

ショットピーニング材の平面曲げ疲労における疲れき裂の進行

Fatigue Crack Propagation due to Plane Bending Cyclic Stresses in Shot-Peened Specimens

北川 英夫*・三角 正明*

Hideo KITAGAWA and Masaaki MISUMI

1. 緒 言

材料の表面状態によって疲労強度がかなり影響されることはよく知られており、表面からき裂が発生進行し破断に到ることが多い。特に繰返し荷重が曲げや振りの場合、応力の分布は表面で最大となる。従って疲労強度を高めるため積極的に材料の表面層を強化する手段（浸炭、窒化、高周波焼入、表面圧延、ショットピーニング等）がとられている。これら熱処理、機械加工の工程を経て仕上げられる部材には材質の変化と残留応力が生じており、これらが疲労強度に影響することはよく知られている。ショットピーニングは施工方法が比較的簡単である上に効果も大きい等の理由で、バネ等にはよく使われているが、その疲れ強さ増強の主因は表面薄層の塑性加工に伴う圧縮残留応力であると言われている¹⁾。しかし、き裂の進行という観点から、ショットピーニングの影響を調べた研究はあまり見あたらない。圧縮の残留応力はき裂の進行を遅くすると一般に考えられているが、その圧縮残留応力の影響について基礎的な資料を得るために、疲労過程がほとんどき裂の進行過程となる鋭い切欠試験片を使って、ショットピーニング材の平面曲げ疲労における疲れき裂の進行を観測した。

2. 使用材料および試験片

材料は市販の S45C を使用した。試験片はショットピーニングにさきだち、すべて 650°C、1hr の応力除去焼鈍をした。焼鈍材とショットピーニング材の機械的性質を JIS 7 号の平板試験片によって測定した結果を表 1 に、疲労試験片形状を図 1 に示す。切欠形状の崩れを避けるためショットピーニング試験片には、ピーニング後に切欠を加工した。写真 1 はショットピーニング処理した表面の写真である。Shot の圧痕による表面の凹凸は疲労強度に悪影響を及ぼすと考えられる²⁾ので、エメリー紙で両面を 0.015mm 程度研磨して平滑面とし、最終的に酸化クロム粉でバフ研磨したものを疲労試験片とした。その表面組織を写真 2 に示す。

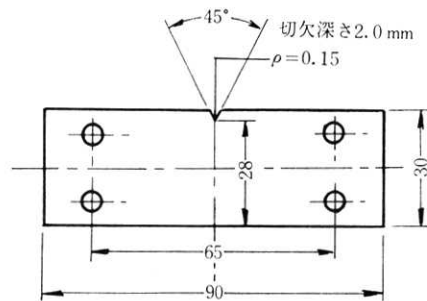
3. ショットピーニング処理

使用した機械は遠心型のもので、その処理条件を表 2 に示す。ショットは Hv 470 の 0.8mmφ cast iron shot を用いた。両面を交互にピーニングしたので試験片の彎曲は微少であった。peening intensity は Almen A gauge で測定の結果 0.3mm で coverage は 100% である。

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

表 1 機械的性質 (注 1)

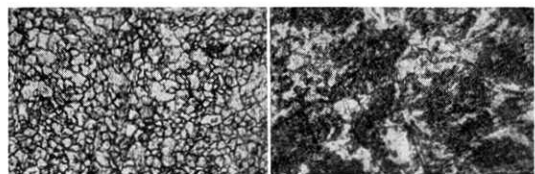
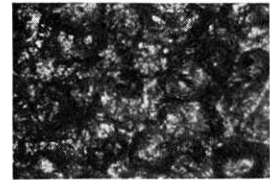
試験片	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	真破断強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %
焼鈍材	46.0	68.5	112	31	47
ショットピーニング材	41.3	68.5	103	25	43



板厚 3.0 mm

図 1 疲労試験片

写真 1 ショットピーニング表面(×42)



焼鈍材 ショットピーニング材

写真 2 表面組織 (3% 硝酸 4sec 腐食, ×400)

ショットピーニング処理後疲労試験片に仕上げた表面から順次 20% 硝酸溶液で溶去して板厚方向の硬度分布を測定した結果が図 2 である。表面硬度は焼鈍材より Hv 50 程度高く、加工硬化の及んでいる層は表面下約 0.3 mm である。

4. ショットピーニングによる残留応力

残留応力の測定には腐食法を用いた。測定試験片の片面にストレンゲージを長手方向とその直角方向に貼布し耐酸性コーティングで保護して、20% 硝酸溶液に浸漬した。他の片面の腐食の進行に伴って現われる歪変化を測定することにより、残留応力は次式³⁾により求められ

研 究 速 報

表 2 ショットピーニング条件

機 械	遠心型, impeller 直径 190mm impeller 回転数 2,800rpm
Shot	0.8φ 鑄鉄ショット (H_V 470)
Arc Height	0.3mm
Coverage	100%

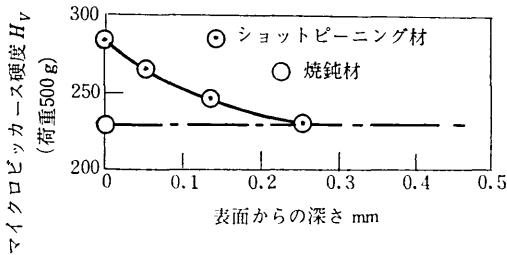


図 2 硬度分布

る。なお温度保障のダミーゲージは焼鈍材に貼って同時に硝酸溶液中に入れて測定している。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ 2\varepsilon - \frac{h-z}{2} \cdot \frac{d\varepsilon}{dz} - 3(h-z) \int_0^z \frac{\varepsilon}{(h-x)^2} dx \right\} \quad (1)$$

$\varepsilon = \varepsilon_x + \nu\varepsilon_y$, ($E=21,000 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.28$)
 z : 腐食深さ, h : 初めの板厚, Suffix x, y :
 長手方向および幅方向

計算結果を図 3 に示す。繰返し数 $N=0$ では、表面直下で応力のピークを示す。この材料の降伏点 46 kg/mm^2 よりも少し高い値である。 16 kg/mm^2 の応力振幅で $N=3.05 \times 10^7$ の繰返し後も破断しなかった試験片についても残留応力を測定したが、わずかながら残留応力の減衰が認められる。

5. 疲 勞 試 験

応力除去焼鈍したままの試験片と、これにショットピーニング処理をした試験片とについて、シェンク型平面曲げ疲労試験機を使用して、両振り曲げの疲労試験を行なって得られた破断繰返し数を図 4 に示す。焼鈍材の $S-N$ 曲線と 10^7 繰返し数との交点 8 kg/mm^2 を一応疲労限と考えれば本実験の切欠材において、ショットピーニング処理による疲労限の上昇率は約 100% である。

最終破断に至るまで各試験片の表面を進行するき裂は試験機を途中で停止することなく、250 枚撮りモータードライブカメラで断続的に接写撮影した。そのフィルムから 20 倍の拡大投影器でき裂長さを読み取り、疲れき裂の進行速度 da/dN を計算した。

6. 疲れき裂進行速度と応力拡大係数との関係

最近、応力拡大係数は疲れき裂の進行の問題に対して広く適用されるようになった。荷重の荷方法や試験片形状の異なる場合にも一義的にき裂先端の応力場の強さを表わすので、実験結果の解析及び相互の比較に便利である。曲げに対する応力拡大係数としては Bowie の示

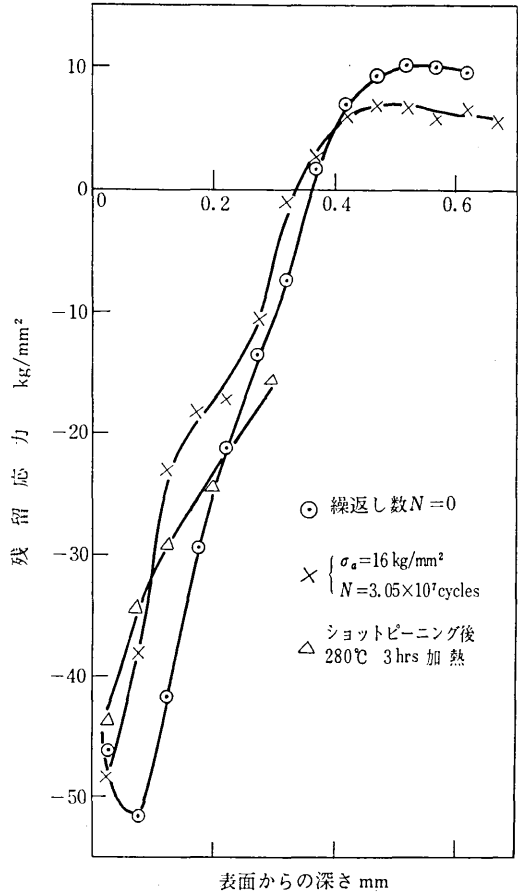


図 3 ショットピーニング材の残留応力分布

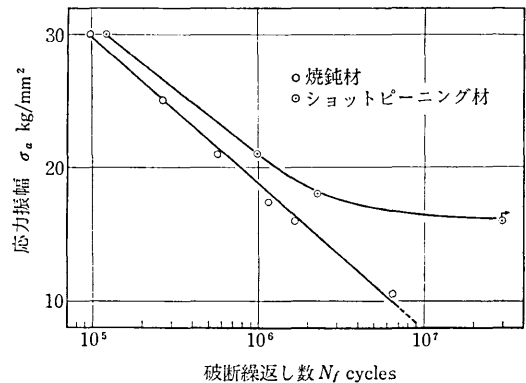


図 4 S-N 曲線

した式を用い⁴⁾ 応力拡大係数の最大値 K_{max} とき裂進行速度との関係を焼鈍材について求めたのが図 5 である。

$$K_{max} = 1.005 \cdot \sigma_{max} \sqrt{a} \quad (2)$$

ここで、 a は切欠を含んだき裂長さであり、また本実験の場合両振り曲げなので、実際には $\sigma_{max} = \sigma_a$ である。

図 5 をみると各々の応力振幅に対してき裂の短い初期(き裂長さが切欠底から約 2 ないし 4mm 程度までの間

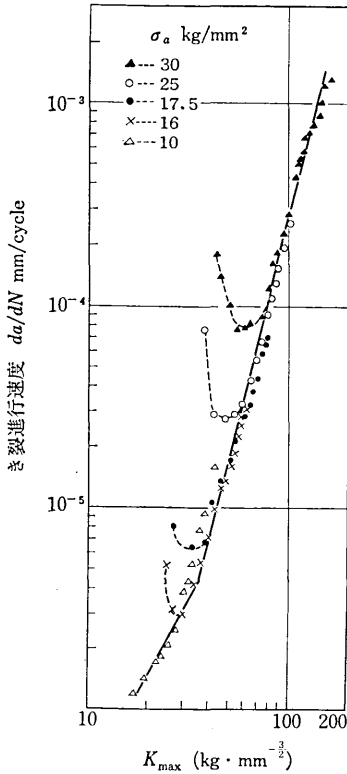


図 5 き裂進行速度と応力拡大係数との関係 (焼鈍材)

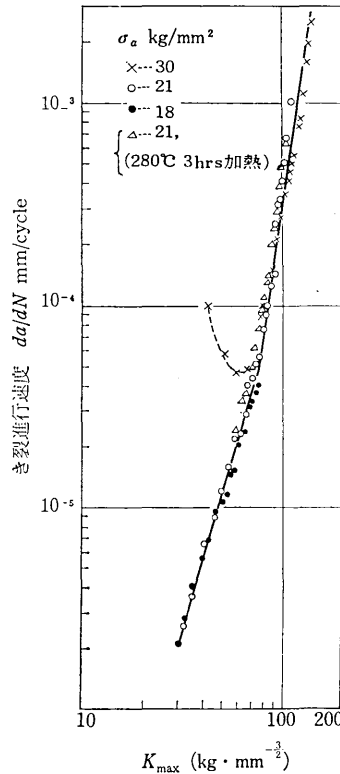


図 6 き裂進行速度と応力拡大係数との関係 (ショットピーニング材)

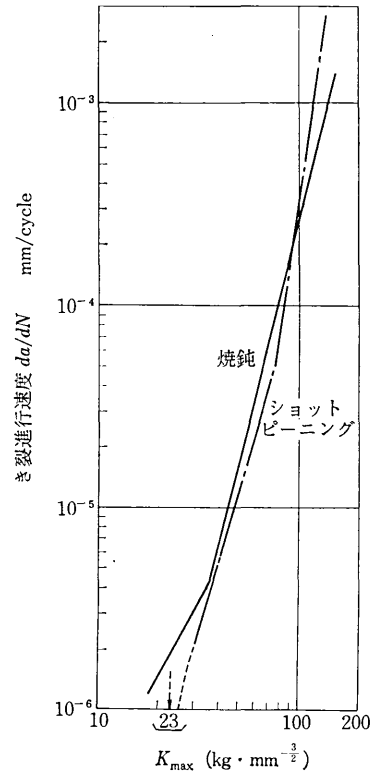


図 7 き裂進行速度と応力拡大係数との関係 (焼鈍材, ショットピーニング材)

で応力振幅が高い程長くなる)には早い速度で進行し始め徐々に速度を落としながら、やがて応力振幅の違いにかかわらず、ある共通の直線関係に入っていくことがわかる。き裂進行の初期に見られる下に凸のこの曲線部は切欠による応力集中の影響と考えられる。このようにき裂進行速度と応力拡大係数を両対数目盛で表わせれば次式で表示される直線関係が初期の部分を除いて成立する。

$$da/dN = C \cdot K_{max}^m = CK_a^m \quad (3)$$

応力拡大係数のべき数 m は K_{max} が約 $35 \text{ kg/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ より大きな範囲で 4.0, それより小さな領域で 1.6 の値を示した。 $m=4$ は Paris が繰返し引張疲労試験について提唱⁹⁾し、理論的にも求められている関係であるが⁹⁾⁷⁾、本実験のような平面曲げ疲労においても K_{max} の大きな領域で成立することがわかる。

図 6 はショットピーニング材についての結果である。応力が 21 kg/mm^2 以下では、き裂の短い時から直線関係ののってくるが、応力が 30 kg/mm^2 に高くなると焼鈍材と同じようにき裂の初期が直線関係からはずれる。これは表面の圧縮残留応力が高い応力の繰返しによって減衰したためであろうが⁹⁾、それでもこの初期部分のき裂速度は焼鈍材の $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ の場合の 0.6 倍に落ちており、圧縮残留応力の効果がなお存在していると考え

えられる。このように、ショットピーニングによって表面に存在する圧縮残留応力は疲れき裂の初期における速度をおさえ、 da/dN と K_{max} との直線関係をより初期にまで延長させる。 m の値については K_{max} が約 $80 \text{ kg/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ より小さな領域で 3.5, それより大きな領域で 7.0 であった。

焼鈍材とショットピーニング材の結果を一括して示したのが図 7 である。 $35 < K_{max} < 80$ では、焼鈍材とショットピーニング材とのき裂速度は大差なく、ショットピーニングによる進行速度の低下はわずかである。しかし、 $K_{max} < 35$ では、 K が小さくなるほど両者の差は大きくなる。疲労限度から考えて、き裂が進行できる K の最小値はショットピーニング材の場合、約 $23 \text{ kg/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ であり、 K がこの値に近いほどき裂の速度は無限に小さくなっていくと考えられるからである。一方、 $K_{max} > 80$ ではショットピーニング材の勾配の方が大きいため、両者は交わる。従って高い応力拡大係数に対しては、かえって、ショットピーニング材のき裂速度の方が大きくなる。このことは図 4 における両者の $S-N$ 曲線が高応力側で交叉することを予想させる。事実、ショットピーニングや旋削による表面加工層をもつ鋼材は、もたないものの $S-N$ 曲線と交叉することが示されている⁹⁾¹⁰⁾。こ

研究速報
 の現象は、表面加工層のある場合応力拡大係数の大きな領域で式(3)のべき数が加工層のない場合より大きいことと関係があろう。これらのき裂進行特性より、切欠のある平板には、切欠の周辺部のみショットピーニング処理を行なうのが最も効果的であることがわかる。

7. き裂の前縁形状について

平面曲げの場合、試験片内の応力は表面で最大で内部に入るほど小さくなり中立面で零である。この場合き裂の前縁形状は直線とはならない。それに残留応力が存在すれば、より複雑な応力分布となり、き裂前縁の形も影響を受けると考えられる。加熱着色法(280°C, 3hrs)を用いれば、既にき裂を生じた面は temper color に着色されるからき裂の形状を知ることができる。 $\sigma_a=21\text{kg/mm}^2$ に対し、疲労寿命のほぼ半分位となる約 3mm の表面き裂長さの時に試験機からはずして空気中で加熱し再び疲労試験を続行して破断させた。ショットピーニング材の着色加熱後のき裂進行速度は図6中に示すように加熱しないものと変わらない。図8に示すように、き裂は表面で最も長く内部に入るほど短い、そして中立面に対して対称である。焼鈍材とショットピーニング材の加熱着色面を写真3に示す。ショットピーニング材の場合特異な形状であるが、図9に示すように表面のき裂は着色が不十分な部分に伸びていることが確認され、従って表面付近の(A)の部分は圧縮残留応力のためき裂面が閉じて酸化不十分だったと考えられる。実際、280°C, 3hrs の加熱をした試験片の残留応力は図3の中に示すように、わずかに減少しているのみである。この(A)の部分の表面での長さは、き裂先端から 2.5mm の後方におよんで

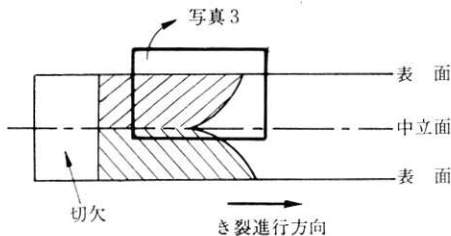
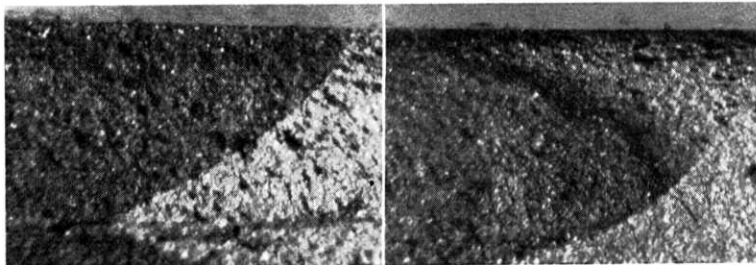


図8 き裂前縁形状



焼鈍材 ($\sigma_a=21\text{ kg/mm}^2$, 表面き裂長さ 3.03 mm) ショットピーニング材 ($\sigma_a=21\text{ kg/mm}^2$, 表面き裂長さ 3.41 mm)

写真3 平面曲げ疲れき裂の前縁形状(×25)

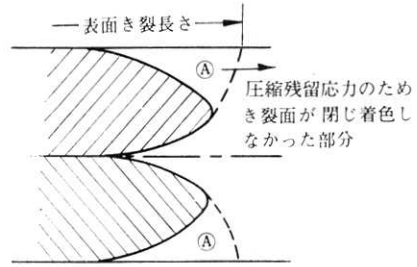


図9 ショットピーニング材の加熱着色面

おり、き裂が入っても圧縮残留応力はかなりき裂の後方まで残っていることがわかる。またトンガリ帽子のような着色部の尖端位置は表面から約 1mm の深さであり、処女材で圧縮残留応力が存在する深さ 0.36mm に比べて、よほど内部に入っている。ショットピーニング材のき裂前縁は焼鈍材よりも丸みを増しているがこれは表面圧縮、内部引張の残留応力のため、内部でのき裂速度が焼鈍材よりも速くなるためであろう。

8. まとめ

表面の塑性加工層に存在する圧縮残留応力がき裂の進行に及ぼす影響を知るために、両振平面曲げ疲労試験において応力除去焼鈍した試験片とさらにショットピーニングしたものとの疲れき裂進行特性を比較した。加熱着色法による観察の結果、ショットピーニング材ではき裂が入っても残留応力は残り、破面を密着させている事が示されたがショットピーニングによるき裂速度の低下が見られるのは、き裂長さの短い初期の間だけであり、応力拡大係数の m 乗則 $da/dN=CK^m$ が成立する範囲でのショットピーニングの効果は小さい。また応力拡大係数の大きな領域ではショットピーニング材で m が増加するが、これが $S-N$ 曲線の交叉に対応しているとの知見を得た。表面に塑性加工層があると、 m の値が 4.0 からずれる機構については今後さらに検討を加える必要がある。

(1971年2月25日受理)

参考文献

- 1) 大野: 金属表面技術, 13, 5 (1965), 35
- 2) 加藤: 金属表面技術, 16, 3 (1965), 24
- 3) 土肥: 北海道大学工学部研究報告, 27 (1961), 1
- 4) R. Roberts, T. Rich: J. Applied Mech, 34 (1967), 777
- 5) P.C. Paris, F. Erdogan: Trans. ASME, seri D 85 (1963), 528
- 6) J. M. Kraft: Trans. ASM, 58 (1965), 691
- 7) P. C. Paris: Fatigue, An Interdisciplinary Approach, Syracuse Uni. Press, 107 (1964)
- 8) 平, 村上: 材料試験, 8・70 (1959), 47
- 9) 川田, 栗田, 児玉: 材料, 17・185 (1968), 74
- 10) 川田, 児玉, 栗田: 材料, 17・183 (1968), 83

注1) 真破断強さ, 絞りは破断後の断面寸法から近似的な値として求めた。