

軸の疲れ強さ

Fatigue Strength of Shafts

大内田 久*
Hisashi Ouchida

内 容 梗 概

軸の疲れ破損の数例を掲げ、応力集中の大きい鋭い切欠部、はめあい部、欠陥部および溶接部の疲れ強さについて注意すべき点を述べた。すなわち鋭い切欠やはめあい部材のある軸では停留き裂が発生する疲れ強さがあり、寸法効果も大きいこと、欠陥材の使用にはその大きさ、方向、性状、使用条件を考慮し寸法効果も考慮すべきことおよび溶接軸は溶接により疲れ強さの低下が大きく、予熱後熱を十分行ない、溶接欠陥の生じないようにすべきことなどにつき筆者の研究を中心に論じたものである。

1. 緒 言

種々の機械部品や構造物の破損の80%は繰返し荷重による疲れが原因といわれているが、この中でも軸は機械の心臓ともいえるべき重要部品で、もしこれが破断すると重大な事故を起こすことになる。従来軸の強さについては種々研究されてきているが、鋭い応力集中のある軸やはめあい軸におけるき裂強さ、疲れ強さに及ぼす寸法効果、表面処理の効果、欠陥および溶接の影響などについては、今日なお設計資料として十分なものが少なく今後の研究に待つべきものがある。本文は筆者の研究を主として軸の疲れ強さの設計上注意すべき点を述べたものである。

2. 軸の破損例

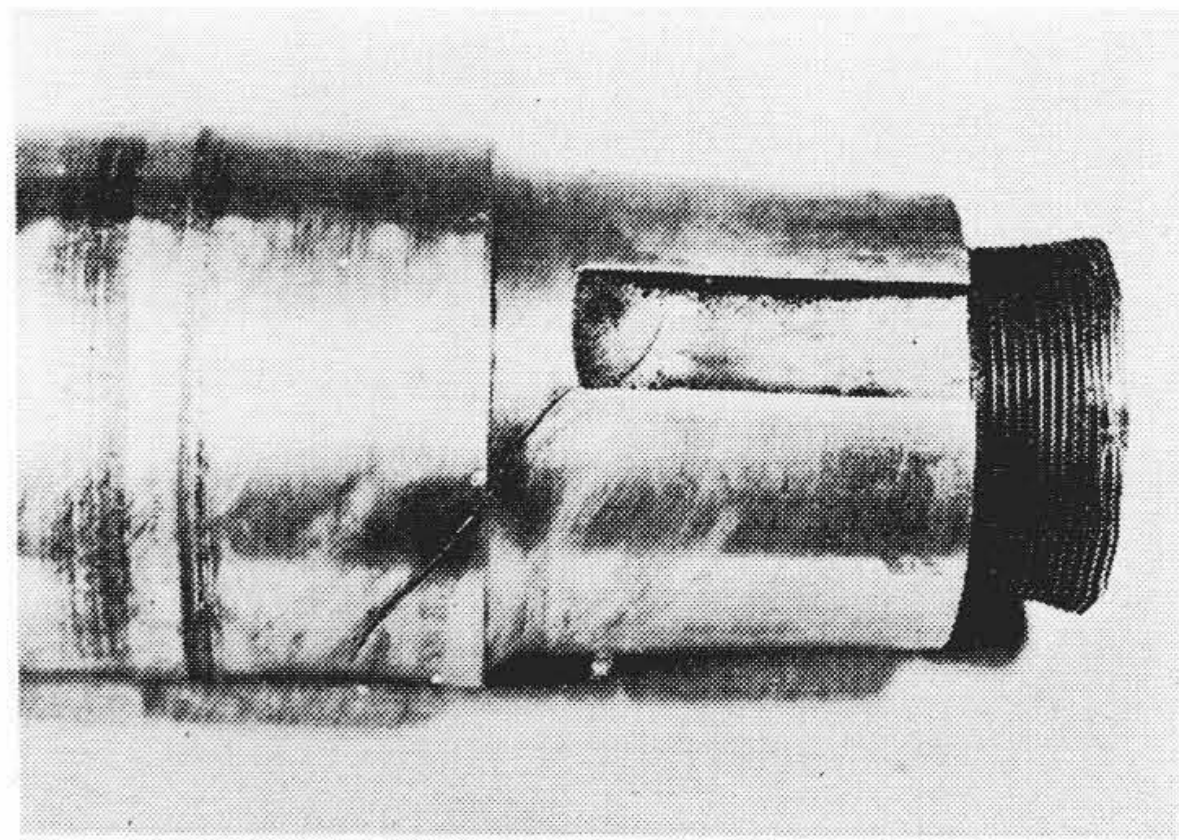
本文の内容に関係のある代表的な軸の破損例を二、三あげてみよう。

(1) 応力集中部のある軸

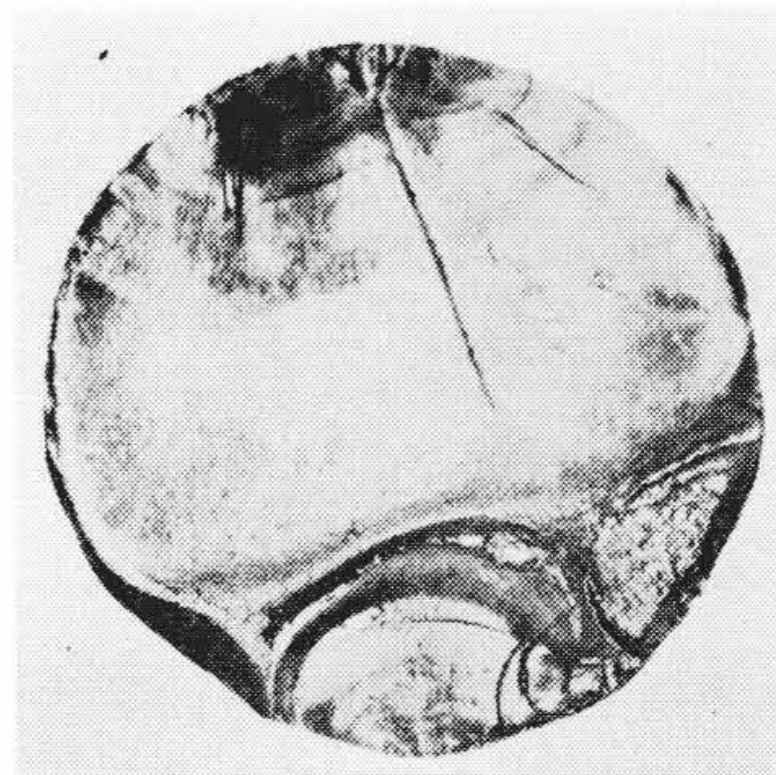
段付や、キームぞ、横穴のある軸でこれらの切欠が鋭い場合あるいは二つの切欠の応力集中が重なって影響する場合には疲労破損が起りやすい。第1図はピニオン軸で段付とキームぞの応力集中が重なったためにねじり疲労破損がこの部を起点として生じている。大きな軸に極端に低い段を付けたり、キームぞの隅肉半径を極端に小さくしたりすると応力集中係数(形状係数)が3以上に大きくなり、破損しない軸でもこれらの応力集中部に停留き裂を生じ、これが荷重の変動によって進展し破壊に至ることがある。飛行機の着陸時の衝撃の繰返しを受ける pivot shaft の段付部の破面を調べると、明らかに停留していたと思われる古いき裂から破壊が生じたと思われる例⁽¹⁾がある。

(2) はめあい軸

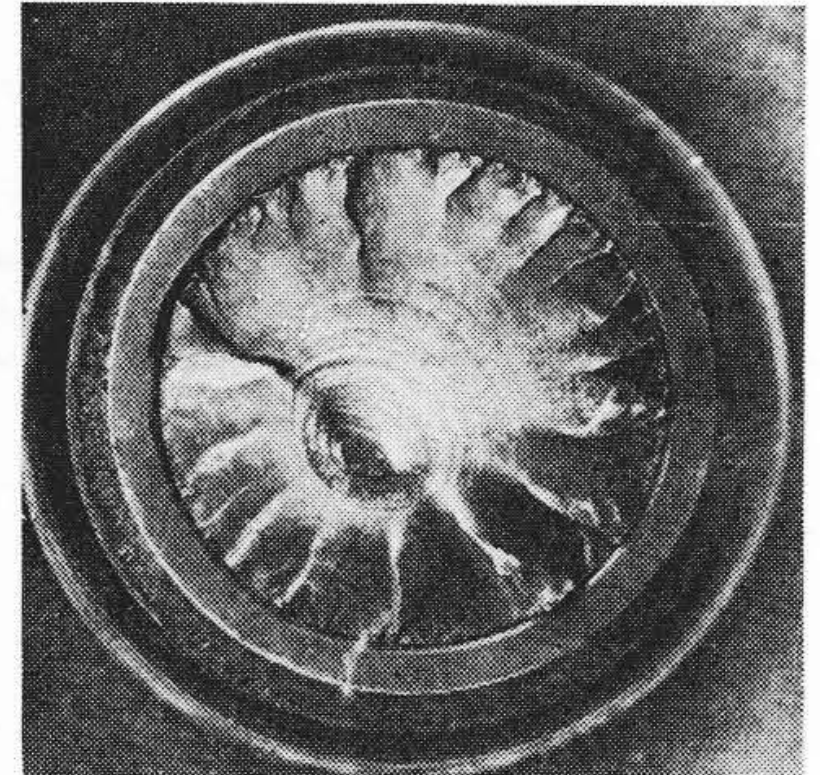
繰返し荷重を受ける軸とはめあい部材の間に微動摩耗(fretting corrosion)が生じ、はめあい端の応力集中とあいまって軸の強さを著しく低下する。このはめあい部には fretting corrosion による停留き裂が生じやすい。第2図は air drop hammer の piston rod の破損例で、rod が hammer head に圧入されている部分で、鍛造による繰返し衝撃で引圧応力を生じ破損した例である。第3図は軸に bearing を焼ばめした部分で回転曲げとねじり荷重により破損した例、第4図は空気圧縮機に直結されたモータ軸がねじり振動により coupling 焼ばめ部より破損した例を示す。このようにはめあい部では一種の腐食をとまなう疲れて時間とともに疲れ強さが低下し、停留き裂を生じやすいことや、疲れき裂がはめあい部端より内方にはいった部分から発生すること、これらのはめあい軸の寸法効果が大きいことなどから、現在でも破損の大き



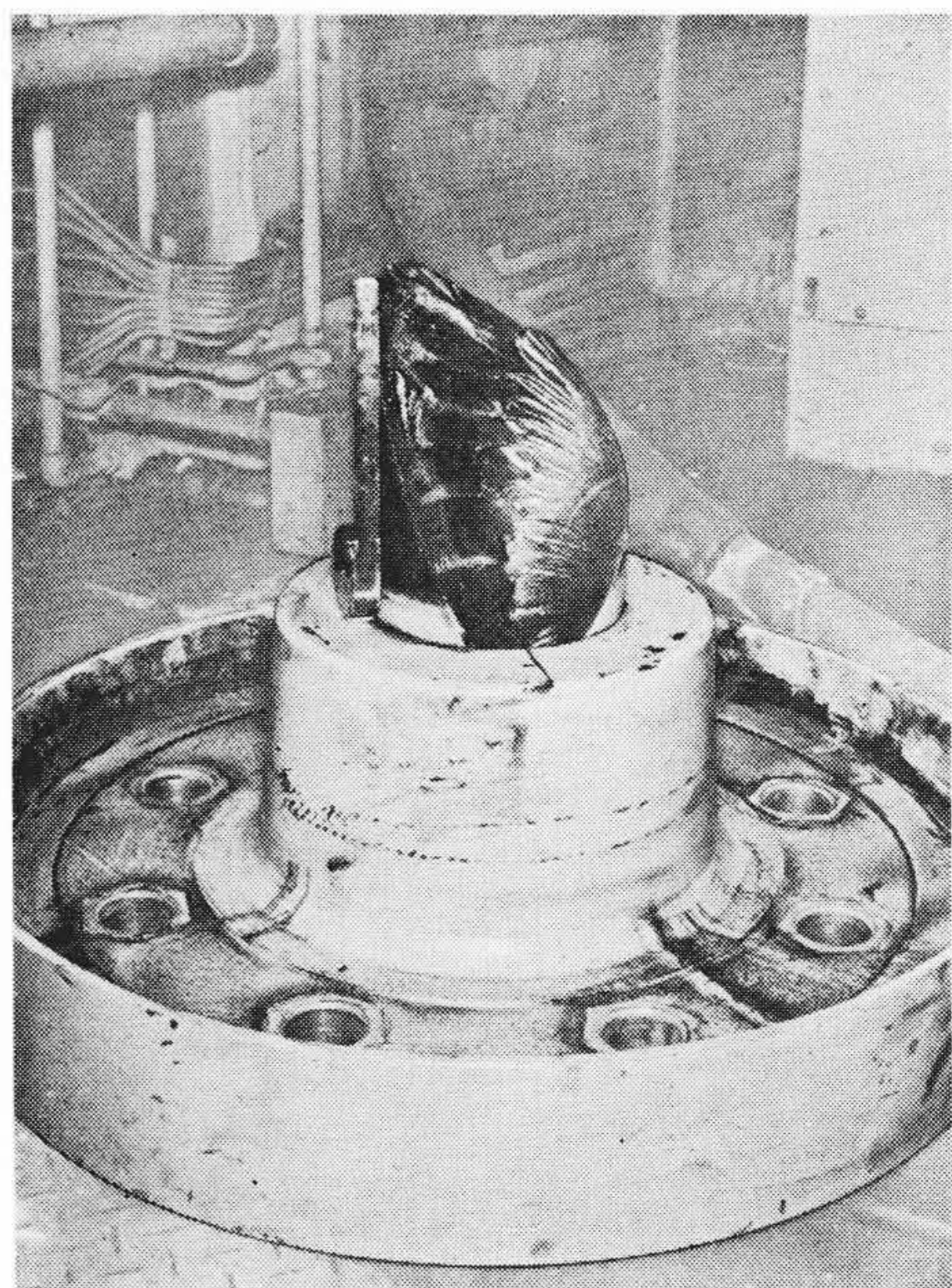
第1図 ピニオン軸の疲れ破損(ねじり)



第2図 ピストンロッドの疲れ破面(引張り圧縮)

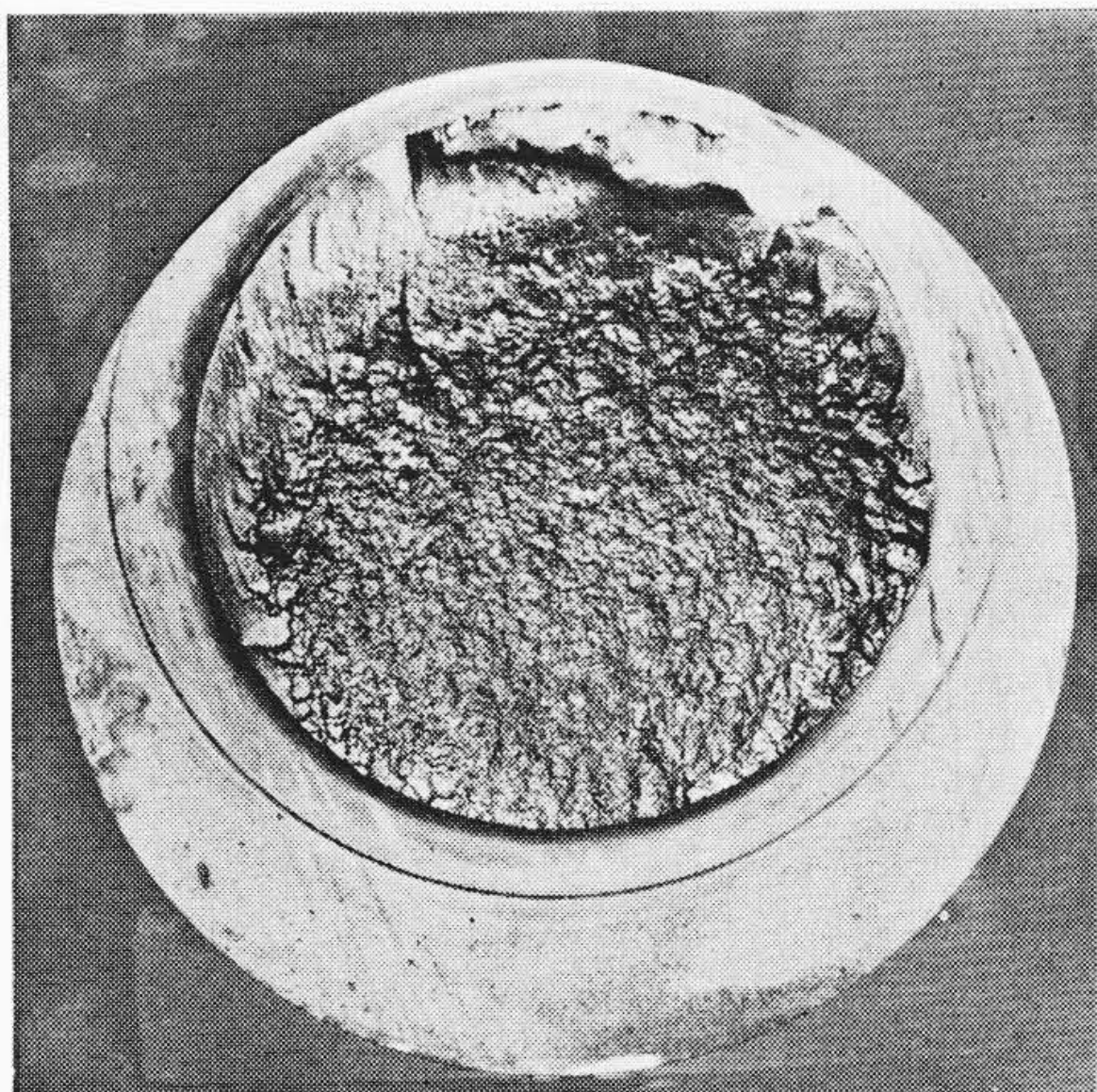


第3図 はめあい軸の疲れ破面(曲げねじり)

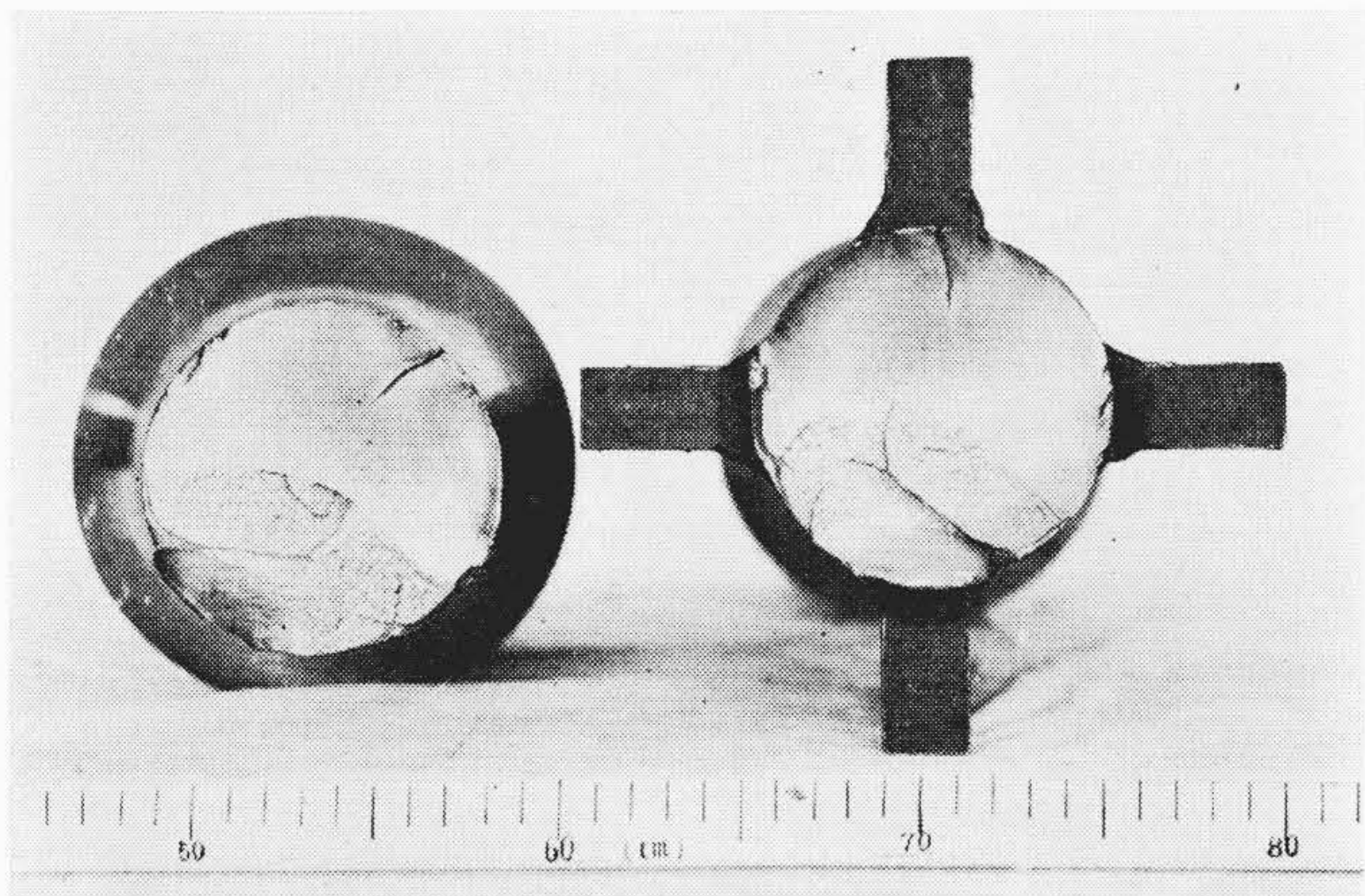


第4図 はめあい軸の疲れ破損(ねじり)

* 日立製作所日立研究所 工博



第5図 クランク軸の疲れ破面(曲げねじり)



第6図 溶接軸の疲れ破面(曲げ)

な部分を占めているようである。

(3) 欠陥のある軸

大きな鍛造鋼である軸には多少とも製造中に生じた欠陥があるが、最近の発達した非破壊検査法によって検出される微細な欠陥の大きさと軸の強さの問題の解決にはなお今後の数多くの研究が必要であり各方面でこの種の研究が盛んである。内部に大きな欠陥があれば疲れ破壊は内部から発生することがあるので強さの判定のために、欠陥の大きさ、方向を非破壊的に精密に検出する技術のいっそうの進歩が望まれる。第5図は内部に欠陥の存在していたクランク軸の疲れ破面の一例を示す。

(4) 溶接軸

種々の付加物が溶接された軸は、形状のみによる応力集中のほかに、溶接による残留応力や材質変化および溶接欠陥などのため一般に疲れ強さが著しく低下する。第6図は arm を溶接した軸の破壊例を示す。

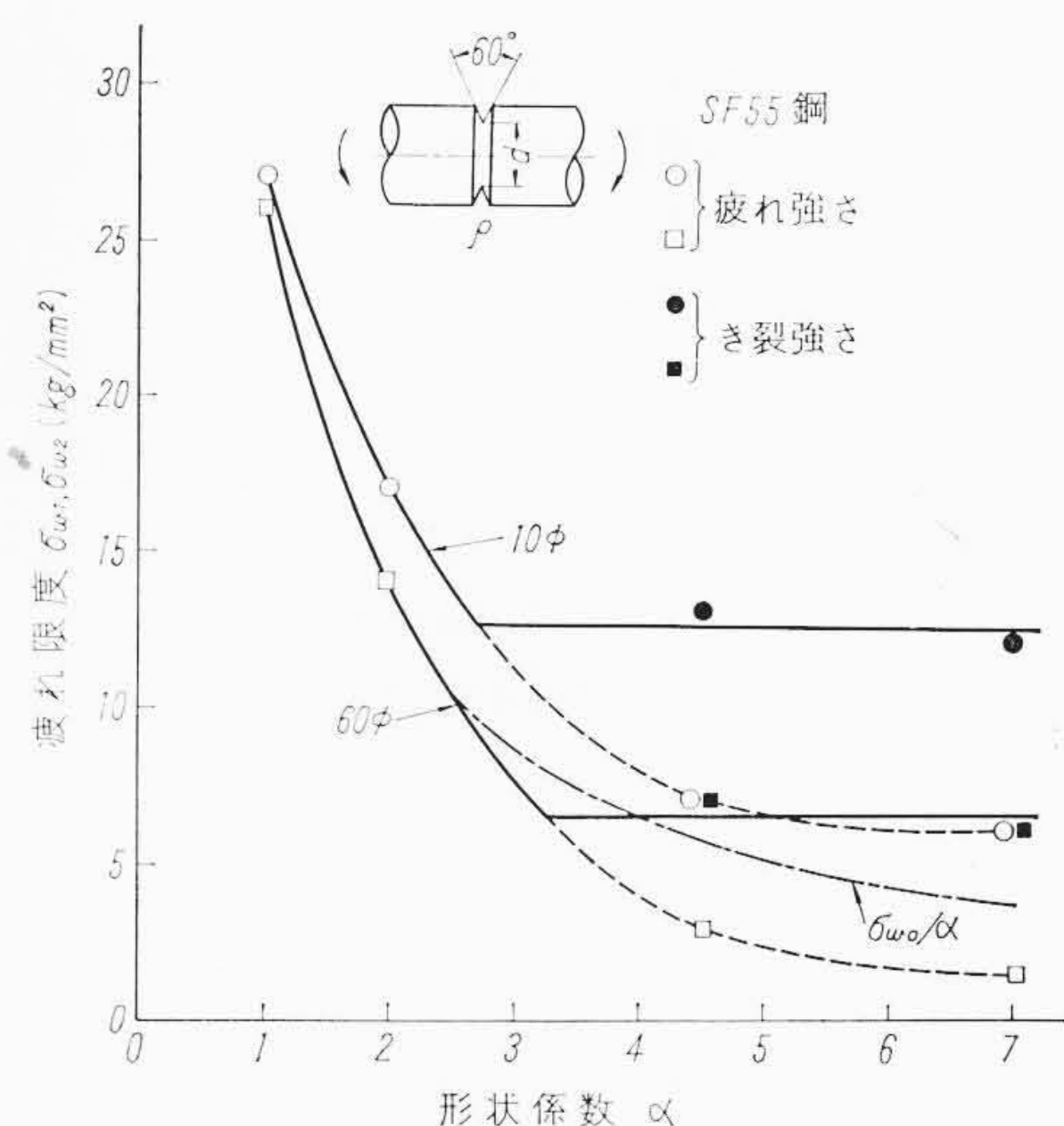
3. 切欠材の疲れ強さ

機械部品として用いられる軸には、応力集中の程度の差こそあれ、種々の切欠部があり、疲れ強さで問題になるのもこの部分である。

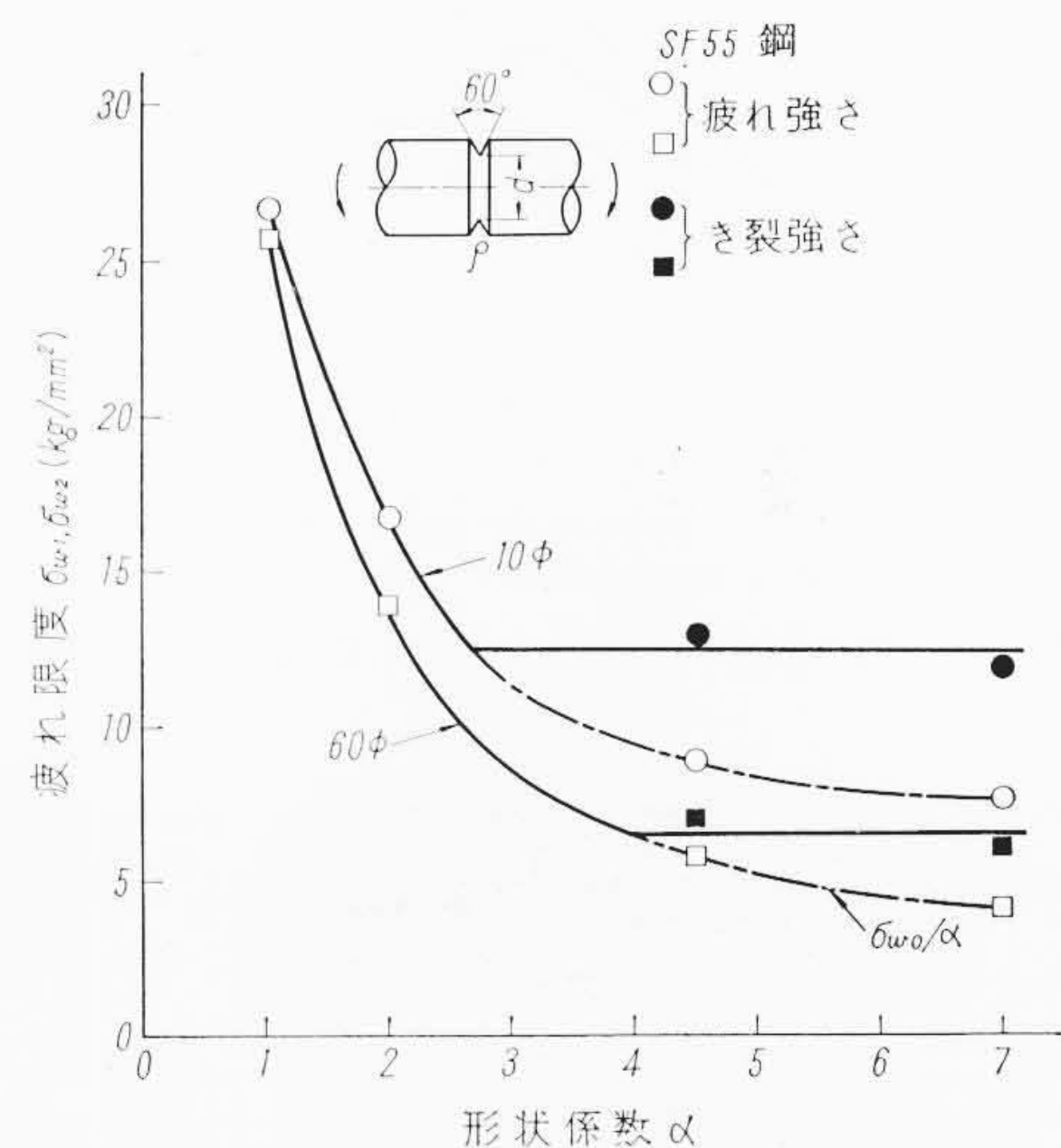
従来小形の標準試験片については切欠のある場合の疲れ強さはかなり詳しくわかっているが、寸法効果に関連して求められたものは少ない。ここでは各種材料につき特に鋭い切欠のある場合の疲れ強さについて調べた結果⁽²⁾を述べる。

(1) 形状係数と疲れ限度の関係

一般に軸としてよく用いられる SF 55 鋼(C 0.34~0.36%, $\sigma_B=55\sim57\text{ kg/mm}^2$) につき 60 度環状みぞ切欠をつけ回転曲げ疲れ



第7図 切欠試験片の疲れ強さ(その1)



第8図 切欠試験片の疲れ強さ(その2)

強さを求めた。鋭い切欠材では荷重の繰返し回転が 10^7 回に達しても破断しない場合に、切欠底に微小の疲れき裂が停留することがある。このような疲れ強さをき裂疲れ限度 (σ_{w2}) と称し、切欠底にき裂を生じない疲れ強さの上限値を疲れ限度 (σ_{w1}) と称することとする。直径 10 mm と 60 mm の大小切欠試験片につき得られた切欠の形状係数と疲れ限度の関係を第7図および第8図に示す。

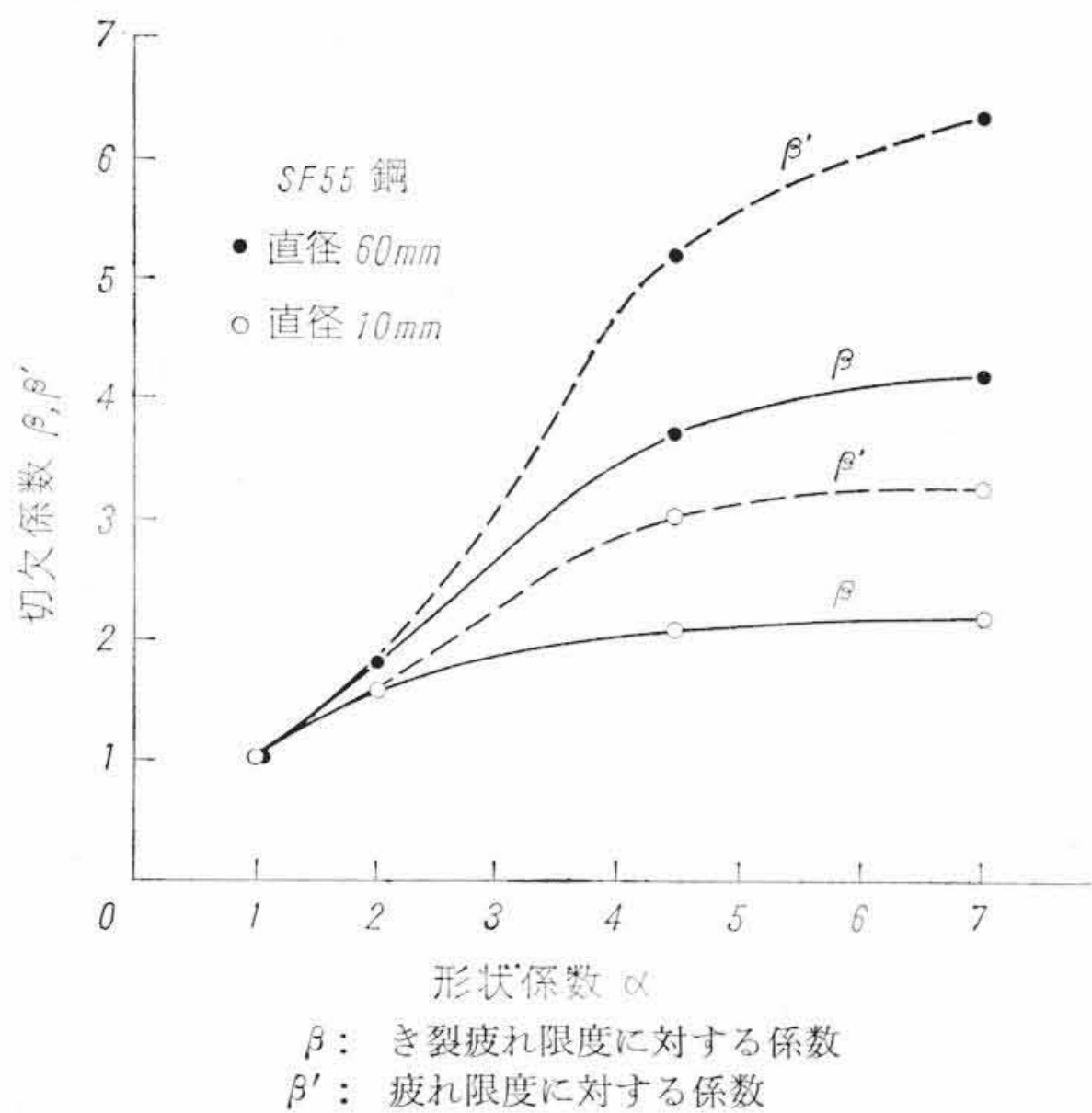
いずれも形状係数が大きくなるにしたがい疲れ限度は小さくなるが、形状係数 $\alpha=2.7$ より大きい切欠ではき裂疲れ限度と疲れ限度とが存在し、前者は形状係数が大きくなっても大差なく、後者は形状係数が大きくなるにしたがい次第に低下し、いずれも大形材のほうが低い値を示す。第7図は疲れ限度を切欠底に局部的にもき裂の生じない疲れ限度として求めた場合である。この場合は図からわかるように平滑材の疲れ限度 σ_{w0} を形状係数 α で除した値よりも小さい疲れ強さを示すから注意を要する。この局部き裂は材質の不均一、欠陥の分布に関係するが、切欠底の局部的き裂といえども工業上は問題となることがあるので、この強さを無視することはできないであろう。切欠の形状のみに関係する力学上からは一応切欠底の材質を均一とみて、切欠底の全周にき裂が生ずるかどうかで疲れ限度を定義することが妥当と考えられる。第8図はこのようにして求めた形状係数と疲れ限度の関係を示し、大形の場合これらの実験点は σ_{w0}/α 線によく乗る。このことは大形の切欠材では形状係数と切欠係数は等しいとして疲れ強

きを見積もれば一応軸の全周き裂を対象とした疲れ強さの見積もりはできよう。き裂疲れ限度と疲れ限度のいずれの強さで軸を設計するかは、機種や負荷条件によって決められるべきであるが、車軸などでは比較的荷重変動も少ないため、軸の大きさの制限のためき裂疲れ限度で設計される傾向にあるが、安全のためにはやはり停留き裂も生じないように応力集中部に局部的に高周波表面焼入れ、圧延などの対策をして疲れ限度で設計することが望ましい。停留き裂の存在の発表されたのは 1951 年であり、これが強さのうえで問題視されはじめたのは近年であるから、古い時代の

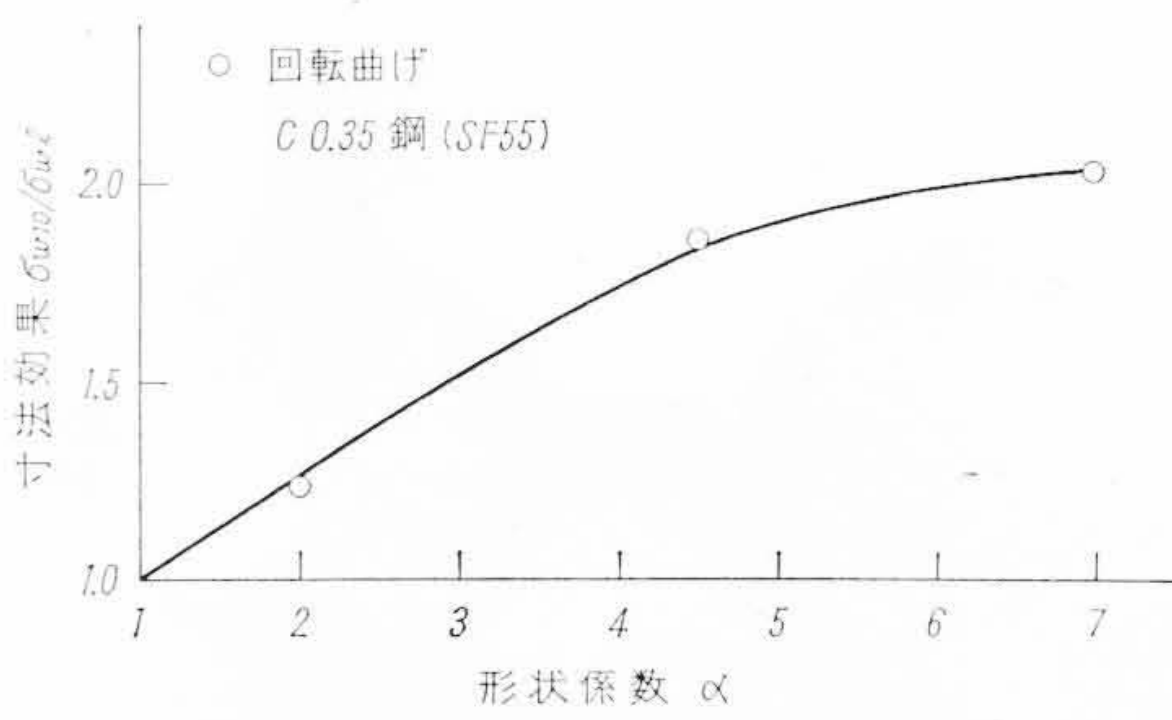
軸の設計では、き裂疲れ強さになっている恐れのあるものもあり、疲れ強さの資料でも鋭い切欠試験片の疲れ限度はき裂疲れ限度のみが求められているのでこれらの機械部品や資料の使用については再検討の必要があろう。き裂疲れ限度と疲れ限度に分かれるいわゆる分岐点においては、 $\alpha\sigma_w=\sigma_s$ (σ_s : 降伏点) なる関係が成り立つことが石橋氏⁽³⁾によって提案され、筆者の小形材の実験結果もよくこれに合っている。したがってこれによって鋭い切欠に停留き裂の発生する目安をつけることができよう。

(2) 形状係数と切欠係数

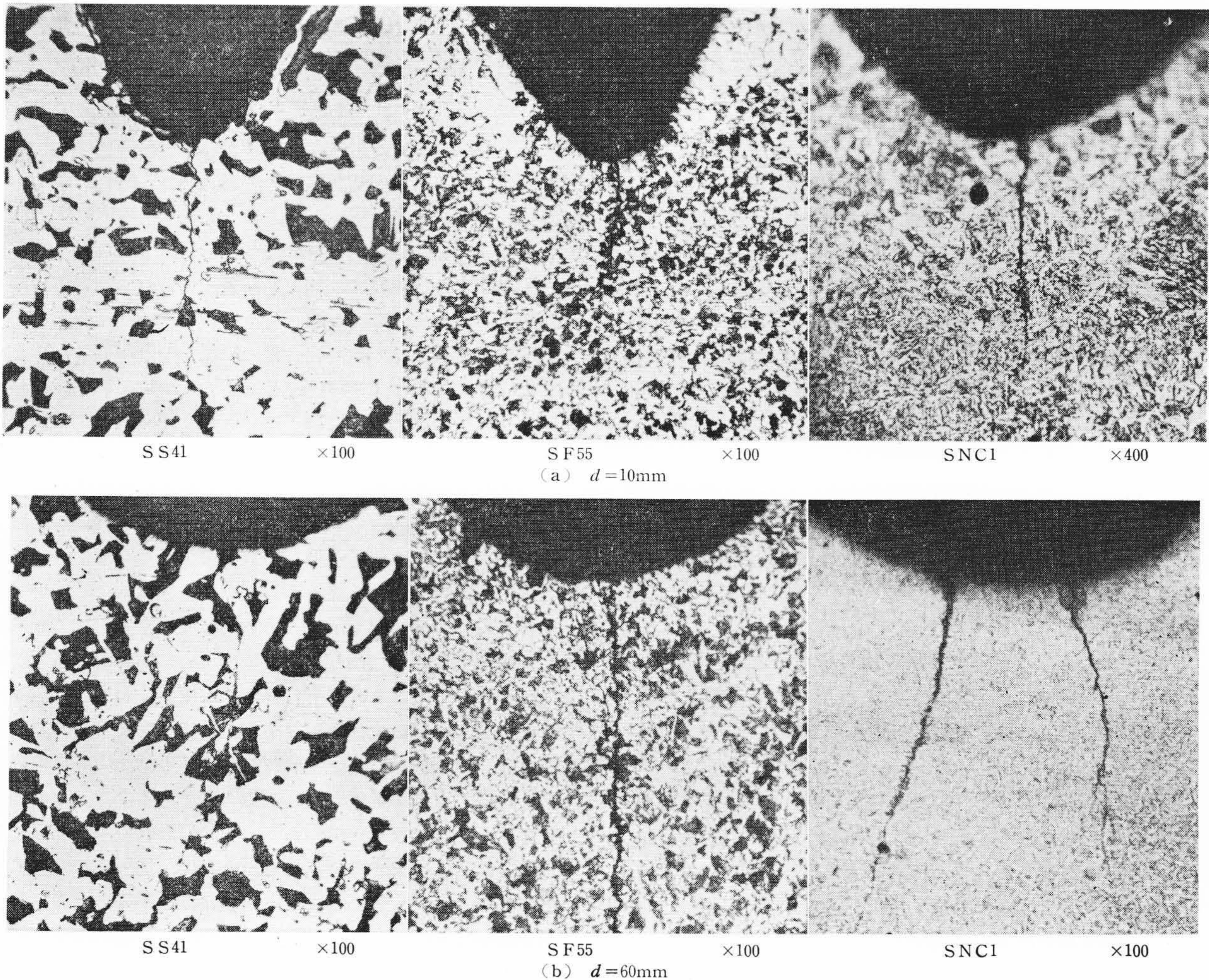
前記の SF 55 鋼の切欠試験片についての実験から求められた形状係数と切欠係数の関係を図示すると第 9 図のようになり、小形材では α が大きくなっても β はそれほど大きくならないが、大形材では α と β が $\alpha=4$ 程度までは $\alpha\approx\beta$ の関係になるから注意が必要である。



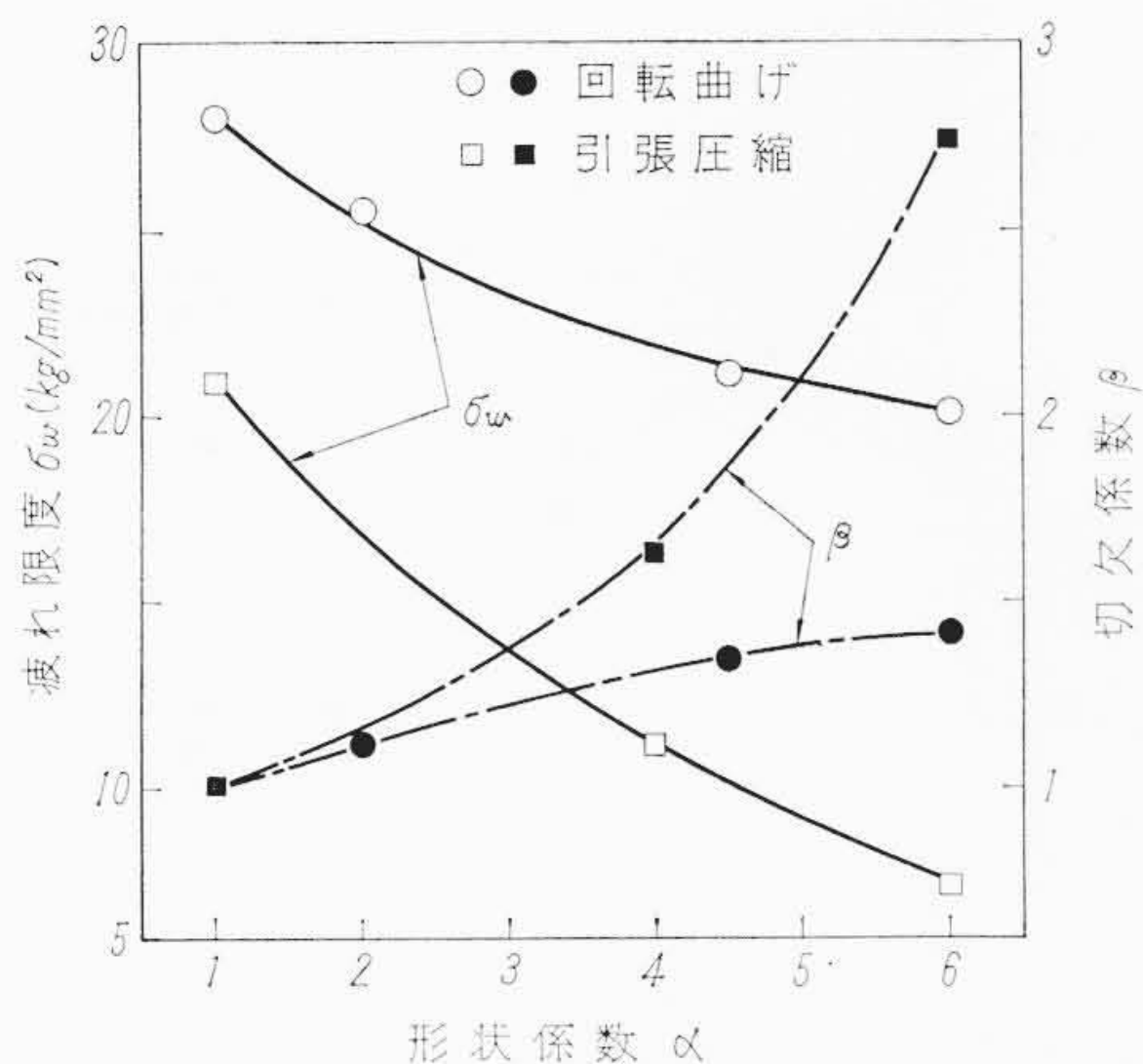
第 9 図 切欠試験片の形状係数と切欠係数の関係



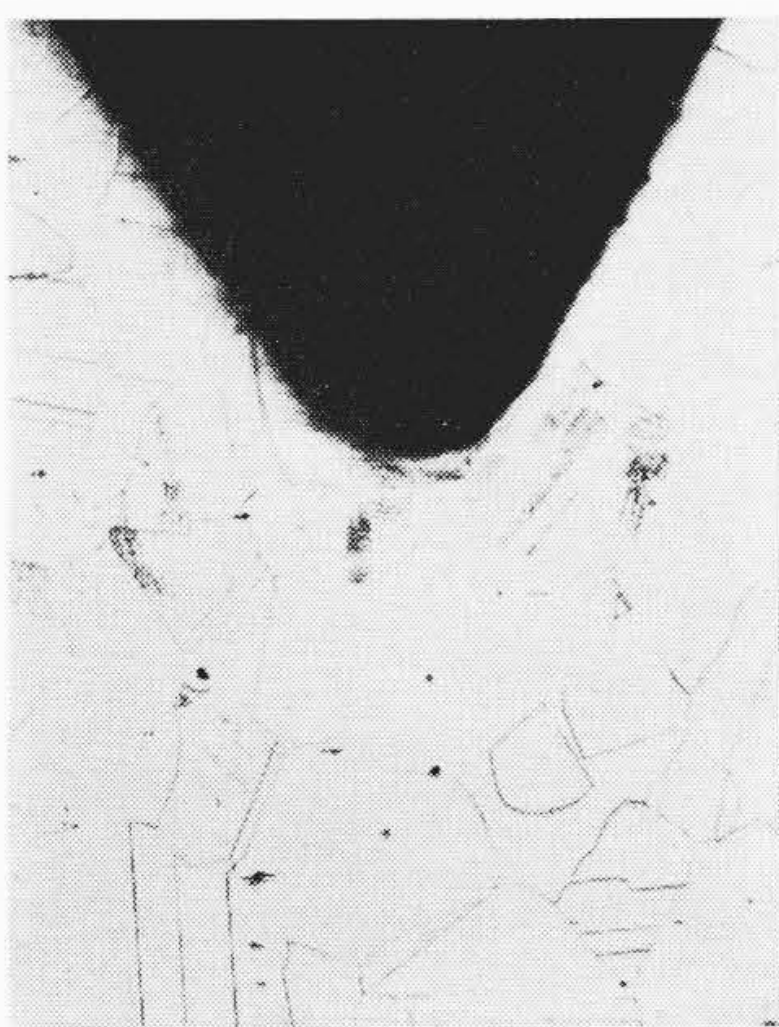
第 10 図 切欠試験片の形状係数と寸法効果



第 11 図 切欠底の停留き裂



第12図 形状係数と疲れ限度，切欠係数の関係(SUS 27 鋼)

第13図 切欠底の顕微鏡写真(×100)
SUS 27 鋼, α=6

(3) 形状係数と寸法効果

直径 10 mm の試験片のき裂疲れ限度 σ_{w10} と 60 mm 試験片のき裂疲れ限度 σ_{w1} の比を寸法効果とすれば，第 10 図のように回転曲げに対しては，形状係数が大きくなるにしたがい寸法効果も大きくなり，SF 55 鋼で $\alpha=7$ にもなると疲れ強さでは大形材は小形材の 1/2 に低下することがわかる。

(4) 停留き裂

鋭い切欠底に生じる停留き裂の長さは，切欠の形状係数が小さい場合のほうが長く，また小形材に比し大形材のほうが長い。これらは停留き裂の発生機構によるもので，切欠底付近の応力分布，応力こう配に影響される。第 11 図に大小試験片の停留き裂の一例を示す。低，中炭素鋼に比し焼入調質された NiCr 鋼のような材料では，平滑材では前者に比べ疲れ限度がかなり大きいにもかかわらず，鋭い切欠がある場合のき裂疲れ限度はかえって小さくなる。切欠底に生ずるき裂も前者と異なり，局部き裂は認められず切欠底全周に生じており，第 11 図に示すようにより均質なため炭素鋼と異なり 2 本のき裂の発生も認められる。18-8 ステンレス材では第 12 図に示すように，回転曲げおよび引張圧縮荷重に対して，切欠係数が炭素鋼に比べ比較的小さく， $\alpha=6$ の鋭い切欠でもき裂強さは認められず第 13 図のように切欠底に停留き裂を発見できない。停留き裂は生ずるが破断はしないき裂強さで軸を設計する場合は，標準試験片に比べ大形材では疲れ限度とき裂疲れ限度の差が小さいこと，また特殊鋼のような焼入調質鋼では炭素鋼に比べこの値が小さいことに注意する必要がある。切欠底に全周に生ずるき裂を対象として，き裂疲れ限度を σ_{w2} ，き裂の生じない疲れ限度を σ_{w1}' とすれば σ_{w2}/σ_{w1}' には第 1 表のように寸法の影響がみられない。このことを利用して，鋭い切欠のある大形材

第1表 き裂疲れ限度と疲れ限度の関係

鋼種	形状係数	直径 mm	疲れ限度 kg/mm ²			σ_{w2}/σ_{w1}	σ_{w2}/σ_{w1}'	σ_{w2}/σ_{w1}	σ_{w2}/σ_{w1}'
			σ_{w2}	σ_{w1}	σ_{w1}'				
SF55	4.5	10	13.0	7.0	9.0	6.0	4.0	1.9	1.44
		60	7.0	3.0	5.0	4.0	2.0	2.5	1.40
	7.0	10	12.0	6.0	8.0	6.0	4.0	2.0	1.50
		60	6.0	1.5	4.0	4.5	2.0	4.0	1.50
SS41	7.0	10	12.0	4.0	7.0	8.0	3.0	3.0	1.72
		60	6.0	1.5	4.0	5.5	1.5	4.7	1.75
SNC1	7.0	10	10.5	7.0	8.0	3.5	2.5	1.5	1.31
		60	13.0	2.0	5.0	11.0	8.0	6.5	2.60

σ_{w1} : 切欠底に局部的に停留き裂を生じない疲れ限度

σ_{w1}' : 切欠底に全周にわたり停留き裂を生じない疲れ限度

σ_{w2} : き裂疲れ限度

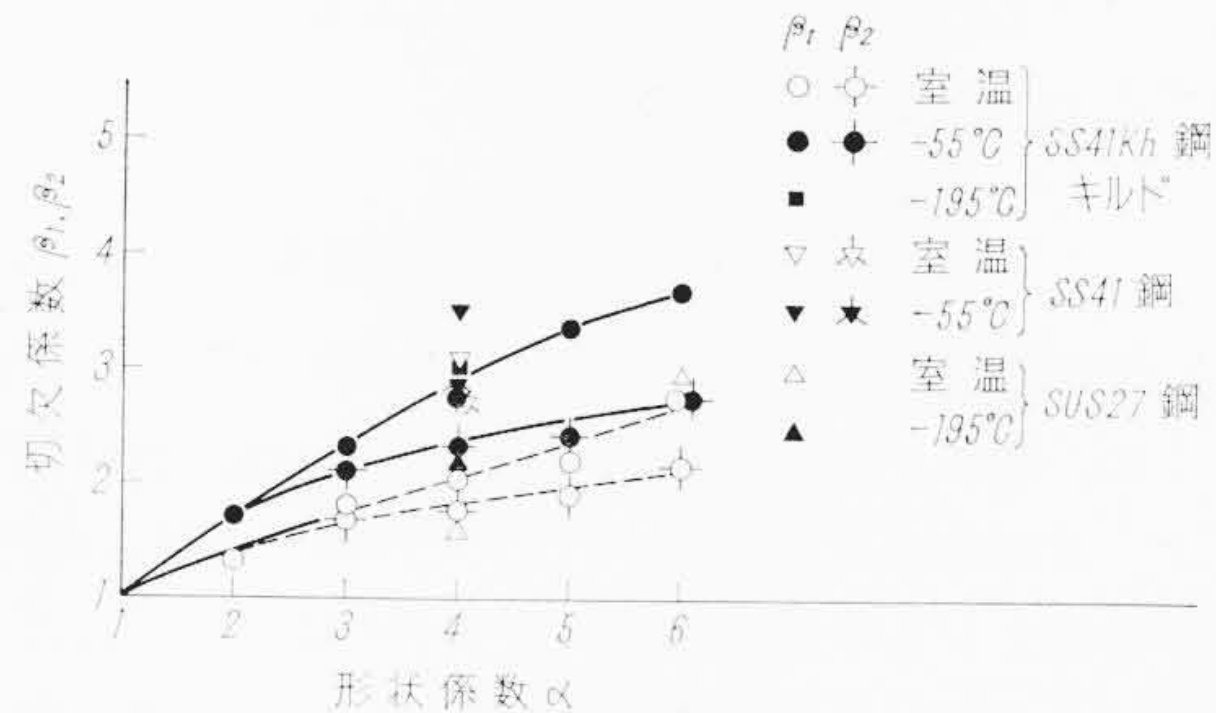
第2表 低温における切欠材の疲れ試験結果

鋼種	形状係数 α	室 温				-55°C				-195°C	
		σ_{w2}	σ_{w1}	β_2	β_1	σ_{w2}	σ_{w1}	β_2	β_1	σ_{w1}	β_1
キルド鋼 SS41Kh	1.0	—	19.3	—	1.00	—	27.5	—	1.00	54.0	1.00
	2.0	—	14.5	—	1.33	—	16.0	—	1.72	—	—
	3.0	11.4	10.7	1.69	1.80	13.0	12.0	2.12	2.29	—	—
	4.0	11.0	9.5	1.75	2.03	11.9	10.1	2.31	2.72	18.0	3.00
	5.0	10.1	8.8	1.91	2.19	11.4	8.2	2.41	3.35	—	—
	6.0	9.0	7.0	2.14	2.76	10.0	7.5	2.75	3.67	—	—
軟 鋼 SS41	1.0	—	21.7*	—	1.00	—	28.8	—	1.00	—	—
	4.0	8.0	7.0	2.71	3.10	10.0	8.0	2.88	3.51	—	—
ステンレス鋼 SUS27	1.0	—	20.8*	—	1.00	—	—	—	—	39.0	1.00
	4.0	—	11.0	—	1.61	—	12.9	—	—	18.0	2.17
	6.0	—	7.0	—	2.97	—	—	—	—	—	—

注：* 他の実験結果よりの推定値

β_1 : 疲れ限度に対する切欠係数

β_2 : き裂疲れ限度に対する切欠係数

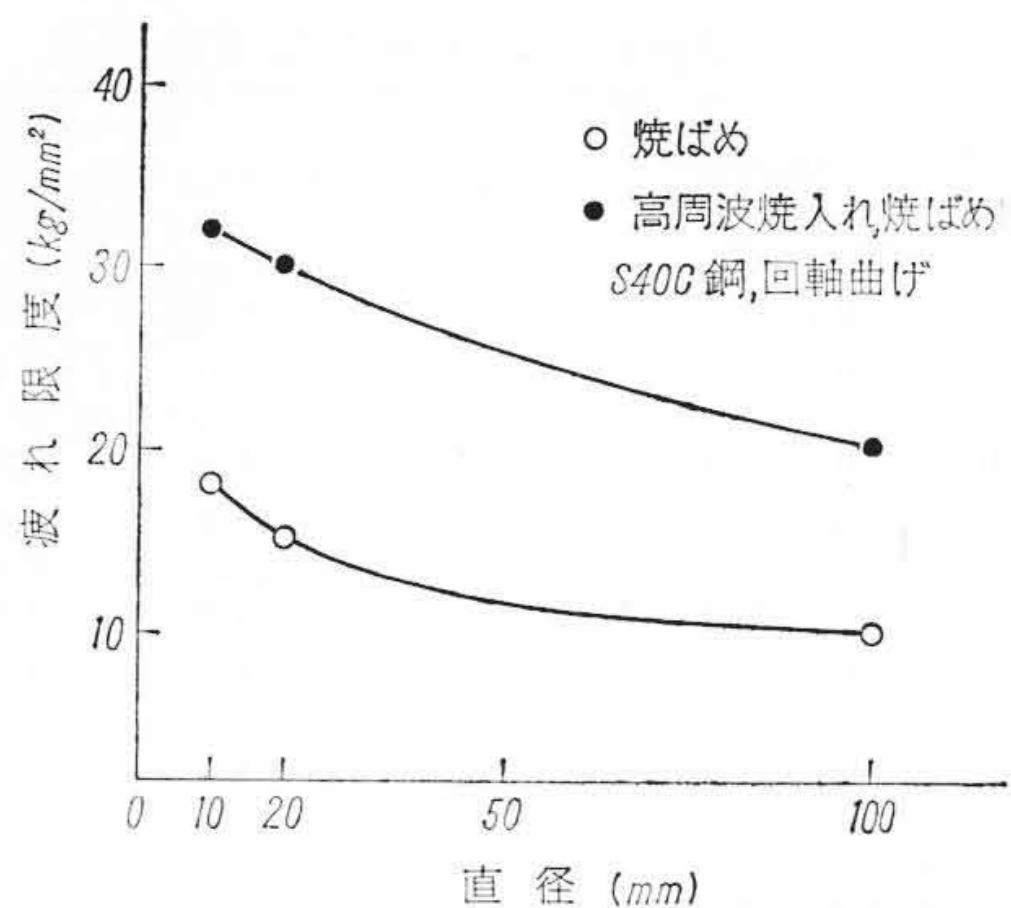


第14図 形状係数と切欠係数の関係に及ぼす温度の影響

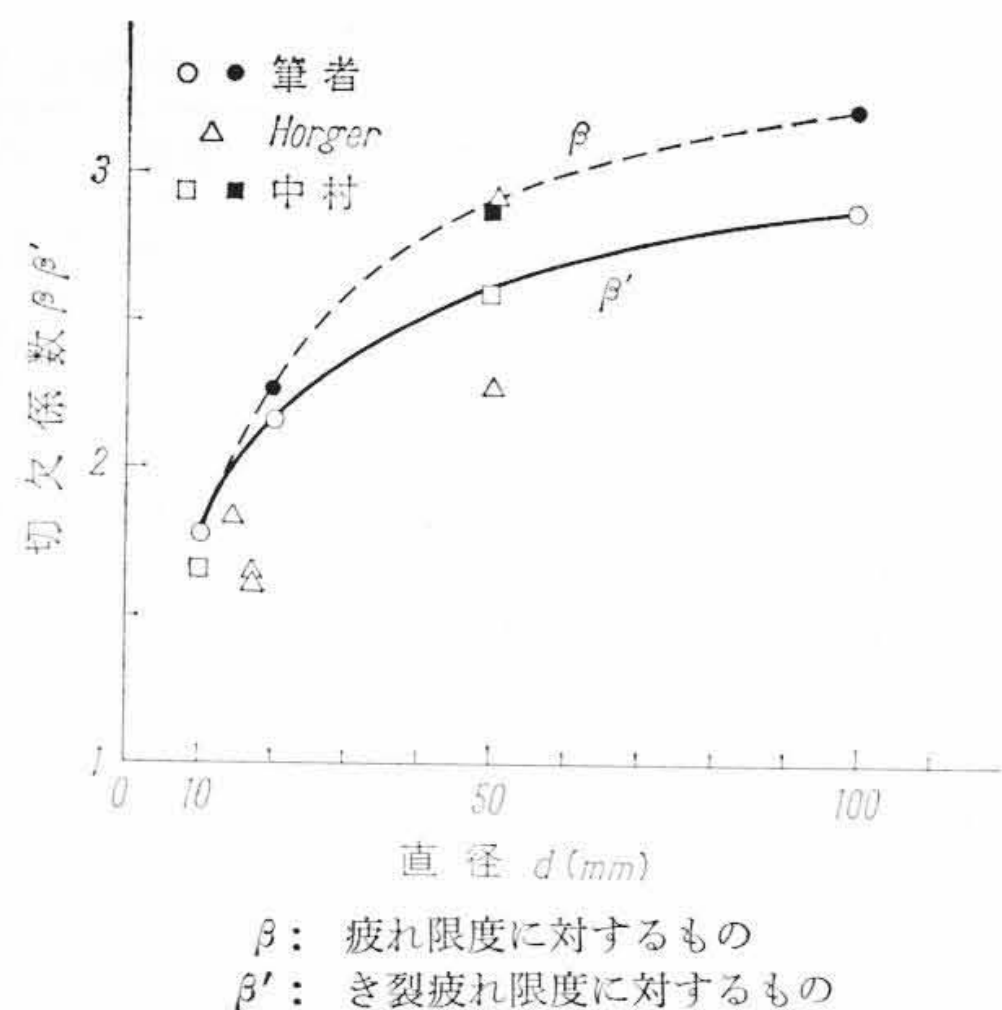
疲れ強さを小形材の実験結果から推定することができよう。SNC 1 鋼で大形材の σ_{w2}/σ_{w1}' の値が大きいのは大形材では焼入れによる圧縮残留応力の影響があったためと思われる。

(5) 低温における切欠材の疲れ強さ⁽⁴⁾

低温になると第 14 図に示すように切欠係数が大きくなるため，疲れ強さは低温になるにしたがい強くなっても，切欠材ではそれほど強くない。また第 2 表に示すようにキルド鋼では室温，-55°C ではき裂疲れ強さが認められるが -195°C になると停留き裂は存在しない。き裂の発生と同じに脆性(ぜいせい)破断することから，低温で使用する軸に鋭い切欠や溶接などによる不溶着部を設けることは避けたほうがよい。18-8 ステンレス鋼では前述のようにき裂疲れ強さはなく，-195°C でも疲れ破面を呈し，き裂の伝ば速度の遅いことを示す。しかし疲れき裂が発生する疲れ強さそのものでは，衝撃値の低いキルド鋼でも -195°C で引張圧縮疲れ限度は平滑材で 54 kg/mm²，ステンレス鋼では 39 kg/mm²，切欠材 ($\alpha=4$) でキルド鋼，ステンレス鋼とも 18 kg/mm² と大差ない強さを示すことから，き裂が発生してからのは別問題として，き裂が発生しない強さで十分安全に強さを見積もっておけば



第 15 図 はめあい軸の寸法効果と高周波焼入れ効果



第 16 図 はめあい軸の切欠係数と寸法効果

キルド鋼でも低温で十分使用できよう。

またこのことが脆性と疲れ強さを直ちに結びつけることの誤りを指摘できる一つの実験例といえよう。

4. はめあい軸の疲れ強さ

はめあい軸の疲れ破損がなお今日軸の破損中で多くを占めるのは前述のように、疲れき裂の発生場所がはめあい部内側であり検出しがたいこと、fretting corrosion によりはめあい部に停留き裂を生じ、時間の経過とともに疲れ強さが低下する傾向にあること、寸法効果が大きいことなどのために、切欠試験片に比べ疲れ強さの低下が著しいためである。

(1) はめあい軸の寸法効果⁽⁵⁾

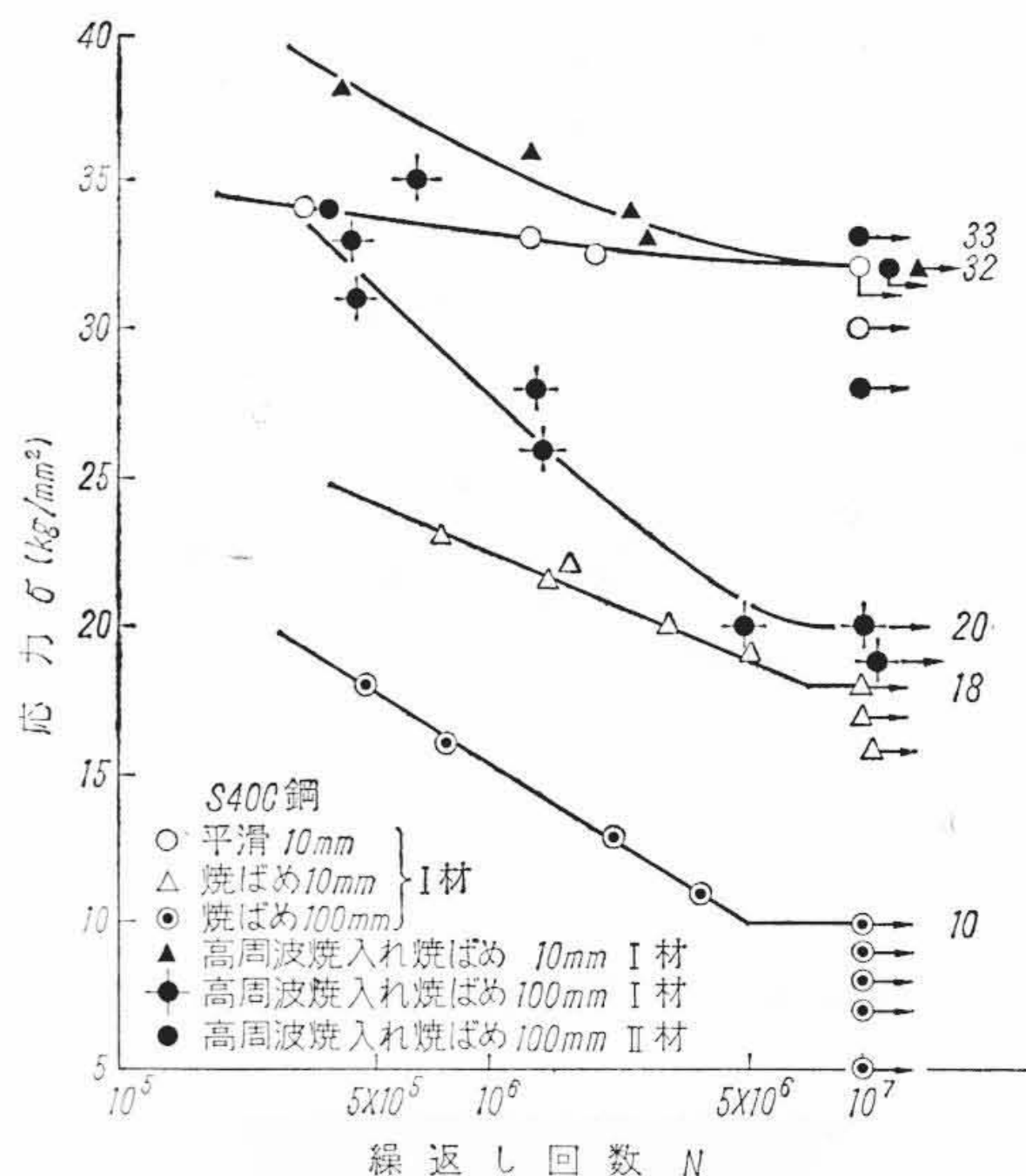
はめあい軸の直径が大きくなるにしたがい疲れ限度も第 15 図に示すように低下し、切欠係数で示すと第 16 図のように大きくなる。しかも大形材軸でははめあい部に停留き裂を生ずる応力も小形材に比べて低く、き裂は長く全周に生ずる傾向にあるから注意を要する。

(2) 表面高周波焼入れの効果⁽⁵⁾

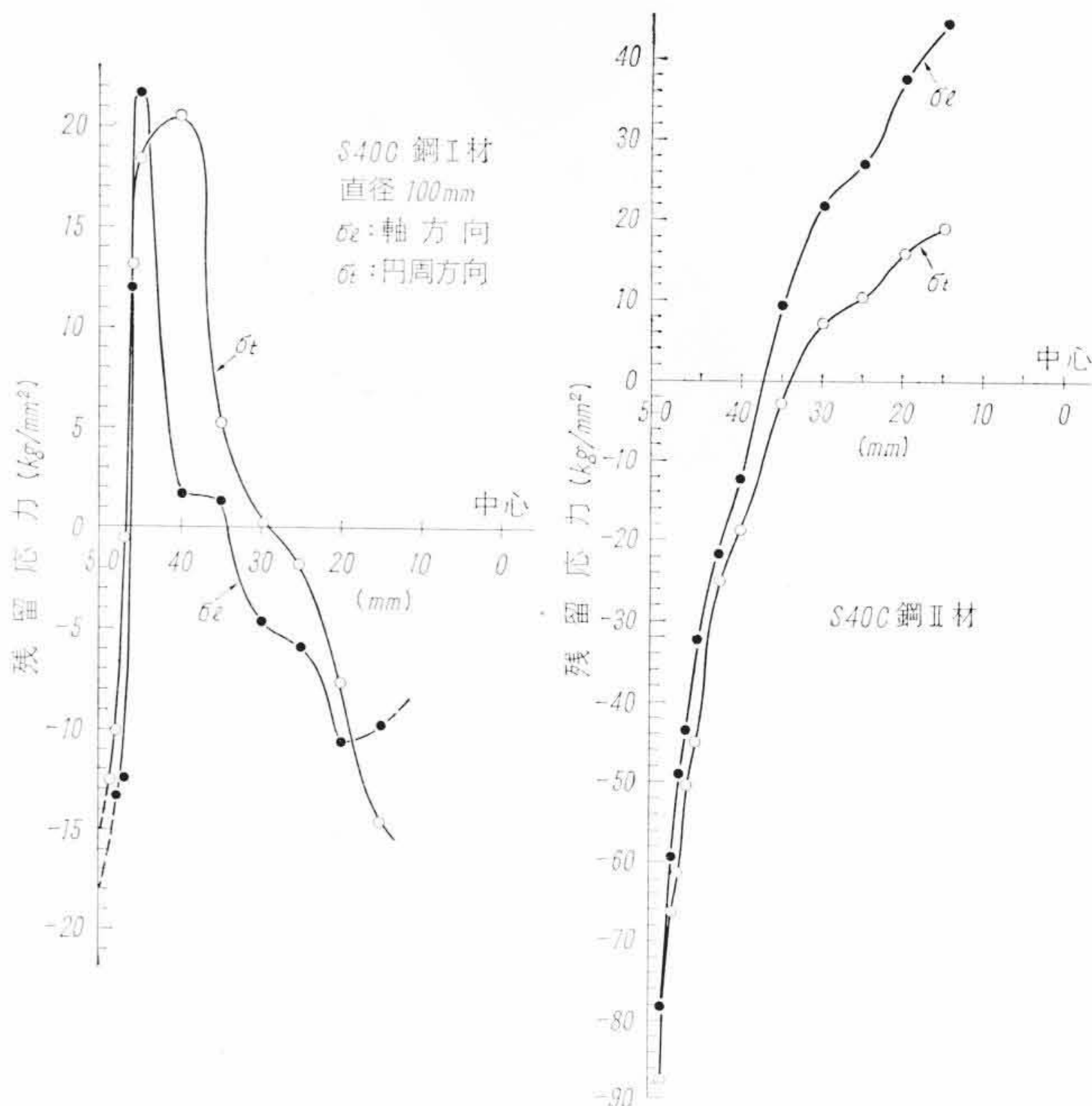
はめあい部に表面高周波焼入れを行なえば第 17 図に示すように疲れ強さの増大に著しい効果があり、特に大形材のほうが焼入れしないものの 2～3 倍と増大率が大きい。しかしこのような焼入れ材では小形と大形で焼入れによる効果が異なり、したがって残留応力やかたさの分布が違いため寸法効果が第 15 図に示すようにみられる。

したがって小形材の疲れ試験結果から大形材の疲れ強さを見積もるといふわけにゆかない。

高周波焼入れは、焼入れ条件によって残留応力分布や疲労強度が異なってくる。第 17 図に示す直径 100 mm の試験片で I 材と II 材は予熱条件、移動焼入れ速度をかえて実験した場合で、I 材では第 18 図に示すように表面の圧縮残留応力もわりに小さく、



第 17 図 はめあい軸の疲れ曲線(回転曲げ)

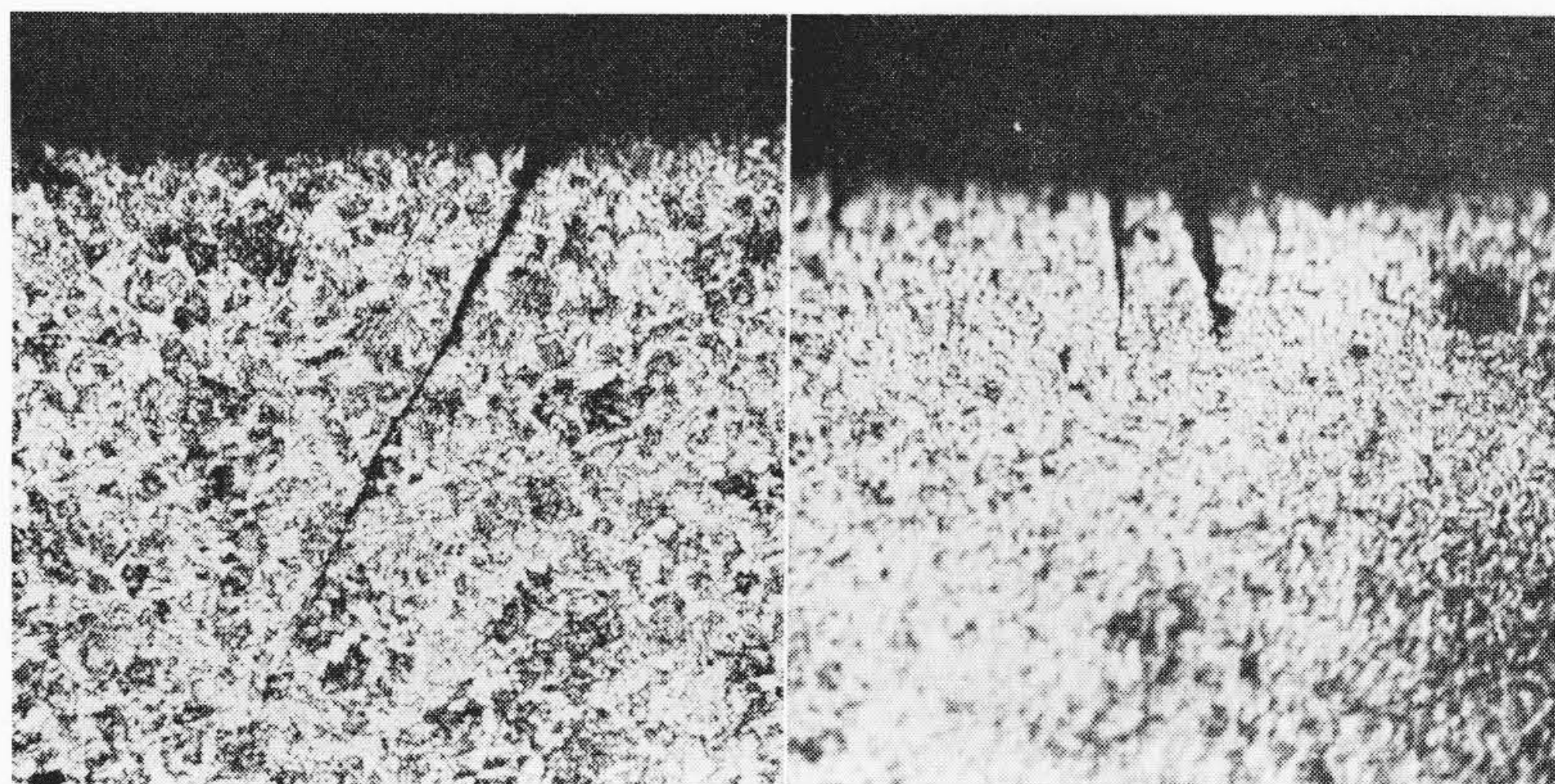


第 18 図 高周波焼入れによる残留応力分布

表面層近くにかかなり大きな引張残留応力を生じているが、II 材では表面の圧縮残留応力は大きくなり、引張残留応力の最大の点も中心部へ移行しており、第 17 図からわかるように疲れ強さで前者の 1.5 倍に増大し小形の高周波焼入れ材と同じ強さにまでなっていることは注目し得る。高周波焼入れに際しては焼入れ条件の検討と厳重な作業管理がなければ信頼のある疲れ強さは期しがたい。高周波焼入れしたものでもはめあい部に停留き裂が発生するが第 19 図のようにき裂は短く、き裂疲れ強さは高く、疲れ強さとの差は小さい。すなわち停留き裂の発生と伝ばに対して高周波焼入れが有効なことがわかる。これは鋭い切欠材についても中村氏⁽⁶⁾によって求められている。高周波表面焼入れは air drop hammer のような引圧荷重を受ける piston rod のはめあい部に対しても第 20 図に示すように有効であることがわかった⁽⁷⁾。表面高周波焼入れの効果は、焼入れによる材質の強さの増大と圧縮残留応力が平均応力として疲れ強さにきいてくることを疲れ限度線図で分けて考えれば一応の目安がつけられる⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

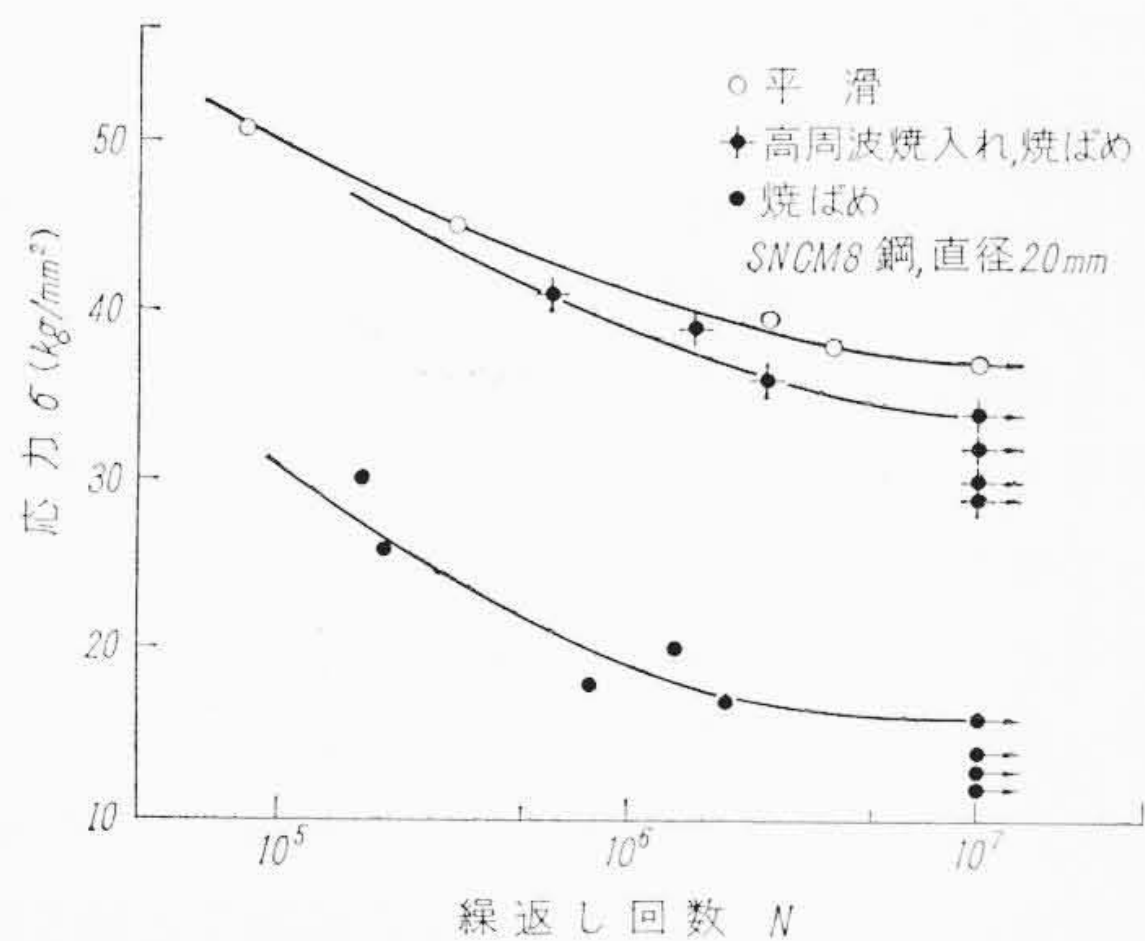
(3) 段付の効果

はめあい軸の疲れ強さを増大させる他の有効な方法は、はめあ



(a) 焼ばめ 長さ 0.4mm ×100 (b) 高周波焼入れ焼ばめ 長さ 0.025mm ×400

第19図 はめあい部の停留疲れき裂 $d=100\text{ mm}$, S40C 鋼



第20図 はめあい軸の疲れ曲線(引張圧縮)

い軸に疲れき裂を生じさせないように、はめあい部に隣接して段をつくり、はめあい部の軸径と細いほうの軸径の比および段付の半径を適当に選ぶことである。第21図は光弾性実験により限界軸径比を求めたもので、 $D'/d=1.02$ が適当なことがわかり第22図のようにこれは疲れ実験によっても確かめられた⁽⁵⁾。

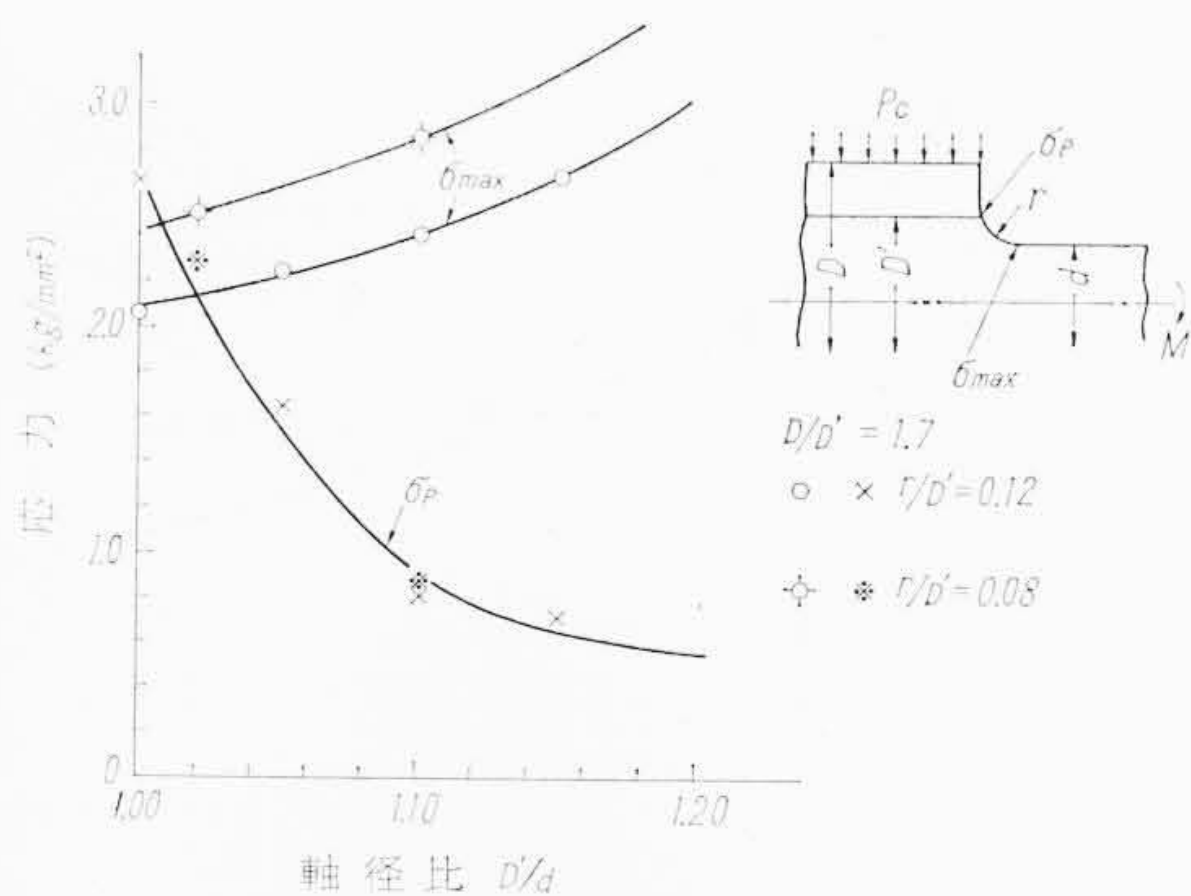
5. 欠陥のある軸の疲れ強さ

最近鋼材の製造中に生じた欠陥を非破壊的に検査する技術の進歩にとともに、欠陥材の強さの判定も厳重になってきて、製鋼技術も急速に進歩していることは喜ぶべきことである。むやみに欠陥を恐れるあまり、微細な欠陥で使用応力から考えると、強さのうえでは問題にならぬ場合でも高価な大形鋼材が廃却のうきめにあうことがある。これは機械製造者にとっては今日なお欠陥材についての強さの資料が不足し、正確な判定ができないため、unknown factor として安全率を大きくとらざるを得ないからであろう。しかし最近金属欠陥の性状や強さについての研究も盛んになってきているので次第に欠陥材の強さの判定もこれら資料を基として合理的に行なわれ、これによって機械の製作工程の短縮と原価低減ができるはずである。

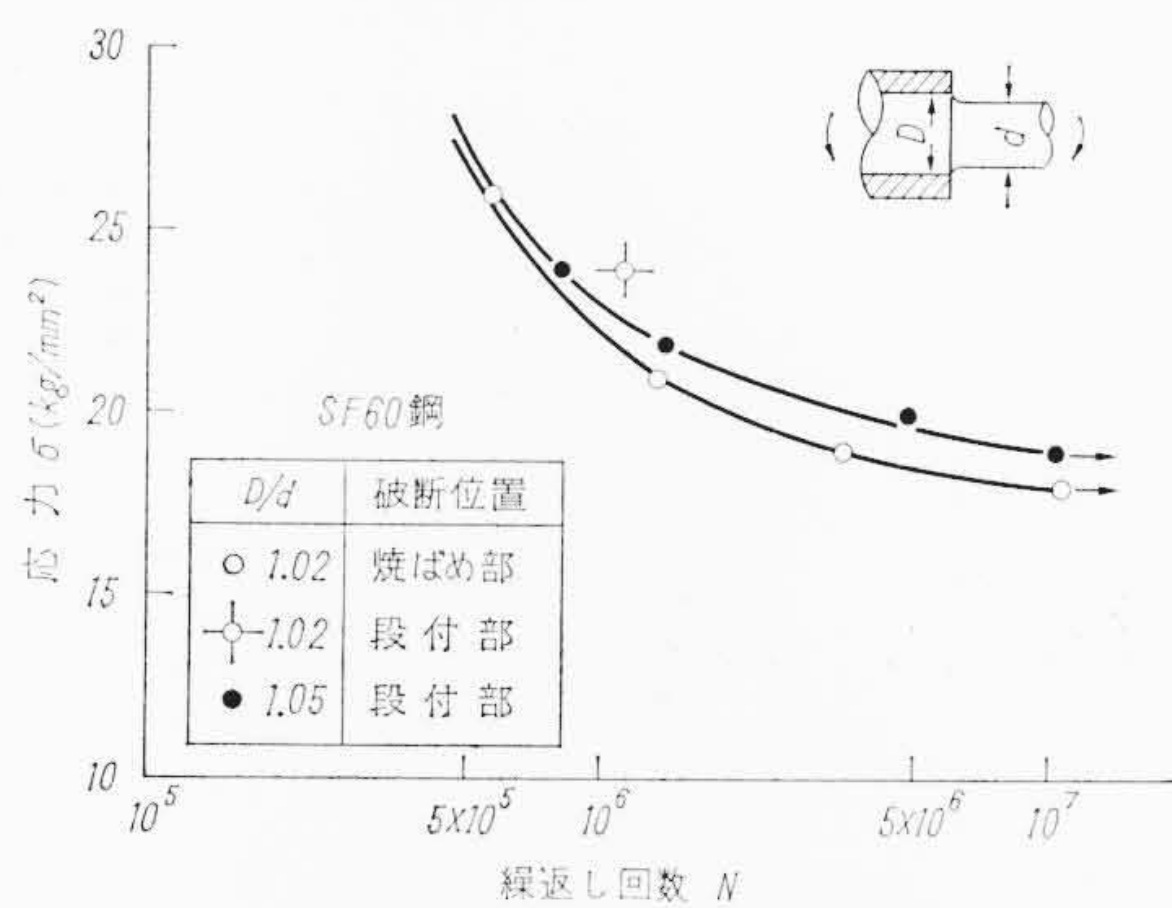
それと同時に材料製造者においてもいっそう製鋼技術の進歩に努力し、設計者の信頼を増し安全率に含まれる材料の不良の因子を小さくすべきではなかろうか。両者とも強度設計の進歩のために反省し、お互いの非を摘出することはあくまで技術の進歩に貢献する範囲にとどむべきであろう。

(1) 非金属介在物

鋼材中に含まれる非金属介在物の影響を単独に求めることは困難であるが、多くの場合介在物の周囲の地



第21図 段付部およびはめあい部の応力と軸径比の関係

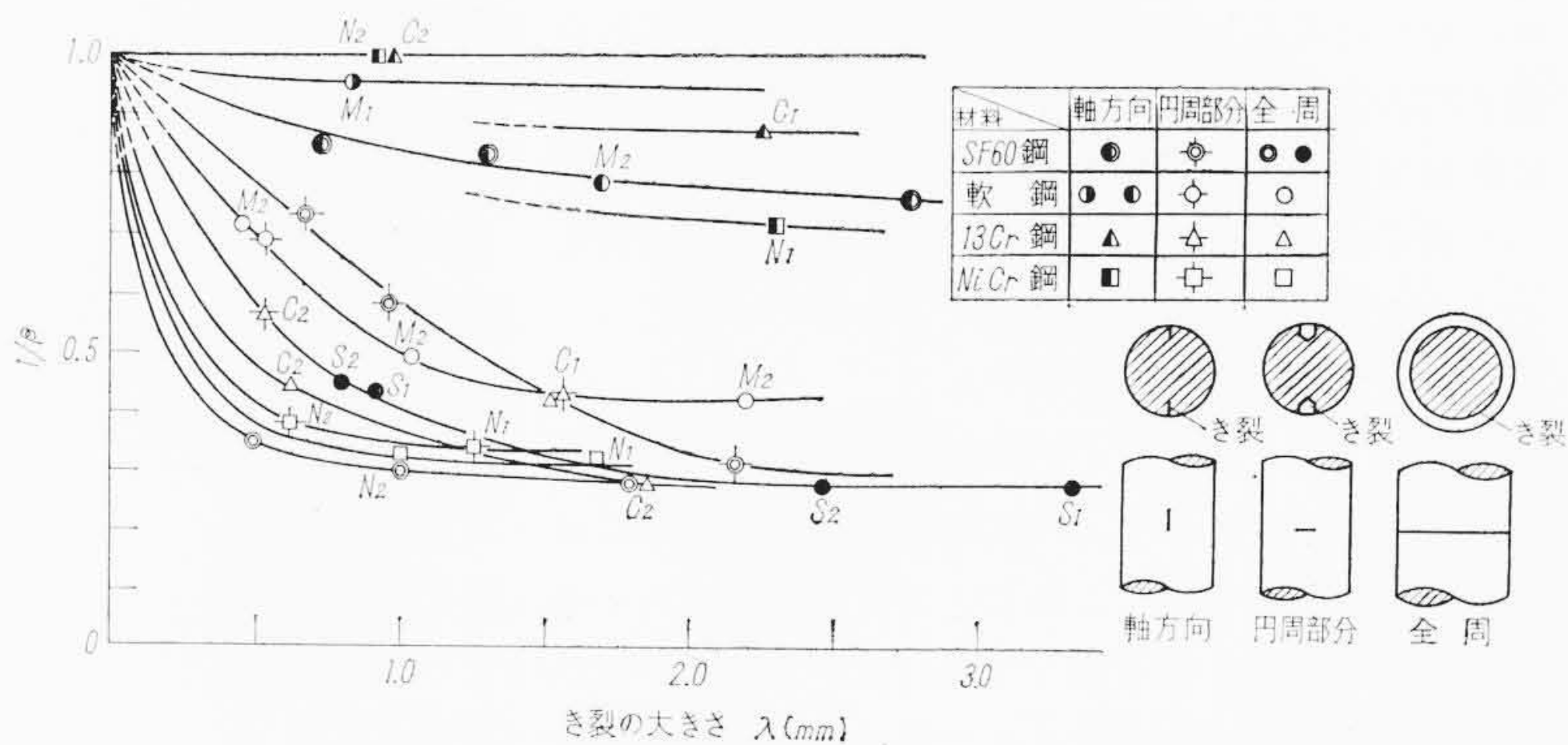


第22図 段付焼ばめ試験片の疲れ曲線

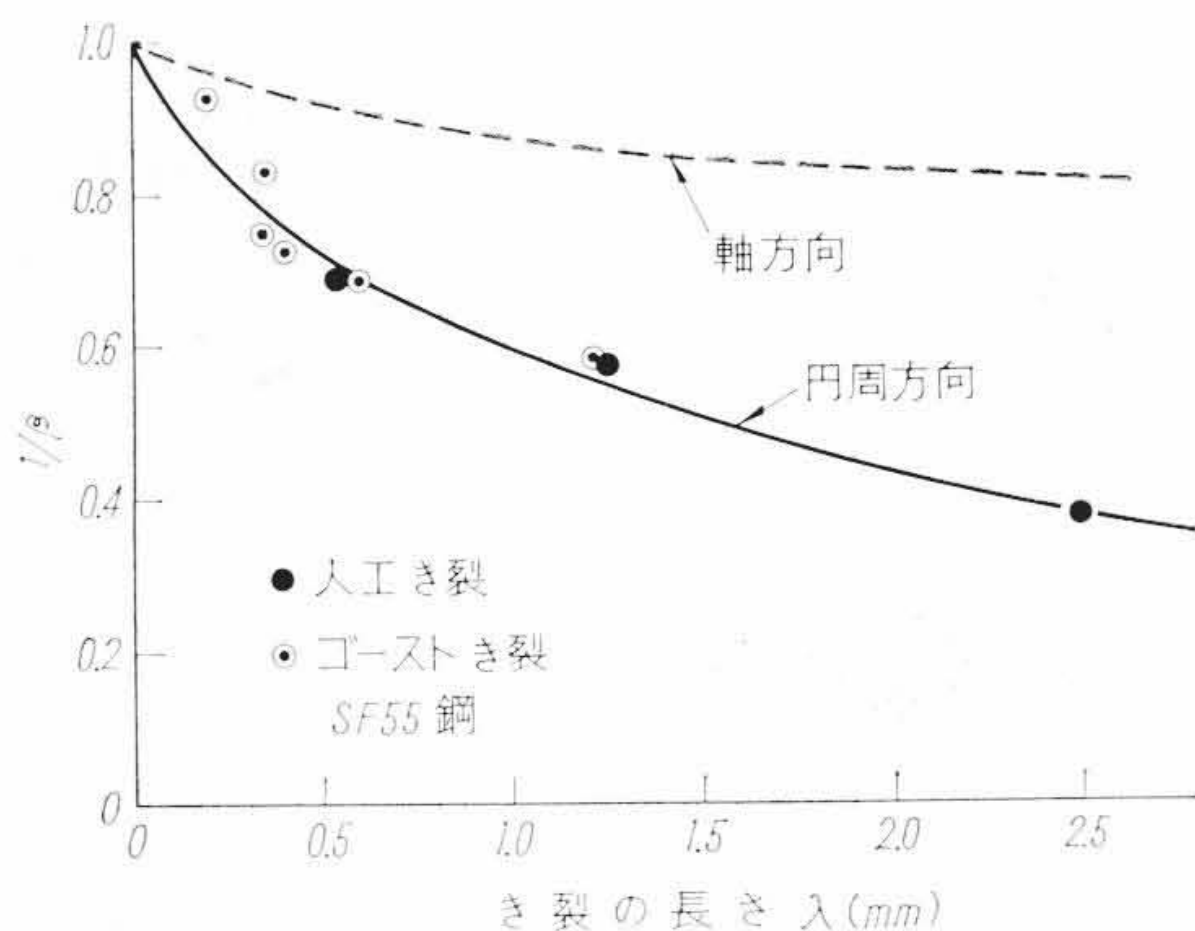
金の組織やかたさが健全部とは異なっており、これらの影響も含んだものが強さの差として求められる。大形鍛造材で非金属介在物が 0.1 mm 以下の微細なもので、地金との間にすき間やき裂をとまなっていないかぎり、疲労強度に及ぼす影響は小さく、大体の目安として約 10% の疲れ強さの低下とみればよい⁽⁸⁾。圧延鋼材に非金属介在物がある場合は圧延方向とその直角方向で異方性がかなり認められその差は約 10~20% に及ぶから注意を要する。一般にねじりの場合のほうが回転曲げに比べて異方性の疲れ強さに及ぼす影響は小さいといえよう⁽⁹⁾。

(2) き裂欠陥

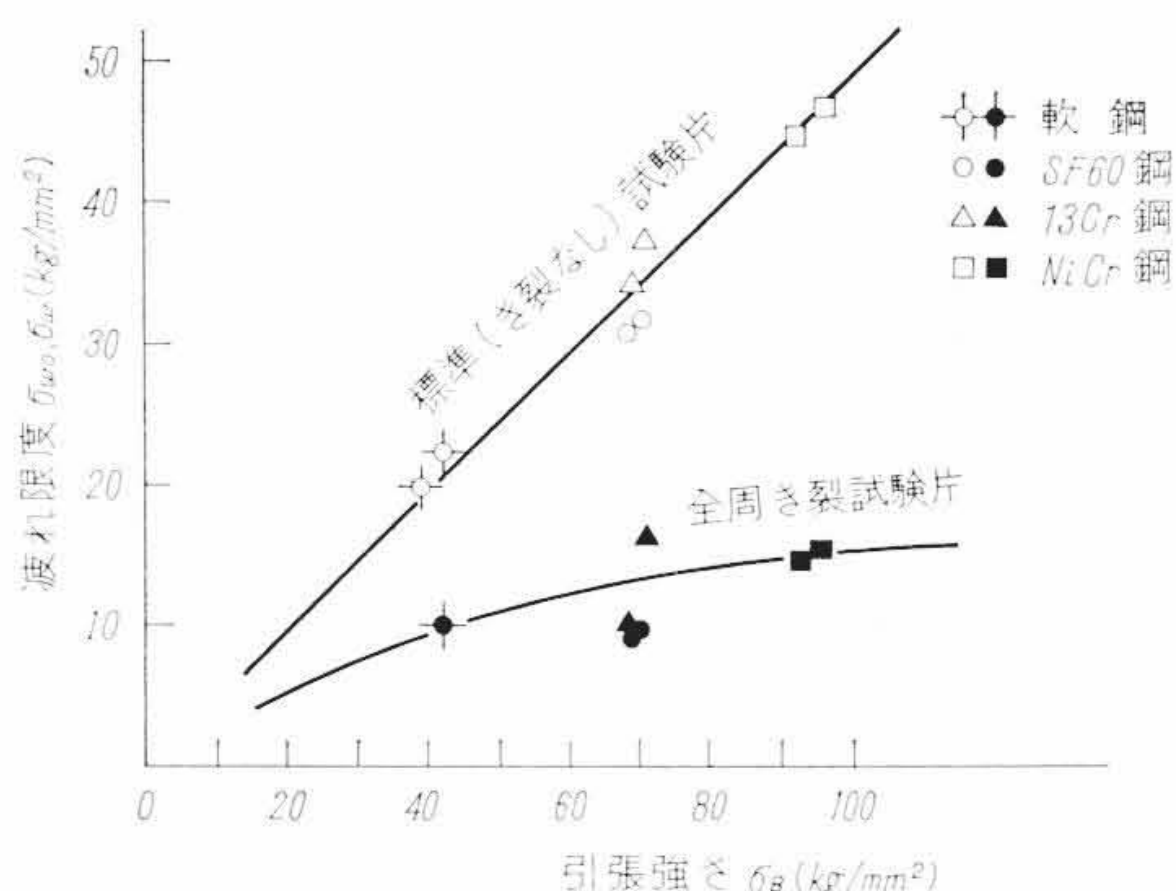
欠陥材の使用に際してもっとも問題となる欠陥で、強さに及ぼす影響も大きいため特に重要である。欠陥の大きさ、方向、位置、性状および使用条件をよく考え合わせて強さの判断をする必要がある。き裂欠陥材の疲れ強さの判定には、種々の材料につき人工き裂をつくらせて疲れ強さを求めた第23図の結果⁽¹⁰⁾が参考になろう。第24図は実物のき裂欠陥材とこの材料で作った人工き裂の疲れ強さを比較したものであり、第23図のような結果がき裂



第23図 人工き裂試験片のき裂の大きさと疲れ強さの低下の関係



第24図 人工き裂とゴーストき裂の疲れ強さの低下に及ぼす影響



第25図 材料の引張強さと疲れ限度の関係

第3表 切欠およびき裂の切欠係数

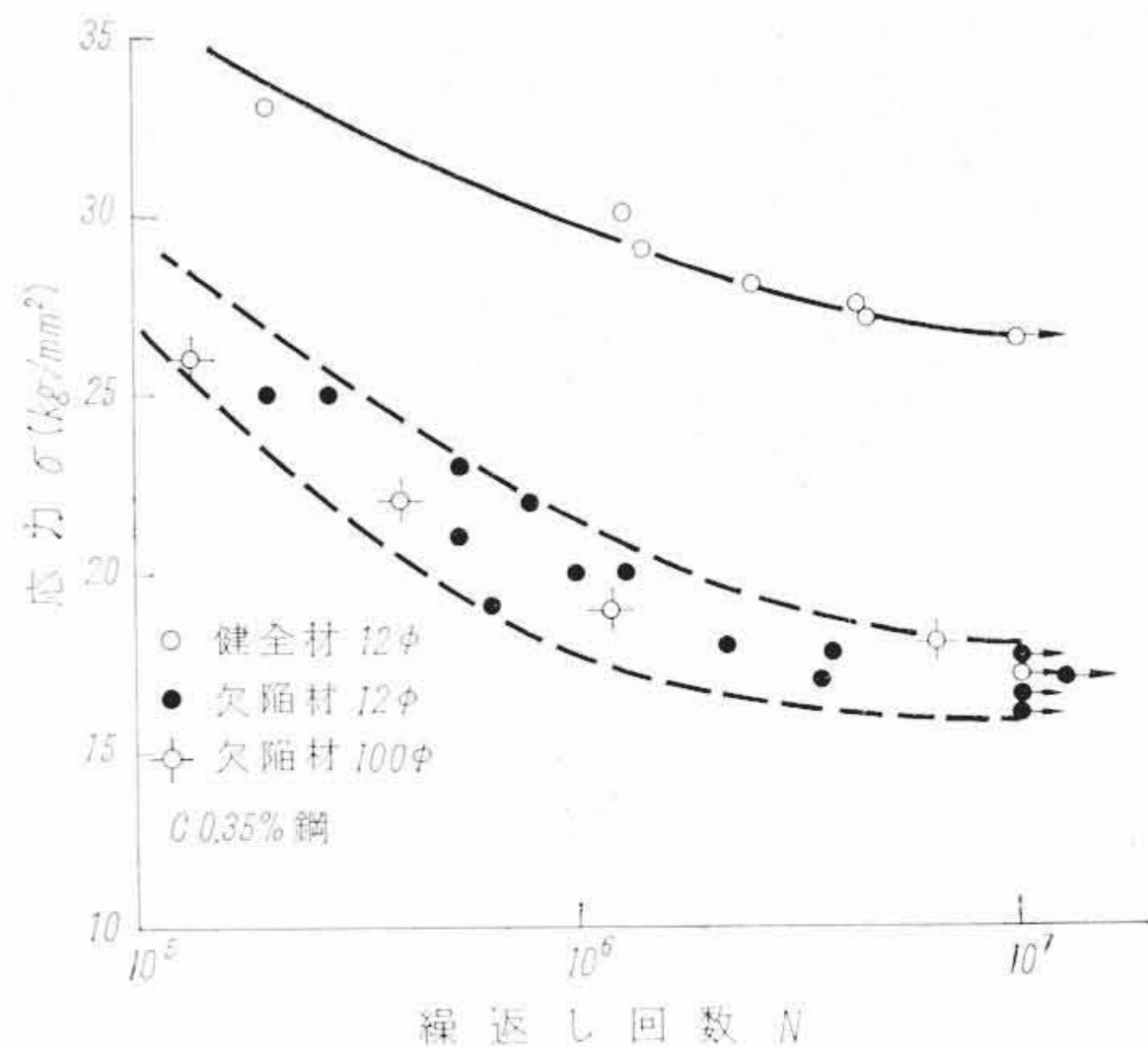
切欠形状	き裂方向	切欠のみ β_n	き裂のみ β_c	切欠およびき裂 β_{nc}	$\beta_{nc}/\beta_n \times \beta_c$
半円弧みぞ	軸方向	1.32	1.17	1.63	1.05
	円周方向	1.32	1.72	2.42	1.07
	全周	1.32	2.28	2.82	0.94
Vみぞ	全周	2.22	2.28	2.81	0.58

欠陥材の疲れ強さの判定に有用であることを示す⁽⁸⁾。

き裂がある場合は材料の引張強さが大きくなっても第25図に示すようにそれほど疲れ強さは増さない⁽¹⁰⁾。言い換えれば引張強さの大きい材料ほどき裂欠陥による疲れ強さの低下率は大きいから、焼入れ調質鋼などにキズがある場合は特に注意が必要である。

応力集中の比較的小さい($\alpha=1.7$)浅い切欠部に深さ1mmのき裂欠陥があれば、第3表⁽¹⁰⁾に示すように、切欠とき裂の両者の影響が重なり、それぞれの切欠係数の積にほぼ等しい切欠係数を示す。これに対し鋭い切欠($\alpha=3.5$)では、き裂が底にあってもその切欠係数は両切欠係数の積の約0.6倍でお互いの影響がそれほどきかなくなる。したがって一般に浅い切欠部にある欠陥ほど疲れ強さに大きな影響を及ぼすものとして注意が必要である。中心部に微細なき裂欠陥がある場合でも曲げやねじりの場合は、負荷応力分布そのほか使用条件を考えて使用できる場合もあるが、き裂の大きさ、位置と使用中におけるき裂の挙動について定期的に精密検査してゆくことが大切である。

同一大きさ(最大約1~2mm)のき裂欠陥を有する大小試験片では、第26図に示すように回転曲げ疲れ強さにほとんど寸法効果が認められない⁽¹¹⁾。このことは大きな軸から小形試験片を採取してき裂欠陥の影響を調べておけば、大形軸の疲れ強さの判定ができることを示す。また大きな軸では小さな軸におけるよりも疲れき裂の伝ば速度が大きいから、疲れ強さの点では、大きな軸に



第26図 大小欠陥材の疲れ曲線

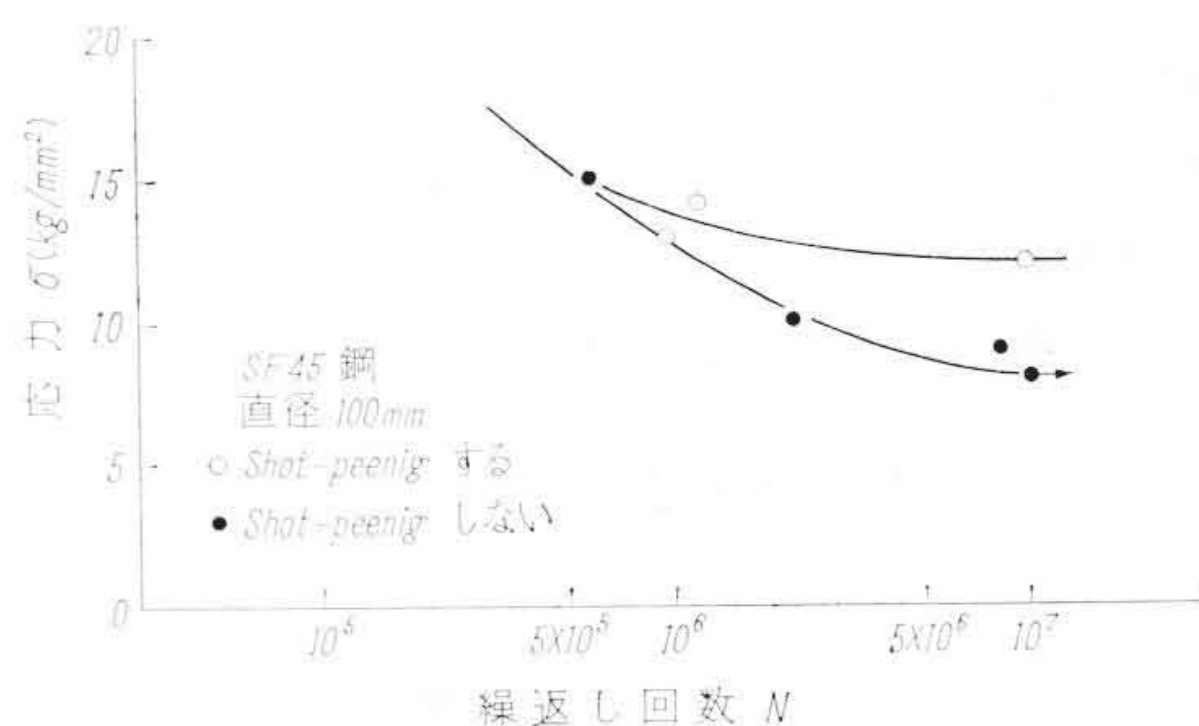
小さいき裂があるからといって、使用応力によっては安心できないことになる。以上は欠陥の数が少なく大小試験片とも表面にある場合であるが、もし大形材のほうが小形材より欠陥を多く含む場合、あるいは小形材の断面に対して欠陥の寸法が著しく大きい場合は違った結果になることは言うまでもない。

高温で使用される場合は、材料によっては高温における繰返し応力によって時効性を示し、き裂の先端の応力集中も緩和され切欠係数も低下するため、き裂は室温におけるほど疲れ強さを低下させない⁽¹²⁾。したがってき裂欠陥材では室温の疲れ強さで設計しても大過ない。ただし高温で使用される大形軸では脆性破壊の点でき裂欠陥材の使用は控えるべきで、また低温でき裂欠陥材を使用することも疲れ強さよりむしろ脆性破壊の点から厳禁すべきであろう。

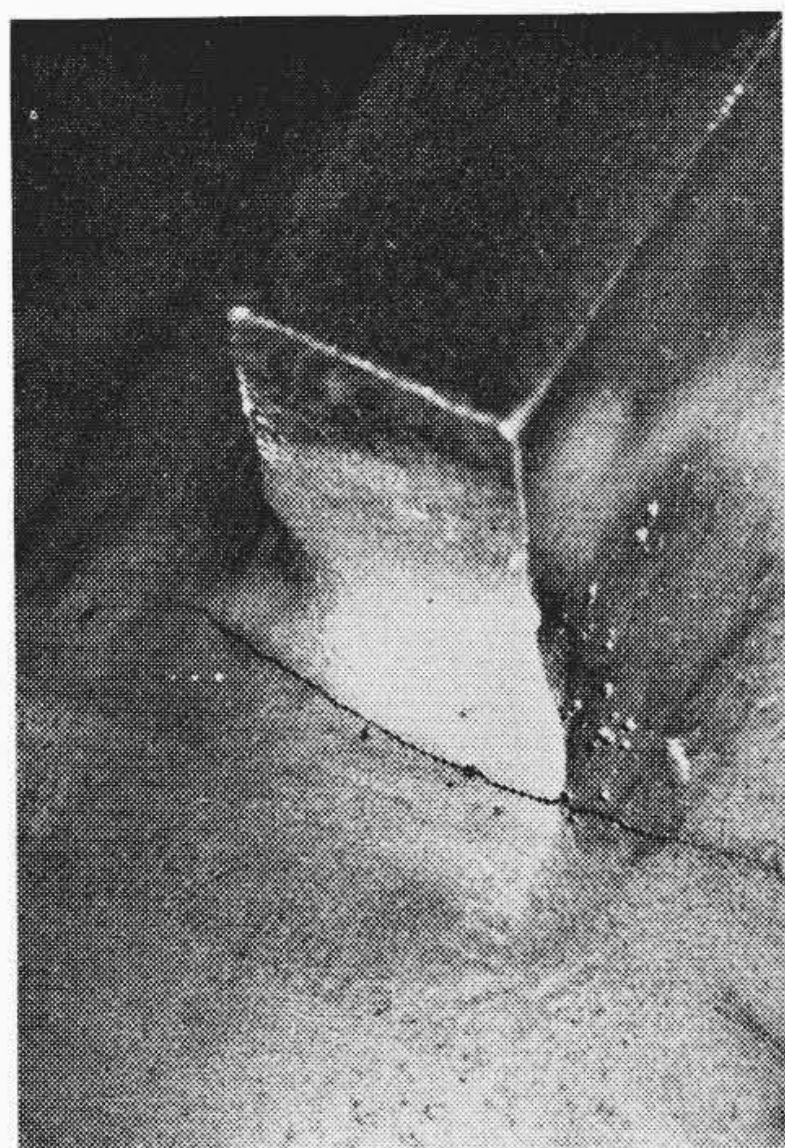
表面にき裂のある欠陥材にショットピーニング加工すれば約30~40%⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾、圧縮加工で約100%⁽¹⁴⁾、表面高周波焼入れによって約200%回転曲げ疲れ強さを増大させることができた例もある⁽¹⁵⁾。

6. 溶接軸の疲れ強さ

電動機軸などで第6図のように armなどを軸に溶接して取り付ける場合があるが、SF45鋼(C0.18%, $\sigma_B=46.6 \text{ kg/mm}^2$)の直径100mmの軸について試験した第27図の結果によれば疲れ限度は8kg/mm²となり、この軸材の溶接しない平滑材の疲れ限度が21kg/mm²と考えられるから、armの溶接により疲れ限度が1/2.6に低下したことになる⁽¹⁶⁾。この場合 arm溶接端の応力集中係数は1.7であるから大形軸で切欠係数を応力集中係数に等しいとみても、なお溶接による影響がかなり大きいことがわかる。このような軸の armの溶接部に第28図のようにブローホールなどの溶接欠陥が発生しやすいことも強さを低下させた一原因と考えられる。この溶接部をショットピーニングすると図のように疲れ強さは12kg/mm²と増大



第27図 アーム溶接軸の疲れ曲線



第28図 arm溶接端部のブローホールと疲れき裂

し効果がある。したがって多少とも欠陥が表面に生じやすい溶接部では研磨仕上げするよりむしろショットピーニングを施行したほうが有利な場合もある。

軸に欠陥やきずあるいは工作誤りのある場合、局部的に溶接肉盛補修する場合があるが、大形軸では特に予熱、後熱を十分に行なって溶接することが大切で、軽々しく溶接補修を行なうと熱影響部の著しいかたさの変化、大きな残留応力、溶接欠陥などのため大きな事故を起こす場合がある。St 50 鋼で直径 50 mm の試験片で溶接しないものの回転曲げ疲れ限度が 23 kg/mm^2 であったものが、肉盛溶接したために 5 kg/mm^2 に低下した結果があり、肉盛溶接がいかに疲れ強さを低下させるものであるかがわかる。一方中炭素鋼 ($C 0.38\%$, $\sigma_B = 61.8 \text{ kg/mm}^2$) の直径 48 mm の試験片で予熱温度 250°C に保持して溶接したものでは、回転曲げ疲れ限度が 20 kg/mm^2 となり、素材の溶接しないものの疲れ限度 27 kg/mm^2 に対し、70% の強さを得ることができた結果⁽¹⁷⁾があり、また中炭素鋼材で予熱 300°C 、後熱 650°C で応力焼なましして肉盛溶接した直径 50.5 mm の軸試験片の平面曲げ疲れ限度 ($N=5 \times 10^6$ 回) は 26 kg/mm^2 となり、母材の疲れ限度 34 kg/mm^2 に対して 76% の強さを得た結果⁽¹⁸⁾もある。熱処理を行なうことが困難な場合には局部的な欠陥ならばその部分を削り去って応力集中の小さい形に修正するほうがむしろ

強度的には有利な場合があり、簡単に熱処理不十分のまま溶接補修を行ない外観をつくろうことは厳禁すべきである。

要するに溶接軸では形状のほかに、溶接による材質変化、残留応力、溶接欠陥などのために疲れ強さがかなり低下するものとして疲れ強さの見積もりには注意が大切である。

7. 結 言

以上筆者の研究結果を中心として軸の設計上注意すべき二、三の点について述べたが、今日なお疲れ強さの設計資料は、寸法効果、変動する実働荷重下の疲れ強さ、温度、腐食のふん囲気中の疲れ強さ、金属組織や欠陥の疲れ強さに及ぼす影響、材料の P-S-N 曲線の確立など今後の研究によって解明せられるべき問題が多い。一方機械部品の設計は高性能、大容量、軽量化と機械の進歩にともないますます厳密正確なことが要望されてきている。疲れ破壊は軸の局部的な弱点から発生し、これを予知することが困難である。したがって軸の設計に当たっては、十分慎重を期し負荷応力や材料の強さの見積もりに unknown factor を考えて余裕係数を含めることがなお今日必要であると思う。この意味において拙稿がなんらかの参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) J. A. Bennett: proc. of Inter. Conf. on Fatigue of Metals, Inst. Mech. Engrs 546 (1956)
- (2) 大内田: 日本機械学会誌 64, 505 (昭 36-2) 263, 日本機械学会前刷集 55 (昭 36-11) 85
- (3) 石橋: 材料試験 3, 18 (昭 29-11) 510
- (4) 大内田: 日本機械学会前刷集 84 (昭 38-4) 117
- (5) 大内田: 日本機械学会論文集 28, 185 (昭 37-1) 29
- (6) 中村: 日本機械学会誌 64, 510 (昭 36-7) 1042
- (7) 大内田, 西岡: 材料 12, 117 (昭 38-6) 451
- (8) 大内田: 日本機械学会誌 58, 436 (昭 30-5) 27
- (9) 石橋: 金属の強さ (養賢堂) 186 (1961)
- (10) 大内田: 日本機械学会論文集 23, 135 (昭 32-11) 842
- (11) 大内田: 日本機械学会誌 62, 484 (昭 35-5) 722
- (12) 大内田: 材料試験 9, 84 (昭 35-9) 32
- (13) 大内田: 日立評論 40, 5 (昭 33-5) 569
- (14) 大内田, 楠本: 日本機械学会論文集 20, 99 (昭 29) 739
- (15) 大内田: 未発表
- (16) 大内田: 未発表
- (17) オランダ技術センター: I. I. W.-XIII, No. 162 (1958-5)
- (18) オランダ技術センター: I. I. W.-XIII, (1956-5)



特 許 の 紹 介



特許第404915号(特公昭37-14040号)

木村博一・田村一二三

電 子 線 加 工 装 置

従来の電子線加工装置においては、加工用電子線の密度が 10 A/cm^2 以上になると、試料の被照射部分から蒸発した試料の一部が加工用電子線によってイオン化され、これによって生じた陽イオンが電子線束周辺に陽イオン鞘を形成して加工用電子線束を吸引して加工時の円滑な走査を防げたり、あるいは陰イオンや漂遊電子が電子線束を偏向して目的にかなう電子線照射走査を非常に困難にするという欠点がある。

この発明は上記のような欠点を改善するために、加工用電子線によって加工される試料の周辺空間に生ずる陽イオンもしくは陰イオンまたは漂遊電子を中和するための低速電荷粒子源を電子線加工装置に設けることを特長とするものであり、このようにして比較的正確な加工が容易に行なえるようになる。(永 田)

