The Society of Materials Science, Japan

117 回転曲げ荷重下の微小疲労き裂に対する線形破壊力学の適用限界の評価

岐阜大学工学部　正　○戸梶恵郎
正　小川武史
日本車輌製造会社　正　原田行雄

1．緒言　本研究は強度の異なる二種類の材料を用いて、回転曲げ荷重下の微小疲労き裂成長挙動を調べ、前報の結果も含めて、微小き裂に対する線形破壊力学(LEFM)の適用限界を材料の組織および強度との関連のもとに、総合的に評価、検討したものである。

2．実験方法　供試材は素材板厚25mmの60kg級高張力鋼HT60と24mmの低炭素鋼S10Cであり、化学成分を表1に示す。S10Cについては、熱処理により二種類の結晶粒径に調整した。熱処理は、細粒（フェライト平均結晶粒径d＝24μm)では900°C・1hr保持後空冷であり、粗粒(d＝84μm)では1100°C・4hr保持後炉冷である。なお、HT60の平均結晶粒径は 10μmである。試験片は直径8mm、平行部10mmの 平滑回転曲げ試験片である。エメリー紙で研摩後、 650°C・1hrの真空焼鈍を施した。熱処理後の機械的性質と結晶粒径を表2に示す。実験直前に、すべての試験片に電解研摩を施した。その他の実験方法は前報と同様であるので、省略する。

3．実験結果

3・1　き裂成長挙動　図1および図2は、それぞれHT60(疲労限度σ_w＝340MPa)およびS10C(細粒σ_w＝220MPa、粗粒σ_w＝190MPa)の各応力における主き裂の成長挙動を、煩雑さを避けるために実験点を省略して示したものである。ΔKには便宜的に$\sigma\sqrt{\pi c}$（σ：応力振幅、c：表面き裂半長)を用いた。応力が引張試験の降伏応力σ_{ys}にきわめて近いか、それを超えるような場合(HT60のσ＝480MPa(0.92σ_{ys})、S10Cのσ＝310MPa(細粒1.08σ_{ys}、粗粒1.33σ_{ys}))を除いて、き裂長さの大きい高ΔK領域では、微小き裂のdc/dN－ΔK関係は巨視貫通き裂のda/dN－ΔK関係とほぼ一致する。前報のSCM435でも同様に一致した。これらのことから、回転曲げ荷重下の疲労き裂成長特性は、繰返し応力が降伏応力に比較して小さければ、$\sigma\sqrt{\pi c}$によって評価され得るものと考えられる。一方、き裂長さの小さい低ΔK領域では、dc/dN の応力依存性が存在し、いずれの場合も巨視貫通き裂よりも高いdc/dNを示す。また、巨視貫通き裂のΔK_{th}以下でも微小き裂は成長する。さらに、この領域の成長挙動は複雑であり、多くの場合、dc/dNの一時的な低下現象が観察される。

各応力のdc/dN－ΔK関係は、ΔKの増加に伴ない徐々に巨視貫通き裂の da/dN－ΔK関係に漸近し一致

表1　材料の化学成分（%）

Materials	C	Si	Mn	P	S
HT60	0.09	0.25	1.67	0.019	0.004
S10C	0.11	0.20	0.38	0.013	0.019

表2　材料の機械的性質

Materials	Upper yield point σ_{su} MPa	Lower yield point σ_{sl} MPa	Tensile strength σ_B MPa	Breaking strength on final area σ_T MPa	Elongation ϕ %	Reduction of area ψ %	Grain size d μm
HT60	556	521	616	1419	24	72	10
S10C	298	286	433	977	33	70	24
	233		402	789	32	63	84

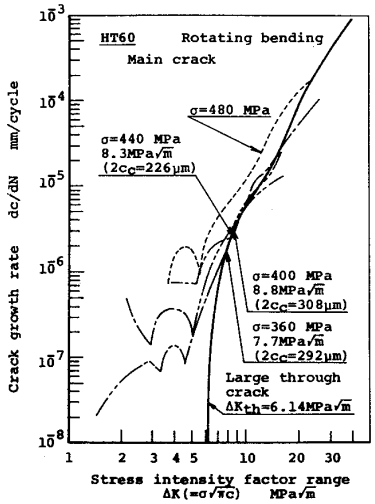


図1　主き裂のdc/dN－ΔK（$\sigma\sqrt{\pi c}$）関係（HT60）

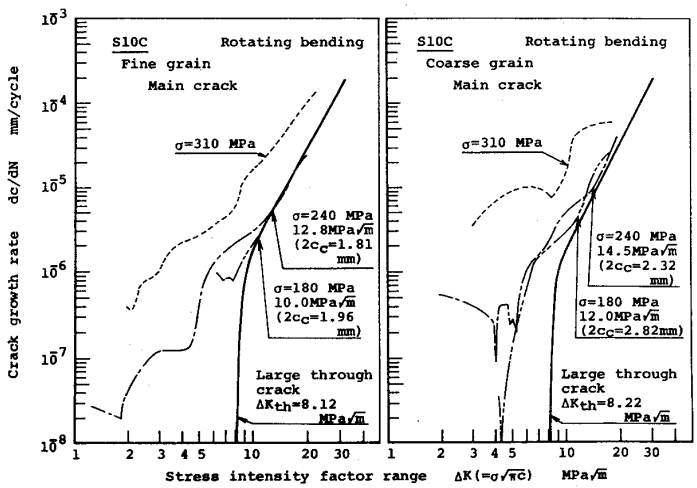
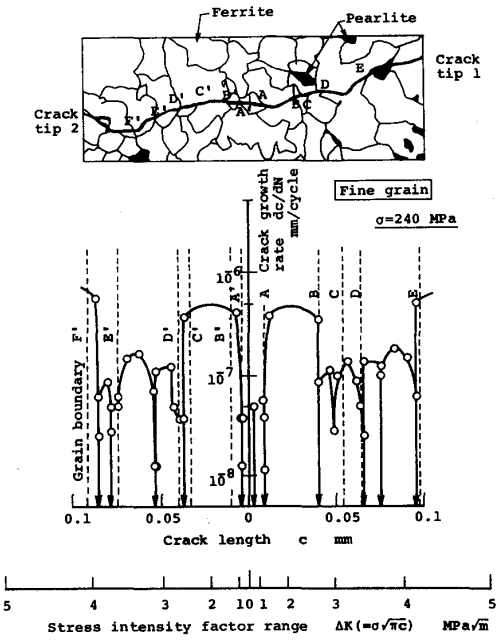


図2　主き裂のdc/dN－ΔK（$\sigma\sqrt{\pi c}$）関係（S10C）

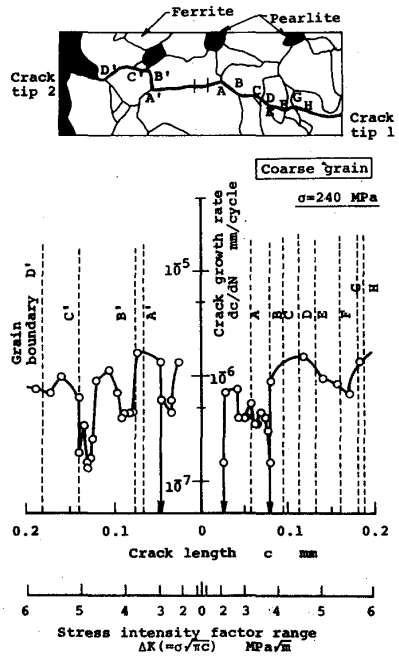
NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

する。この点のΔKと2cの値を図中に示した。これら2cの値は、LEFMの適用限界き裂長さ$2c_c$を示すことになるが、σと$2c_c$との間に一貫した関係はなく、$2c_c$のσ依存性は不明確である。従って、成長する微小き裂に対する$2c_c$は HT60では 230～310μm、S10Cの細粒および粗粒では それぞれ1.81～1.96mm、2.32～2.82mmとなる。これらの結果から、強度の低下、あるいは結晶粒径の増加は $2c_c$の増加をもたらすことがわかる。



(a) 細粒



(b) 粗粒

図3　dc/dNに及ぼす結晶粒界の影響（S10C）

3・2　結晶粒界の影響　図3にS10Cのき裂成長挙動の詳細な観察結果の一例を示す。いずれの場合も、き裂は不規則に成長しており、結晶粒界を通過する際に dc/dNが急激に低下する。この結晶粒界の影響のσ依存性は明確でなかったが、c依存性は明確であり、cの増加に伴ない不明瞭となる。S10Cの場合、2c＞200μm(細粒)、250μm(粗粒)となれば、結晶粒界の影響は消失し、dc/dNはcの増加に伴ない増加する。HT60では、図3のような観察を行っていないが、S10Cや前報のSCM435において観察されているように、結晶粒界の影響の出現する領域がアスペクト比の著しく変動する領域とほぼ一致していたことから、HT60における結晶粒界の影響領域は、2c＜100μmと確認された。

4．考察　前述したように、微小疲労き裂が低ΔK領域で示すdc/dNの不規則性は、結晶粒界の影響に起因している。この領域はHT60では2c＜100μm、S10Cでは2c＜200μm(細粒)、250μm(粗粒)である。フラクトグラフィの観察から、この領域の破面は明らかに他の領域とは区別され、第1段階き裂の様相を呈していることが確認された。従来は、き裂長さが結晶粒径などの材料微視組織の単位程度であれば、等方性連続体の仮定が成立せず、LEFMが適用できないとされてきたが、本研究結果はその範囲が数結晶粒に及ぶことを示している。この領域のき裂は結晶粒界によるdc/dNの低下およびアスペクト比の変動が著しく、微視組織に敏感なき裂であり、この意味で微視組織的微小き裂ということができる。図4に微視組織的微小き裂長さ$2c_m$とdとの関係を示す。SCM435の場合、dとして旧オーステナイト結晶粒径とパケット寸法の両者に対して整理した。図から明らかなように、SCM435の組織の単位としてパケット寸法を用いると、d≦30μmの範囲では材質に無関係に $2c_m$は強いd依存性を示し、$2c_m$≒9dとなる。一方、d＞30μmの範囲では、$2c_m$

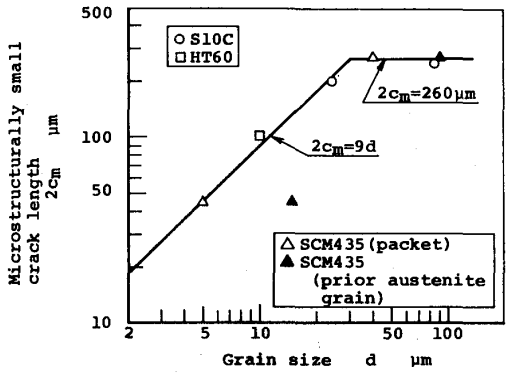


図4　微視組織的微小き裂長さと結晶粒径との関係

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

≒260μmとなり、dに依存しない一定値を示す。

図5(HT60)および図6(S10C)は、それぞれ図1および図2を書き直したもので、任意のΔKに対する 2 c_c の評価を与えている。すなわち、巨視貫通き裂の勾配−1/2 の直線から、微小き裂の実験点が逸脱し始めるき裂長さが2 c_cとなる。これによって評価される2 c_cは図1および図2に示されている2 c_cと同一となるべきものである。前述したように、2c＜9d、260μmで組織の影響が存在した。図中にその長さを破線で示したが、すべての場合、2 c_cはその寸法よりも相当大きく、完全に組織の影響が消失した 2 c_cが評価されている。本研究の範囲内で、2 c_cは得られた結果の最大長さを採用して、HT60では約310μm、S10Cの細粒では約1.96mm、粗粒では約2.82mmとなる。なお、S10Cについては、下限界値に対する2 c_cの評価も行った。その結果が図6の○印である。いずれの結晶粒径の場合も、き裂長さの大きい領域ではほぼ一定のΔK_{th}を示すが、巨視貫通き裂のそれとは一致せず小さい。この差異は、微小き裂と巨視貫通き裂の下限界値に対する主に酸化物誘起き裂閉口の関与の相違に起因すると考えられる。ΔK_{th}に対する2 c_cを評価する際には、この点に注意すべきである。この結果から、ΔK_{th}に対する2 c_cは 成長する微小き裂に対するそれよりも明らかに小さい。以上の2 c_c値は、図は省略するが、結晶粒径や降伏強度とは単独には依存しない。

ところで、dc/dN−ΔK関係が巨視貫通き裂のda/dN−ΔK関係と一致するき裂長さ以上のき裂は、物理的に小さくとも大き裂とみなされ、LEFMが適用できる。限界き裂長さ2 c_cと 前述の2 c_m の中間に位置するき裂長さの領域は、組織の影響は受けないが、dc/dNは巨視貫通き裂よりも高く、き裂閉口が大き裂と同程度まで形成されていく過程であると考えられる。このき裂閉口が評価できれば、LEFMが適用できると予想される。従って、この領域のき裂は力学的微小き裂である。図7に力学的微小き裂長さ、 すなわち き裂閉口形成距離 2 c_{cl}(=2 c_c−2 c_m)とσ_{ys}の関係を示す。2 c_{cl}はσ_{ys}に強く依存し、σ_{ys}の増加に伴ない低下する。

最後に、以上の結果から微小疲労き裂に対するLEFMの適用限界をまとめると次のようになろう。もし、微小き裂の閉口が評価されれば、2c＝9d (d≦30μm)、260μm(d＞30μm)がLEFMの適用限界き裂長さとなろうが、その評価が困難な現状では、2 c_c=2 c_m +2 c_{cl}が工学的なLEFMの適用限界き裂長さとなり、これは材料が指定されれば、図4と図7の関係を用いて評価されうる。

結言、参考文献省略。ただし、前報は第17回疲労シンポジウム前刷集、p16(昭59年11月)である。

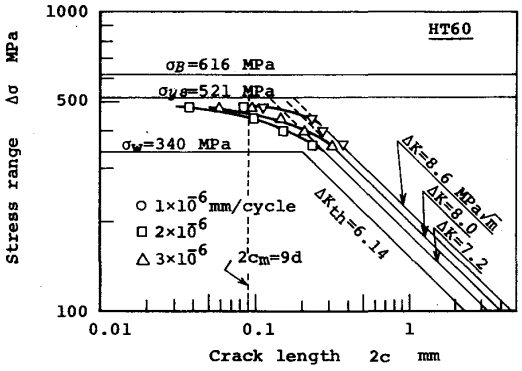


図5　応力幅とき裂長さの関係 (HT60)

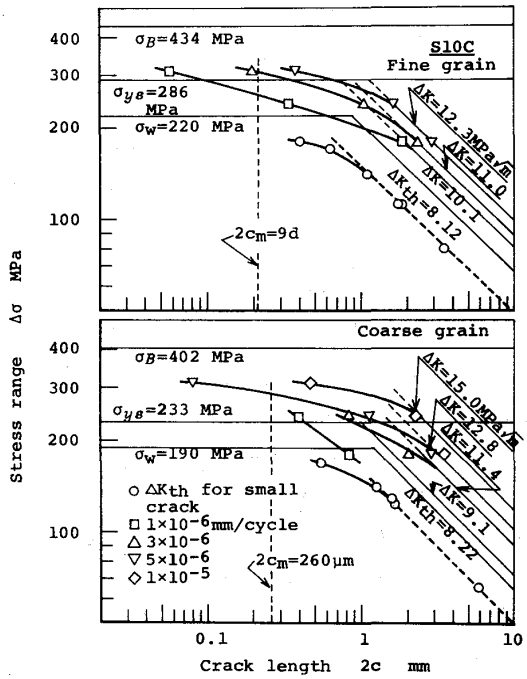


図6　応力幅とき裂長さの関係 (S10C)

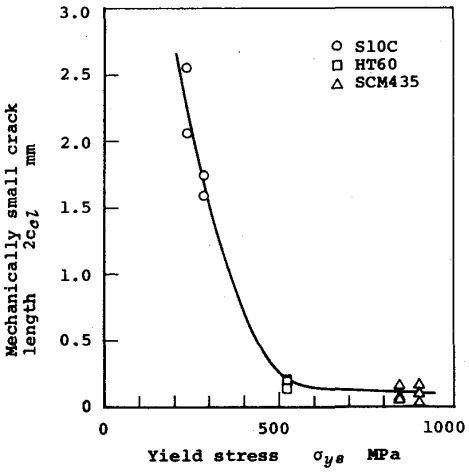


図7　力学的微小き裂長さと降伏強度の関係

NII-Electronic Library Service