

浸炭焼入れ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
Carburized and Quenched Specimens

北川 英夫*・三角 正明*

Hideo KITAGAWA and Masaaki MISUMI

1. 緒 言

疲れき裂の進行に及ぼす残留応力の影響を検討するため、前報¹⁾においてはショットピーニング材における疲れき裂の進行特性を明らかにした。本報はショットピーニング処理の場合と同じく表面圧縮、内部引張の残留応力分布を持つ浸炭焼入れ材を対象とする。浸炭焼入れの場合残留応力は熱収縮、変態膨張に基因する応力であり組織の変化を伴う。炭素の浸入拡散により表面層の比容積が心部より大きいこと、また変態温度は炭素濃度の低い心部の方が高いため焼入時の変態膨張は心部が先行する結果、一般に表面浸炭層に圧縮残留応力が発生する。耐疲れ性を著しく向上させる主因として、硬化のための材質の強化とこの残留応力の寄与があげられるが、一方き裂が在ると疲れ強さは大きく低下することも知られている²⁾。表面硬化した実用部品に微細なき裂が発生することはよくあり、この場合 fail safe design の立場からき裂の進行が問題となる。しかし自動車部品をはじめ広く用いられる浸炭焼入れ材については疲労の研究が比較的に少なく、き裂の進行を観測した例は見当たらない。

浸炭焼入れの場合の残留応力分布は、鋼種、部品断面の大きさ、浸炭条件、焼入条件等によって複雑に影響を受ける³⁾ なかで、浸炭深さの影響が最も大きい。また浸炭深さと疲れ強さ、および浸炭深さと残留応力の関係はよく似ていることから疲労においては残留応力の効果が直接きいている⁴⁾ との実験結果がある。そこで本報では浸炭深さを変えた二種類の試験片について、浸炭深さお

よびそれに伴う残留応力とき裂進行速度との関係について研究した。

2. 使用材料および試験片

材料は前報¹⁾と同じ S45C である。疲労試験片は図 1 に示す寸法に機械仕上げし、650°C 1 hr の応力除去焼鈍をした後、浸炭熱処理を施した。熱処理後は酸化クロム粉でき裂進行部のみを鏡面に研磨して実験に供した。

3. 浸炭および熱処理

浸炭深さ約 0.3 mm のものはシアン化ナトリウム：炭酸ナトリウム = 19 : 1 の液体浸炭剤を用いて行ない、浸炭深さ約 1.0 mm のものは木炭：炭酸バリウム = 9 : 1 の固体浸炭剤による普通の方法によった。残留応力測定のため図 1 と同じ寸法で切欠きと穴を加工してない平板を他の試験片と一緒に同じ熱処理をしている。浸炭後の熱処理は、液体浸炭の場合そのまま 25~60°C の油中に焼入れし、固体浸炭の場合炉中で 850°C の焼入温度から油中に焼入れた。焼戻しは浸炭による C 量の均一性が多少低い⁵⁾ 固体浸炭材のみに行なった。以上の熱処理条件をまとめて表 1 に示す。

表 1 浸炭焼入れ条件

浸炭深さ	略 称	熱 処 理 条 件
0.3 mm	C 03	850°C 2 hrs 液体浸炭 → 油焼入
1.0 mm	C 10	900°C 5 hrs 固体浸炭 → 850°C 油焼入 → 150°C 2 hrs 焼戻し

3. 組織、機械的性質、硬度

表面組織を写真 1 に示す。JIS 7 号の小型平板試験片によって測定した機械的性質を表 2 に示す。伸びがほとんどないまま破断し、降伏点を示さない。



写真 1 表面組織 (3%硝酸 4 sec 腐食, ×400・1/2)

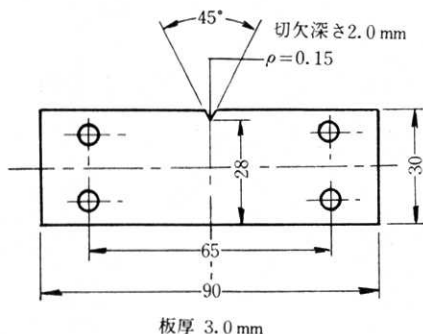


図 1 疲労試験片

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研究速報

表 2 機械的性質 (注 1)

材 料	降 伏 点 σ_Y 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
C 03	—	125.0	130	2	4
C 10	—	135.3	138	3	2

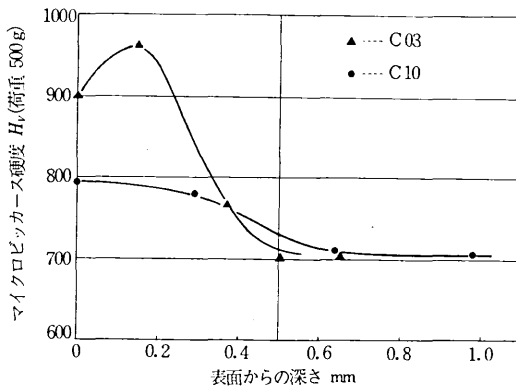


図 2 硬度分布

引張強さは浸炭深さの小さい方が低く表われ、他の実験結果⁶⁾とは異なる傾向である。試験片表面を 20%硝酸溶液で溶去して深さ方向の硬度分布を順次測定した結果が図 2 である。表面近くでは C 03 の硬度が高いが、約 0.5 mm より内部ではほぼ同じ硬度となる。その内部でも硬さは $H_v 700$ とかなり高く、JIS の規定 ($H_v 513$ の点までの距離が有効硬化深さ) によれば、全断面が有効硬化域に入る状態である。

4. 浸炭焼入れ後の残留応力

浸炭材の場合、浸炭層の組織中の残留オーステナイトが徐々に分解するという時効現象のため残留応力がしばらくの間漸減する⁷⁾。したがって、時効による応力変化がほぼ飽和する 1 ヶ月後から実験に入り残留応力測定を行なった。残留応力測定は前報と同じ方法 (20%硝酸による片面腐食、歪ゲージによる湾曲歪の計測) を用い、次式で算出した。

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

$\varepsilon = \varepsilon_x + \nu \varepsilon_y$, x, y : 長手方向と幅方向の suffix

z : 腐食深さ, h : 初めの板厚

弾性率とポアソン比は一応一定とみなし、21000 kg/mm² および 0.28 なる値を採用した。図 3 に計算結果を示す。C 10 の残留応力は C 03 よりかなり低いが、深くまで圧縮応力である。圧縮から引張へ応力が反転する位置は各々約 0.3, 0.9 mm である。 $\sigma_a = 18$ kg/mm² で $N = 1.25 \times 10^7$ の繰返しに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。図 3 からわかるように表面でわずかに大きい、ほとんど変化がないといえる。

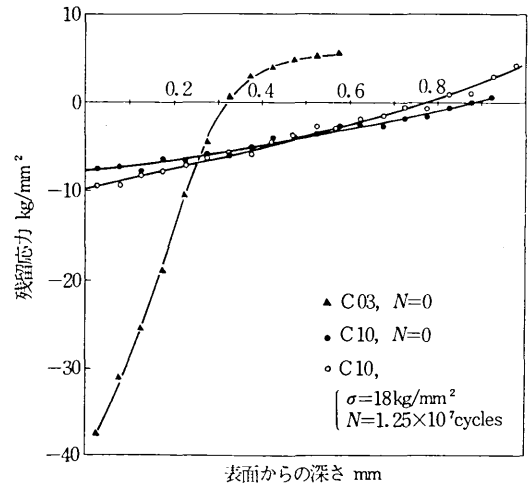


図 3 残留応力分布

5. 疲労試験

シェンク型平面曲げ疲労試験機により 1500 cpm の繰返し速度で、図 4 に示すごとく両振り曲げの疲労試験を行なった。応力振幅が 30, 25, 21 の三段階に対して得られた破断繰返し数を図 5 に示す。破断時にはピシッという鋭い音を発して瞬間的に破壊する。焼鈍材の疲れ限度は 8 kg/mm²、したがって C 03 と C 10 の疲れ限度の上昇は、それぞれ 150%, 125% と大幅な増加を示す。しかし時間強さを見ると、C 10 などは焼鈍材よりも低下し、高応力側では C 03 もそれにならうようである。疲

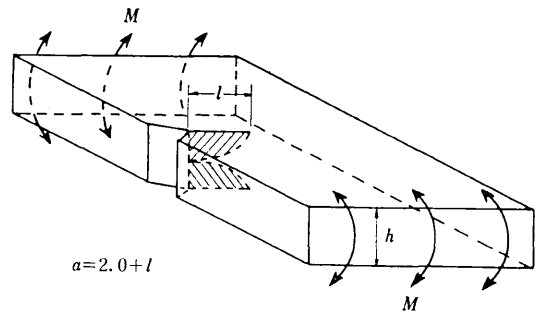


図 4 両振り曲げを受ける試験片

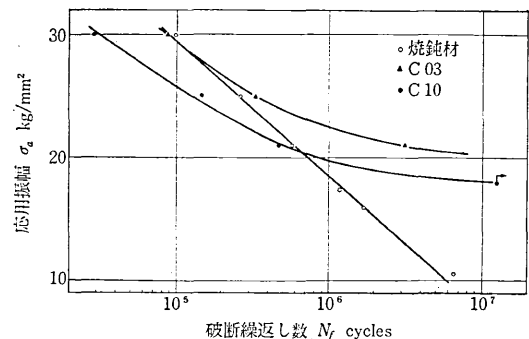


図 5 S-N 曲線 (応力振幅は応力振幅に訂正)

研究速報

れ限度の増加は著しくても、き裂がひとたび発生すれば、危険性の大きい事が明瞭である。

硬い材料では、き裂は急激に進展するため観測が困難であるが、ここでは 250 枚撮りモータードライブカメラで断続的にき裂を接写撮影し、フィルムから 20 倍の拡大投影器でき裂長さを読みとった。

6. 疲れき裂進行速度と応力拡大係数との関係

き裂進行速度 da/dN と応力拡大係数の最大値 K_{max} (本実験では両振り曲げなので圧縮側ではき裂が閉じて $K=0$ になると考える) との関係について調べた。ここで K の値としては曲げに対して Bowie が示した式⁸⁾ ($K=1.005 \sigma_B \sqrt{a}$, $\sigma_B=6M/th^2$)を用いている。

a) 浸炭深さ 1.0 mm (C 10) の場合、図 6 にき裂速度と K_{max} の関係を示す。図中の矢印は疲れ限度から計算したき裂進行の限界の K 値を示す。き裂は疲労の初期にすぐ発生して進行に移るが、その進行様相は応力拡大係数が約 $50 \text{ kg/mm}^2 \sqrt{\text{mm}}$ の左右で異っている。それぞれの部分は直線で近似できるので折れ曲がった 2 直線で表わせる。すなわち次式

$$da/dN = CK_{max}^m = CK_a^m \dots \dots \dots (2)$$

のべき数 m の値が、 $K_{max} \leq 50$ の範囲で 0.5, $K_{max} \geq 50$ の範囲で 7.8 となり、き裂の進行は急激に速くなる。そ

のため、き裂の進行を観測できたのは板幅の 50% のき裂長さまでであった。 $K_{max} \leq 50$ での挙動は、焼鈍材の場合き裂進行の初期に見られた挙動¹⁾を想起させる。焼鈍材では一度速度が落ちて $m=4$ の直線関係に入っていたが、C 10 の場合はわずかに加速しつつ進む。

b) 浸炭深さ 0.3 mm (C 03) の場合、C 10 にくらべると、き裂の発生は比較的遅くなる。図 7 に示すように、やはり折れ曲がった 2 直線で表わされる。図中の矢印は疲れ限度から計算したき裂進行の限界の K 値を示す。折曲点は大体 $K_{max}=60 \sim 70 \text{ kg/mm}^2 \sqrt{\text{mm}}$ 付近である。この付近を境として、 K の小さな範囲で $m=3.5$ K の大きな範囲では $m=7.0$ であった。これはショットピーニング材の m の値と全く同じで¹⁾、両者は平行な関係になる。硬度は大幅に相違しているが、残留応力分布がよく似ているこの両者に、このような共通性が見出されるのは興味がある。C 10 と比較してすぐわかることは、 $K_{max} \leq 50$ でき裂速度が低いことである。両者の硬度はそう大差ないが、C 03 の表面層に存在する圧縮残留応力は C 10 よりかなり大きいことから、次のようにいえると思う。表面に存在する圧縮の残留応力はき裂長さの短い初期ほどき裂進行速度を低下させ、べき数 m を大きくする効果がある。このことはショットピーニング材で観察された傾向と一致する。

c) 焼鈍材¹⁾と浸炭焼入材と一緒に示したのが図 8 である。全体的に浸炭焼入材の方が焼鈍材よりき裂進行速度は速い。硬さが高くなると衝撃値が低下する。それに

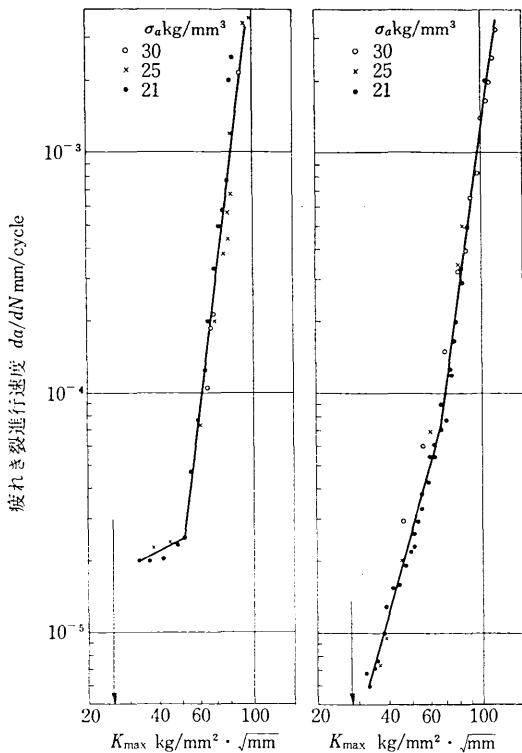


図 6 $da/dN \sim K_{max}$, 1 mm 浸炭材

図 7 $da/dN \sim K_{max}$, 0.3 mm 浸炭材

(図 6, 7 上部の kg/mm^3 は kg/mm^2 に訂正)

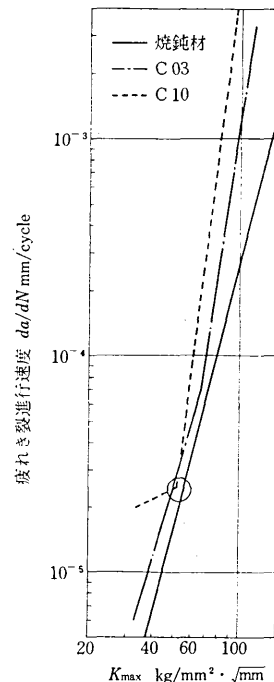


図 8 $da/dN \sim K_{max}$ (C 10, C 03, 焼鈍材)

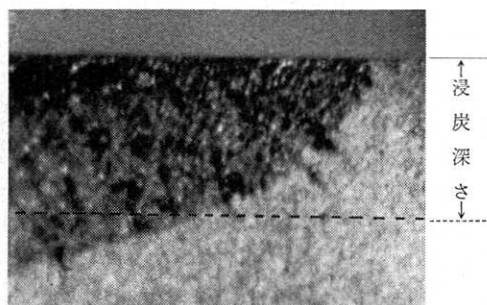
研 究 速 報

したがって疲れき裂の伝ば抵抗も小さくなるからであろう。浸炭焼入材は折曲点以後では、焼鈍材よりも勾配が大きくなりき裂伝ば機構は異なってくると思われるが、C 10 と C 03 はほぼ平行で、圧縮残留応力の大きい C 03 が C 10 より下側に位置する。これは浸炭材では応力繰返しによる残留応力の減衰は小さいから⁹⁾¹⁰⁾、両者の残留応力の差の効果であろう。しかも、ほぼ平行であるのは平均応力の効果¹¹⁾と同じであることを示している。それに反して折曲点以前の K の小さな領域では、勾配 m が異なるから、残留応力がなんらかの形でき裂伝ば機構に影響を与えているとも考えられる。このように K の領域により、残留応力の影響の仕方が異なるため、き裂の進行に伴って遷移する応力状態と対応させて調べる必要があると思われる。また、焼鈍材と浸炭材の $S \sim N$ 曲線が交叉するのは、折曲点以後 m の値が大きくなり、速度が急に増大することと対応している。

一方、一つの興味ある特徴が見い出されるのは、材質や残留応力の異なる三者が、 $K_{max}=50$ 付近ではほぼ等しい速度 (約 $da/dN=2.5 \times 10^{-5}$ mm/cycle) を示すことである (図中の円内で示す部分)。

7. き裂の前縁形状について

加熱着色法 (280°C, 3 hrs) を用いて、本実験のように残留応力が分布している中を進むき裂の形状について調べた。写真 2 に C 10 材の実例を示す。Williams¹²⁾ は、曲げの場合のき裂前縁の形状を合成樹脂について調べ、楕円曲線になると報告しているが、本実験の場合は楕円とはならず残留応力分布によって前縁形状は変化することが認められた。図 9 に示すように、両者ともほぼ直角に表面と交わるが C 03 の方が丸みが強い。これは、試験片の内部における引張残留応力のために、C 10 よりき裂が内部で進行しやすいからであろう。



1.0 mm 浸炭材
($\sigma_a=21$ kg/mm², 表面き裂長さ=3.95 mm)

写真 2 き裂前縁写真 (×25)

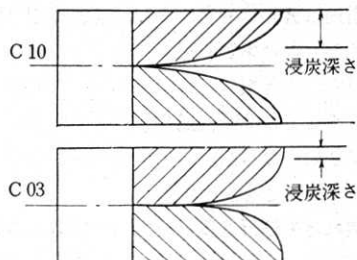


図 9 浸炭深さの違いによるき裂前縁形状の相異

8. ま と め

表面の浸炭硬化層に存在する残留応力がき裂の進行に及ぼす影響を知るために、両振り曲げ疲労試験により、浸炭深さの異なる二種類の試験片について疲れき裂の進行特性を比較した。き裂の前縁形状は残留応力分布形の影響を受けることが明らかになった。圧縮残留応力の影響の仕方は応力拡大係数 K の範囲で異なり、 K の小さいところで速度低下の効果が著しい。C 03 では $da/dN=CK_{max}^m$ のべき数 m の値は、残留応力分布形がほぼ等しいショットピーニング材と同じであり、硬度や処理法の相異によらぬある共通性が見いだされる。また焼鈍材との大幅な材質の変化にもかかわらず、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。そして、その K の値以後ではき裂速度が急に大きくなるのであるから、き裂の存在する浸炭部品の保守管理上重要な目安となるのではないだろうか。 m の値がそれぞれ異なってくる機構については今後の問題である。

(1971 年 2 月 25 日受理)

参 考 文 献

- 1) 北川, 三角: 生産研究, Vol. 23, No. 5 (1971), 195
- 2) H. Staudinger: Z. VDI, 88, 51~52 (1944), 681
- 3) 米谷, 本山: 残留応力評価調査研究分科会成果報告書 (1970), 78
- 4) 鮎谷, 野田: 材料, 第 17 巻 183 号 (1968), 78
- 5) 筒井, 川崎, 佐藤, 松井: 日本金属学会誌, 第 21 巻第 6 号 (1957), 388
- 6) 津村, 米谷, 金武: 鉄と鋼, 第 3 号 (1961), 245
- 7) 平, 村上: 材料試験, 第 7 巻第 62 号 (1958), 591
- 8) R. Roberts, T. Rich: J. Applied Mech. Vol 34 (1967) 777
- 9) 平, 村上: 材料試験, 第 7 巻第 62 号 (1958), 591
- 10) 平, 村上: 日本機械学会論文集, 第 25 巻, 155 号 (1959), 545
- 11) J. Schijve, D. Broek: NLR-Report T.R.M 2111 (1963)
- 12) J.F. Williams, R.D. Ewing: Fracture, Proc. 2nd. Intern. Conf. of Fracture, (1969), 119

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。