

炭素鋼のねじり疲れにおけるすべり帯の 変化とき裂の進展との関係*

追分重義**

宇野和雄**

(昭和46年9月29日受理)

Relation between the Growth of Slip Bands and the Propagation of Cracks in the Torsional Fatigue Test of Carbon Steel

by Shigeyoshi OIWAKE and Kazuo UNO

The growth of slip bands and the propagation of cracks were simultaneously observed by the metaloscope of S35C plain test pieces under completely reversed torsional stress cycle.

1) The length of the slip bands and the cracks showed a similar tendency of change with the progress of the cycle. Throughout the total fatigue life the cracks are considered to be formed mostly from the persistent slip bands.

2) At the failure cycle the length of the slip bands was shorter and that of the cracks longer for the larger stress amplitude than for the smaller. As the cycle proceeds the cracks seem rather to start from the existent stress concentration sources than to trouble to develop slip lines or bands.

3) For each over-stress amplitude, smaller than the yielding point, the slip bands became visible at the cycle of about 1% of the failure cycle.

4) For the specimen anisotropic with the axially banded structure as the roll-effect, axial slip bands and cracks as well were predominant and for one which was made isotropic by the high temperature annealing, such predominance almost vanished.

5) The surface hardness of pearlite of the fatigued specimen was 0.97 to 1.12 times the hardness of the virgin specimen, the number being larger for the larger stress amplitude, while that of ferrite was just 0.90 to 0.98 times, without such relation with the amplitude.

1. 緒 言

金属材料の疲れき裂は一般に材料にせん在する格子欠陥，空孔，き裂および粒界，非金属介在物や応力の繰返しによって生ずるすべり帯などの応力集中源から発生する。いわゆる微視

* 日本機械学会北海道支部第15回講演会(1971.10)で講演

** 北見工業大学機械工学科

き裂 (micro crack) は疲れ寿命の 1~10% という早い時期において残存すべり帯 (persistent slip band) から発生するといわれている^{1),2)}。疲れき裂の初始については従来突出し (extrusion) や入込み (intrusion) がすべり線 (slip line) やすべり帯 (slip band) と相関して生ずる過程に転位論的な見解^{3),4)} を与えることが重視されていたように思われる。転位論的な approach はとかくモデルで現象を説明する定性的なものになりがちであった^{3),4),5)}。すべり線の生成は疲れにきわめて特徴的な現象であり、疲れ寿命の全域にわたってすべり帯の消長とき裂の進展との相互関係を光学顕微鏡により定量的に掌握することを本研究は試みた。なお試験片としては平滑試験片を用いた。

2. 実験方法

2.1 試験材および試験片の処理

準共振曲げねじり疲れ試験機で、図 1 の試験片に繰返速度 900 r.p.m. の両振りねじりを与え^{6),7)}、応力振幅は降伏点以下の過大応力 13.0, 14.5, 16.0, 17.5 kg/mm² の 4 段階とした。供試材 S35C は供給のままでは、圧延効果がフェライトとパーライトの軸方向の帯が交互に配列した带状組織 (banded structure) として残っているために、材料の異方性が顕著である。試験片に加工する前に供給材に 1080°C の高温焼なましを施し、带状組織を解放して材料の異方性を除くようにした。表 1 には供給材および焼なまし材の性質が示されている。平行部は切削後バフ磨きし、表面がなめらかで切削きずがないようにした。平行部の円柱面の

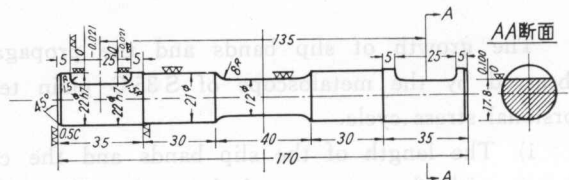


図 1 試験片
Fig. 1. Test piece.

表 1 供試材の諸性質

Table 1. Properties of tested material

| 材 料 | | S 35 C | | | | | |
|-----------|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| 化 学 成 分 % | | C | Si | Mn | P | S | |
| 機 械 的 性 質 | 引 張 力 | 原 材 | 降 伏 点 50 kg/mm ² | 抗 張 力 70 kg/mm ² | 延 伸 率 30 kg/mm ² | 収 縮 率 67 kg/mm ² | |
| | | 焼なまし材 | 降 伏 点 31.5 kg/mm ² | 抗 張 力 58.6 kg/mm ² | 延 伸 率 21.2% | 収 縮 率 41.7% | |
| | ね じ り | 焼なまし材 | 降伏ねじり応力 18.8 kg/mm ² | ねじり破壊係数 60.2 kg/mm ² | せん断弾性係数 7388 kg/mm ² | 耐 久 限 度 10.5 kg/mm ² | |
| | | 焼なまし条件 | 1080°C で 6 時間保持, のち炉中冷却。 | | | | |

軸断面による半分はナイトルで腐食し、金属組織が見えるようにし、他の半分はそのままとし、前者ではすべり帯、後者ではき裂の変化を金属顕微鏡によって観察した。すべり帯の観察には粒界が必要で、き裂の進展の測定では粒界やパーライトが見えると困難だからである。

2.2 すべり帯やき裂の観察

すべり帯はパーライトの中ではきわめて見づらく、フェライトの中だけを調べた。S35C鋼ではき裂はおもにフェライト地をぬって進展することは従来報告されている⁸⁾。すべり帯を調べた顕微鏡倍率は400、き裂は200である。すべり帯もき裂長さの測定値も、おのおの解像性が異なり、観察の仕方も異なっているので、その絶対値の比較には問題があるが、変化の傾向は比較してさしつかえないと考える。すべり帯の測定は1本の母線上のおおむね等ピッチの20個所の 0.2×0.14 mmの視野に対して行ない、き裂長さの測定は上述の半円柱表面の等ピッチの3本の母線に沿った円周方向幅0.25 mmの視野を走査し、これらの測定長さを面積比で平行部の全表面積の長さに換算した。すべり帯、き裂長さおよび硬さの測定は測定サイクルで試験片を試験機から取りはずして行なうことを同じ試験片について破断まで繰返した。

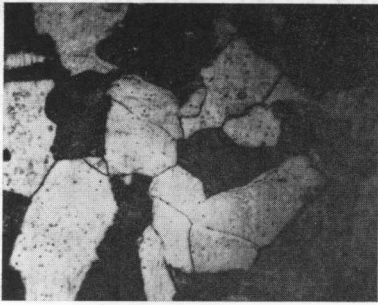
3. 実験結果と考察

3.1 き裂の発生

図2は供試材の同じ局所のすべり帯の変化を調べたサイクルごとの顕微鏡写真である。しかしすべり帯のデータはこのような写真からではなく、フィルムを直接投影器に掛けて拡大した、より鮮明な映像から読取った。金属組織におけるき裂伝ばの様子は従来数多く報告されているので⁹⁾、とくに注目されたことだけを述べる。フェライトとパーライトの間の粒界に近い、フェライト内において粒界にほぼ垂直な方向に平行に並んでいた多くのすべり帯が微視き裂によって連絡されたり、さらにこれが巨視き裂に発展する場合が見受けられた。これについては、i) すべり帯の方向にすべることが粒界において阻止されるために粒界面に引張や圧縮応力を生じ¹⁰⁾、引張応力がすべり帯の間の丘に微視き裂を作ったり、ii) 粒界における結晶間の方位の相違によるひずみの発生¹¹⁾ や異種金属の接触によって生ずる起電力による腐食¹²⁾ などに帰因する応力集中が微視き裂を生じたり、iii) これらが粒界近辺で残存すべり帯や停留き裂(non propagating crack) と連絡して巨視き裂へ発展するのではないかと考えられる。フェライト中に平行に数多く存在するすべり線が結晶粒の中央付近でも破断近くなると微視き裂でつながる場合も見受けられた。これについてはすべり帯の間隔が $1 \sim 2 \mu$ ほどできわめて狭く、残存すべり帯や付近にせん在した非金属介在物などが応力集中源になり、細く、弱いフェライトの丘になだれ式にき裂を発生させた場合が考えられる。

3.2 すべり帯やき裂長さの変化と応力振幅との関連

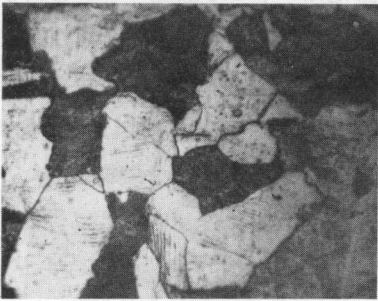
図3に応力振幅別のすべり帯とき裂長さの変化とを示した。同じ応力振幅の図で同じ線種の曲線は同じ試験片のものである。なお $\tau = 13.0 \text{ kg/mm}^2$ のすべり帯の変化を示す破線と点線



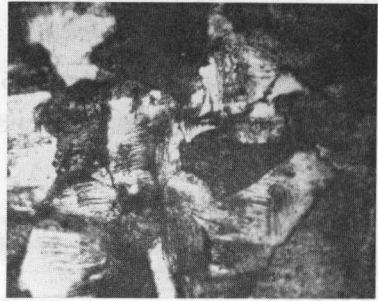
(a) $N=0$



(d) $N=4.2 \times 10^3$



(b) $N=8 \times 10^2$



(e) $N=1 \times 10^4$



(c) $N=1.8 \times 10^3$



(f) $N=3.16 \times 10^4$



(g) $N=3.32 \times 10^4$ 破断

図 2 すべり帯の変化

Fig. 2. Change of slip bands.

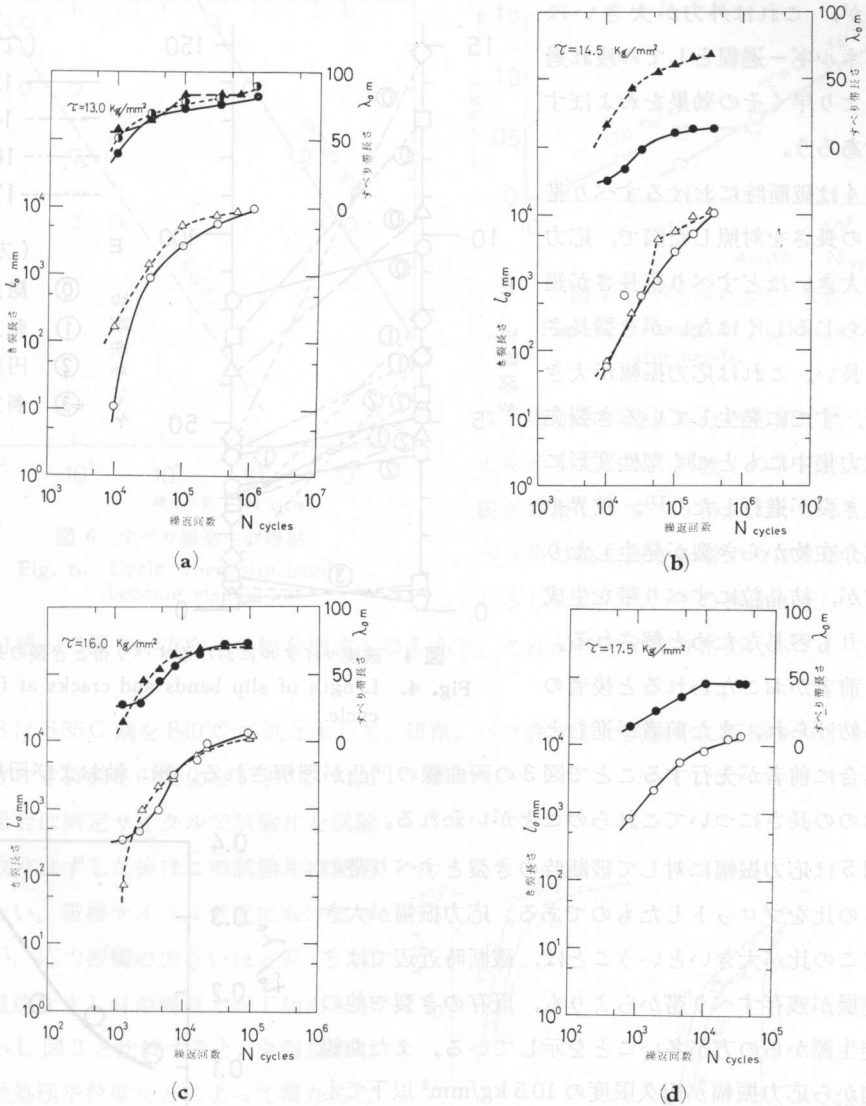


図3 すべり帯とき裂長さの変化
Fig. 3. Change of length of slip bands and cracks.

異なる観測個所に対する曲線でいずれもき裂の点線に対応するものである。どの応力振幅についてもすべり帯長さとき裂長さの曲線とを比べると、両曲線の凹凸は、ずれはあるが、同じ傾向を示している。すべり帯が材料の深部におよんで残存すべり帯を生じ、これに応力が集中して微視き裂を生ずる。粒界、非金属介在物、せん在の欠陥から発生することもあるが、微視き裂の始まりは残存すべり帯からが多いということは従来からいわれており¹⁾、今回すべり帯を観察してみてもこの傾向があったし、上記の両曲線の凹凸の傾向が同じであることもこのことを裏書きする。曲線は応力振幅が大きいほどすべり帯もき裂もより早く生ずることを表わし

ているが、これは外力が大きいほど、エネルギー過程としての疲れ過程に、より早くその効果をおよぼすためであろう。

図4は破断時におけるすべり帯とき裂の長さを対照した図で、応力振幅の大きいほどすべり帯長さが短く、いちじるしくはないがき裂長さがより長い。これは応力振幅が大きいほど、すでに発生しているき裂先端の応力集中にもとづく塑性変形によってき裂が進行したり¹³⁾、粒界や非金属介在物からき裂が発生したりする方が、結晶粒にすべり帯を生成するよりも容易なためと解される。なお、前者がおこなわれると後者の進行が妨げられ、また前者が進むと

いう具合に前者が先行することで図3の両曲線の凹凸が理解される。総、軸および円周方向のおおのの長さについてこれらのことがいわれる。

図5は応力振幅に対して破断時のき裂とすべり帯の総長さの比をプロットしたものである。応力振幅が大きいほどこの比が大きいということは、破断時近辺ではき裂の進展が残存すべり帯からよりも、既存のき裂や他のき裂発生源からの方が多いいことを示している。また曲線の傾向から応力振幅が耐久限度の10.5 kg/mm²以下でもすべり帯を生ずるようである。

3.3 すべり帯の発生とその長さや幅の増加率の変化

図3のすべり帯の変化を示す曲線より求めたすべり線の発生サイクルと応力振幅との関係を試験片の時間疲れ限度線と並べたものが、図6である。どの応力振幅においても破断サイクルの約1%のサイクルですべり線が発生することを示している。

図7はすべり帯の太さの変化を繰返し回数に対してプロットしたものである。サイクルの進むにつれてはだいに太くなるが、サイクル当たりの増加率は減る。一方図3はすべり帯の長

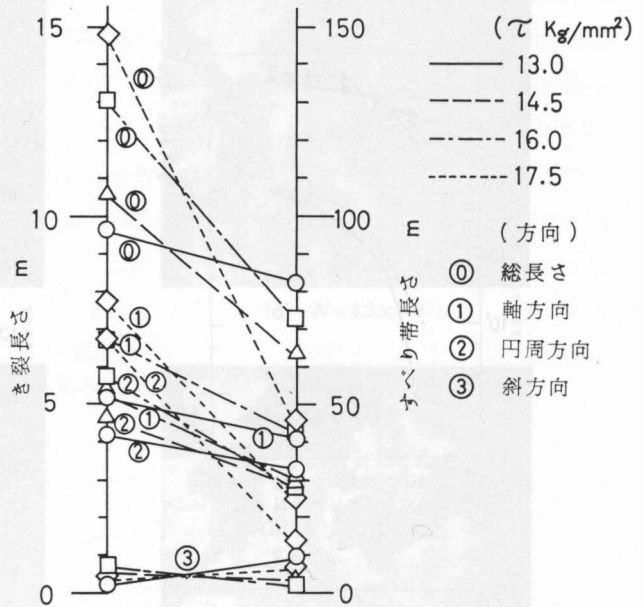


図4 破壊サイクルにおけるすべり帯とき裂の長さ
Fig. 4. Length of slip bands and cracks at failure cycle.

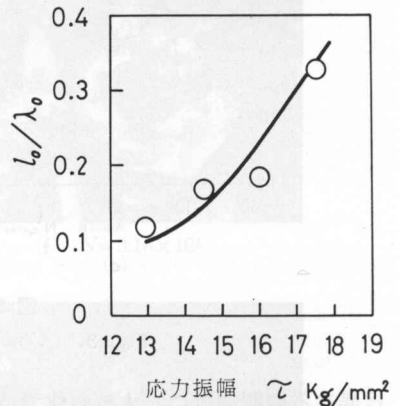


図5 $l_0/\lambda_0-\tau$ 曲線
Fig. 5. $l_0/\lambda_0-\tau$ curve.

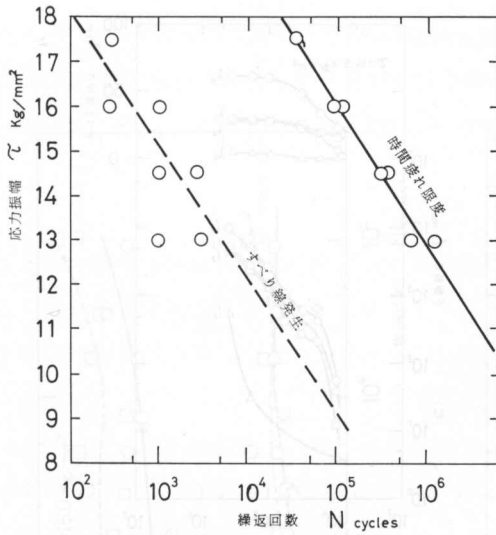


図 6 すべり線発生時期
Fig. 6. Cycle when slip bands become visible.

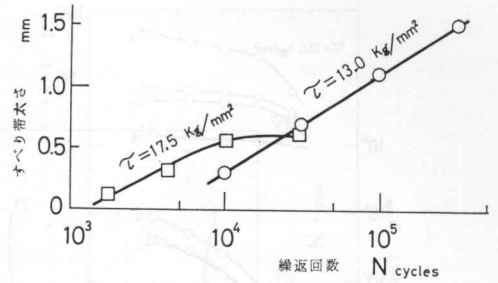


図 7 すべり帯の太さの変化
Fig. 7. Change of thickness of slip bands.

さの増加率が疲れ寿命の初期で最大なることを示している。試験片の表面上ですべり線が集束してすべり帯が太くなったり、すべり帯の数や長さを増すのは初期にはいちじるしいが^{1),14)}、その後はしだいに内部の

抵抗に打勝って深さ、方向への幅を増すものもあり、これが残存すべり帯になっていくと解される。

図 8 は S35C 鋼を 840°C で焼なましして、研削、バフ磨きした試験片に両振りねじりを繰返したときのき裂長さの変化を示す¹⁵⁾。ただしこの場合は測定サイクルで試験片を試験機から取りはずした後はこの試験片は使用していない。破壊サイクル付近におけるき裂長さが、応力振幅の大きいほど長く、前記の高温焼なまし材の場合と同じ傾向を示す。しかし図 3 と比較すると、き裂長さの変化が熱処理や粒度などによって異なることがわかる。

3.4 すべり帯やき裂の方向性

図 9 (a) は $\tau = 13.0 \text{ kg/mm}^2$ のすべり帯やき裂長さの変化をそのき裂の方向別に画いたものである。図 9 (b), (c) および (d) は $\tau = 14.5, 16.0$ および 17.5 kg/mm^2 に対するものである。接尾 0 は総、1 は軸、2 は円周、3 は斜方向を表わす¹⁵⁾。この高温焼なまし材で $\tau = 13.0 \text{ kg/mm}^2$ に対する方向別の長さの割合はすべり帯もき裂もともに軸、円周、斜方向の順に約 50, 40, 10%、他の応力振幅では値は異なるが大きさの順序は変わらない。図 8 の 840°C 焼なまし材の場合はき裂長さが 65, 25, 10% 程度である。すべり線は結晶粒の方位が最大せん断応力の

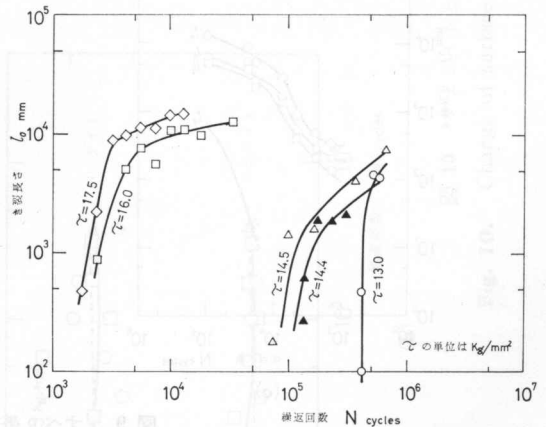


図 8 840°C 焼なまし鋼のき裂長さの変化
Fig. 8. Change of crack length of 840°C annealed steel.

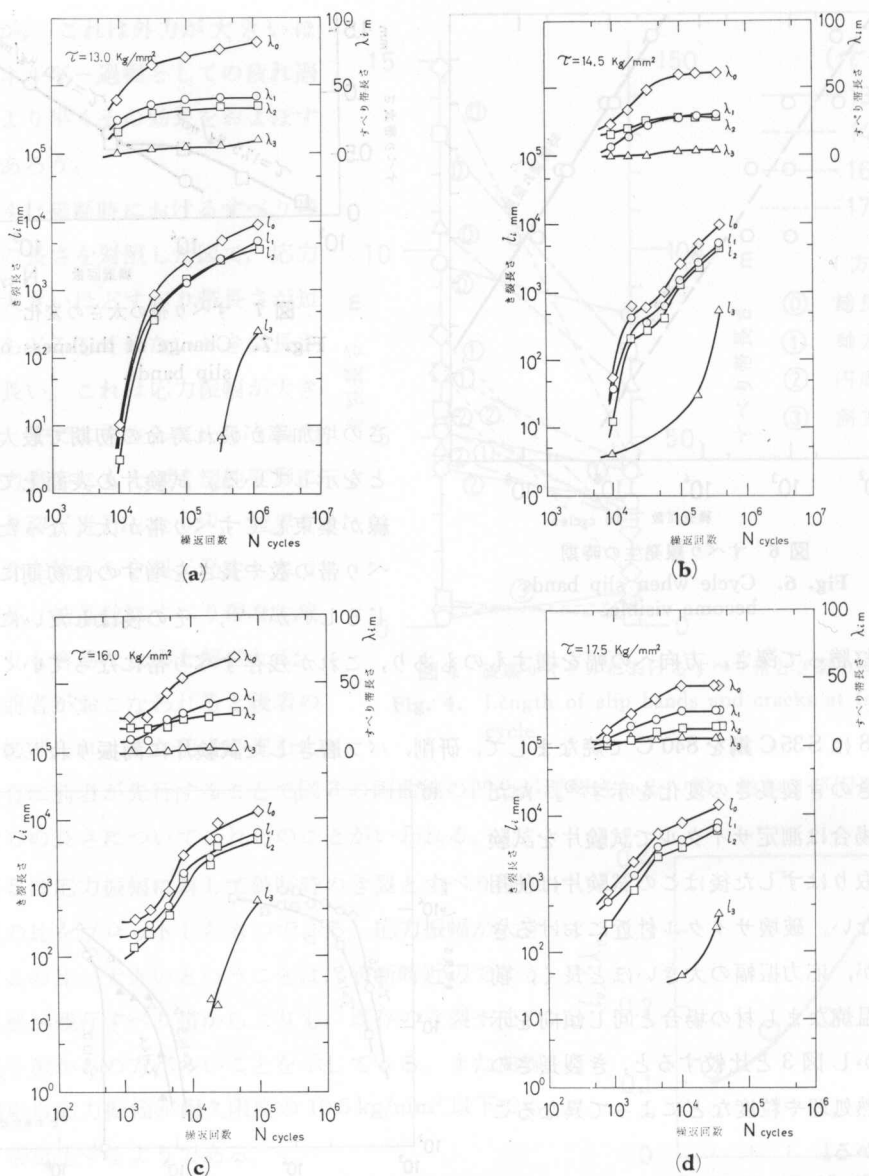


図9 すべり帯やき裂の方向
Fig. 9. Direction of slip bands and cracks.

方向に一致した結晶に生ずるので^{(16),(17)}、等方性材料であれば、ねじりの場合は軸と円周方向に生ずる割合は同じなはずである。上記の実験結果が得られたのは高温焼なまし材はかなり等方性になっているが、840°C 焼なまし材は帯状組織による異方性があるためと思われる。

3.5 疲れに伴う硬さの変化

図10は疲れに伴う硬さの変化を示したものである。ヴィッカース微小硬度計によりフェライトおよびパーライトを別々に測定した。試験荷重は50 gr、荷重時間は15 secですべり帯

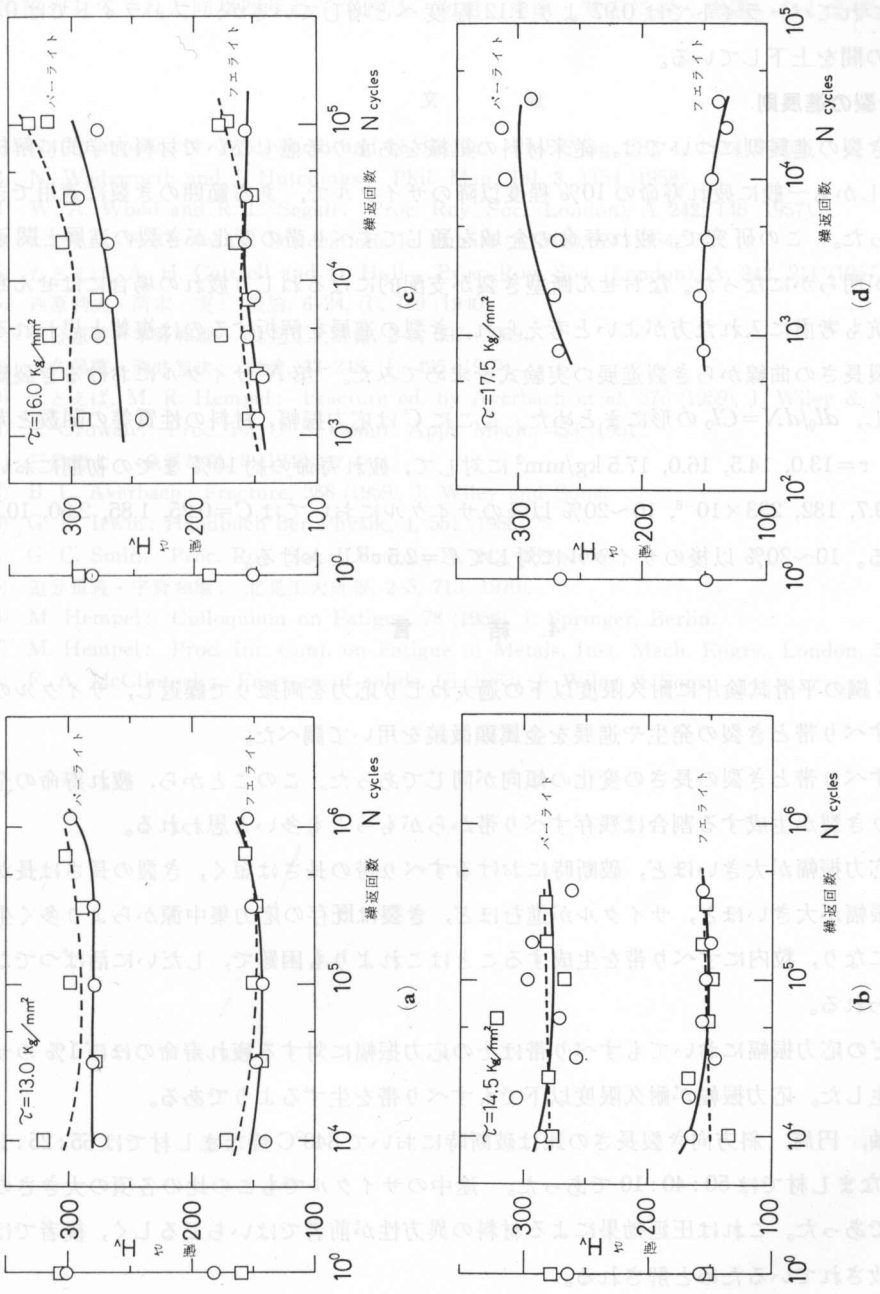


図 10 フェライトとパーライトの硬さの変化
Fig. 10. Change of surface hardness of ferrite and pearlite.

の存在しない点5カ所の平均をプロットした。処女材の硬さはフェライトで150~180, パーライトで260~300程度であった。破断時における硬さと処女材の硬さとの比は応力振幅の大きくなるにつれてパーライトでは0.97より1.12程度へと増しているが、フェライトでは0.9~0.98程度の間を上下している。

3.6 き裂の進展則

疲れき裂の進展則については、従来材料の組織をあまり考慮しないで材料力学的に解析してきた。しかも一般に疲れ寿命の10%程度以降のサイクルで、ある範囲のき裂に適用できるものであった。この研究で、疲れ寿命の全域を通じてすべり帯の変化がき裂の進展と関連を持つことが明らかになった。なおせん断型き裂が支配的になるねじり疲れの場合にはせん断面の接触抵抗も考慮に入れた方がよいと考えられ、き裂の進展を解析するのは複雑と思われる。図3のき裂長さの曲線からき裂進展の実験式を求めてみた。第 N サイクルにおけるき裂総長さを l_0 とし、 $dl_0/dN=C l_0$ の形にまとめた。ここに C は応力振幅、材料の性質等の関数と考えられる¹⁸⁾。 $\tau=13.0, 14.5, 16.0, 17.5 \text{ kg/mm}^2$ に対して、疲れ寿命の約10%までの初期においては $C=8, 9.7, 132, 233 \times 10^{-6}$ 、10~20%以降のサイクルにおいては $C=0.25, 1.85, 2.60, 10.5 \times 10^{-6}$ である。10~20%以後のサイクルに対して $C=2.5 \tau^{12}$ とおける。

4. 結 言

S35C鋼の平滑試験片に耐久限度以下の過大ねじり応力を両振りで繰返し、サイクルの進行に伴うすべり帯とき裂の発生や進展を金属顕微鏡を用いて調べた。

1) すべり帯とき裂の長さの変化の傾向が同じであった。このことから、疲れ寿命の全期間にわたりき裂が生成する割合は残存すべり帯からがもっとも多いと思われる。

2) 応力振幅が大きいほど、破断時におけるすべり帯の長さは短く、き裂の長さは長かった。応力振幅が大きいほど、サイクルが進むほど、き裂は既存の応力集中源からより多く生成するようになり、粒内にすべり帯を生成することはこれよりも困難で、しだいに活ばつでなくなると思われる。

3) どの応力振幅においてもすべり帯はその応力振幅に対する疲れ寿命のはぼ1%のサイクルで発生した。応力振幅が耐久限度以下でもすべり帯を生ずるようである。

4) 軸、円周、斜方向き裂長さの比は破断時において840°C焼なまし材では65:25:10、1080°C焼なまし材では50:40:10であった。途中のサイクルでもこの比の各項の大きさの順序は同じであった。これは圧延効果による材料の異方性が前者ではいちじるしく、後者ではほとんど解放されているためと解される。

5) 1080°C焼なまし材の破断時におけるパーライトの表面硬さは処女材のその0.97~1.12倍程度であり、応力の大きいほど大きかった。フェライトでは0.9~0.98程度の間を上下して、上記の傾向はない。

本研究に対して有益な助言をいただいた北大工学部半沢宏教授に厚くお礼申し上げます。試験片の製作に尽力された本学機械工学科阿部清氏，鳴沢勇吉氏ならびに疲れ試験の遂行に非常に協力してくれた同科四年目学生倉島 明君，桑原 寛君に深く感謝いたします。

文 献

- 1) N. Thompson, N. Wadsworth and N. Louat: *Phil. Mag.*, [8], **1**, 113 (1956).
- 2) N. Wadsworth and J. Hutchings: *Phil. Mag.*, [8], **3**, 1154 (1958).
- 3) W. A. Wood and R. L. Segall: *Proc. Roy. Soc. (London)*, A **242**, 145 (1957).
- 4) たとえば, E. Orowan: *Dislocations in Metals (AIME)*, 69 (1954).
- 5) たとえば, A. H. Cottrell and D. Hull: *Proc. Roy. Soc. (London)*, A, **242**, 211 (1957).
- 6) 西原利夫・河本 実: *機論*, **6-24**, (I), I-9 (1940).
- 7) 追分重義・宇野和雄: *北見工大研報*, **2-3**, 397 (1969).
- 8) 大久保肇・酒井智次: *機論*, **33-248**, (I), 495 (1967).
- 9) たとえば, M. R. Hempel: *Fracture* ed. by Averbach et al, 376 (1959), J. Wiley & Sons.
- 10) E. Orowan: *Proc. 1st U. S. Congr. Appl. Mech.*, 453 (1951).
- 11) 三島徳七: *金属材料*, **8** (1940), アルス.
- 12) B. L. Averbach: *Fracture*, 388 (1959), J. Wiley and Sons.
- 13) G. R. Irwin: *Handbuch der Physik*, **4**, 551 (1958).
- 14) G. C. Smith: *Proc. Roy. Soc. (London)*, A, **242**, 189 (1957).
- 15) 追分重義・宇野和雄: *北見工大研報*, **2-5**, 713 (1970).
- 16) M. Hempel: *Colloquium on Fatigue*, 78 (1956), J. Springer, Berlin.
- 17) M. Hempel: *Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, Inst. Mech. Engrs., London*, 543 (1957).
- 18) F. A. McClintock: *Fracture of solids*, 65 (1963), J. Wiley & Sons.

1. 緒 言

自然界においては気流境界層の中に物体が存在するという流れの例が数多くあり、その代表として、地面に沿って流れる境界層内に建てられた橋脚や煙突の揺れおよび破損を有する現象をもった水路およびパイプ内の流れを挙げる事ができる。これらはいずれも境界層内に物体が存在する種々の流れであり、これらに関する正しい知識を得ることは極めて重要な意義を有している。また、最近大口径の煙突などが出現し、これら地上にある煙突周辺の風の流れがもとより、これらが風から受ける抵抗力に関して正しい資料を得ることが必要とされてきている。

かかる見地からして、本研究はこれら気流境界層の中に存在する三次元的物体の抵抗力につ