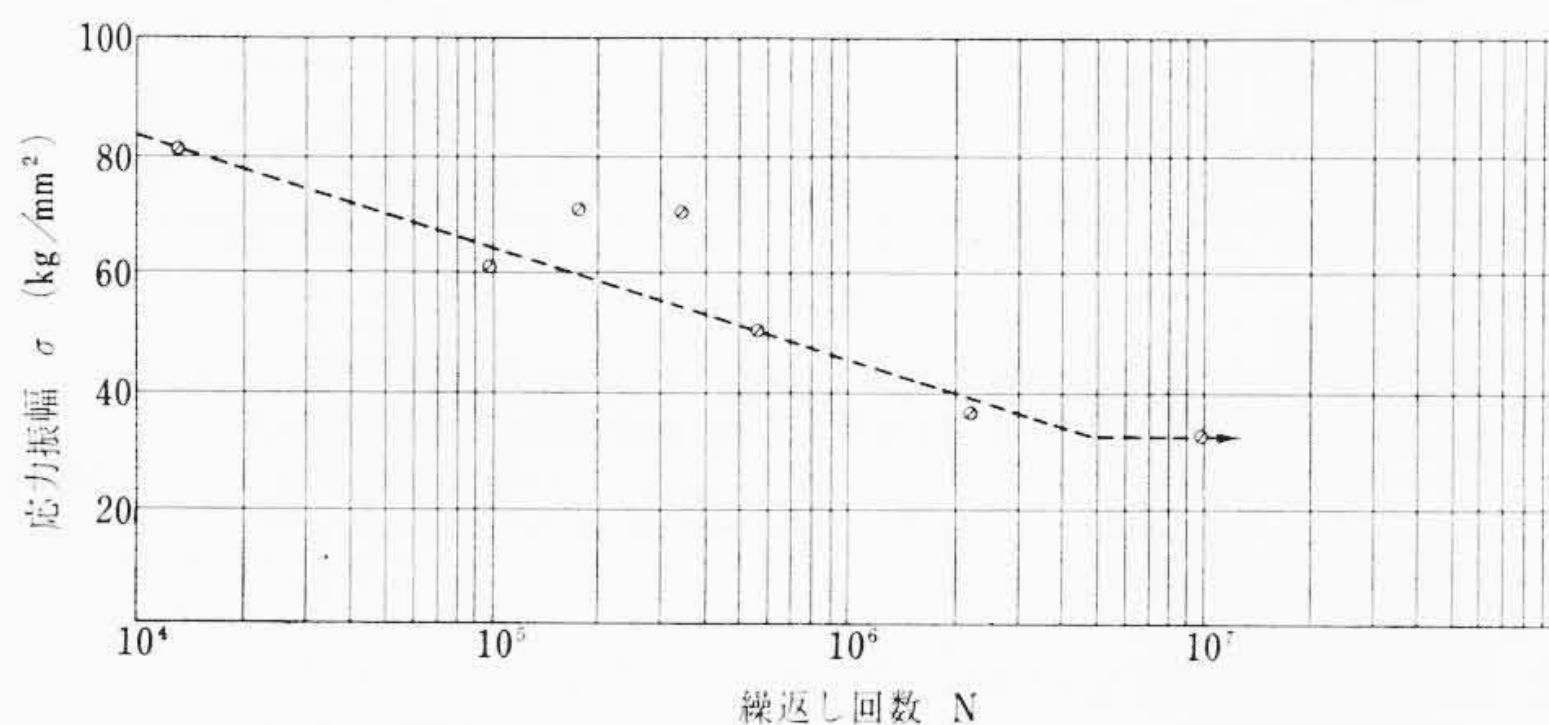


図 13 1200 番エメリーペーパー仕上げの S-N 曲線

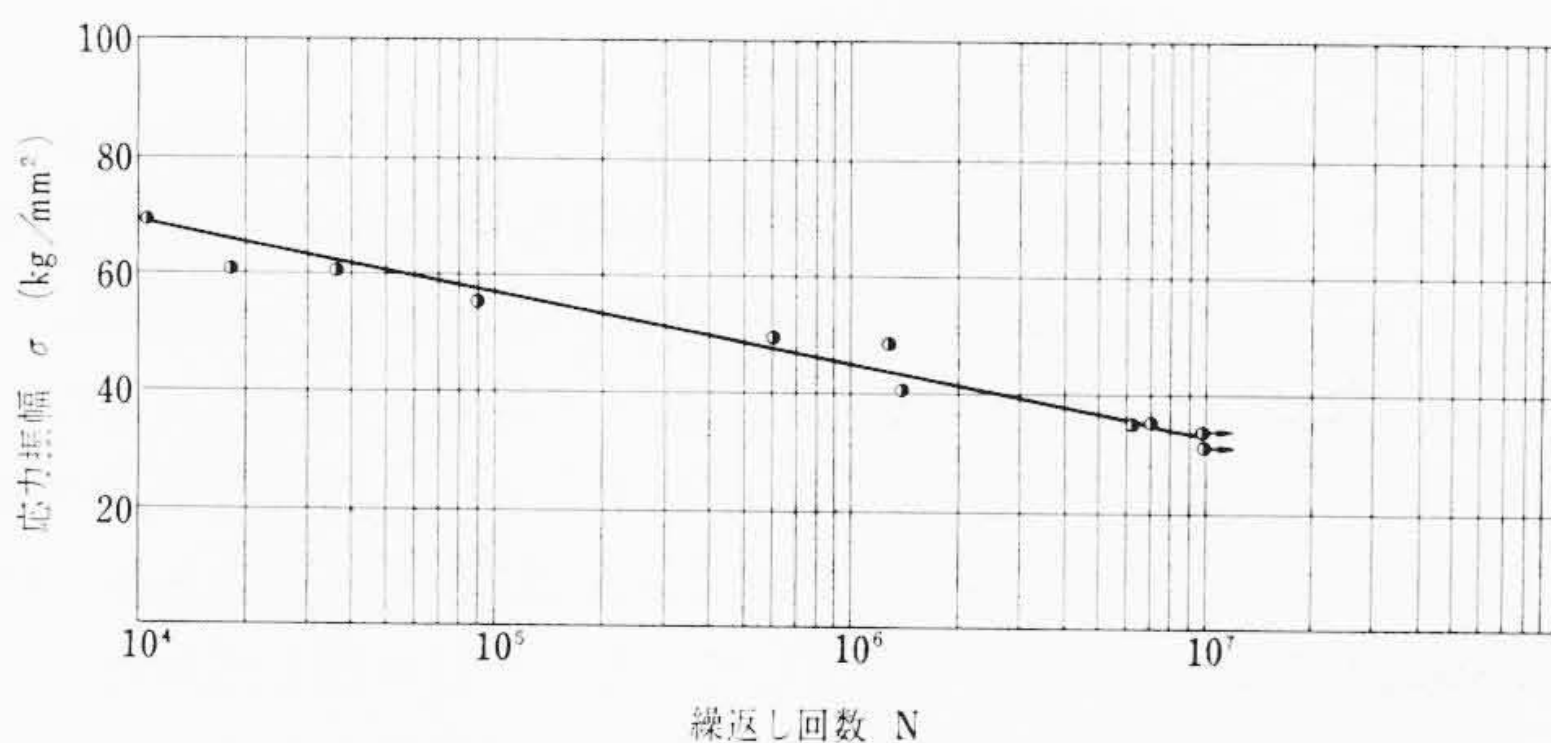


図 17 めっき後ベーキング処理(バフ研磨)の S-N 曲線

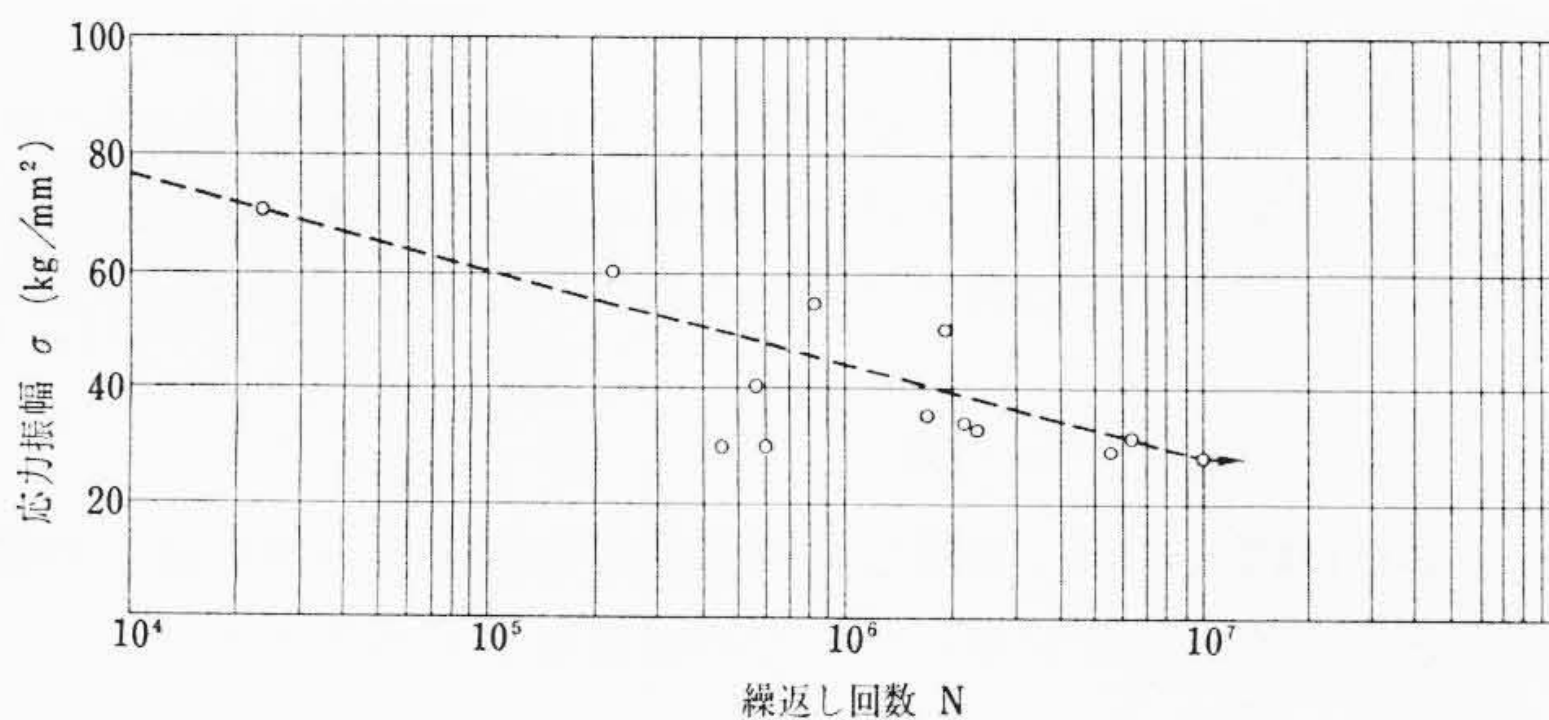


図 14 バフ研磨仕上げの S-N 曲線

図 9 に硬質クロムめっきを行なった際のめっきの方法を示した。陽極には直径 70 mm の鉛製パイプを用い、陰極には鉛製パイプの中心にめっきされる試験片を垂直に立ててめっきを行なった。この際めっきを有効にするために試験片平行部以外の 12 mmφ のつかみの部分にはビニールテープを巻き電流を遮断した。

なお、めっき液の組成は

無水クロム酸	250 g/l
硫酸	2.5 g/l

であり、液温を 42~45℃ に保ち、電流密度 30 A/dm² の条件で 1 本につき約 60 分間めっきし、厚さ 0.05 mm の硬質クロム層を作

った。

めっき作業中、鋼の表面に吸着される水素によるぜい化作用のための疲れ強さの低下、まためっき層内に生ずる引張残留応力による疲れ強さの低下⁽¹⁾を取り除くため、めっき後 180℃ で 2 時間のベーキング処理も行なった。図 10 はめっき処理後、バフ研磨仕上げを行なった表面のあらさである。

3. 試験結果

表面状態を変えた疲れ試験片は小野式回転曲げ疲れ試験機(回転速度 3,290 rpm)によって実験された。

図 11~17 は疲れ試験結果を S (応力振幅) - N (繰返し回数) 曲線に示したものである。また、表 2 には各表面仕上げによる表面あらさと疲れ限度を一括して示してある。

60 kg/mm², 40 kg/mm² の荷重における表面あらさと繰返し寿命との関係を示したのが図 18 である。

これらの結果から表面あらさを変えた 1200 番エメリーペーパー仕上げ, 1000 番エメリーペーパー仕上げ, センターレスグラインダ仕上げ, 電解研磨仕上げではあらさが大きくなるにしたがって徐々に疲れ強さが低下した。またバフ研磨仕上げでは S-N 曲線における各点にバラツキが多く、これらの点から S-N 曲線を求めるとあらさの小さい割にはやや低い S-N 曲線となった。

表2 表面仕上方法と疲れ限度

仕 上 方 法	あらさ H_{max} (μ)	疲 れ 限 度 (kg/mm^2)
200 番 砥 石	1	28
1000 番 ベーパ	0.3	31
1200 番 ベーパ	0.2	32
パ フ	0.3	27
電 解 研 摩	2	25
めっき (ベーキング処理済 $180^{\circ}C$) (円周方向へパフ研摩)	0.3	33
めっき (ベーキング処理なし) (円周方向へパフ研摩)	0.3	29

表面にクロムめっきを施した場合には図18のあらさと繰返し荷重寿命の関係に示してあるように 60 kg/mm^2 の荷重には繰返し寿命が 1.6×10^4 であり、また 40 kg/mm^2 の荷重には 9.5×10^4 であり、表面あらさのみ変えた場合に比べて著しい疲れ強さの低下が認められた。しかし、疲れ限度においては 29 kg/mm^2 の値を示し、ほかの場合とあまり差は認められなかった。

一方、ベーキング処理 ($180^{\circ}C \times 2$ 時間) を施した場合は、図18に示すようにベーキング処理のないクロムめっきのままの場合と比べると、 60 kg/mm^2 の荷重では繰返し寿命が 1.6×10^4 から 5.5×10^4 と約3.5倍延びており、また 40 kg/mm^2 の荷重でも 9.5 kg/mm^2 から 3×10^6 と約30倍も延びている。このようにベーキング処理の施してあるものはクロムめっきによる疲れ強さの低下は認められず、むしろクロムめっきを施してない同程度のあらさをもつ試験片より疲れ限度付近ではまさっている値を示した。

4. 考 察

4.1 表面あらさと疲れ強さについて

以上の試験結果から一般に表面あらさを小さくすると疲れ強さが向上することが確認された。図19はC0.61%炭素鋼(引張強さ 63.7 kg/mm^2)、C0.41%炭素鋼(引張強さ 57.5 kg/mm^2)⁽²⁾と実験に用いたAISI・D2の表面あらさと疲れ限度との関係を比較したものである。この図によるとAISI・D2は表面あらさによる疲れ限度の低下が炭素鋼に比べて急である。特に 1.5μ 以上の表面あらさではAISI・D2は疲れ限度が著しく低下している。それに反してかたさの低い炭素鋼では表面あらさが 2μ くらいまでは表面あらさによる疲れ限度の低下はあまり認められず、また 2μ 以上のあらさを与えてもAISI・D2ほど急激な疲れ限度の低下は起こらない。これによって高硬度材は低硬度材に比べて疲れ強さに及ぼす表面あらさの影響は顕著であることがわかる。

4.2 S-N曲線における各点のバラツキについて

図11～17の疲れ試験の結果を見ると大体に各点のバラツキは少ないがパフ研摩仕上げ、電解研摩仕上げには、いくつかのバラツキが認められる。表面あらさの小さいパフ研摩仕上げのほうが、表面あらさが大きく不ぞろいが多いと考えられるセンタレスグラインダ仕上げよりもバラツキが大きい。このことはパフ研摩の際のわずかな傷、試験機に取り付ける際の傷などが原因として考えられる。もし試験片平行部に一部分でも傷があれば、その部分に応力集中を起し、そのために疲れ強さが低下する。したがって仕上げが良好でも傷が一個所でもあると疲れ強さの低下が起こり、疲れ寿命のバラツキが大となる。このことは横堀氏らの実験⁽⁸⁾で統計的判断から「一定応力振幅に対し疲れ寿命のバラツキは表面仕上げ程度の良いものほど大きい」といわれていることと一致する。

4.3 めっきの影響について

従来このめっきの影響についてはいろいろな原因が指摘されており、そのおもなものは

- (1) めっき作業中に鋼表面に吸着される水素による鋼のぜい化
 - (2) めっき層内に生ずる引張残留応力
- などである。しかしこれらが疲れ強さの低下の因子としてどのよう

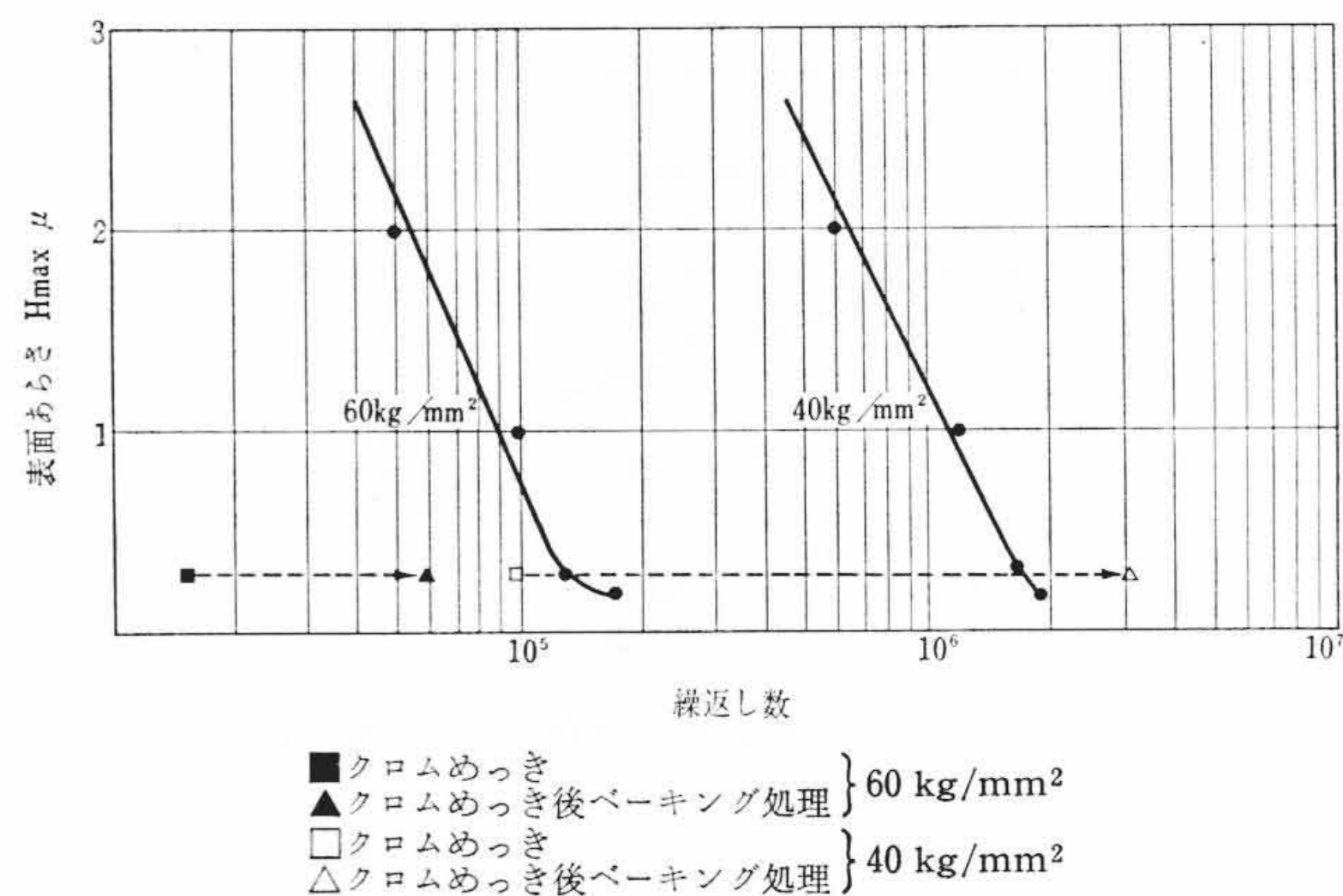


図18 表面仕上げと繰返し荷重寿命

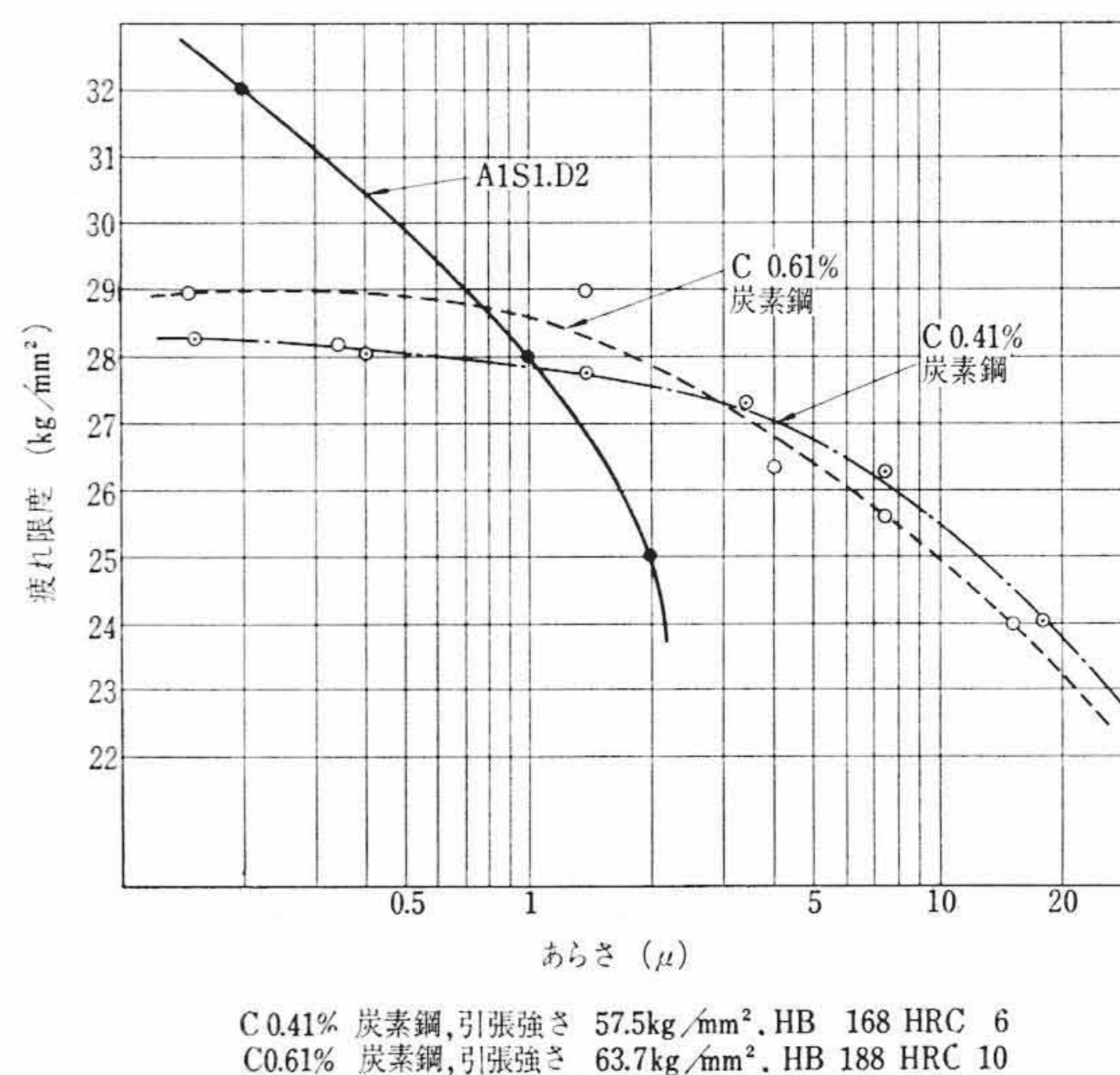


図19 あらさと疲れ限度との関係

に影響するか確定的な結論は得られていない。

ベーキング処理後のS-N曲線は疲れ限度がほかのS-N曲線の疲れ限度よりもやや上り (33 kg/mm^2) であり、 50 kg/mm^2 の辺で反転してそれより高い荷重ではほかのS-N曲線よりも低い値を示しているが、ベーキング処理の効果は明らかに認められる。このことからベーキング処理がたいせつなことがわかる。しかし、ベーキング処理の効果の水素によるぜい化を弱めるのか、または引張残留応力を弱めるのかは本段階では詳細に理解することはできない。

5. 結 言

以上AISI・D2の焼入、焼戻し材で平行部の表面あらさを変えた場合の回転曲げ疲れ強さを求めた。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 表面あらさを大きくするとAISI・D2の疲れ強さは炭素鋼などの比較的軟かい材料の場合とは違ってその低下率が著しい。
- (2) 試験片表面にクロムめっきを施すと水素による母材のぜい化、めっき層内に生ずる引張残留応力のために著しく疲れ強さが低下する。しかしベーキング処理を施すと疲れ強さは上り、疲れ限度はめっきをしない場合よりも高くなる。

参 考 文 献

- (1) 日本機械学会編：金属材料疲れ強さの設計資料 (昭40.9) p.29 [日本機械学会]
- (2) 河本：金属の疲労 (昭37.5) p.82 [朝倉書店]
- (3) 横堀：金属の疲労強度と安全設計 p.41 [日本材料学会]