

機械部品の疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果

The Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Machine Parts

大 内 田 久*
Hisashi Ouchida

内 容 梗 概

機械部品の表面処理法の一つであるショットピーニングの疲労強度に及ぼす影響を主として 13Cr 鋼, 中炭素鋼につき, 種々の切欠形状, 熔接, かしめのある部材および高温や腐蝕を伴う場合について求めた。試験の結果によれば次のことがわかり, この方法の適用に際しての参考資料が得られた。

(1) 一般に平滑な部材に対しては約 10%, (2) 切欠材に対しては 15~40%, (3) 13Cr 鋼では 400°C においても約 30%, (4) 水腐蝕を受ける場合でもき裂が発達しにくく 15%, (5) 欠陥材に対して 30~40% 疲労限度の増大が得られ, また圧縮加工などのほかの表面処理法を併用すれば効果がいつそう大なることもわかった。

1. 緒 言

最近機械部品や金属の表面処理法の一つとしてショットピーニングが各方面で用いられるようになり, これについての解説的な文献^{(1)~(3)}もみられ, この方法による材料の疲労強度の増大についての研究も多く発表されるようになった^{(4)~(9)}。しかしピーニングの疲労強度に及ぼす効果についての資料は, 現場や設計で用いようとする場合必ずしも十分でないので, 筆者は主としてタービン翼材である 13Cr 鋼につき種々の切欠形状, 熔接またはかしめ加工された場合, 高温の場合につき疲労強度を求め, さらに中炭素鋼につき段付部や水腐蝕を受ける場合につき, また欠陥材として中炭素鋼や NiCr 鋼を選びこれらに対するピーニングの効果について調べ, 各種機械部品の使用条件に対する適当なピーニングの用い方についての資料を提供した。

第 1 表 材料の化学的成分および機械的性質

材料 No.	化 学 的 成 分 (%)					機械的性質(kg/mm ² , %)				硬 度 Hv
	C	Si	Mn	Ni	Cr	σ_s	σ_B	ϵ	φ	
I	0.17	0.27	0.22	0.21	12.88	49.4	63.8	31.8	66.2	—
II	0.21	0.34	0.33	0.96	12.45	57.5	69.9	24.0	—	238
III	0.18	0.27	0.39	0.21	13.01	56.9	72.5	27.3	—	225
IV	0.16	0.22	0.28	0.57	12.83	47.7	66.0	24.3	—	210
V	0.16	0.14	0.38	0.22	13.59	44.6	67.9	28.6	—	205
VI	0.09	0.18	0.20	0.11	14.51	43.6	68.0	28.0	64.4	215~220
VII	0.15	0.26	0.53	0.70	12.47	50.6	69.2	29.6	67.1	220~225

σ_s : 降伏点, σ_B : 引張強さ, ϵ : 伸び率, φ : 絞り率

2. タービン翼材に対する効果

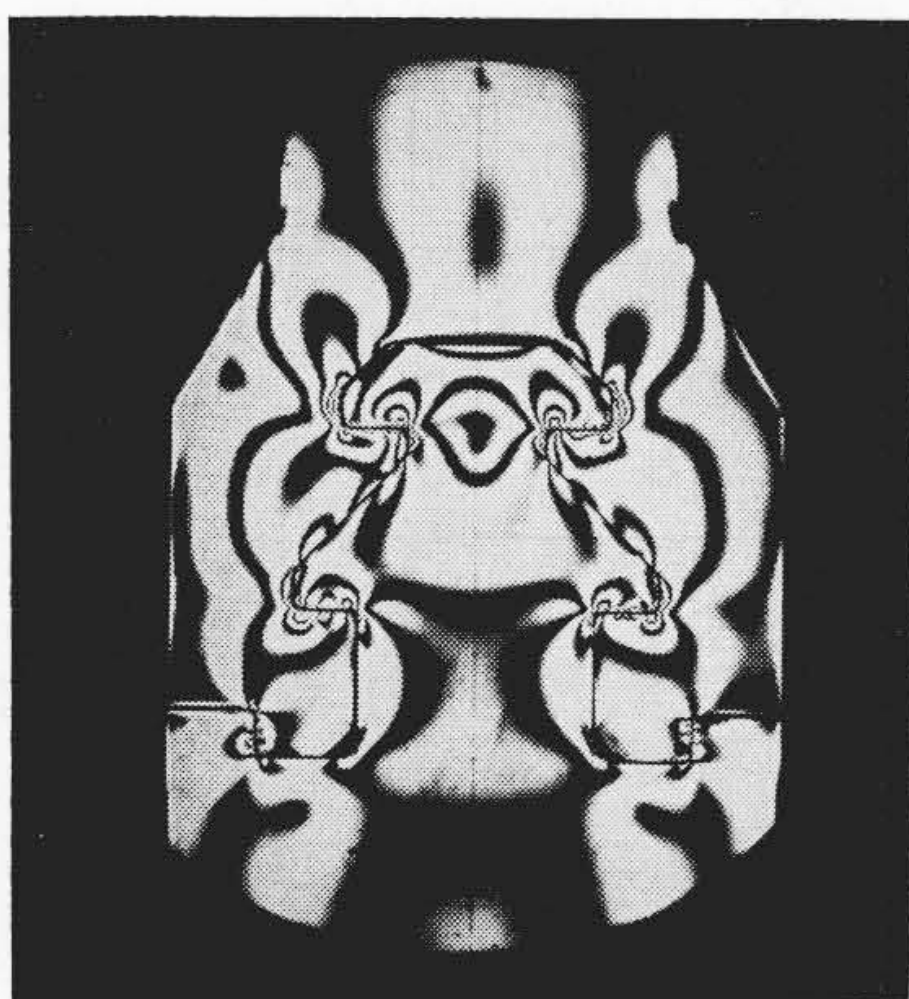
2.1 供 試 材 料

一般に蒸気タービンの翼材として用いられている 13Cr 鋼 (SEC 3) を用い, 試験片に加工する前に 850°C, 1 時間焼鈍後炉冷, 950°C, 30 分保持後焼入油冷, 700~720°C 45 分焼戻油冷した。試験に用いた材料の諸性質を第 1 表に示す。

2.2 平滑および環状溝試験片

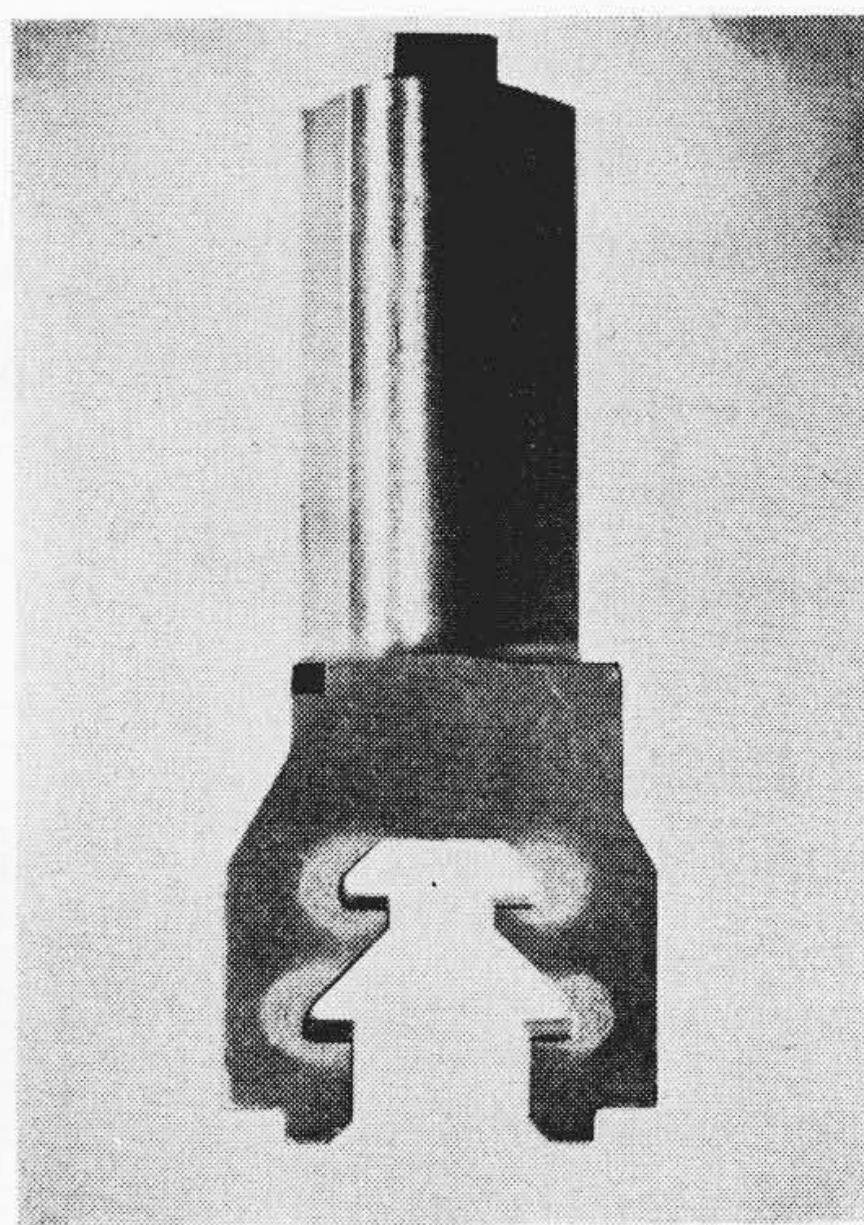
2.2.1 試験片および試験機

タービン翼が車盤に植込まれるダブテール溝部は, 第 1 図 (a) に示すように遠心力や曲げを受けて応力が集中し強度的に問題となる部分である。この部分の強度増大のために第 1 図 (b) に示すように段付部をショットピーニング (以下ピーニングと称す) する際



(a)

植込部の応力集中 (光弾性縞模様)

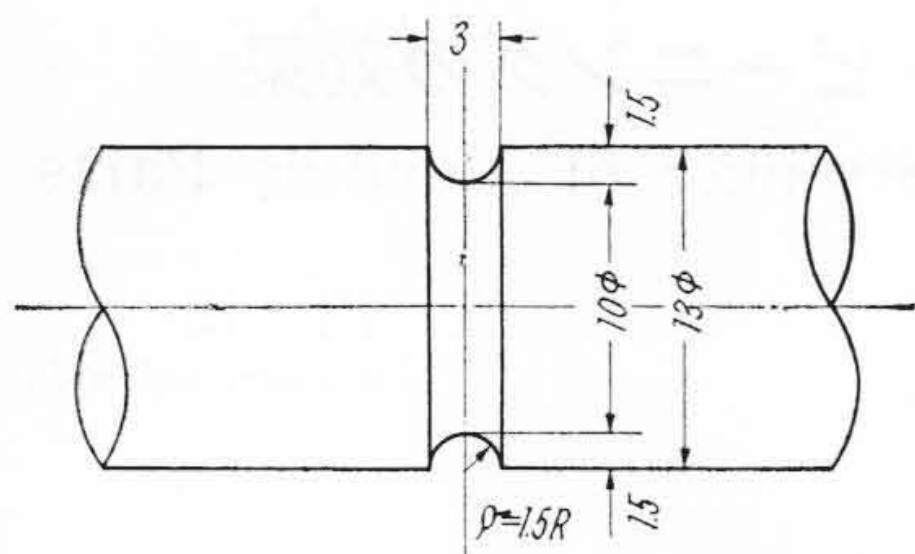


(b)

ショットピーニングされたタービン翼

第 1 図 タービン翼植込部

* 日立製作所日立研究所



第2図 環状溝切欠試験片

の資料を得るために以下の実験を試みた。第1表のIの材料を用い直径10mmの平滑試験片を、またVIIの材料より同寸法の平滑および第2図に示すような形状係数 $\alpha=1.54$ の切欠試験片を作製した。これらを用い機械仕上げ後エメリ-04紙仕上げのものとピーニングしたものを用意し、小野式回転曲げ疲労試験機(1,450 rpm)により試験した。

2.2.2 ピーニングの条件

ピーニングの条件と材料の疲労強度との関係についての研究結果にもとづき、以下の実験ではアークハイト(SUP 6)を0.3mm程度、カバーレッジ>50%を目標としてピーニングすることとした。

2.2.3 硬 度

試験片の横断面について表面付近の硬度分布をVIIの材料につき求めると、平滑試験片ではピーニングによる表面の硬度はわずかに増大するのみであるが、切欠試験片では表面では中央部より20Hv硬くなり、機械仕上げのものに比し15Hv程度硬くなっていることがわかった。すなわち応力集中のある部分の方がピーニングによる表面の硬度増大は大きいといえる。

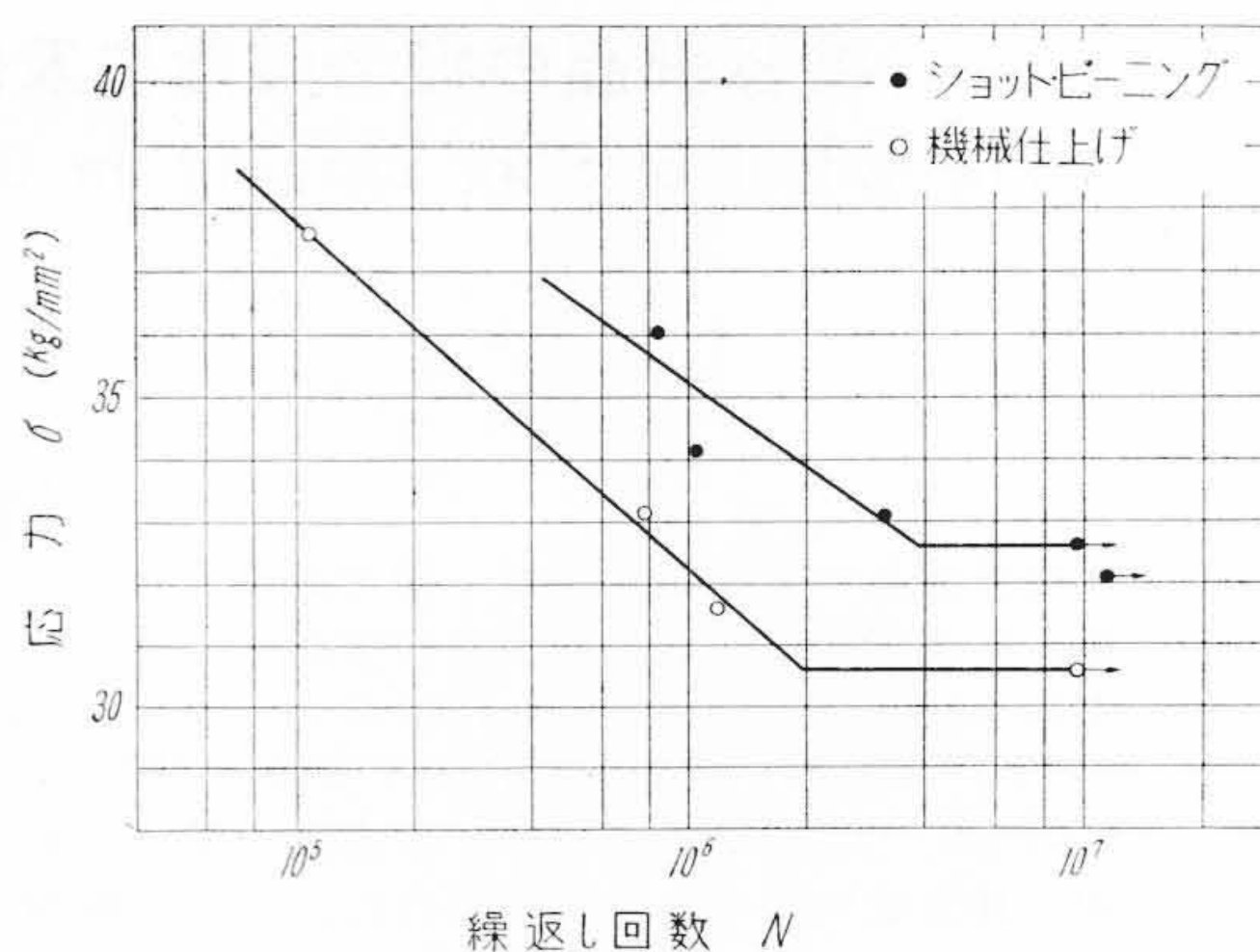
2.2.4 疲労試験の結果

疲労試験の結果はI材の平滑試験片については第3図、VII材については第4図のようにS-N曲線が求められた。これらより疲労限度はI材で機械仕上げのもの30.6 kg/mm²、ピーニングしたもの32.6 kg/mm²となり8.5%の増大、VII材については平滑の場合機械仕上げのもの36.5 kg/mm²、ピーニングしたもの39.5 kg/mm²で約8.2%、切欠の場合機械仕上げのもの22.5 kg/mm²(切欠係数1.62)、ピーニングしたもの25.6 kg/mm²と求まり約13.8%の疲労限度の増大が得られた。この結果より応力集中のある切欠部における効果は平滑部より大きいことがわかる。

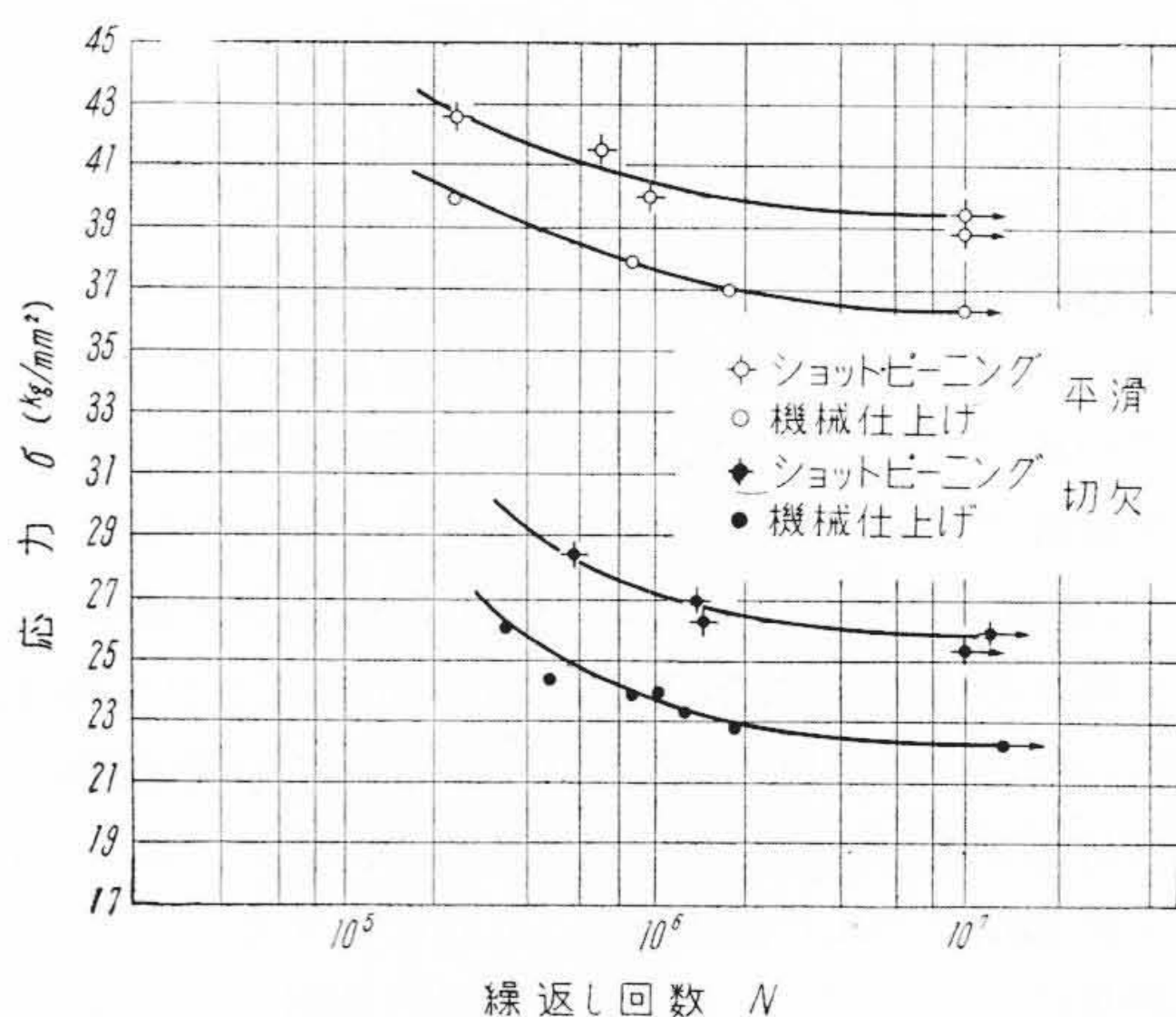
2.2.5 残留応力

疲労限度に達したVII材のピーニングした試験片につき、Sachs法により表面の残留応力を測定した結果表面層0.1mm厚さの平均値として軸方向 $\sigma_e = -34$ kg/mm²、円周方向 $\sigma_t = -41$ kg/mm²を得た。

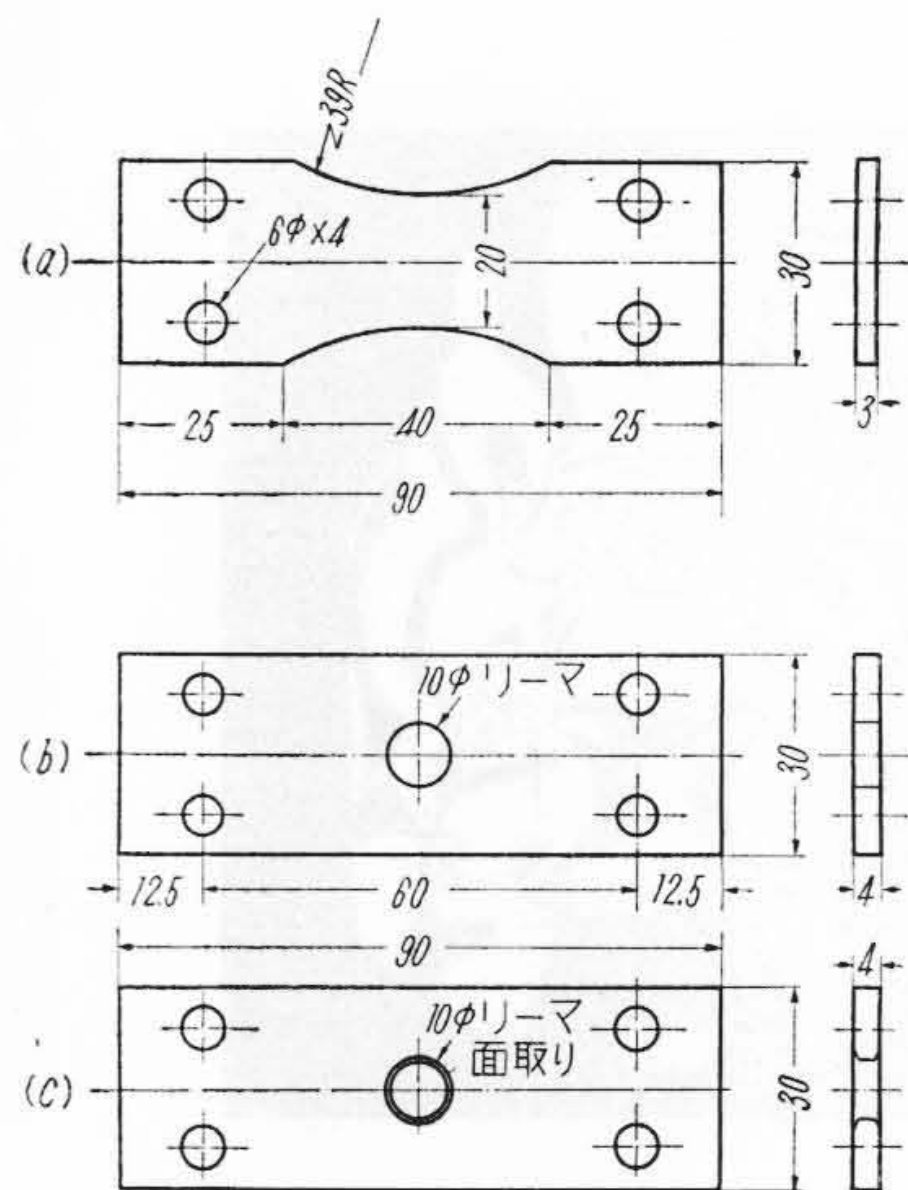
以上の結果からピーニングによつて表面の薄い層に



第3図 ショットピーニングの疲労強度に及ぼす効果(その1) I材



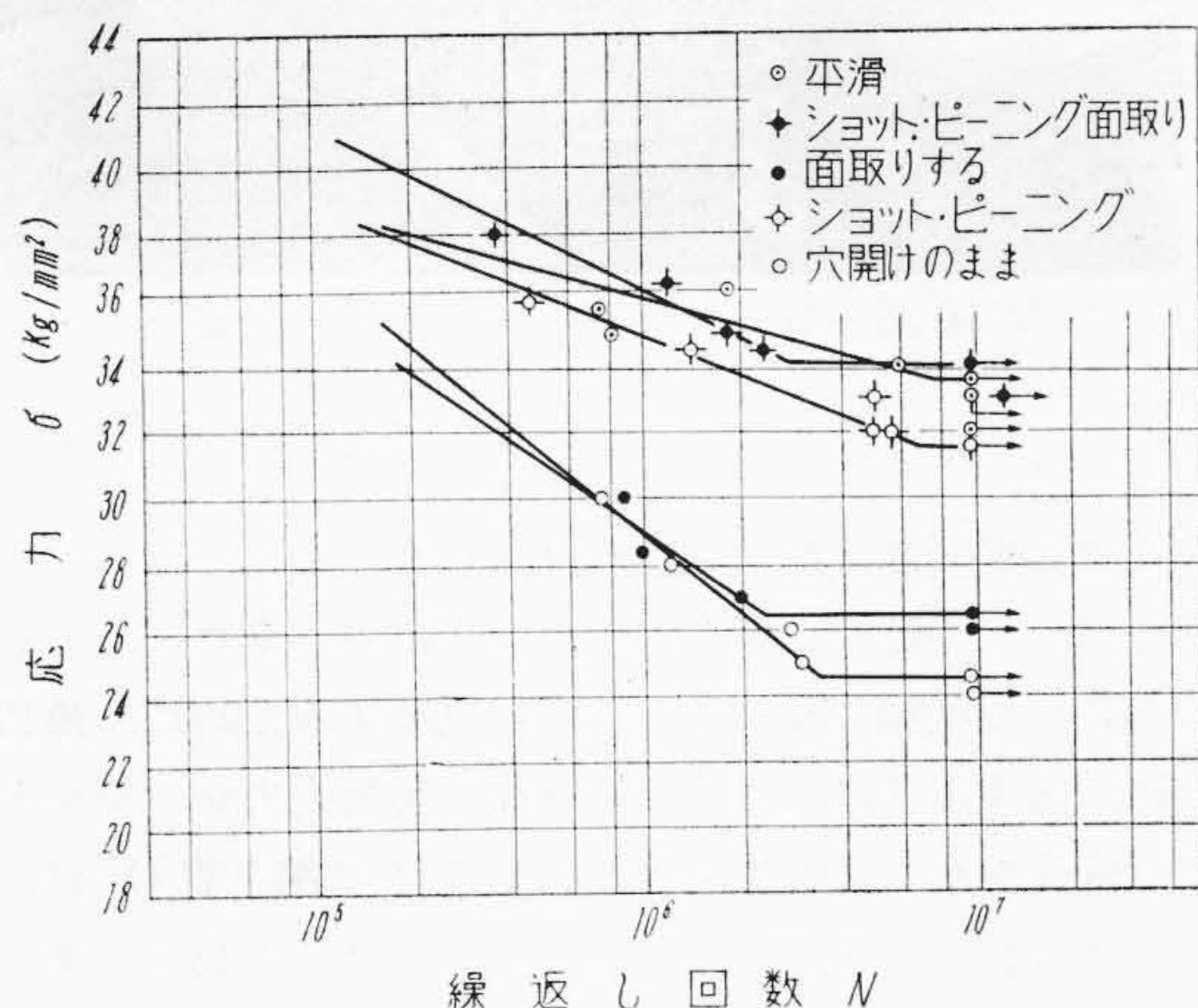
第4図 ショットピーニングの疲労強度に及ぼす効果(その2) 常温, VII材



第5図 穴のある試験片

第2表 穴のある板の疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果

試験片	疲労限度 σ_w (kg/mm ²)	増大率 (穴あけに対し)	切欠係数 β
平滑	33.5	—	1.00
穴あけ	24.5	1.00	1.37
面取り	26.5	1.08	1.26
ショットピーニング	31.5	1.29	1.06
面取り・ショットピーニング	34.0	1.39	0.99



第6図 穴のある試験片に対するピーニングの効果, II材

硬化と圧縮残留応力を生ずることがわかり、表面に切欠によつて応力が集中する場合に、応力勾配が大きく切欠の部分の疲労強度が切欠表面付近の応力分布によつてきまるため、平滑な試験片で応力勾配の小さい場合よりもピーニングの効果が大きくきくことがわかる。

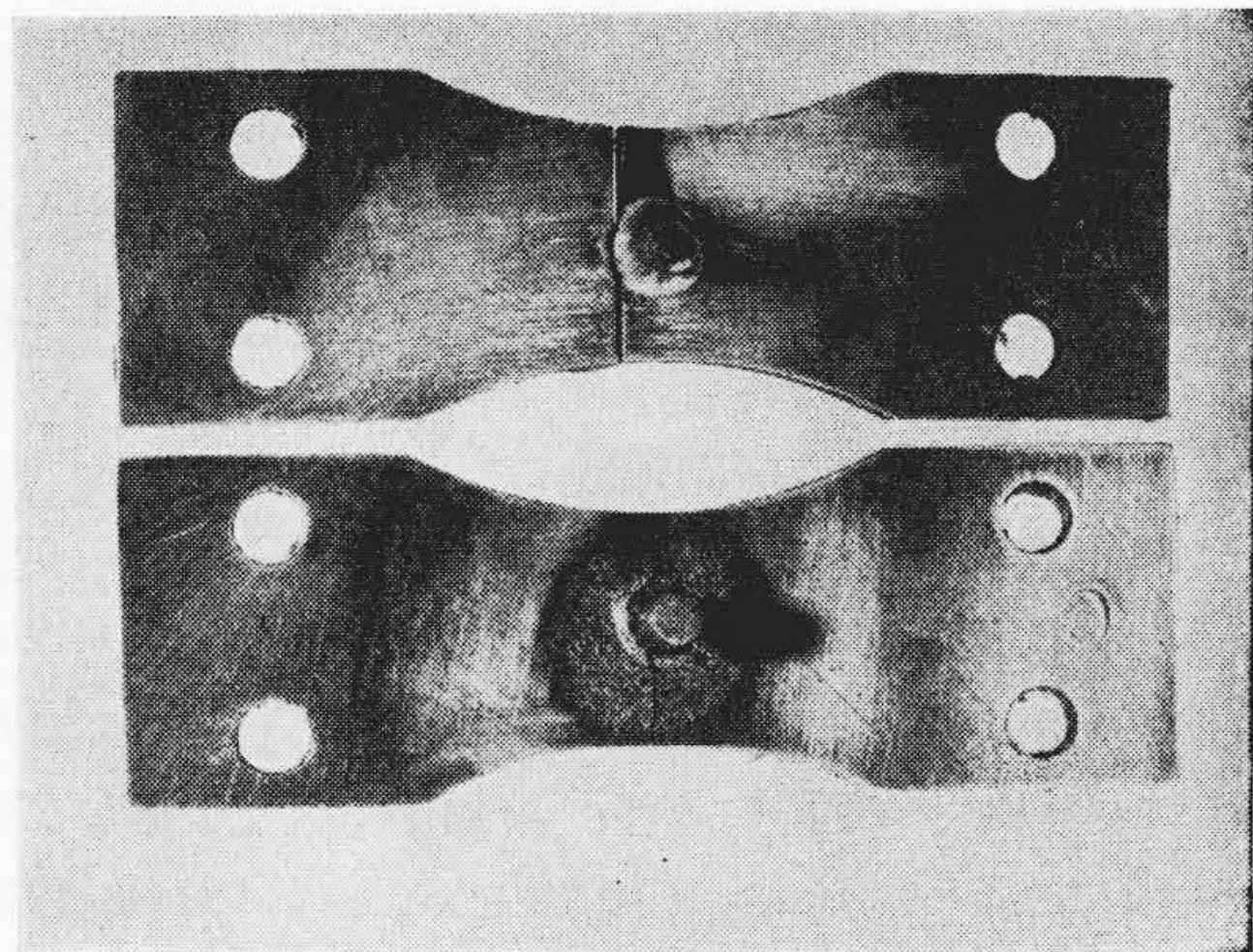
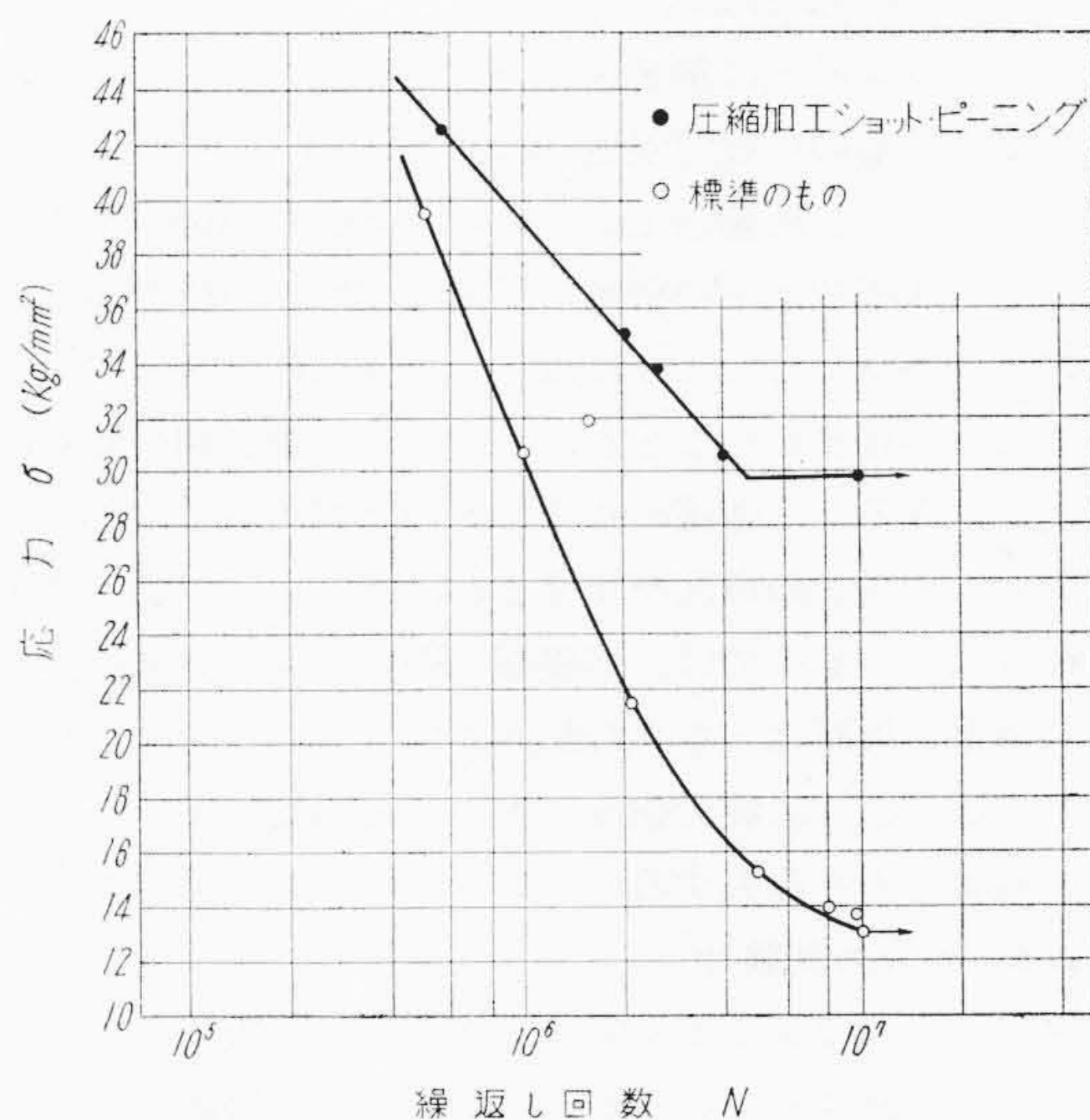
2.3 穴のある板状試験片

2.3.1 試験片および試験機

タービン翼を連結するシュラウド板の場合を考えまた前項の結果から丸棒の場合より薄板の場合の方が応力勾配が大きくピーニングの効果が顕著に現われることから板状試験片を第1表のII材より作製した。その形状は第5図に示すようなもので、平滑のほか中央に穴のあるものおよび穴の縁を面取りしたものを用意した。これは面取りを行つている機械部品にピーニングを適用し、縁を丸める作用と疲労強度の増大の効果を得て、面取り作業を省略できるかを検討したものである。穴の縁の面取りはドリルで45度の傾斜で表面より1mmの深さに取つた。試験はシェンク式疲労試験機(3,000 rpm)により平面曲げ両振で行われた。

2.3.2 疲労試験結果

疲労試験の結果は第2表および第6図のS-N曲

(上) 溶接のまま, (下) ショットピーニング, 圧縮加工
第7図 バインド線溶接試験片の破断状況

第8図 バインド線溶接試験片に対するショットピーニングの効果

線のように求まり次のことがわかつた。すなわちショットピーニングの効果は、穴の縁を面取りするしないにかかわらず、ピーニングしない平滑材の疲労限度に近い値まで強くなり、面取りしないもので29%, したもので28.5%疲労限度を増大した。また面取りによる応力集中緩和のための疲労限度の増大は、ピーニングの有無を問わず約8%程度であり、ピーニングの效果に比べるとはるかに小さい。したがつて面取作業を省いてもピーニングによつて十分の強度が得られる場合が多いと思われる。穴あけのままのものにピーニングする場合この実験では遠心式の機械を使用したため縁が出張つて、応力集中を大きくしたきらいがある。噴口式によつてピーニングの方向を自由に変えつつ縁を丸めるようにすればさらに疲労強度は増大したものと

推定できる。

2.4 バインド線溶接試験片

タービン翼が低圧側でバインド線により銀鋸溶接され連結される場合の溶接部に対するピーニングの効果調べた。

2.4.1 試験片および試験機

第1表のVの材料から板厚4mmの第7図に示すような板状試験片を作製した。中央に5φの穴をあけバインド線を通して銀鋸溶接したものおよび穴の開口部を3,000 kgの荷重で3/8"φの鋼球により圧縮加工後溶接し、さらにバインド線を中心とし径12mmの範囲にわたり圧縮し、その後17mmφの範囲をピーニングしたもの2種を用意した。シェンク式により平面曲げの疲労試験を行った。

2.4.2 疲労試験結果

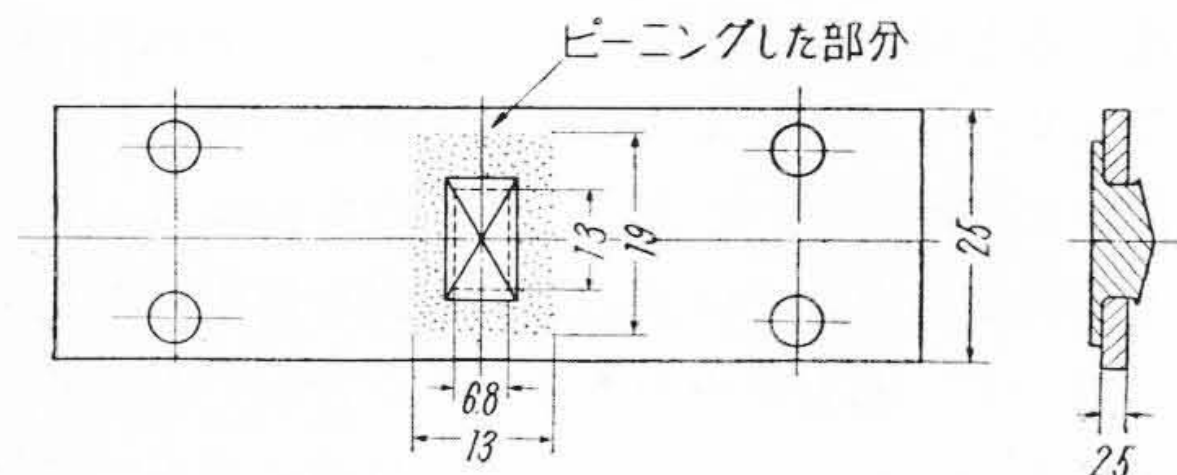
疲労試験結果は第8図のS-N曲線のように、溶接のままのものの疲労限度13.0 kg/mm²に対し、ピーニングおよび圧縮加工したものは29.7 kg/mm²と求めた。圧縮加工との併用の効果は130%の疲労限度の増大であり、このようにほかの表面処理と合せて用いることが好ましいことを示している。第7図の破断状況からみると、溶接のままのものは溶接線の端より破断し穴を含み破面を呈するが、ピーニングおよび圧縮加工したものでは、溶接線の引張残留応力が除去され硬化し破断は穴を含む断面で生じていることがわかる。このように疲労強度に害のある溶接のための表面の残留応力を除去するのにピーニングが効果がある。

2.5 かしめ試験片

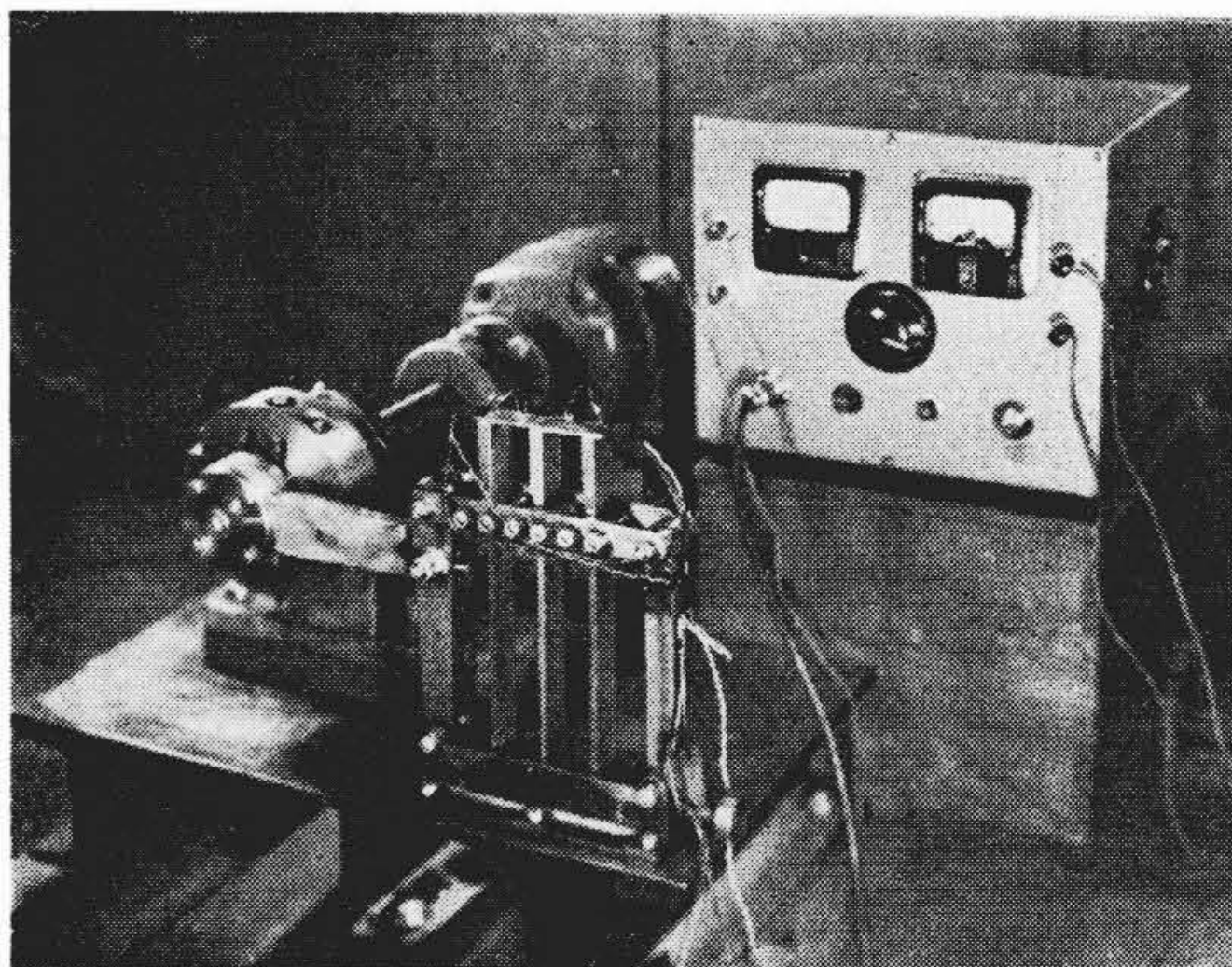
タービン翼はシュラウドリングによつて数枚ずつ翼頭でかしめ連結されているが、蒸気力による振動や曲げおよび遠心力を受けて、シュラウドがそのかしめ穴部より疲労破損を起し、かしめ加工程度が強度上問題となることがある。かかる平角穴のあるシュラウドのかしめ部分に対するピーニングの効果について調べた。

2.5.1 試験片および試験機

(1) 最初に第1表IIIの材料を用い第9図のような板状試験片に翼頭を通す平角穴をあけ、この部に翼頭に相当する部材を槌でかしめ取り付けた試験片を用い穴の周囲を図の範囲表裏よりピーニングした。シェ



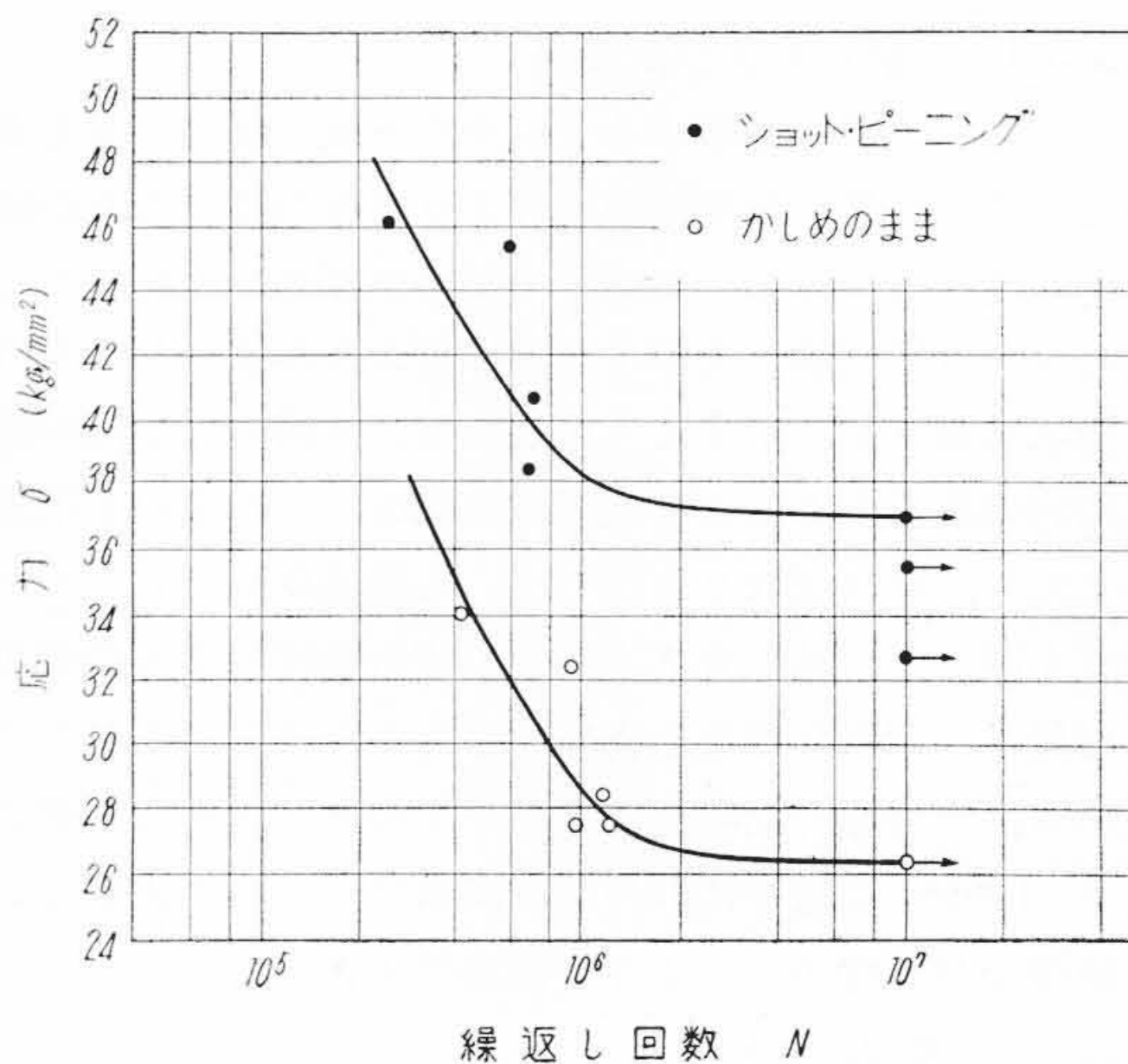
第9図 かしめ試験片



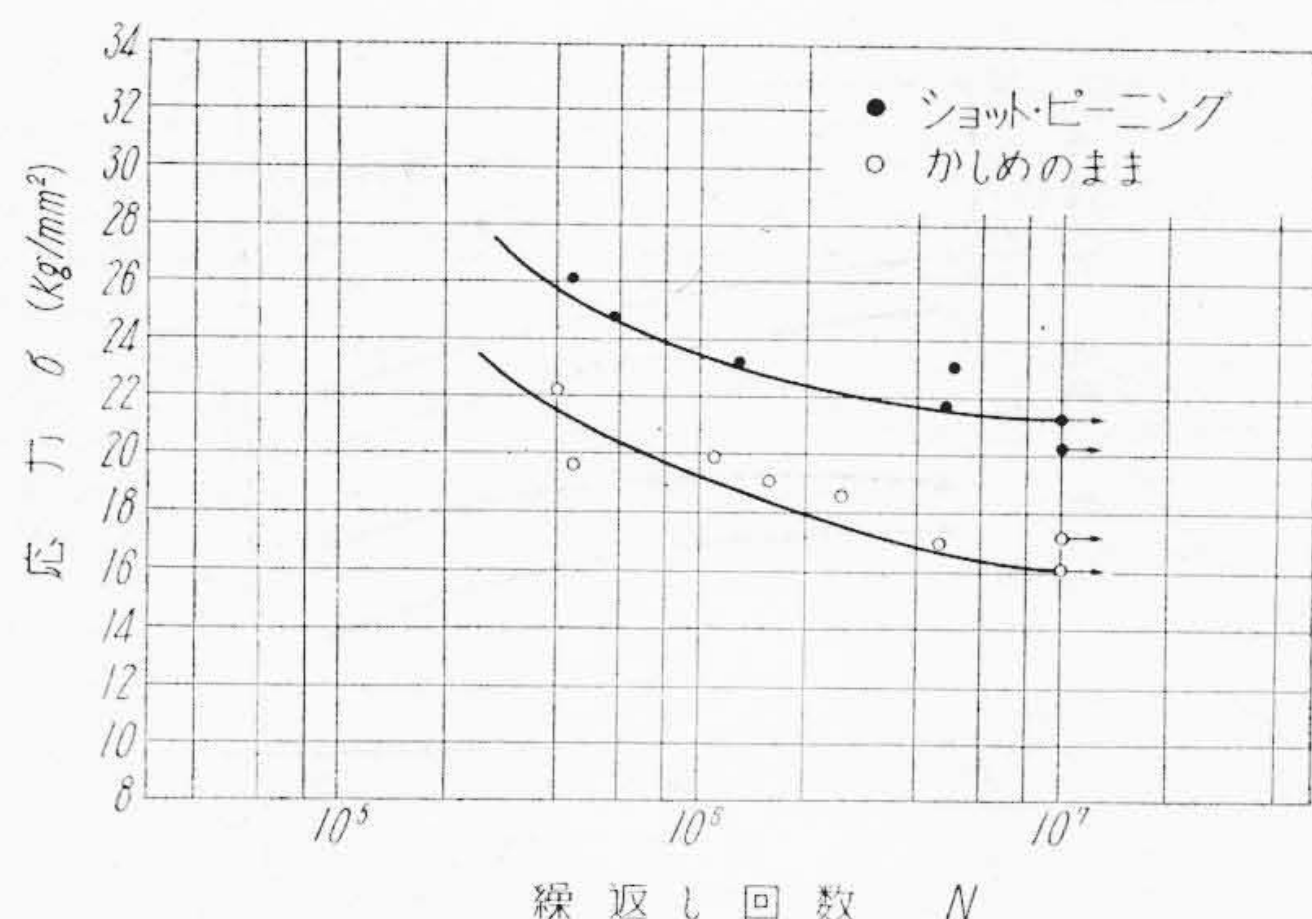
第10図 3枚翼曲げ試験装置

ンク式平面曲げ疲労試験機を用いた。

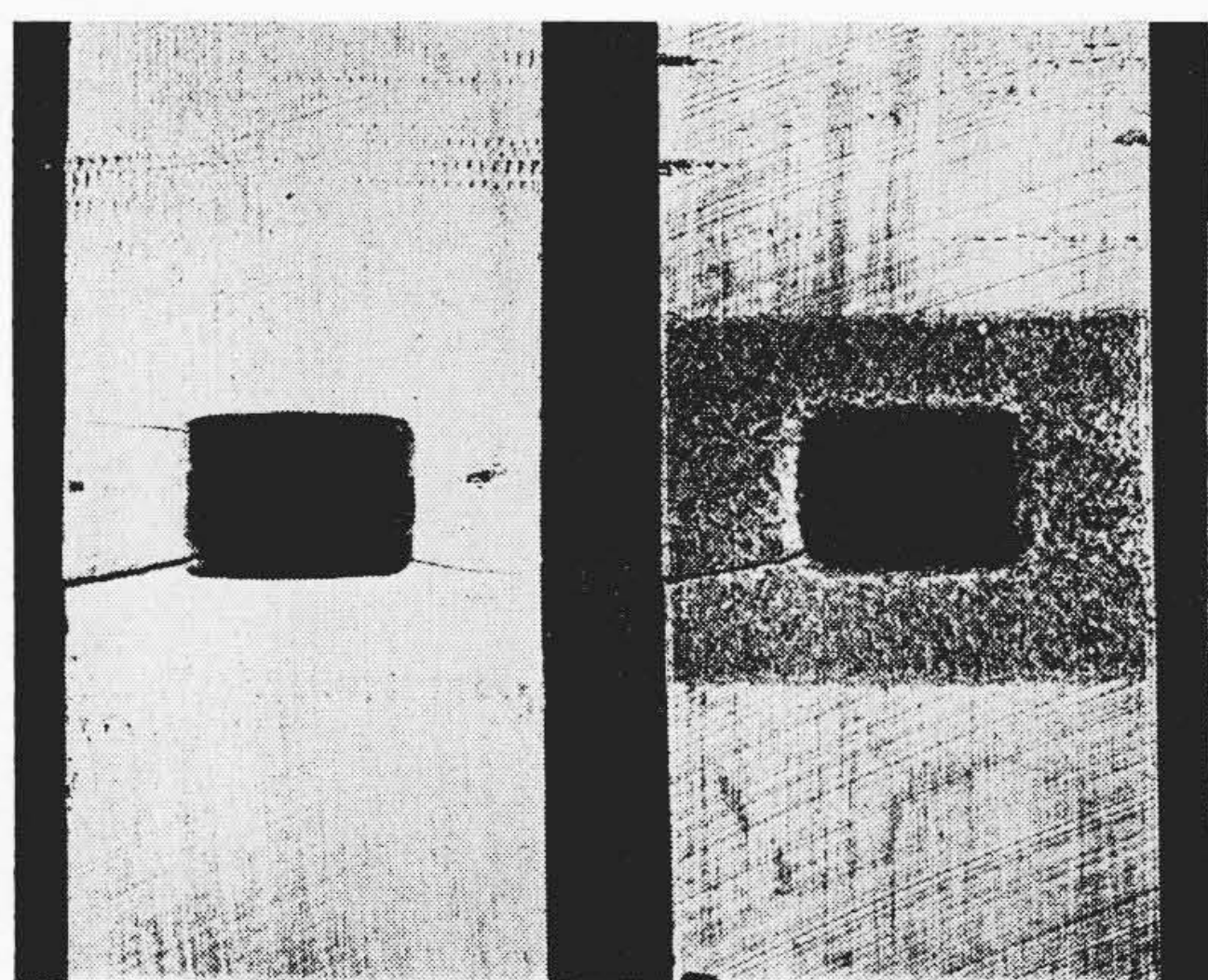
(2) 実際のようにタービン翼にシュラウドがかしめられた状態で繰り返し曲げの試験するために、第10図に示すように、3枚の模型翼に実物大のシュラウド試験片をかしめ取り付けた。試験片は第1表IV材より作られた。翼は図のようにベークライト製ローラーを介してクランク機構により振動し繰り返し回数は1,450 rpmとした。シュラウドに疲労によりき裂が発生すれば自動的に駆動電動機が停止する装置を用いた。試験片は幅20.6×長110×厚2.15で、両端のかしめ部の板厚を厚くし中央のかしめ穴より破断するようにした。応力はかしめ穴の両側の表面に抵抗線ひずみ計を貼付けて測定し、一方シュラウドの傾角を測定して計算により求めた値と両方より検討しシュラウドの穴のある断面の平均応力で表わした。



第11図 かしめ試験片の平面曲げ疲労試験結果



第12図 かしめ試験片の翼模型による疲労試験結果



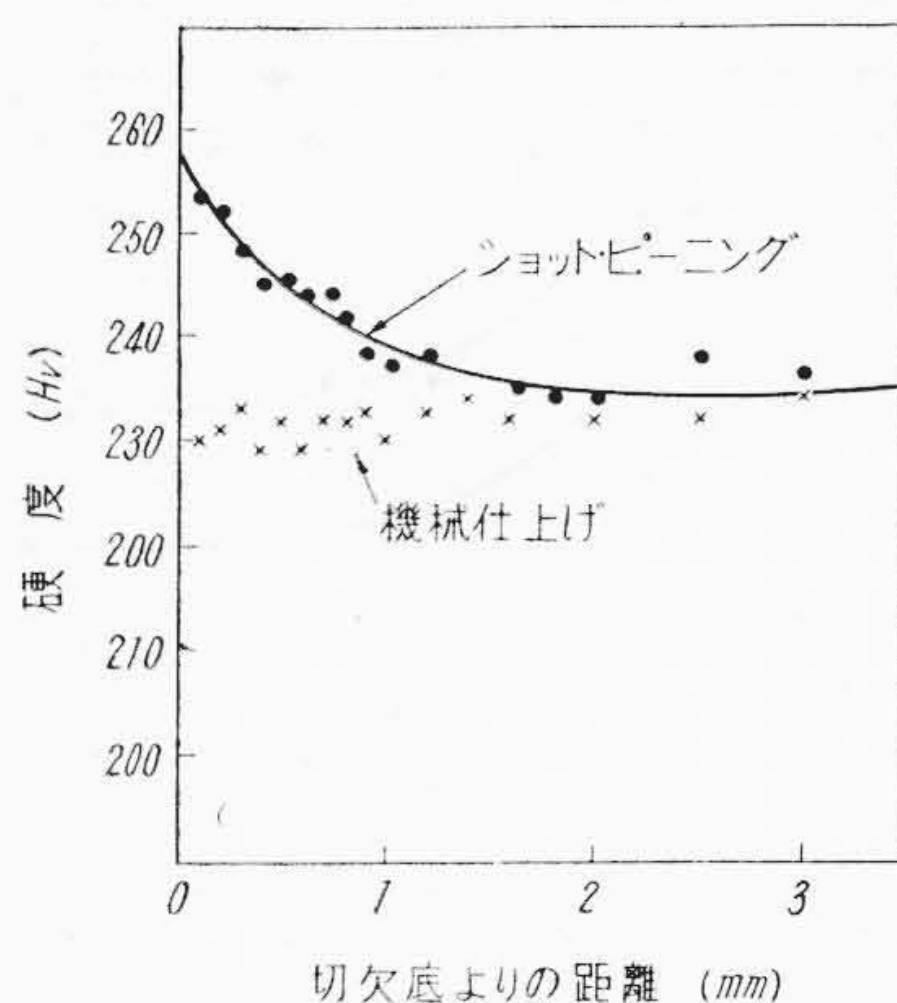
第13図 シュラウド試験片の疲労き裂

シュラウド材について表面の残留応力を腐蝕法による板の曲率の変化より算出して求めた結果圧縮残留応力 -50 kg/mm^2 を得た。

2.5.2 疲労試験結果

(1) 平面曲げ疲労試験の結果は第11図のように求まり、かしめたままのものの疲労限度 26.4 kg/mm^2 に比し、ピーニング後かしめたものは 37.1 kg/mm^2 と約40%の疲労限度の増大が得られた。

(2) 3枚翼に取り付けられたシュラウド試験片の試験結果は、第12図のS-N曲線のように求まった。かしめたままのものの疲労限度 16.0 kg/mm^2 に対し、ピーニングしたもの 21.1 kg/mm^2 と約26%の増大を示した。疲労限度の値が小さいのは、平面曲げでは翼頭部のかしめによる引張応力が曲げによつて引張側で減ずるが、3枚翼の場合このかしめによる内圧が平均応力としてきいてきたためであると考えられる。またかしめの際の翼頭と穴の隙間もこの実験の場合の方が小さい点でも内圧が大きくなり強さに影響したものであろう。いずれの場合もシュラウドの破損は下面の穴



第14図 切欠試験片の硬度分布 (400°Cで試験したもの)

の隅部より第13図のように発生し上面へと進展して生じている。これは翼が曲げを受けシュラウドが翼の下方へ曲げられる場合は翼の肩でささえられるが、上方へ曲げられる場合はかしめられた翼頭の縁部で支持されるのみであるため、シュラウド下面の引張応力が上面よりも大きくなるためである。

シュラウドの破損したものでは穴の内面がFretting Corrosionで赤く錆びているのを見る。このようにFretting Corrosionを生ずるところにもピーニングが強度増大にきくものと思われる。

2.6 温度の影響

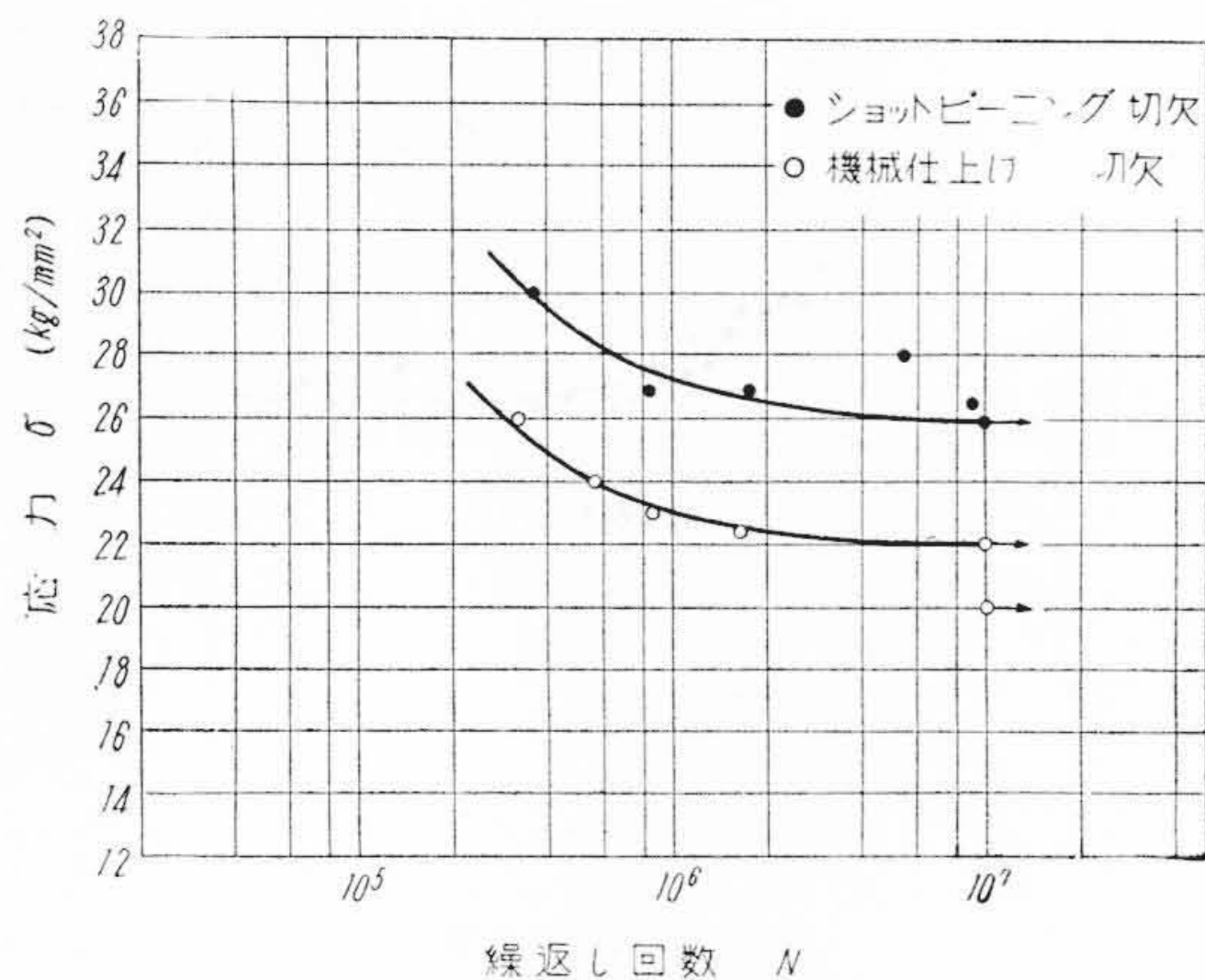
蒸気タービンでは高圧側で翼の使用温度が400°C程度になることがあるので、ピーニングによつて生じた表面の残留応力や硬皮層が消失し効果がなくなることが予想されるので⁽¹⁰⁾、常温、200°Cおよび400°Cにおいて疲労試験を行つて調べた。

2.6.1 試験片および試験機

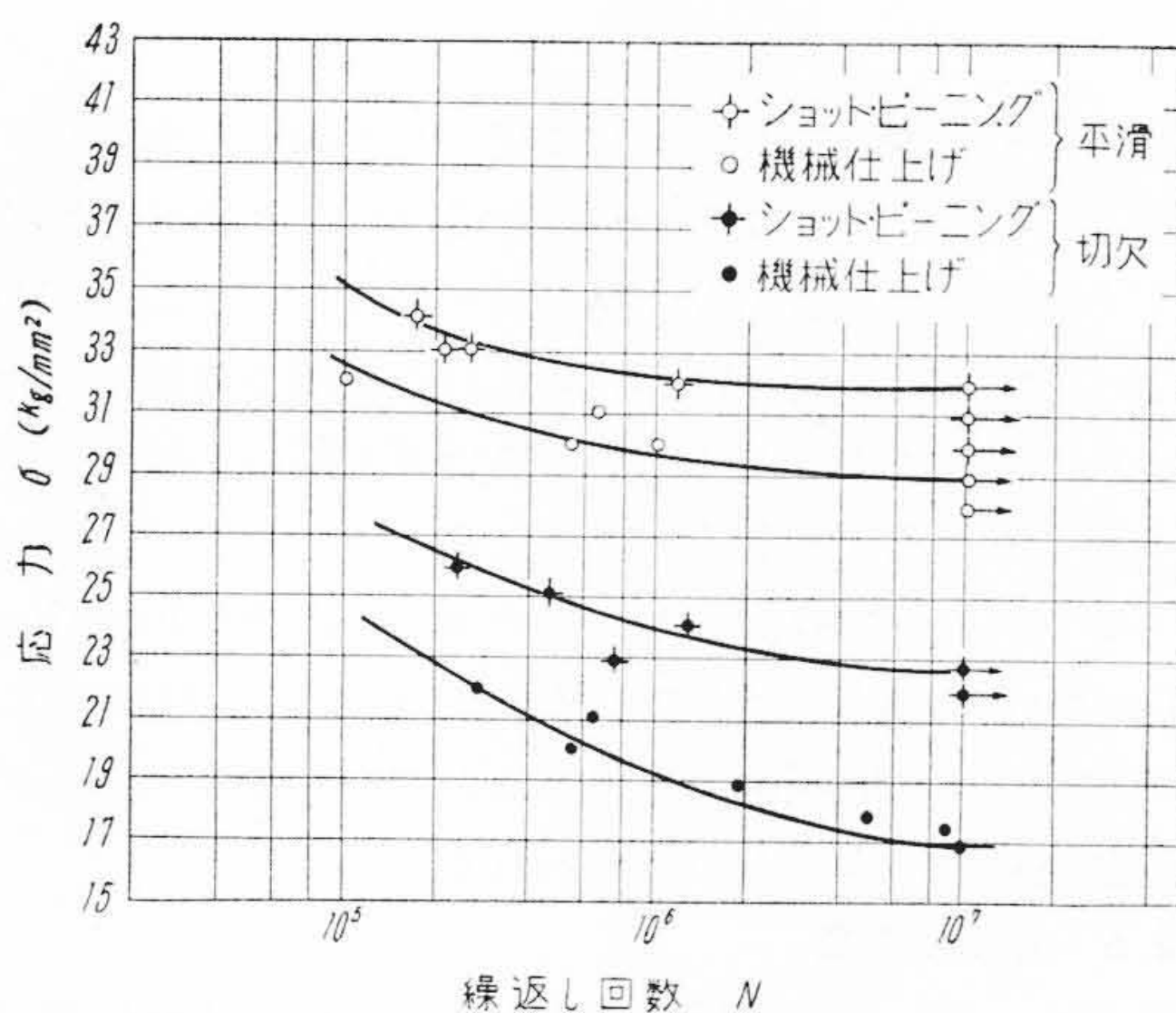
第1表のVI, VIIの材料を用い、VIより200°C, VIIより常温および400°C用の平滑および切欠試験片を作製した。試験片の形状は2.2項で述べたものと同じでただ高温用のものは試験片が長くなっている。試験機は小野式で高温では温度を $\pm 3^\circ\text{C}$ の温度範囲で調節しほぼ一定に保つた。

2.6.2 表面層の硬度

各試験片につき疲労試験後断面の硬度分布を測定した結果、平滑試験片では常温ではピーニングによる表面層の硬化は顕著でないが、400°Cのものでは表面で中心部より約20HV硬くなっている。切欠試験片では200°C, 400°C用のものいずれも表面で約20HV硬くなっており、機械仕上げのものより20~30HV硬度が高くなっていることがわかった。第14図にその一例



第15図 200°Cにおける試験結果



第16図 400°Cにおける試験結果

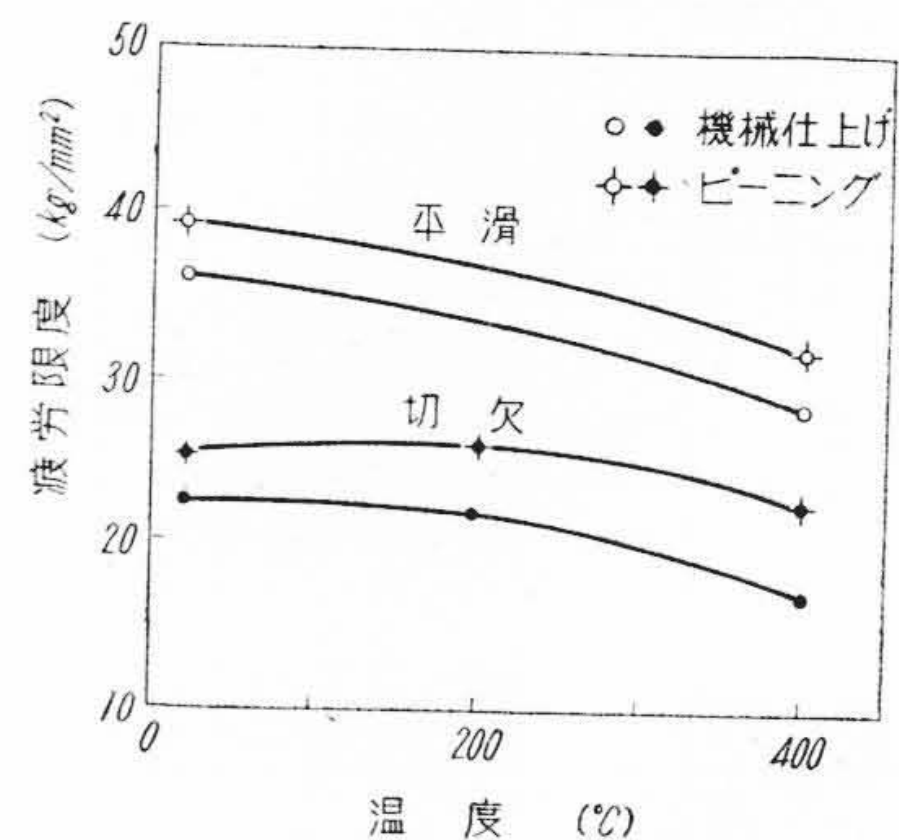
を示す。

2.6.3 表面の残留応力

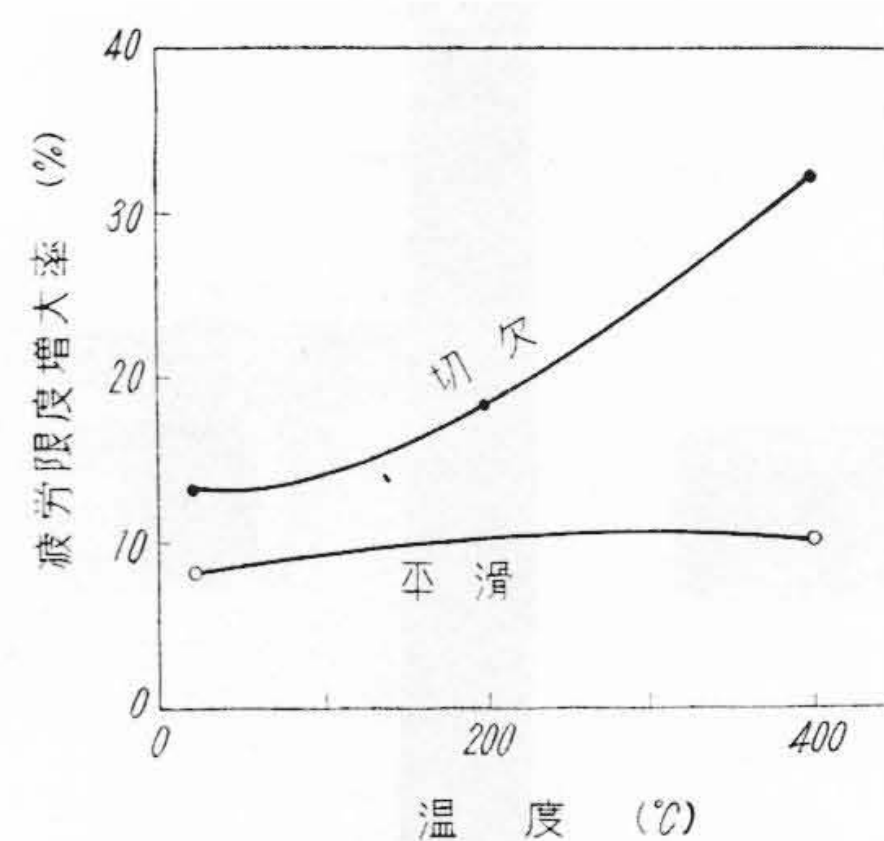
400°Cで試験した平滑試験片につき Sachs 法で残留応力を求めた結果, $\sigma_e = -25 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_t = -15 \text{ kg/mm}^2$ となり常温のもの (2.2 項参照) より減少しているがまだかなり残っていることがわかった。

2.6.4 疲労試験結果

疲労試験の結果は常温については前述したので省略



第17図 温度と疲労限度の関係



第18図 高温におけるピーニングの効果

するが, 200°Cでは第15図, 400°Cでは第16図の S-N 曲線が求まった。これらの結果から 200°Cでは機械仕上げのものの疲労限度 22.0 kg/mm^2 に対しピーニングしたもの 26.0 kg/mm^2 で約 18%, 400°Cでは平滑な機械仕上げのもの 29 kg/mm^2 がピーニングにより 32 kg/mm^2 と 10.3%および切欠のあるもので機械仕上げのもの 17.0 kg/mm^2 に対し 22.5 kg/mm^2 とピーニングにより 32.4%のそれぞれ疲労限度の増大が得られた。これらの結果より疲労限度と温度の関係を図示すると第17図のようになり, 試験温度の上昇による疲労限度の低下率はピーニングしたものが小さい, 特に切欠材で大きく機械仕上げの 24.4%に比しピーニングしたものでは 12.1%となつている。また第18図

第3表 材料の化学的成分および機械的性質

材料 No.	化 学 的 成 分 (%)								機 械 的 性 質 (kg/mm^2 , %)				硬 度 Hv
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	σ_s	σ_B	ϵ	φ	
VIII	0.42	0.27	0.55	0.018	0.017	—	—	—	28.3	63.8	26.5	54.5	166
IX	0.45	0.39	0.70	0.015	0.012	—	—	—	39.3	63.7	29.2	52.2	180
X	0.41	0.36	0.63	0.024	0.030	—	—	—	34.2	63.6	25.8	40.5	170
XI	0.34	0.30	0.59	0.025	0.027	0.35	0.06	0.16	31.6	57.0	27.9	47.5	179
XII	0.32	0.28	0.57	0.023	0.026	0.37	0.06	0.11	22.1	31.1	2.4	2.9	180
XIII	0.39	0.21	0.59	0.017	0.14	—	1.39	0.79	82.2	95.9	20.0	57.4	—

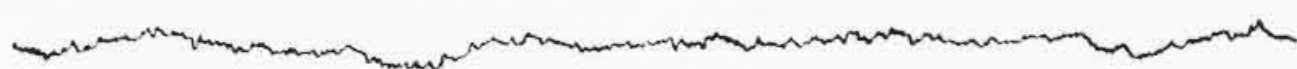
よりわかるように平滑材では温度にかかわらずピーニングの効果は10%程度であるが、切欠材では試験温度の範囲で温度が高くなるほど効果も大きくなる傾向にあることがわかる。切欠係数についても機械仕上げのものが、常温1.62, 400°C 1.70, ピーニングしたものの常温1.54, 400°C 1.42 となりピーニングしたものは温度が上るとかえって減少している。

以上の実験結果より 400°C 程度の温度で 10^7 回の繰返し数では、ピーニングによる残留応力および硬化はまだかなり残存しており、疲労限度の増大に効果があり、特に応力集中のある場合に大きく $\alpha=1.54$ の切欠試験片で約 30% 程度であることがわかった。しかしさらに高温となり 700°C 近くなれば当然残留応力や硬化層は消滅してピーニングの効果もなくなるものとみなければならない。

3. 段付軸に対する効果

3.1 供試材料

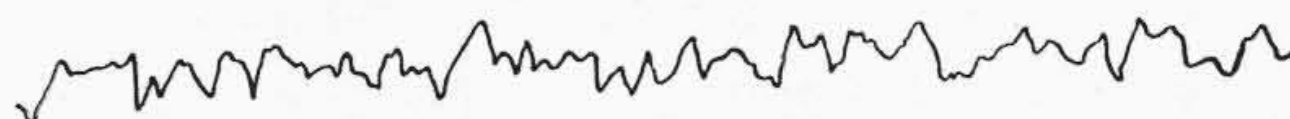
軸材として一般に用いられている第3表 VIII, IX に示すように中炭素鋼 SF 60 をえらび、試験片に加工前に 880°C, 1 時間の焼鈍を行つた。IX 材より作つた試験片は旋削仕上げ後加工硬化層を除く目的でさらに切削粉をつめた鉄製容器中に入れ 880°C, 1 時間の焼鈍を行つた。



(a) VW 0.7 μm H×20 V×2000

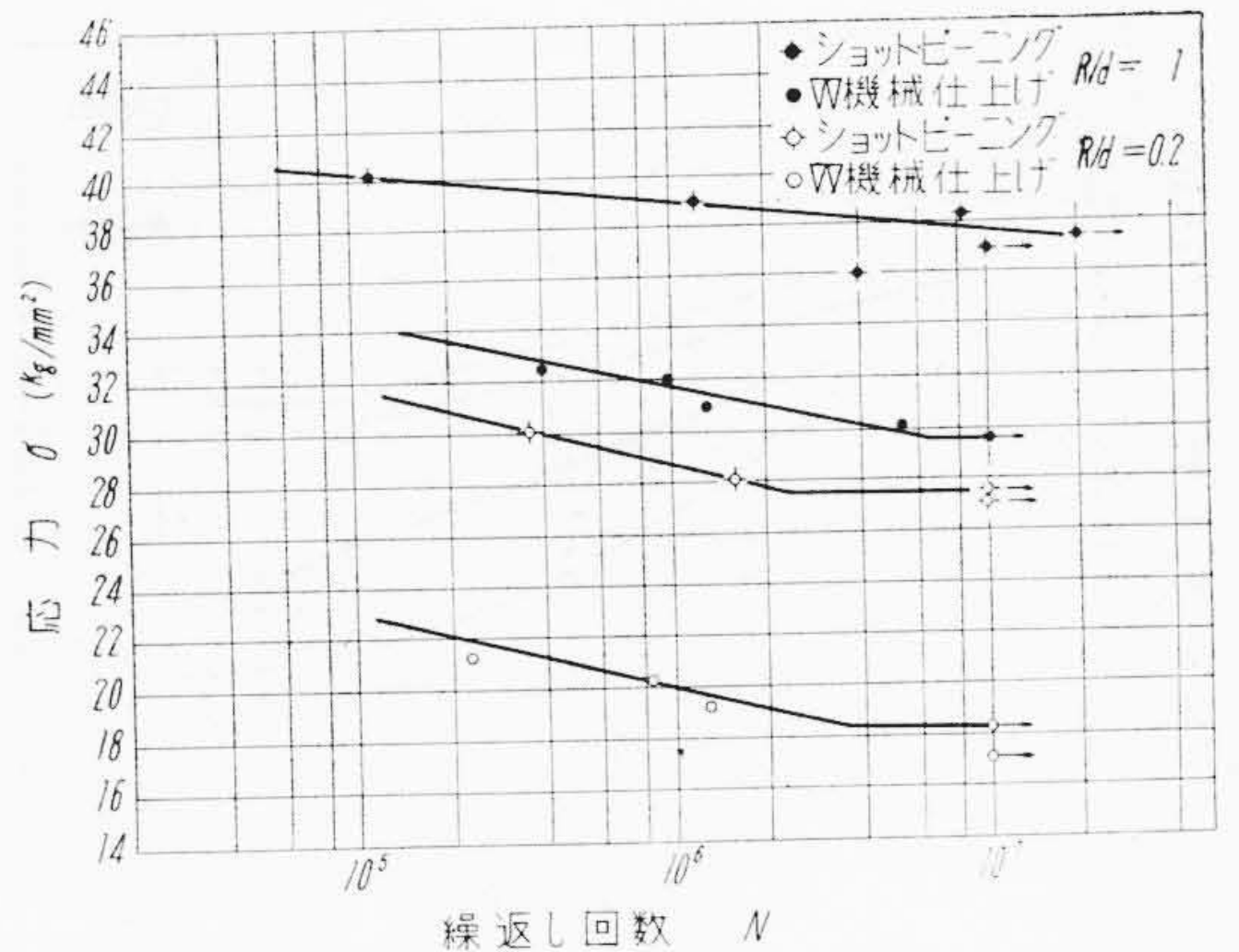


(b) W 16 μm H×20 V×500



(c) ショットピーニング 18 μm H×20 V×500

第19図 段付軸の各種仕上げと表面粗さ



第20図 段付軸に対するショットピーニングの効果

3.2 試験片および試験機

試験片は片持梁式のもので、その掴部に近い直径 D と試験すべき部分の直径 d (10 mm) の比を $D/d=2$ とし、段付の隅間半径 R を $R/d=1.0$ および $R/d=0.2$ に選んだ。これらの段付の形状係数はそれぞれ $\alpha=1.1, 1.4$ である。

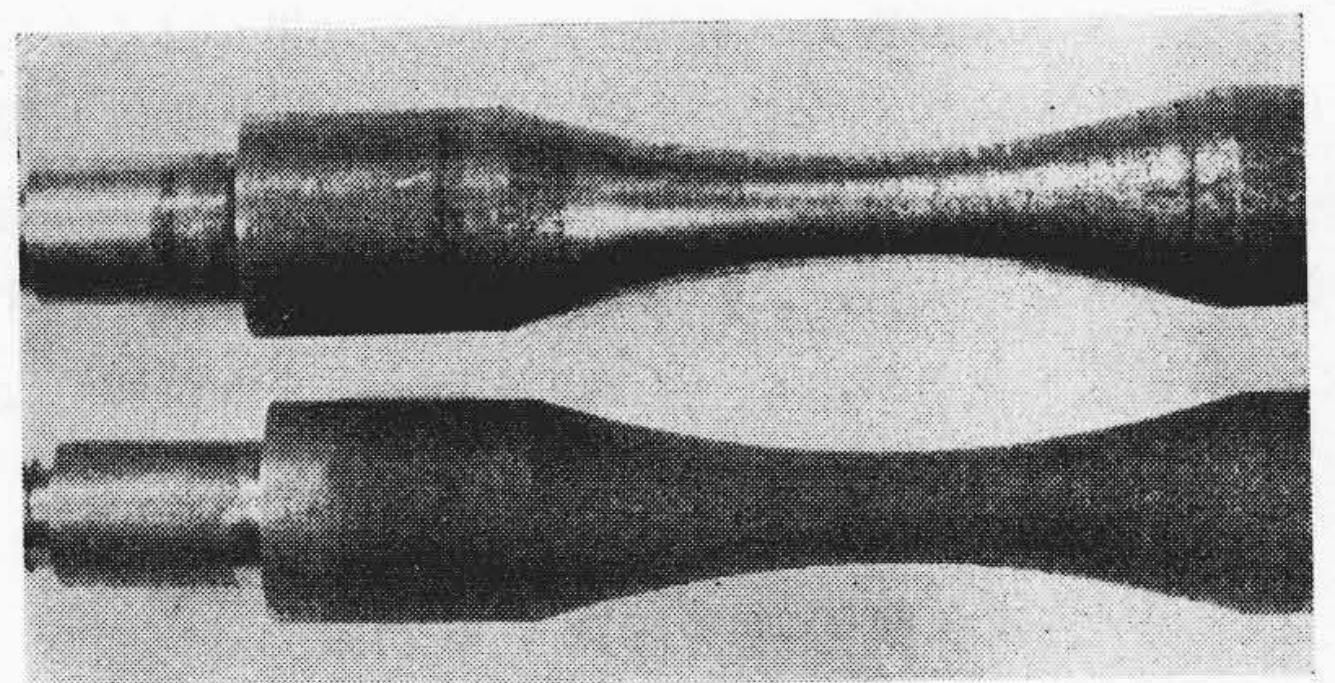
$R/d=1.0$ の試験片は VIII の材料より、 $R/d=0.2$ のものは IX の材料より作製した。片持梁式疲労試験機を用いた。

3.3 表面粗さ

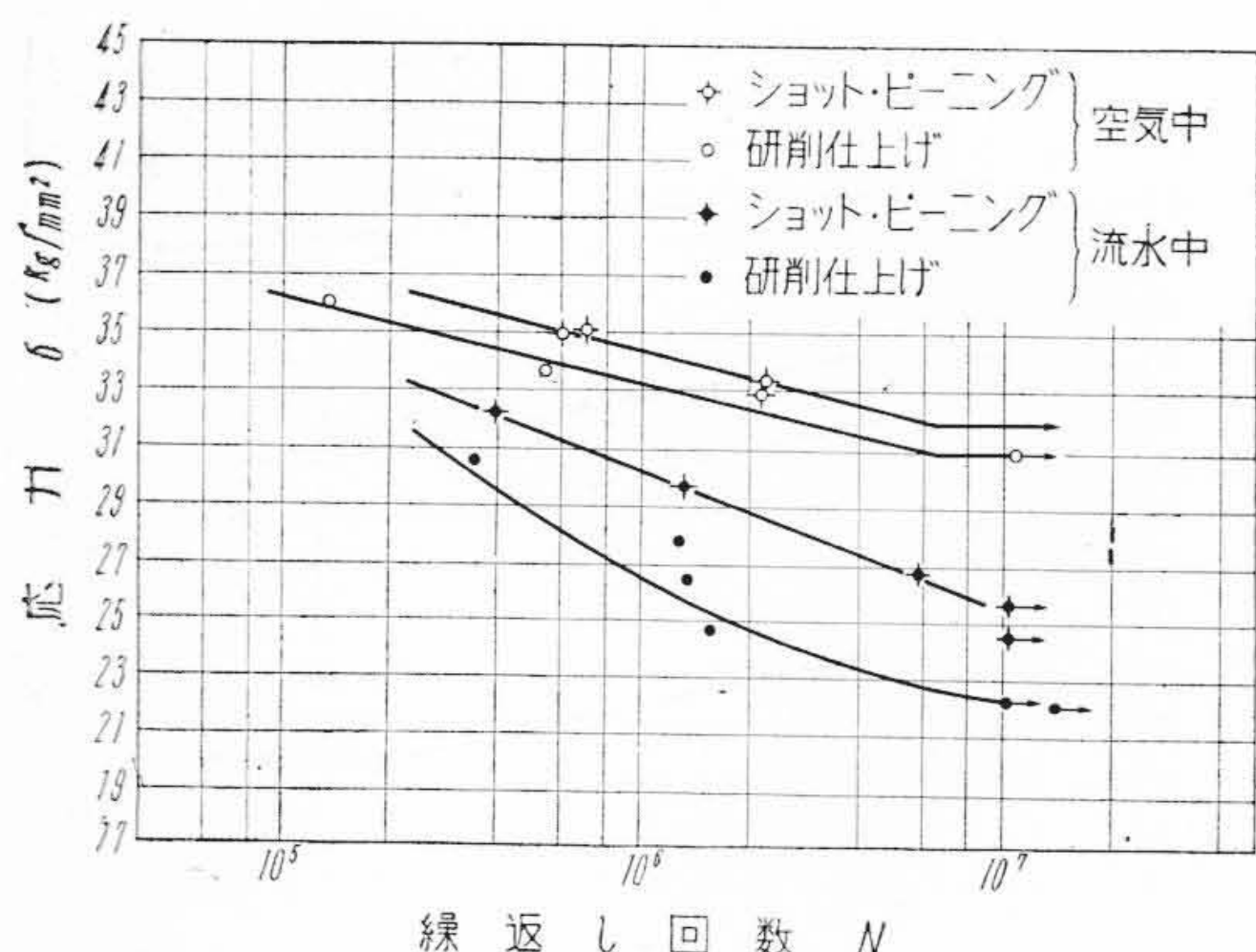
旋削仕上げの試験片の仕上程度を VW (0.6-S~1.7-S) および W (4-S~16-S) とし、W 仕上げのものにピーニングした。これらの仕上げ条件のものの表面粗さを小坂式表面粗さ検査機によつて測定した結果の一例を第19図に示す。その結果によればピーニングしたものは平均 18 μm で W よりもやや粗い程度である。

3.4 疲労試験結果

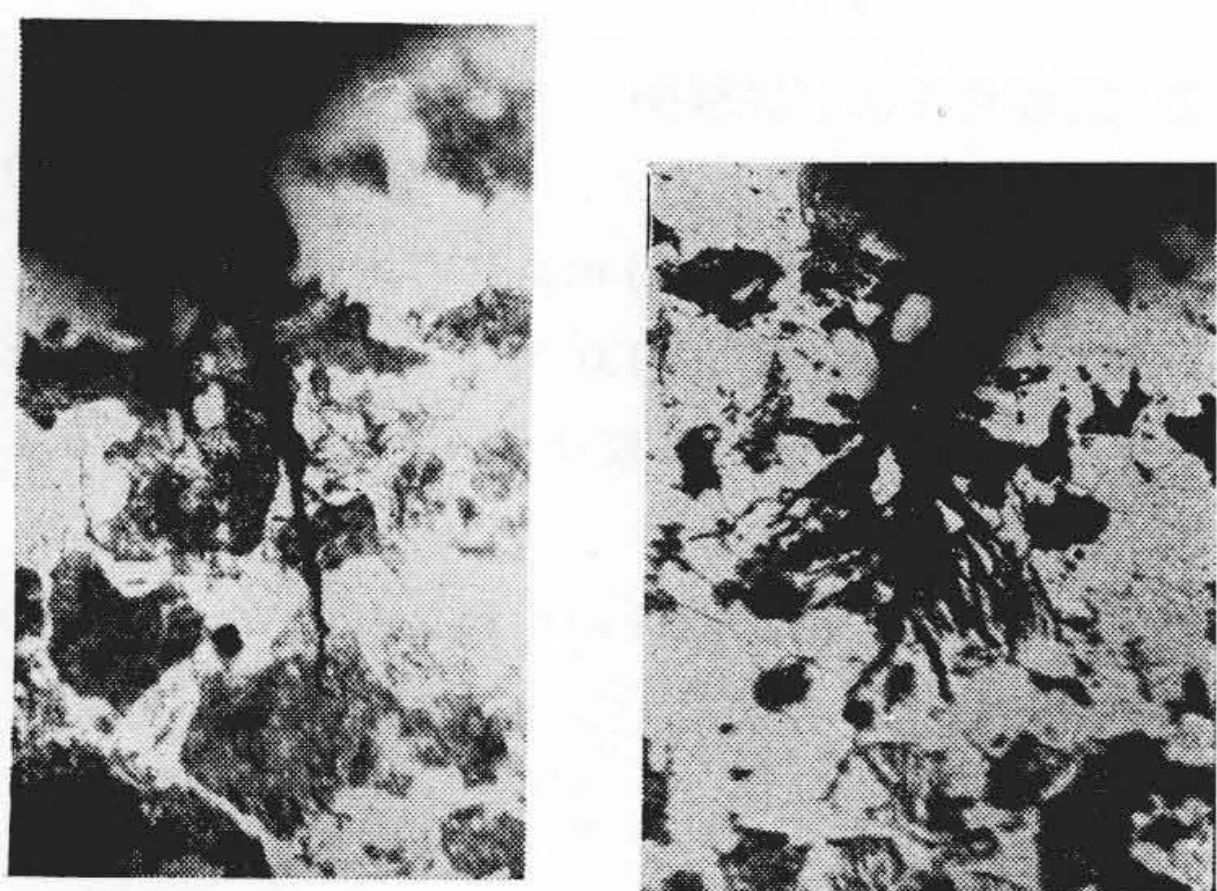
疲労試験の結果第20図の S-N 曲線が得られ、 $R/d=1.0$, VW 仕上げの疲労限度 31.0 kg/mm², W のもの 29.5 kg/mm² およびピーニングしたもの 38 kg/mm² と求まり、ピーニングによる疲労限度増大の効果は VW



(上) 機械仕上げ (下) ピーニング
第21図 試験片の腐蝕状況



第22図 腐蝕疲労に対するショットピーニングの効果



(a) 機械仕上げ (b) ショットピーニング
第23図 腐蝕疲労によるき裂 (×200)

に対し23%, W に対し29%である。 $R/d=0.2$ ではVV仕上げのもの19.6 kg/mm², W仕上げ18.2 kg/mm²およびピーニング27.5 kg/mm²と求まり, 効果はVVに対し40%, W に対し51%の増大となり, 形状係数の大きい場合の方がピーニングの効果が大きいことは, これまでに述べた切欠試験片の場合と同様である。ここで表面粗さは同じ程度でもピーニングによつて生ずる圧縮残留応力と硬化のためWに比し効果の大きいことはもちろん, 粗さのはるかに滑らかで小さいVVに対しても効果が著しいことは, 表面の粗さの疲労強度に及ぼす影響よりもピーニングの効果がはるかに大きいことを示すもので, このことから機械部品の段付, 溝などの応力の集中する部分にバイト目が残つて強度上問題となる場合, この部分をていねいに研磨し直すことも一策であるが, ピーニングを行えば表面は粗くなつても強度的にはいつそう効果的であるといえる。

4. 腐蝕疲労に対する効果

4.1 試験片および試験機

第3表のXのような中炭素鋼SF 60材を試験片に加工

前850°C, 1時間焼鈍後炉冷した。試験片は片持梁式のもので第21図に示す。最小直径15 mmで機械仕上げ後エメリー04紙仕上げのものとピーニングしたものとを用意し, 自家製片持梁式回転曲げ疲労試験機(1,700 rpm)により試験した。腐蝕疲労の試験は, 水道水を噴口より200 cc/minで回転中の試験片に接近してつるした布上に流下させ, 布と試験片との間に水が表面張力でつながつて流動するように工夫した。

4.2 疲労試験結果

空気中における結果では第22図の上のS-N曲線から, 機械仕上げのものの疲労限度30.8 kg/mm²に対しピーニングしたもの約32 kg/mm²とその効果は小さいが, 腐蝕中の疲労試験の結果では10⁷回のくり返し回数において下の曲線のように機械仕上げのもの22.2 kg/mm²に対しピーニングしたもの25.5 kg/mm²と約15%の増大が得られ効果が空気中よりも大きいことがわかった。第21図にみるようにピーニングしたものは試験片表面の腐蝕は機械仕上げのものに比し著しい。しかし疲労試験後軸方向の断面で調べると, 第23図のように腐蝕疲労によつて生じたき裂の成長の状況が二つの場合で異なっていることがわかる。すなわち, 機械仕上げのものは(a)図のように表面に腐蝕によつて形成されたpitより大きなき裂が深く進んでこの発達によつて試験片は破断しているが, 一方ピーニングされたものでは(b)図のように表面のpitから生じたき裂も, 硬化と圧縮残留応力のある表面層では多数樹枝状にじくざくに進みき裂が進みにくいことがわかる。

しかしこのピーニングの効果も長年月の腐蝕疲労に対しては, 表面層の腐蝕による脱落とともに消滅するものと考えなくてはならぬが, 防錆塗料との併用によつてある期間はその効果が期待できるであろう。したがつて不銹鋼に対してピーニングすれば腐蝕疲労に対してはいつそう有利ではないかと考える。

5. 欠陥材に対する効果

機械部品の加工中に, 鋼材の製造中に生じた種々の欠陥が露出してきて, 磁気探傷, ダイマークなどによつて検出され強度上問題にされることがしばしばある。この場合ピーニングによつて欠陥部の強度を増大できれば製造工程上大変たすかる。従来欠陥のある材料に対してはピーニングすれば, 疵がさらに大きくなつてかえつて有害であるといわれている⁽²⁾が, 欠陥の性状によつては有効であるものと考え次の二, 三の材料について調べてみた。

5.1 試験片および試験機

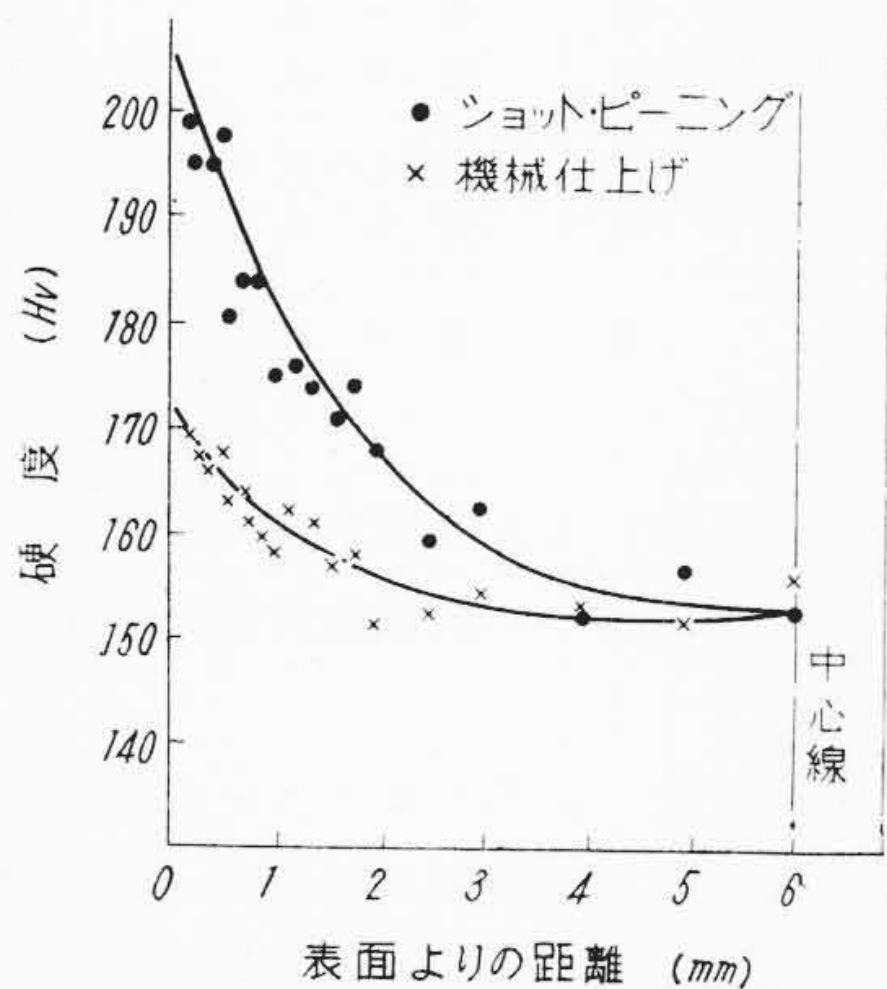
超音波探傷試験の結果欠陥が検出され廃却となつた直径600 mmの水車軸材(SF 55)を用い, 欠陥のない表



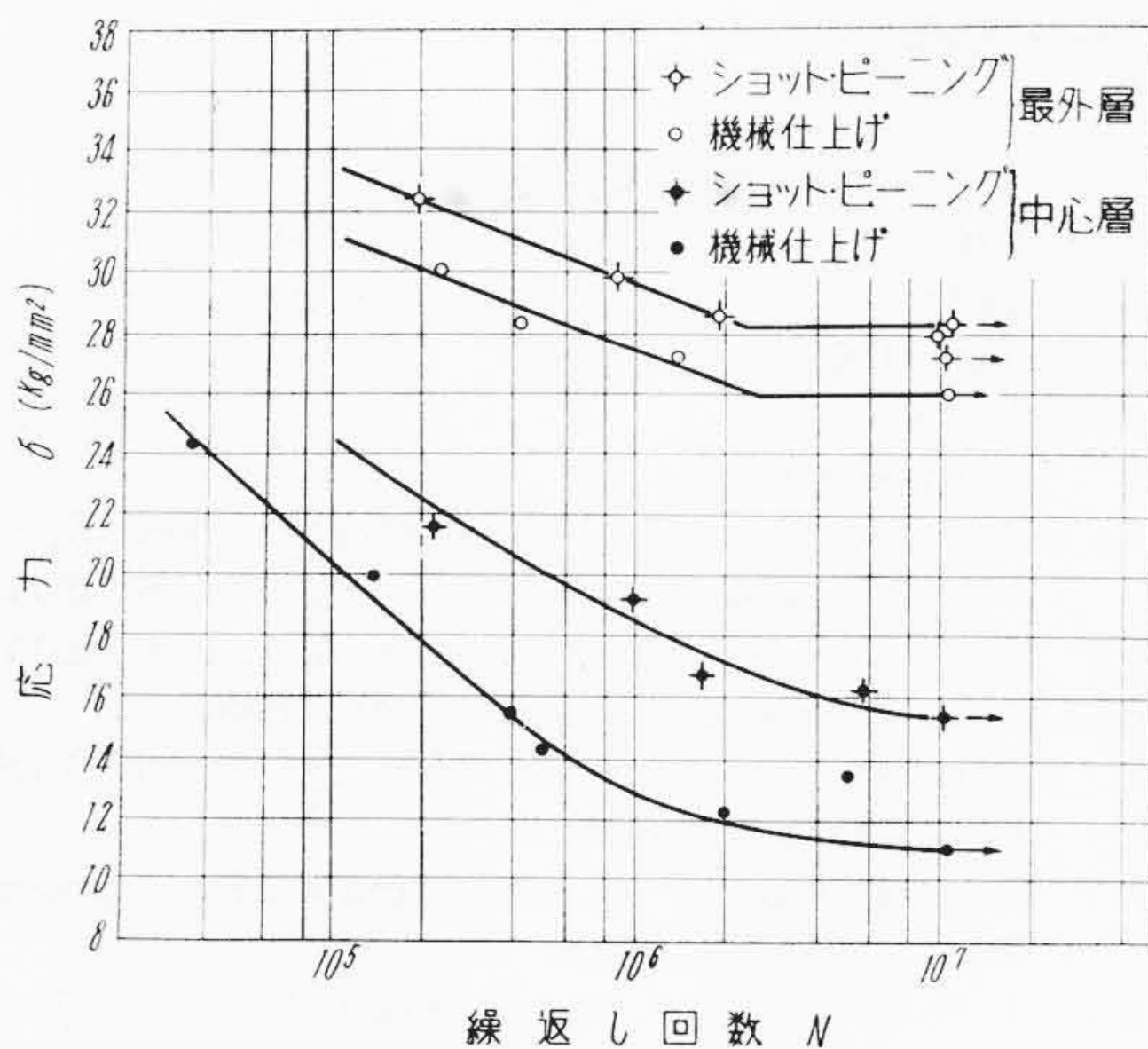
第24図 試験片表面の欠陥 (SF 55) (×20)



第25図 人工き裂の断面 (NiCr 鋼) 表面がピーニングされている (×400)



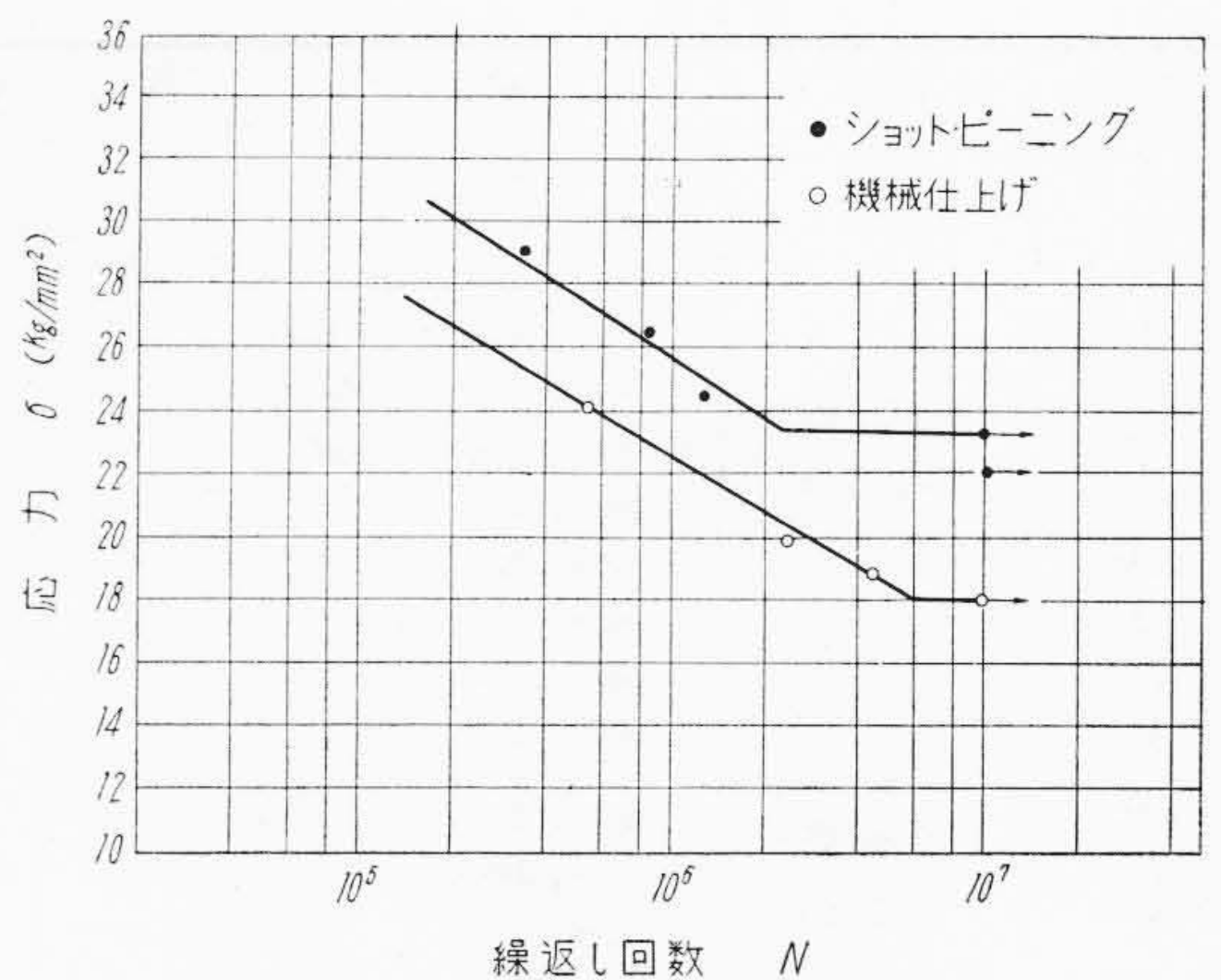
第26図 欠陥試験片の硬度分布



第27図 欠陥材に対するショットピーニングの効果

面層の部分 (第3表 XI 材) および中心層の欠陥の多い部分 (XII 材) から試験片を採取した。試験片の表面に現われた欠陥の一例は第24図に示すように、鋼材の熱処理中に生じたき裂状のもので軸方向に長くのびて存在し、最大のもので2mm程度である。

また欠陥のなかでもつとも強度的に問題となるき裂の



第28図 人工き裂材に対するショットピーニングの効果

場合の基礎資料を得るため、鍛造により人工的につくった NiCr 鋼 (XIII 材) のき裂 (円周方向長さ 0.52mm, 深さ 1.5 mm) に対する効果についても調べた (第25図)。

疲労試験片は直径 12 mm とし小野式を使用した。

水車軸材のピーニングによる表面層の硬化の模様を第26図に示し、表面で機械仕上げのものより約 30 Hv 硬くなっていることがわかる。第25図からわかるようにき裂部はピーニングされても、口を開いたりき裂部が盛り上つてめくれを生ずることはない。

5.2 疲労試験結果

水車軸材については第27図のように求まり、表面層の欠陥のない部分に対しては機械仕上げ 26.0 kg/mm²、ピーニング 28.2 kg/mm² と疲労限度の増大は 8.5% で前述の平滑材における効果と同程度である。欠陥のある中心層の材料に対しては、機械仕上げ 11.0 kg/mm² で欠陥や結晶組織の相違のために表面層より 58% の疲労限度の低下をきたすが、これにピーニングしたものでは 15.3 kg/mm² と 39.4% の増大が得られ効果が大きいことがわかった。

また人工き裂のある NiCr 鋼に対しても第28図の S-N 曲線のように機械仕上げのもの 18.1 kg/mm² に対しピーニングしたもの 23.4 kg/mm² と疲労限度が 29.3% 増大し、前記の水車欠陥材の場合と同様、この程度の欠陥材に対しては、ピーニングが有効であることがわかった。これはき裂欠陥が疲労により発達する場合、表面のき裂の先端付近がピーニングにより圧縮残留応力や硬化によつて強められるためである。

6. 試験結果の総括

以上各種材料、試験片形状、ピーニング方式などによるピーニングの効果を試験結果から表示すると第4表の

第 4 表 ショットピーニングの疲労限度に及ぼす効果

材料 No.	材料種類	試験片形状	荷重条件	試験条件	ピーニング機械	疲労強度増大率(%)
I	13 Cr 鋼 SEC 3	丸棒, 10φ	回転曲げ	常 温	遠 心 式	8.5
II		平板, 有穴	平面曲げ	常 温	遠 心 式	29.0
II		平板, 有穴, 面取り	平面曲げ	常 温	遠 心 式	28.5
III		平板, 平角穴, かしめ	平面曲げ	常 温	噴 口 式	40.0
IV		平板, 3 個穴, かしめ	曲 げ	常 温, 模 型 翼	遠 心 式	26.0
V		平板, バインド線銲接	平面曲げ	常 温, 圧縮加工	遠 心 式	130.0
VII		丸棒, 10φ	回転曲げ	常 温	噴 口 式	8.2
VII		丸棒, 10φ	回転曲げ	400°C	噴 口 式	10.3
VII		丸棒, 13φ, 切欠	回転曲げ	常 温	噴 口 式	13.8
VII		丸棒, 13φ, 切欠	回転曲げ	400°C	噴 口 式	32.4
VI		丸棒, 13φ, 切欠	回転曲げ	200°C	噴 口 式	18.2
VIII	半 硬 鋼	丸棒, 10φ, 段付 R/d=1.0	回転曲げ	常 温	噴 口 式	23.0
IX	S F 60	丸棒, 10φ, 段付 R/d=0.2	回転曲げ	常 温	噴 口 式	40.0
X		丸棒, 15φ,	回転曲げ	常 温, 水 腐 蝕	噴 口 式	15.0
XI	半 硬 鋼	丸棒, 12φ, 欠陥なし	回転曲げ	常 温	遠 心 式	8.5
XII	S F 55	丸棒, 12φ, 欠陥あり	回転曲げ	常 温	遠 心 式	39.4
XIII	NiCr 鋼 SNC 2	丸棒, 12φ, 人工き裂	回転曲げ	常 温	噴 口 式	29.3

ようになり、これらから次のことがわかった。

(1) 平滑試験片に対するピーニングの疲労限度増大の効果は 8~10% 程度である。

(2) 応力の集中する形状 ($\alpha=1.5$) の切欠試験片に対しては約 30% の増大が得られる。

(3) 13 Cr 鋼では 400°C においてもかなり効果があり、切欠試験片では約 30% の増大が得られた。

(4) 腐蝕を受ける場合は、き裂が表面層で進みにくく 15% の効果があり、防錆塗料との併用が望ましい。

Fretting Corrosion に対しても有効である。

(5) 欠陥のある材料に対してもピーニングは有効であり、き裂材に対して 30~40% 疲労限度を増大した。

7. 結 言

タービン翼材を中心として二、三の材料につきピーニングの効果について調べたが、その結果は応力の集中する部品で効果の大きい場合でも 30~40% であることがわかった。この方法の適用は十分その特長を生かし、対象とする機械部品の形状、材質および使用条件を考えて行うべきである。すなわちピーニングによつて生ずる表面の薄い層の圧縮残留応力と硬化層によつて疲労強度が増大するのであるから、薄い板状部材、切欠部材、表面に有害な欠陥や引張残留応力のある部材などに適用すれば効果が大きい、大きな寸法のもの、平滑な部材、強い腐蝕媒体中で働く部材、材料の変態点に近い高温での

使用では効果が小さいことに留意すべきである。

またピーニングをほかの表面処理法と併用すればその効果はさらに増大する。

終りに本研究を行うに当りピーニング加工に便宜を与えられた神奈川県工業試験所大野明氏、日本発条株式会社ならびに助言と援助を賜つた日立製作所日立工場黒川正一郎、木崎隆市の両氏、高温疲労に協力された日立研究所佐々木良一氏および研究室の西岡章夫、久保木悦也の両君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 広瀬：ショットピーニング (昭-30 誠文堂)
- (2) 福田：プラスチッククリーニングとショットピーニング (1953-日刊工業社)
- (3) 佐々木・村上：ショットピーニングの解説, Engineering, 39, 319 (昭27-10)
- (4) O. J. Horger and H. R. Niefert: Proc. E. S. A. II., 2, 1 (1944), proc. E. S. A. II., 1 178 (1944)
- (5) H. F. Moore: proc. E. S. A. II, 1, 170 (1944)
- (6) F. P. Zimmerli: A. S. M. 51 (1940)
- (7) J. M. Lessels & W. M. Murray: Proc. A. S. T. M. 41, 569 (1941)
- (8) R. L. Mattson & W. S. Coleman, Metal progr. 108/112 (May 1954)
- (9) A. S. M. 委員会: Metal progr. 15, 105 (July 1954)
- (10) W. E. Jones & G. B. Wilkes: proc. A. S. T. M. 50, 744 (1950)