

表面脱炭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 Surface Decarburized Specimens

北川 英夫*・三角 正明*

Hideo KITAGAWA and Masaaki MISUMI

1. 緒 言

残留応力が疲れ強さにおよぼす影響は単に表面の残留応力値のみでなく、深さ方向の分布形や残留応力の発生原因等によって異なってくる。また残留応力は材質の変化を伴ってくるので残留応力のみの影響を抽出する難しさが常につきまとう。本研究では疲れき裂の進行という観点から、残留応力を数種の方法で発生させて材質変化と残留応力分布形を組合わせた実験を行ない、疲れき裂の挙動の全体像から残留応力の影響を共通因子として見出そうとする。前報¹⁾²⁾においてはショットピーニングと浸炭という本質的に異なる二つの表面処理によって生じる表面圧縮、内部引張の残留応力分布が疲れき裂の進行にそれぞれいかなる影響をおよぼすかを、き裂前縁形状を含めてある程度内部的にも観察し、興味ある特性を2, 3見た。平面曲げ疲れ試験で表面き裂の進行を調べた研究^{3)~6)}はいくつかあるが、F. Erdogan⁷⁾らは応力拡大係数(S.I.F.)によって整理すると平面曲げと引張圧縮の疲れき裂進行速度はある関係をもって対応することを示している。したがって本研究でもより一般性のあるS.I.F.で整理してきた。さらに本報では、前二報とは反対の残留応力分布すなわち表面引張、内部圧縮の場合について検討した。部品の製造過程(熱間圧延、鍛造、熱処理などの加熱作業等)において表面に脱炭層が形成されそれに伴って引張の残留応力が発生することは比較的多く、疲れ強さにおよぼすその有害性についてはよく知られているが、疲れき裂の進行に対する効果はまだ明確ではない。

2. 使用材料および試験片

前報¹⁾²⁾と同じS45Cであり、試験片(長さ90mm, 幅30mm, 板厚3mm, 片側V-notch: 深さ2.0mm,

表1 熱処理条件

略 称	処 理 条 件
OQ	850°C 10 min→油中焼入
OQT	850°C 10 min→油中焼入→200°C 1 h 焼戻し
OQSP	850°C 10 min→油中焼入→ショットピーニング

* 東京大学生産技術研究所 第1部

$\rho=0.15$ mm) は 650°C 1 hr の応力除去焼鈍をした後、熱処理およびショットピーニングによって残留応力分布の異なる三種類の試験片を用意した。最終的には酸化クロム粉でき裂進行部のみ鏡面に仕上げた実験に供した。

3. 脱炭熱処理、ショットピーニング

熱処理条件を表1に示す。所定形状に製作した試験片を850°Cに加熱したBaCl₂(90%)+KCl(10%)の塩浴中に10分間浸漬した後、25~60°Cの油中に焼入れた。それを三組に分け、一組は200°C 1 hの加熱を行なって表面の残留応力を減少させると共に内部を焼入焼戻調質組織としたもの。一組は前報¹⁾と同条件のショットピーニング処理をして表面の引張残留応力を圧縮に転化させ、疲労強度を増大させる効果などの検討資料とした。ショットピーニングした試験片はエメリー紙で両面を0.01 mm程度研磨してShotの圧痕による凹凸を除いた。

4. 組織、機械的性質、硬度

各試験片表面の顕微鏡組織を写真1に示す。疲労試験片と同じ板厚のJIS 7号小型平板試験片によって求めた機械的性質を表2に示す。伸びがほとんどないまま破断し、引張強さは浸炭材²⁾と焼鈍材のほぼ中間にある。20%硝酸溶液で試験片の表面を溶去して深さ方向の硬度を微小硬度計によって測定した結果が図1である。表面から0.3 mmより内部では浸炭材²⁾の内部と同じ硬度であり、中心まで完全に硬化しているが表面部の硬さは脱炭材特有⁸⁾⁹⁾の急激な減少を見せている。ごく浅い表面脱炭である。焼戻しおよびショットピーニング後の硬

写真1 表面組織 (3% 硝酸4 sec 腐食, $\times 400 \times 1/4$)

表2 機械的性質(注1)

材 料	降伏点 σ_r kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	真破断強さ σ_T kg/mm ²	伸 び δ %	絞 り ψ %
焼鈍材	46.0	68.5	112	31	47
OQ	—	97.5	103	2	5

研究速報

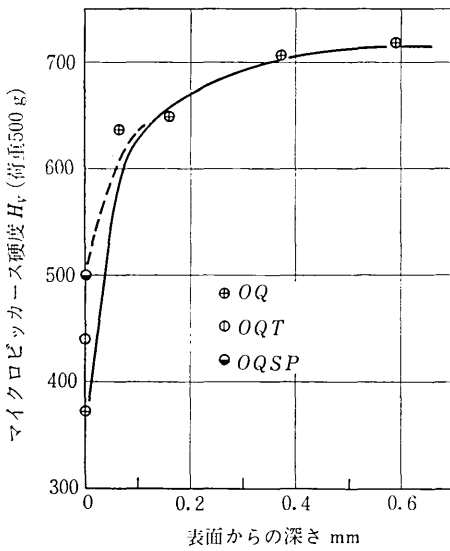


図1 硬度分布

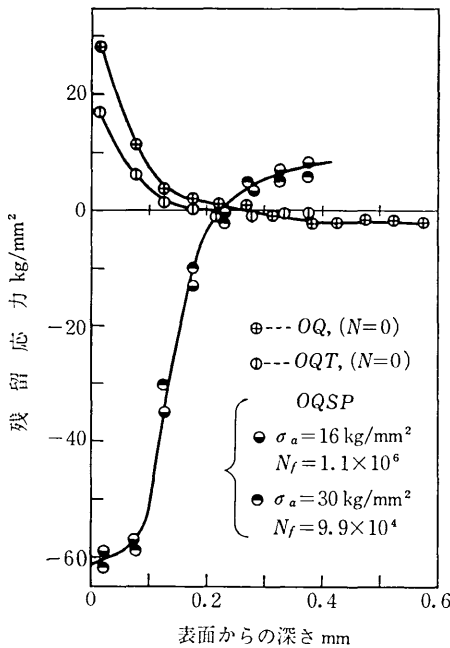


図2 残留応力分布

度も表面のみ測定したが、それぞれわずかずつ上昇している。

4. 残留応力

残留応力測定は前報と同じ方法²⁾ (20% 硝酸による片面腐食, 歪ゲージによる彎曲歪の計測) で行なった。結果を図2に示す。表面層の引張残留応力の最大値は 29 kg/mm² であり、内部の圧縮応力値はわずか 3 kg/mm² と小さい。表面層で急激に引張残留応力となる特異な残

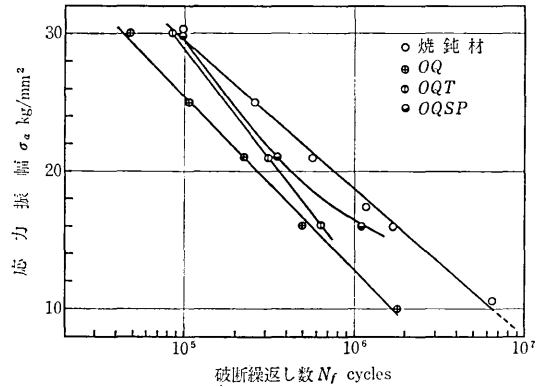


図3 S-N 曲線

留応力分布は表面脱炭材の特徴である¹⁰⁾。200°C 1 h の焼戻しによって残留応力は約 60% に減少する。油焼入れ後ショットピーニングを施した場合は表面の脱炭層のみ塑性変形を強制されるため、表面は圧縮残留応力に変化し、その最大応力値は焼鈍材にショットピーニングした場合¹¹⁾ よりも大きい。存在していた引張りの残留応力分を考えればショットピーニングのみによって発生した圧縮残留応力は約 90 kg/mm² であり、他の実験結果¹⁰⁾ とほぼ一致している。この残留応力分布は図中にも示すように 16, 30 kg/mm² の応力振幅で破断した試験片から採取した試料 (28×20 mm) によって求めたものである。応力振幅の違いにかかわらず残留応力の分布はほとんど変化しておらず、この程度の繰返し応力では残留応力の減衰はほとんどないといえる。

5. 疲労試験

シェンク型平面曲げ疲労試験機によって両振り曲げの疲労試験 (1500 cpm) を行なって得られた破断繰返し数を図3に示す。OQ 材の時間強度は焼鈍材の 30~50% に低下し、応力振幅の小さい程その低下は大きい傾向にある。表面の引張残留応力が少し低くなった OQT は、σₐ=30 kg/mm² では焼鈍材とほぼ同じ位に寿命が回復しているが、σₐが低いと寿命の増加は少ない。すなわち σₐの大きい場合には表面の引張残留応力の大小は寿命に敏感に影響するが、σₐの小さい領域では引張残留応力の多少の差異はあまり問題にならないようである。ショットピーニングを施すと表面層は大きな圧縮残留応力になりしかも繰返し応力による減衰がほとんどないにもかかわらず、寿命の伸びは高応力側では小さい。しかし応力振幅が小さくなると急速に寿命が増加する様相を示唆しており、疲労限度の上昇を予想させる。

6. 疲れき裂進行速度と応力拡大係数との関係

疲れき裂進行の観測方法は前報と同じである。繰返し

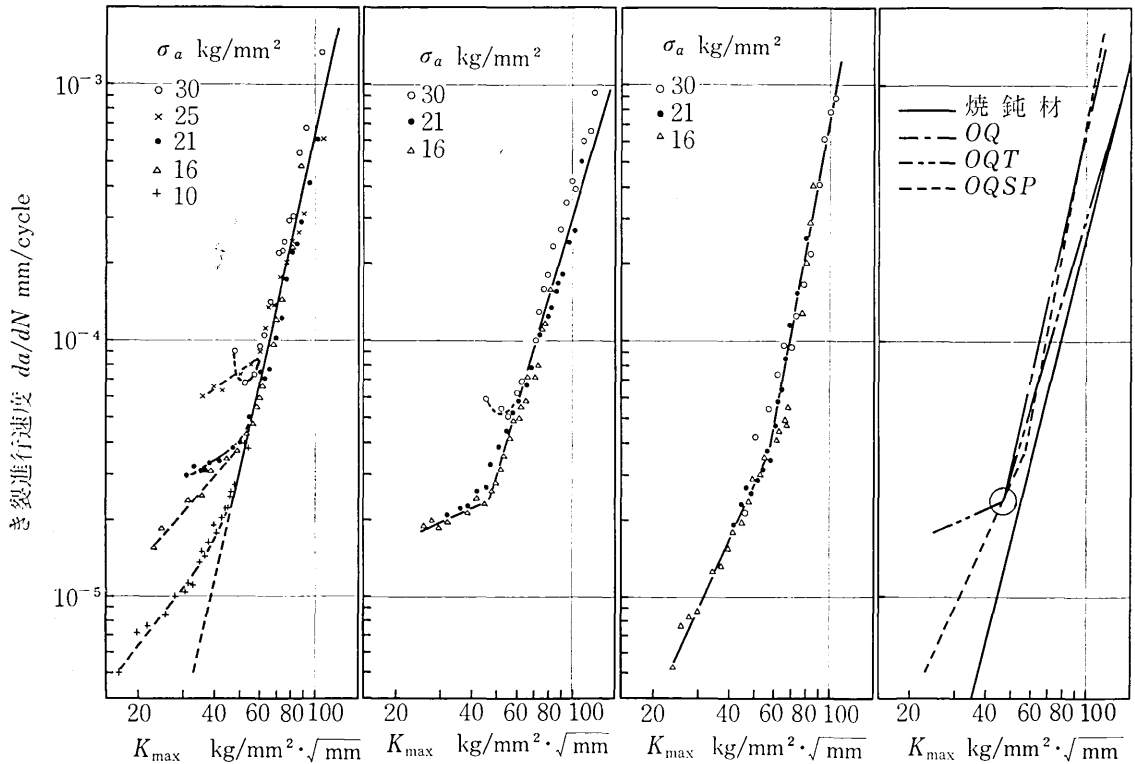


図4 $da/dN \sim K_{max}$ 油焼入材 (OQ) 図5 $da/dN \sim K_{max}$ 油焼入焼戻材 (OQT) 図6 $da/dN \sim K_{max}$ 油焼入ショットピーニング材 (OQSP) 図7 $da/dN \sim K_{max}$ (焼鈍材, OQ, OQT, OQSP)

数 N とき裂長さ (切欠きを含む) a の関係より計算したき裂進行速度 da/dN と応力拡大係数の最大値 K_{max} との関係について調べた。 K の値としては、Bowie が edge crack を有する薄板の曲げに対して示した次式、 $K=1.005 \sigma_B \sqrt{a}$ 、 $\sigma_B=6M/th^2$ を用いた。

a) 焼入れしたまま (OQ) の場合、図4に da/dN と K_{max} との関係を示す。初めはそれぞれの応力振幅 σ_a ごとに、同じ K_{max} でも異なった速度で進行していくが、やがて σ_a の違いによらないある共通の直線関係に入っていく。しかしその共通の関係に入る時期は σ_a の小さい程遅くなり、 $\sigma_a=10 \text{ kg/mm}^2$ の場合などは、その時のき裂長さは約 20 mm であり、き裂進行期間のほとんどを費している。 σ_a が大きくなると、き裂進行速度は一度減少して共通の直線関係に入り、焼鈍材¹⁾ と同じ様相を示す。 σ_a によらない共通の直線関係は次式で表わせる。

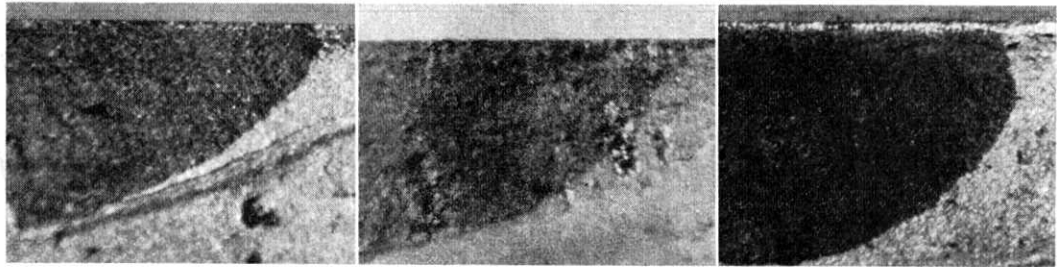
$$da/dN = CK_{max}^m = CK_a^m \quad (1)$$

べき数 m の値は 4.4 であった。この関係からはずれている初期の部分にも (1) 式は適用され、その m の値は $\sigma_a=10, 16$ で 1.2, $\sigma_a=21, 25$ で 0.6 である。このように表面に引張残留応力がある場合、き裂進行速度

は K のみの関数になる領域と、ならない領域に二分される。 K のみの関数にならない領域では表面の引張残留応力はき裂長さの短い初期き裂進行速度を上昇させ、表面圧縮の残留応力の場合とは正反対に、 m を小さくする効果を持っているようである。

b) 焼入れ、焼戻し (OQT) の場合、図5に示すが、全体的に OQ 材よりも速度はわずかに低下しており、引張残留応力が減少した効果が現われている。 $K_{max}=45$ 付近を折れ曲がり点として左右の勾配 m は 0.5 および 3.3 となっている。この様相は 1 mm 浸炭材²⁾ と同じであり、折曲点以前の両者は完全に重なるので、表面層の材質の違いはき裂速度になんの効果も与えてないといえるが、折曲点以後では m が大幅に異なるという点で材質の違いが現われている。

c) ショットピーニングを施した (OQSP) 場合、図6に示すように $K_{max}=60$ 付近を境として折れ曲がった 2 直線で表わされ、その m の値は 2.2 および 5.0 である。 $K_{max} \geq 60$ では OQ 材より勾配はわずかに大きくなり、 $K_{max} \leq 60$ の領域では K の小さいほどき裂速度の低下が大きくなっており、結果として m が増加すると共に K のみの関数としてまとまる。 OQ と OQSP の



OQ (σ_a=21 kg/mm², 表面き裂長さ OQ=5.17 mm, OQT=5.67 mm, OQSP=5.91 mm)

写真 2 疲れき裂の前縁形状 (×25)

き裂挙動の違いは焼鈍材とショットピーニング材¹⁾の間の相違とまったく類似しているの、そのき裂挙動の変化は材質の違いではなく残留応力が主たる原因であると考えられる。

d) 焼鈍材と脱炭材をまとめて図 7 に示す。脱炭材の方が焼鈍材より全体的にき裂進行速度は速い。OQT のき裂速度が K の大きい所で焼鈍材に近づき、 K の小さい所では OQ に近くなるという挙動を示す点は三者の $S-N$ 曲線間の関係とよく対応している。表面層の残留応力を三種類にかえて実験した結果をまとめて表現すると次のように言える。 da/dN と K_{max} の関係は折れ曲がった直線で表わされ、その直線関係は表面に引張りおよび圧縮の残留応力が存在することによって回転する傾向を有し、その回転中心として、浸炭材で見られたと同じく脱炭材三者が必ず通過する共通点 ($K_{max} \approx 50$, $da/dN \approx 2.5 \times 10^{-5}$ mm/cycle) が存在するようである (図中の円内に示す部分)。

7. き裂の前縁形状について

曲げ応力のもとでき裂が進行する場合、板厚方向に応力変化のある効果がどのようなものかという問題がある。この問題はき裂先端の局所的な効果を含み、き裂の形状が三次元的になるなどの数学的困難さのため解析的にはまだ求められていない。Erdogan 等¹¹⁾ は曲げを受ける合成樹脂板の中を進むき裂の形状が初めの三角形から次第に丸みをおびていく変化様相を観察している。ここでは、局所的効果を持つと考えられる残留応力の効果を加熱着色法 (280°C, 3 hrs) にて観察した。写真 2 に示すように、表面引張残留応力を持つ OQ, OQT では

焼鈍材とはほとんど同じ形状であるが、OQSP の場合は表面の大きな圧縮残留応力の効果が顕著であり、表面薄層は圧縮力によるき裂面の接触のため酸化不十分の形跡が見える。図 8 に示すように、試験片の表面とき裂前縁の交角 θ は鈍角となりき裂速さが表面で強く抑制され、内部では加速されているのがわかる。

8. ま と め

表面の脱炭層に存在する残留応力がき裂の進行におよぼす影響を知るために、両振り平面曲げ疲労試験により表面残留応力の異なる三種の試験片について疲れき裂の進行特性を応力拡大係数を用いて比較した。き裂の前縁形状は 30 kg/mm² 程度の表面引張残留応力ではほとんど影響を受けないが、 K の小さい領域でき裂速度の上昇効果は大きく、き裂速度が K のみの関数とならない場合がでてくる。引張残留応力は、圧縮残留応力と反対にべき数 m を小にする効果を有する。また、応力、材質、残留応力の違いにかかわらず常に等しい速度をとるようなある K の値が存在するようである。残留応力が局部的にき裂進行に影響を与える三次元的考察、および m の値の変動については今後検討を加えていきたい。

(1971 年 6 月 25 日受理)

参 考 文 献

- 1) 北川, 三角: 生産研究, 23, 5 (1971), 195
- 2) 北川, 三角: 生産研究, 23, 6 (1971), 244
- 3) 平, 本田, 阿部: 日本機械学会論文集, 31, 221 (1965), 39
- 4) T. W. Crooker, E. A. Lange: Welding J., 46 (1967), 322-S
- 5) 西谷, 真谷: 日本機械学会論文集, 34, 258 (1968), 224
- 6) 平, 田中: 材料, 18, 190 (1969), 620
- 7) F. Erdogan, R. Roberts: Proc. 1st Inter. Conf. Fracture, JSSFM, Japan, 1 (1966), 341
- 8) 磯村: 金属材料, 6, 1 (1966), 52
- 9) 上田, 上田: 材料試験, 8, 65 (1959), 170
- 10) 上田, 上田: 材料試験, 8, 75 (1959), 913
- 11) F. Erdogan, O. Tuncel, P. C. Paris: ASME paper 62-Met-5 (1962)

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。

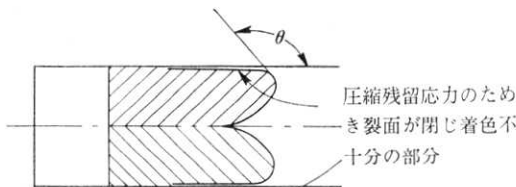


図 8 OQSP のき裂前縁形状