

# 疲労過程におけるすべり挙動

高 行 男

## 1. 緒 言

疲労過程における材料のすべり挙動の検討は、疲労破壊の機構そのものを理解する際に重要な事柄となる。これは、すべり形成が容易な箇所からき裂が発生し、き裂の進展に先立ちその先端部においてすべりの繰返しが起こることから明らかなように、疲労き裂の挙動とすべり挙動が密接に関連しあっているからである。しかしながら、疲労き裂の発生・進展と関連したすべり挙動について体系だった説明がなされていないので、著者らの若干の報告<sup>1-9)</sup>を含め、疲労過程におけるすべり挙動について検討する。

## 2. 疲労過程におけるすべり線の基本的性質と静的荷重におけるそれとの比較

疲労過程において発生するすべり線については、き裂の形成を研究するために試験片表面の状態を詳しく検討した Ewing らの研究<sup>9)</sup>以来、多くの研究の積み重ねによってその様相が明らかにされ、静的荷重下における様相との類似点および相違点が知られている。すなわち、疲労過程で生ずる結晶のすべり面とその方向は、静的荷重と同じであるが<sup>7)</sup>、発生したすべり線を観察すると、静的荷重の場合は表面で階段状となるのに対し、疲労の場合はみぞ状となって、その形態を異にしている<sup>8)</sup>。また、疲労の場合のすべり線の発生の様子は、局所の結晶粒ごとにあらいすべり線が現われ、静的荷重の場合に見られるような数結晶粒にわたり、鋭い直線的なものではない<sup>9,10)</sup>。

疲労においても、静的荷重の場合と同様に、すべり線を発生させる限界の応力が存在し、その値は材料の疲労限度よりもかなり低くなる<sup>7-11)</sup>。図 1 には、欠陥などの応力集中源が存在しない平滑材の S-N 曲線とすべり線発生限界の応力曲線との関係を示した<sup>11)</sup>。

疲労の場合のすべり線は、すべり線発生限界応力より高い応力を加えると直ちに現れるのではなく、ある繰返し数に達したとき初めて発生する。このすべり線は、繰返し数を増すと、表面を数  $\mu\text{m}$  除去しても光学顕微鏡下で黒い筋として存在する残存すべり帯<sup>12)</sup>となるが、静的荷重の場合には大部分消え、残るものもかすかで不明りょうである<sup>13)</sup>。

疲労の場合のすべり発生条件は、最大せん断応力の振幅値によって決定されるが<sup>7,14)</sup>、応力分布(主として応力こう配)によっても影響を受ける<sup>15)</sup>。すべりの発生状況が最大応力ばかりでなく応

力こう配にも影響される場合の具体的な観察が、横穴を有する平滑丸棒材についてなされている<sup>16)</sup>。このように、すべり形成が応力こう配に影響されることは、同一の平滑材において、曲げ荷重による疲労強度が引張荷重によるそれより大きくなることの原因となる<sup>17)</sup>。

### 3. 疲労き裂の挙動とすべり線の挙動

疲労破壊に至るまでの過程は、一般的に図2に示されるように<sup>17)</sup>、すべり線の形成を伴い、微小き裂が生じ、それらが連結、またはある微小き裂が優先的に成長し主き裂となり、主き裂の進展によって材料の破壊となる。このように、疲労破壊というのは、き裂の発生と進展の内容を有する現象である。

#### 3・1 き裂の発生とすべり線の挙動

き裂の発生を考える際には、定義するき裂の寸法が問題となる。本章では、光学顕微鏡下での観察結果に基づいた範囲において、若干の検討を行う。

前章で述べた残存すべり帯が最終破断を導びくき裂の起点となるので<sup>12)</sup>、電解研磨などにより残存すべり帯などの被害層を除去すれば、疲労寿命は長くなる<sup>18)</sup>。なお、すべり線が発生した後の焼なまし処理の有無は、き裂の発生に影響を及ぼさないようである<sup>19)</sup>。

図1より推定できるように、すべり線の発生密度は、繰返し数を一定にして比較すれば応力振幅値によって異なり、応力振幅値を一定にして比較すれば繰返し数によって異なる<sup>10)</sup>。各応力レベルにおいて、き裂発生に必要な繰返し数のその応力における疲労寿命に対する割合を求めると、応力レベルが高いほどその割合は小さくなる<sup>20,21)</sup>。ところで、すべり線の発生時期は、応力レベルに無関係に疲労寿命の約数%程度の値であると報告されている<sup>22)</sup>。このことを認めれば、すべり線の発生からき裂の発生に至る過程が、応力レベルにより異なり、高い応力レベルほど容易であると考えられる。なお、すべり線の発生時期は、同一の応力振幅値においても温度<sup>23)</sup>や繰返し速度<sup>24)</sup>などによって影響を受けるが、こうした因子とすべり挙動との関連についての報告は、他の機会にゆずる。

応力振幅の大小に関連した事柄では、また、き裂の発生箇所が結晶粒の粒内であるのか、粒界

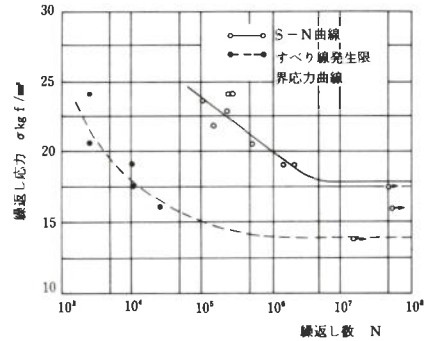


図1 平滑材におけるS-N曲線とすべり線発生限界応力曲線  
(焼なまし0.09% C鋼, 平面曲げ)

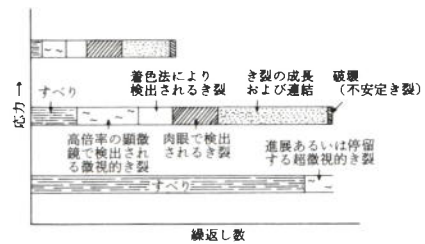


図2 き裂検出の各段階

であるのかという問題がある。低応力振幅ではすべり帯での集中的なすべりによりき裂が粒内で発生するが、高応力振幅では全面的にすべりが生じるため、ひずみの不連続の生ずる粒界にき裂が発生するとの報告がなされ<sup>25)</sup>、これを支持する実験結果も多い<sup>26)</sup>。しかし、これと逆の傾向を示す実験結果も報告されており<sup>27)</sup>、材料の相違による傾向の差異など、さらに検討を要する問題であると考えられる。

### 3・2 き裂の進展とすべり線の挙動

き裂の発生から進展に至る過程は、例えば第1段階から第2段階へのき裂の挙動の問題などがあり、解明されるべき重要な研究分野となっている<sup>28)</sup>。しかしながら、き裂の進展に対しては、その先端部における繰返しすべりが重要な役割を果たしており<sup>29)</sup>、また、き裂の進展に先立ってその先端部に発生するすべり線の領域が、き裂の進展に対して必要条件となっている<sup>30)</sup>。

このように、き裂の進展挙動を考える際にその先端部のすべり発生領域の疲労挙動の検討は、重要な研究課題であるが、具体的にき裂先端部のすべり領域に着目した研究報告は数少ないようである。

#### 3・2・1 き裂先端部のすべり線発生応力

平滑材表面には、図1に示したように<sup>11)</sup>、一般に疲労限度よりもかなり低い繰返し応力の作用に

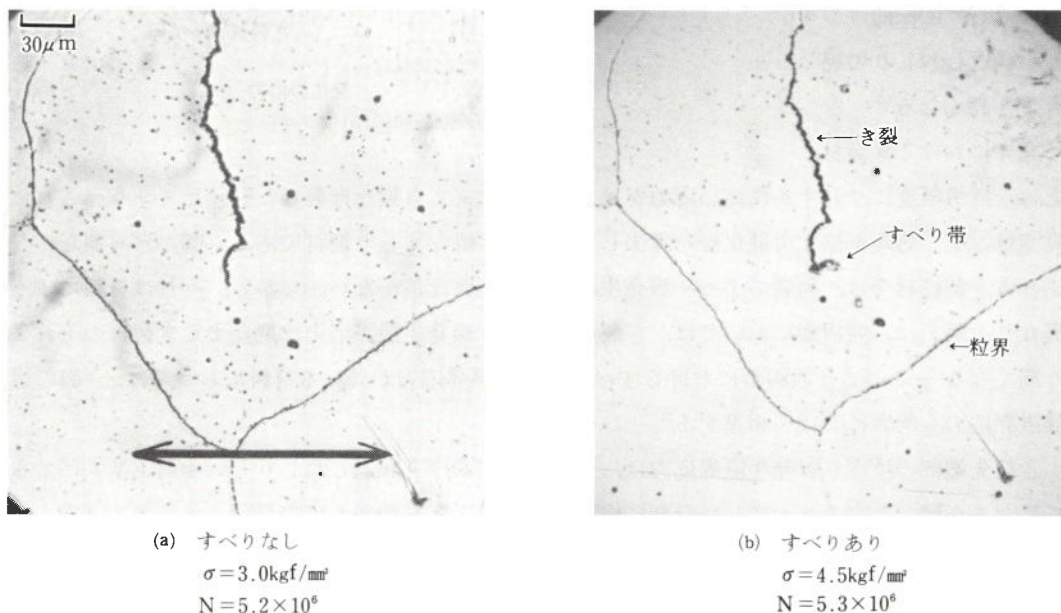


図3 き裂先端部におけるすべり発生の有無  
 (純鉄,  $l = 0.48 \text{ mm}$ , 回転曲げ。矢印は軸方向を示す。平滑材のすべり線発生限界応力  $\sigma_s = 9.0 \text{ kgf/mm}^2$ 。)

よって、一結晶粒程度の領域にすべり線が発生する。き裂先端部においては、き裂の応力集中のため平滑材のすべり線発生限界応力よりも低い繰返し公称応力によって、すべり線が観察される。観察の一例として図3に、表面き裂を有する純鉄丸棒平滑材に回転曲げによる適当な応力を  $(0.5 \sim 1) \times 10^7$  回加えた場合のき裂先端部のすべり線の発生状況を倍率400倍の光学顕微鏡で調査した結果を示す<sup>2)</sup>。このような測定例に基づき、き裂長さ  $l$  とすべり線発生の限界応力(すべり線の認められた測定点と認められなかった測定点の境界) との関係を図4に示す。図からも明らか

のように、き裂が長くなると先端部の応力集中が高くなるので、すべり線発生限界応力が低下する。繰返しねじりにおけるき裂に対しても同様に調査した結果によれば、き裂の応力集中の割合(平滑材とき裂先端部におけるすべり線発生限界応力の比)は、同一長さのき裂に対し、回転曲げの方が繰返しねじりの場合より高くなる<sup>1,2)</sup>。

図4におけるき裂材

とは、疲労限度よりわずかに高い応力を適当な回数加えてき裂を作製した試験片であり、これに真空焼なまし処理を施して硬化層を除去した試験片が焼なましき裂材である。図からも明らかのように、純鉄材では、両者のすべり線発生応力には顕著な差がない。しかし、それは材料により異なり、例えば、共析鋼においては、き裂材のすべり線発生限界応力は焼なましき裂材のそれより高くなる<sup>3)</sup>。このような両者におけるすべり線発生限界応力が異なる材料においては、き裂の進展限界応力も両者において相違する<sup>3)</sup>。

き裂先端部のすべり線発生限界応力は、上述の回転曲げと繰返しねじりという荷重型式によって異なるが<sup>1,2)</sup>、このことをさらに詳細に検討すれば、き裂先端部が実際受ける負荷型式(応力状態)によって相違するといえる<sup>4)</sup>。まず、繰返しねじりを受ける丸棒平滑試験片にき裂が同一長さであっても、それが試験片軸に垂直方向〔図5(3)〕にあるか45°方向〔図5(2)〕に存在するかにより(せん断型き裂か引張型き裂かにより)、すべり線発生限界応力は異なり、せん断型き裂の限界応力が引張型き裂のそれより低くなる〔図6の曲線(2), (3)参照〕。これは、同一の公称繰返しねじり

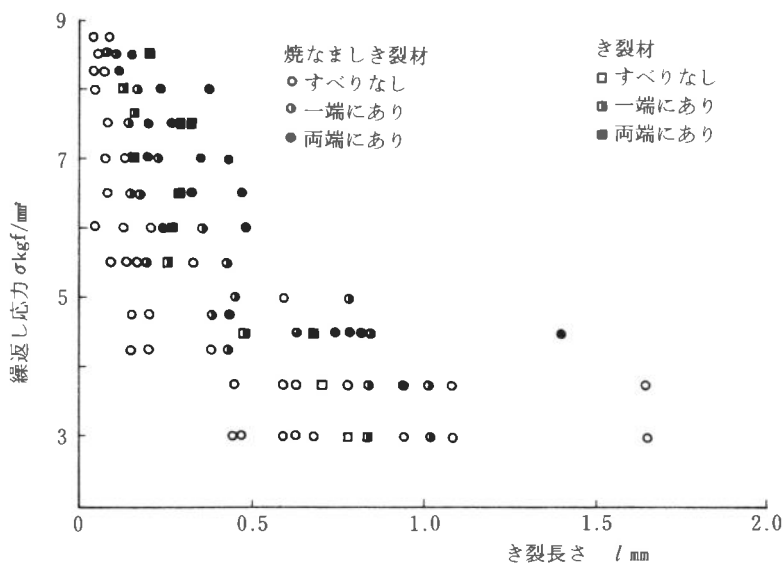
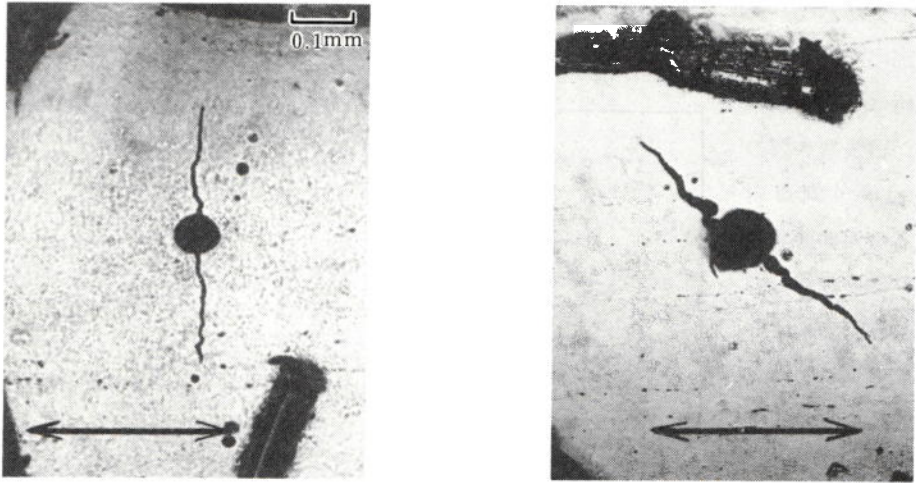


図4 き裂長さとしべり発生の応力 (純鉄, 回転曲げ)



(1) 回転曲げ  
(3) 繰返しねじり

(2) 繰返しねじり

図5 き裂の発生状況およびその負荷型式  
〔(1), (2):引張型き裂, (3):せん断型き裂, 共析鋼。矢印は試験片軸方向を示す。〕

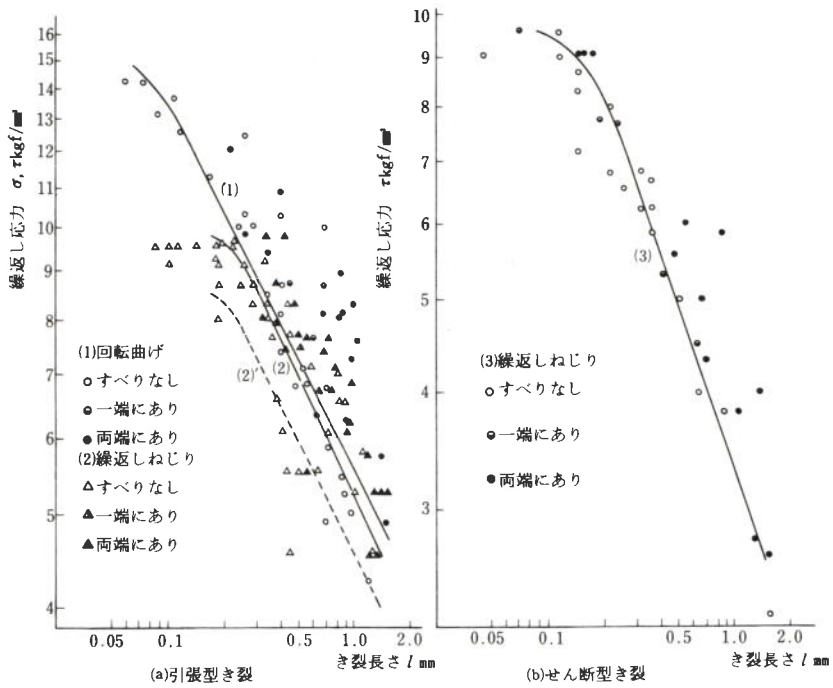


図6 き裂長さとすべり線発生限界応力(共析鋼)

応力を加えたとき、き裂先端部に加わるせん断応力値はせん断型き裂の方が引張型き裂の場合より高くなるので、前者の方が後者の場合より低い繰返しねじりの公称応力によってき裂先端部にすべり線が発生するためである。次に、同一長さの引張型き裂に対し荷重型式が回転曲げ（引張圧縮）か繰返しねじりかによって、き裂の挙動が異なる<sup>4,31)</sup>〔図6

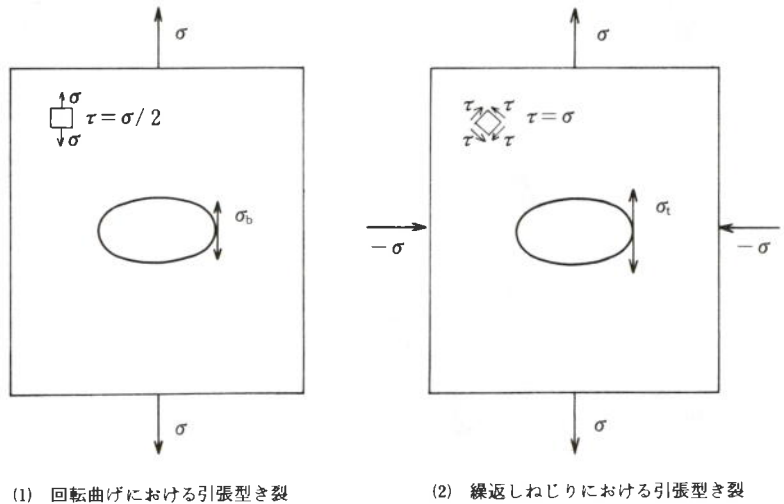


図7 単純引張りおよび引張りと圧縮を同時に受けるだ円孔を有する無限板による回転曲げおよび繰返しねじりにおける引張型き裂のモデル〔図5(1), (2)と対応〕

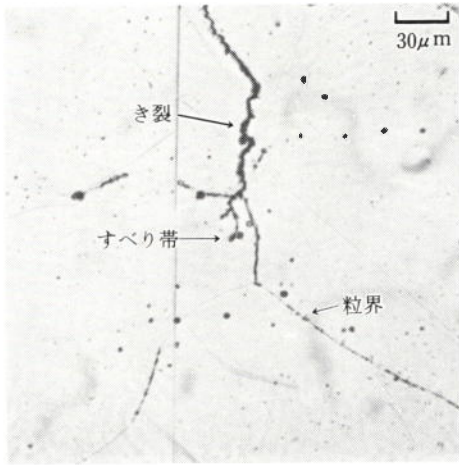
(a)〕。図(a)において、破線(2)は使用したシェンク式疲労試験機の慣性誤差<sup>45)</sup>を考慮して曲線(2)を修正したものであるが、図からも明らかなように、同一長さのき裂について回転曲げ〔曲線(1)〕と繰返しねじり〔曲線(2)〕を比較すれば、後者のすべり線発生限界応力は前者のそれより低い。これは、図7に示したように、回転曲げにおける引張型き裂先端部の応力状態は繰返しねじりにおける引張型き裂の場合と異なるためである。すなわち、後者では、図7に示されたき裂先端部に向かう圧縮応力が存在するため、同一の繰返し応力を加えたときに先端部に発生する後者の応力 $\sigma_t$ は前者の応力 $\sigma_b$ より大きくなる<sup>46)</sup>。この理由により、後者では前者に比べき裂先端部のすべり線の発生が容易になり、後者のすべり線発生限界応力は、前者の場合より低くなる<sup>4)</sup>。このき裂先端部に向かう圧縮応力は、また、き裂の進展を促進する効果を有している<sup>4,31)</sup>。

なお、このようなき裂先端部における応力状態の相違は、き裂の進展限界応力における先端部の材質の変化（かたさ変化）の程度にも差異をもたらす<sup>3)</sup>。

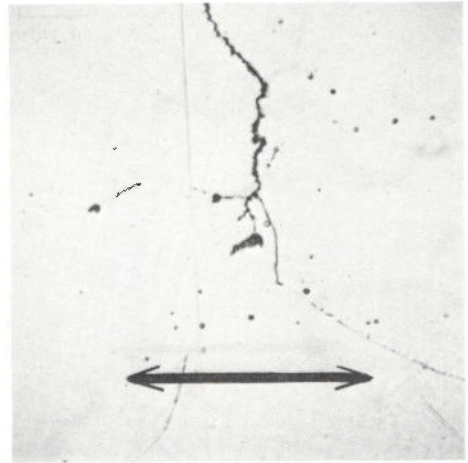
### 3・2・2 き裂先端部のすべり領域の変化

き裂先端部のすべり領域は、き裂の進展限界応力以下においても、前述のすべり線発生限界応力より高い繰返し応力を加えれば変化し、繰返し応力が高いほどその領域は増加する。図8は、純鉄材におけるき裂の同一先端部において繰返し応力を $N = (0.5 \sim 1) \times 10^7$ 回加えたとき、繰返し応力の増加に伴うすべり領域の変化の一例を示したものである<sup>2)</sup>。繰返し数を $N = (0.5 \sim 1) \times 10^7$ としたのは、き裂の進展限界応力以下の応力ではき裂先端部のすべり発生領域が図9に示すよう

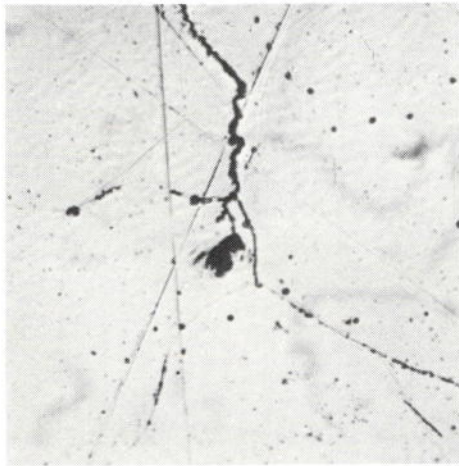




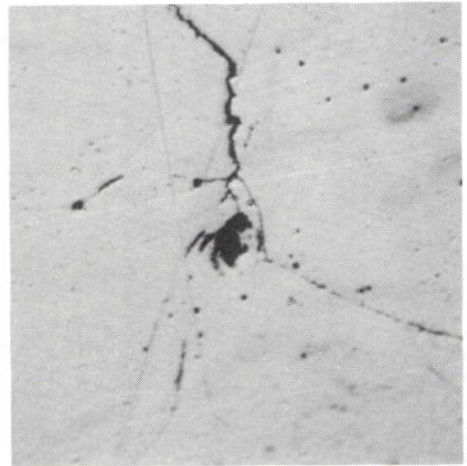
(a)  $\sigma = 3.0 \text{ kgf/mm}^2$   
 $N = 5.2 \times 10^6$



(b)  $\sigma = 4.5 \text{ kgf/mm}^2$   
 $N = 5.3 \times 10^6$

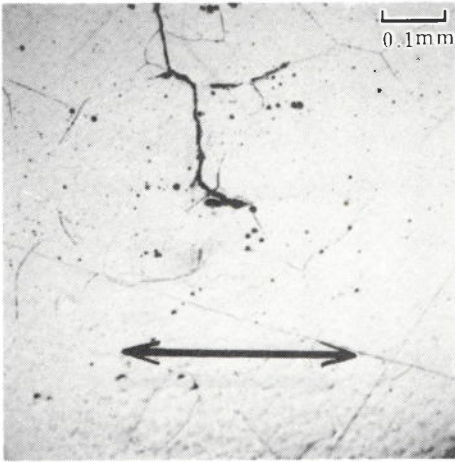


(c)  $\sigma = 6.0 \text{ kgf/mm}^2$   
 $N = 9.5 \times 10^6$

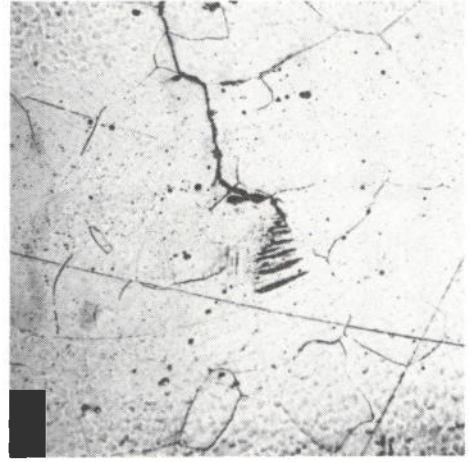


(d)  $\sigma = 7.0 \text{ kgf/mm}^2$   
 $N = 5.3 \times 10^6$

図8 き裂進展限界応力以下の繰返し応力の増加に伴うき裂先端部のすべり領域 (純鉄,  $l = 0.78 \text{ mm}$ , 回転曲げ)



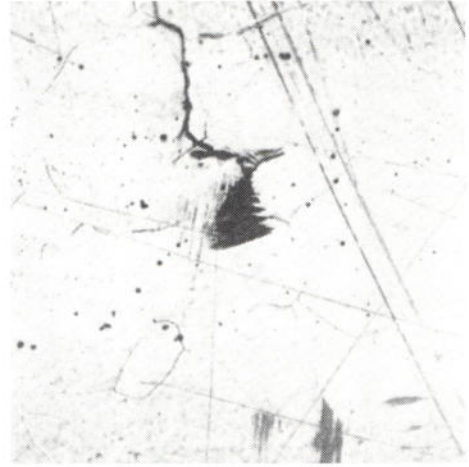
(a)  $N=0$



(b)  $N=0.94 \times 10^6$



(c)  $N=5.1 \times 10^6$



(d)  $N=15.4 \times 10^6$

図9 繰返し数の増加に伴うき裂先端部のすべり発生の状況(純鉄,  $l=0.73\text{mm}$ ,  $\tau=6.75\text{kg}$   
 $f/\text{mm}^2$ , 繰返しねじり)



に  $N=0.5 \times 10^7$  程度で飽和する傾向が認められるからである<sup>2)</sup>。繰返し応力がき裂の進展限界応力よりも高くなれば、図10に示すようにすべり領域内にはき裂の進展が起り、進展限界応力より低い場合に観察されたすべり領域の飽和現象は起らず、繰返し数の増加とともにすべり領域が次第に広がっていく。これらのことから、き裂が進展する場合には、ある大きさ以上のすべり領域が先行する必要があるといえる<sup>2)</sup>。この領域については、さらに検討され<sup>3)</sup>、き裂の進展限界においては、き裂先端部からすべり発生領域の周縁までの最大長さ（一般にはき裂の進展方向）が、取扱ったき裂長さの範囲 ( $l=0.1 \sim 2.0\text{mm}$ ) では、き裂長さに依らずほぼ一定となる。

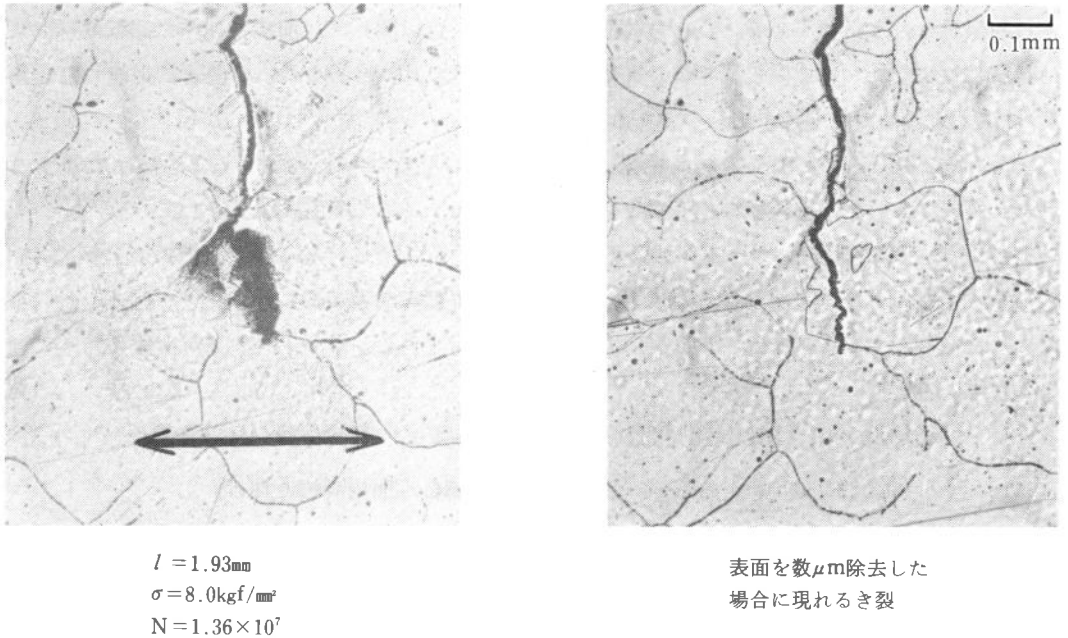


図10 き裂進展限界応力よりも高い応力を繰返した場合の進展状況（純鉄，回転曲げ）

### 3・2・3 き裂の進展速度とすべり発生領域

報告<sup>32,33)</sup>によれば、き裂先端部のすべり発生領域と細束X線によるき裂先端部の substructure の発達した領域が、ほぼ一致しているが、材料により両者は必ずしも一致しないようである<sup>34,35)</sup>。しかしながら、き裂先端部の substructure の発達の度合いがき裂の進展速度と密接に関係していること<sup>36,37)</sup>および前項で述べたように、き裂が進展するには先端部にある大きさのすべり発生領域が先行する必要があることから、すべり発生領域とき裂の進展速度との関係を検討することは、合理的であると考えられる。

き裂の進展速度  $dl/dN$  とき裂先端部のすべり発生領域の長さ  $\xi$  との関係が次式のように報告されている<sup>38,39)</sup>。

$$dl/dN = 6.0 \times 10^{-5} \xi^{1.7} \quad (\text{純鉄, 引張圧縮}) \quad [1]^{38)}$$

$$dl/dN = 1.9 \times 10^{-8} \xi^{1.5} \quad (\text{S15C, 面内両振り曲げ}) \quad [2]^{39)}$$

ここで $\xi$ は、き裂先端部からき裂の進展方向へのすべり領域周縁までの距離である。

0.23% C 低炭素鋼の2軸応力下(一定内圧と軸方向引張圧縮)での検討によれば、

$$dl/dN = 1.65 \times 10^{-8} \xi^{1.54} \quad [3]^{40)}$$

であり、上記の式[2]と類似している。このことは、き裂先端部のすべり領域の大きさ $\xi$ を用いると、き裂の進展速度は応力振幅やき裂長さに依存しない式で整理されるばかりでなく、同一材料に対しては負荷型式にもよらない同一の式で表されることを指摘できるものと考えられるが、さらに検討を行う必要がある。この負荷型式によらない点に関して、前項で述べた回転曲げおよび繰返しねじりにおける引張型き裂の進展限界における $\xi$ が、両者において顕著に相違しない事実<sup>3)</sup>は、上述の指摘を支持するものである。

また、 $\xi$ を用いると、種々の結晶粒径(46 $\mu$ ~250 $\mu$ )を持つAlについても $\xi$ が結晶粒径より大きい領域においては、粒径の相違によらず同一の $dl/dN$ と $\xi$ の関係式が成立している<sup>41)</sup>。

ところで、き裂先端部のすべり領域の長さ $\xi$ は、図8に示したように、繰返し応力の上昇に伴いその領域は増加する。き裂が長くなると、すべり線発生限界応力が低くなること(図4)から推察されるように、 $\xi$ はき裂長さと負荷応力によって決定される。すなわち、 $\xi$ が次式のように報告されている<sup>35,39)</sup>。

$$\xi = 1.3 \times 10^{-1} \Delta K^{1.6} \quad (0.05\% \text{ C 鋼, 繰返し引張り}) \quad [4]^{35)}$$

$$\xi = 0.032 \left\{ \sec \left( \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{0.77\sigma_y} - 1 \right) \right\} l \quad (\text{S15C, 面内両振り曲げ}) \quad [5]^{39)}$$

ここで、 $\Delta K$ は応力拡大係数範囲、 $\sigma$ は曲げ応力、 $\sigma_y$ は降伏応力、 $l$ はき裂長さである。

上記以外の他の報告<sup>42,43)</sup>をも考慮すれば、き裂先端部のすべり領域の長さ $\xi$ は、ほぼ $\Delta K^2$ に比例しているものと考えられる。この $\xi$ と $\Delta K^2$ との関係を認めれば、前述の式[1]~[3]におけるき裂進展速度 $dl/dN$ と $\xi$ の関係式を用いて $dl/dN$ と $\Delta K$ との関係が求められ、それはよく知られた $dl/dN = C (\Delta K)^4$  [ $C$ :定数]<sup>44)</sup>と類似した関係式となる。

#### 4. 結 言

本論では、疲労過程におけるすべり挙動が、き裂の発生およびその進展と密接に関連していることについて概説した。しかし、著者が実際取扱った範囲は全体の一部分にすぎないため、重要な事実の見落としがあるかもしれないと考えている。今後、さらに検討を行いたい。

終わりに、著者らの報告として本論で述べた内容については、名古屋大学工学部 清家政一郎教授ならびに北岡征一郎助教授のご指導を賜わった。ここに記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

1) 清家・北岡・高, 機論, 40-335 (昭49-7), 1819.

- 2) 清家・北岡・高, 機論, 41-341 (昭50-1), 1.
- 3) 清家・北岡・高, 機論, 42-354 (昭51-2), 317.
- 4) 北岡・高, 機論, 42-359 (昭51-7), 1954.
- 5) 高・北岡, 機講論, No753-1 (昭50-3), 49.
- 6) Ewing, J. A. & Humfrey, J. W. C., Phil. Trans. Roy. Soc., A200 (1903), 241.
- 7) Gough, H. J., Proc. ASTM, 33 (1933), 3.
- 8) Wood, W. A., Proc. Int. Conf. Fatigue of Metals, (1956), 531.
- 9) 河本・ほか共著, 金属の疲れと設計, (1972), 2, コロナ社.
- 10) Ivanova, V. S., 著, 横堀鑑訳, 金属の疲労破壊, (1970), 59, 丸善.
- 11) Hempel, M. R., Fracture, (1959), 378, John Wiley & Sons.
- 12) Thomson, N., Wadsworth, N. & Louat, N., Phil. Mag., 1 (1956), 113.
- 13) Smith, G. C., Proc. Roy. Soc., A242 (1957), 189.
- 14) 横堀, 材料強度学, (1964), 172, 岩波書店.
- 15) 西谷・村上, 機論, 35-275 (昭44-7), 1389.
- 16) 西谷・鹿毛, 機論, 39-323 (昭48-7), 2005.
- 17) Christensen, R. H., Metal Fatigue, (1959), 376, McGraw-Hill.
- 18) 例えば, 石橋, 機論, 28 (昭37), 1301.
- 19) 西谷・池永, 機論, 42-361 (昭51-9), 2661.
- 20) 例えば, 西谷, 機論, 34-258 (昭43-2), 220. 西谷・吉川, 機論, 34-263 (昭43-7), 1190.
- 21) Francis, P. H., Trans. ASME, Ser. D, 91 (1969), 770.
- 22) 佐々木・村田, 機論, 35-273 (昭44-5), 927.
- 23) Grosskreutz, J. C., ASTM STP 495, (1971), 5.
- 24) 例えば, 古市・藤井・會山・水川, 機論, 31-222 (1965-2), 194.
- 25) Kemsley, D. S., J. Inst. Met., 85 (1957-56), 420.
- 26) 例えば, Laird, C. & Smith, G. C., Phil. Mag., 8 (1963), 1945. Boettner, R. C., Laird, C. & McEvily, A. J. Jr., Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), 379. 佐賀・ほか2名, 材料, 26-282 (昭52-3), 289.
- 27) 例えば, Laird, C. & Feltner, C. E., Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), 1074. 下河・ほか2名, 日本材料強度学会誌, 4 (1970), 108.
- 28) 小林・中沢, 第1段階の疲れき裂進展過程, 機械の研究, 連載講座(1)~(15), (1972-74).
- 29) 宮本, 機誌, 72-601 (昭44-2), 176.
- 30) 横堀, 機誌, 74-624 (昭46), 4 ; 72-608 (昭44), 1216.
- 31) 大南・坂根, 機論, 43-375 (昭52-11), 3955.
- 32) 平・田中, 材料, 17-183 (昭43-12), 1098.
- 33) 小長・本田, 材料, 16 (昭42), 985.
- 34) 平・田中・渡辺, 機論, 38-316 (昭47-12), 3074.
- 35) Yokobori, T., Sato, K. & Yamaguchi, H., Rep. Res. Inst. Str. Frac. Mat., Tohoku Univ., 9 (1973), 1.
- 36) 平・林, 機論, 33 (昭37), 1.
- 37) 林・鳥井, 材料, 18-188 (昭44-5), 391.
- 38) 平・田中, 材料, 18-195 (昭44-122), 1126.
- 39) 平・田辺・田中, 材料, 19-207 (昭45-12), 1114.
- 40) 佐賀・ほか3名, 材料, 26-280 (昭52-1), 80.
- 41) 佐賀・ほか2名, 材料, 26-291 (昭52-12), 12202.
- 42) 中川・福原, 機論, 41-345 (昭50-5), 1317.
- 43) 安藤・小倉, 材料, 25-268 (昭51-1), 99.
- 44) Paris, P. C. & Erdogan, F., Trans. ASME, Ser. D, 85 (1963), 528.

45) 西島, 材料, 12-118 (昭38-7), 528.

46) Timoshenko, S.P. & Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Ed., (1970), 191, McGraw-Hill.