

豊田工業大学 正 上野 明, 岸本秀弘
トヨタ自動車(株) 正 近藤拓也,
豊田工業大学・学生(現・光洋精工(株)) 正 ○森田和芳

1. 緒 言

窒化ケイ素における疲労き裂進展挙動に関しては、著者の研究を含め、CT試験片を用いた長いき裂の研究やピッカーズ圧子などで導入した微小圧痕き裂を用いた研究が数多く行われてきた。しかし、これらはき裂材を用いた研究であり、実際の構造用部材を数百 μm もの長さのき裂が入った状態で用いることは考えられないことから平滑材での研究が望まれる。本研究では前報に続き、平滑材での繰返し疲労試験を行い、製造欠陥から自然発生する微視き裂の成長挙動について明確にするとともに、その成長挙動の要因について検討を加えた。

2. 実験方法

実験に供した材料は、日本特殊陶業製ガス圧焼結窒化ケイ素EC14I(日本材料学会疲労部門委員会セラミックス強度研究分科会により配布された共通試料)である。疲労試験片の形状および寸法を図1に示す。疲労き裂の発生場所を特定する目的で、試験片には浅い切欠き(応力集中係数 $\alpha=1.037$)を設けた。疲労試験にはレーザ顕微鏡式その場観察装置を用いた。荷重条件は4点曲げで、応力比 $R=0.1$ 、周波数 $f=0.1$ の三角波とし、鏡面研磨された試験片表面上の製造欠陥から発生・成長する微視き裂を観察した。

3. 実験結果および考察

図2にS-N特性を示す。図中の矢印付きのプロットは、その時点で未破断であることを示す。 Δ プロットは、未破断

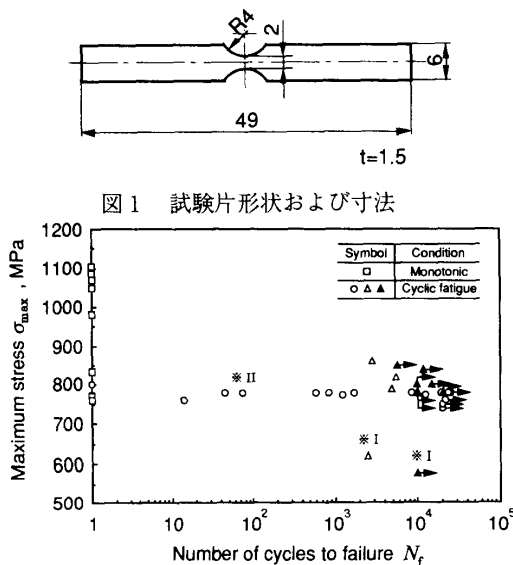
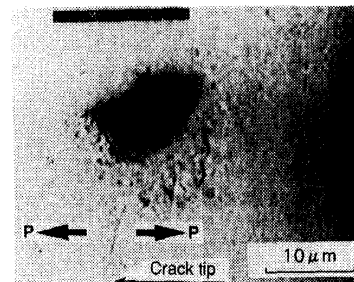


図2 S-N特性

試験片(Δ プロット)を再利用し、破断させたことを示す。また、 $N_f=1$ サイクル上の $\square$ プロットは単調曲げ試験の結果を示し、平均曲げ強度は986MPaである。S-N線図から、製造欠陥が極めて少ないとされているEC14Iにおいても、破断寿命にかなりのばらつきがあることがわかる。S-N特性を参考に適当な最大応力を設定し、倍率6000倍のき裂観察を伴った繰返し疲労試験を行った。その結果、図2中で※印を付けた2本の試験片(試験片I, II)についてき裂観察に成功した。き裂観察結果の一例を以下に示す。

試験片IIは最初 $\sigma_{\max}=580\text{MPa}$ で実験を開始した。その際、平均応力を負荷した段階で図3(a)に示すように、試験片表面の微細な空孔からき裂(空孔を含めたき裂全長 $2a=20.9\mu\text{m}$)が発生した。このき裂は、170サイクルの時点で $2a=31.7\mu\text{m}$ まで急成長したが、その後成長が止まったため10000サイクルで実験を打ち切り、 $\sigma_{\max}$ を620MPaに変更した



(a) $\sigma_{\max}=580\text{MPa}$, 平均応力負荷時



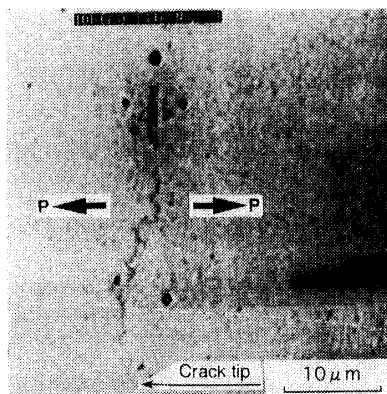
(b) $\sigma_{\max}=620\text{MPa}$, 破断直前
図3 試験片Iのき裂観察例

ところ、2150サイクルから再び成長が始まり、安定成長した後、2484サイクルで破断した。破断直前の2482サイクルにおけるき裂写真を図3(b)に示す。

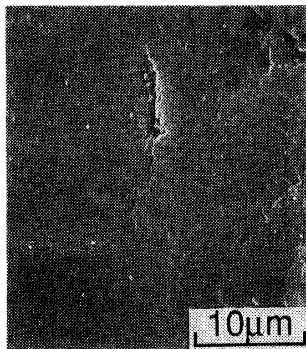
試験片IIは、 $\sigma_{\max}=780\text{MPa}$ で実験を開始した。5サイクルで試験片表面の細長い空孔からき裂($2a=12.8\mu\text{m}$)が発生した。このき裂は、73サイクルの時点で $2a=31.0\mu\text{m}$ まで成長したが74サイクルで破断した。破断直前($N=73$ サイクル)のき裂写真を図4(a)に示す。き裂が未成長のまま破断したため、破面近傍の試験片表面を詳細に観察した結果、図4(b)に示すように図(a)に示した欠陥およびき裂が試験片表面に存在した。このことは、セラミックスの最終破壊をもたらすのは1本のき裂であるが、き裂は複数の欠陥で発生することを示す。

試験片IおよびIIで測定したき裂全長 $2a$ と繰返し数比 N/N_f の関係を図5に示す。図中に(i), (ii), (iii)で区分するように、欠陥から発生したき裂では、(i) 発生後急成長する領域、(ii) 成長・停止を繰り返しながら安定成長する領域、(iii) 再び急成長する領域が現れるが、すでに発生したき裂を用いた場合は、領域(i)が現れない。このことより、欠陥から発生するき裂は、欠陥周辺の応力集中場の影響を受け、その結果、発生後急成長するものと考えられる。

き裂を半円形と仮定し、Raju-Newmanの式から求めた最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ とき裂進展速度 da/dN の関係を図6に



(a) 破断直前($N=73$ サイクル)



(b) 破面近傍の試験片表面写真
図4 試験片IIのき裂観察例

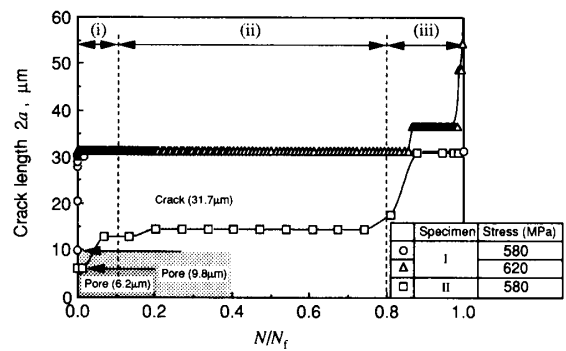


図5 き裂全長 $2a$ と繰返し数比 N/N_f の関係

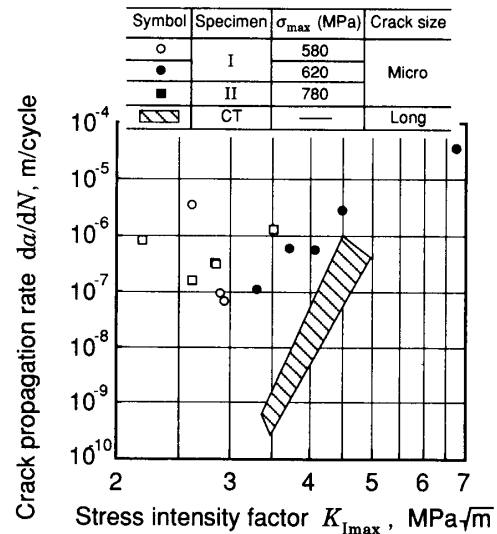


図6 最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ とき裂進展速度 da/dN の関係

示す。図中のハッチングは、同一素材のCT試験片で求めた長いき裂の成長挙動である。破断をもたらす主き裂も、直接破断には寄与しないき裂もほぼ同様の挙動を示す。しかし、図より明らかなように、窒化ケイ素の微視き裂の成長挙動は、長いき裂の成長挙動とは異なり、以下の特徴を有することがわかる。(1)微視き裂は、長いき裂の下限界値 $K_{I\text{th}}$ 以下の低い $K_{I\max}$ ($\approx 2.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)でも比較的高速度で進展する、(2)き裂が発生後、 da/dN の一時的な低下現象が見られる、(3)き裂長さが増加するに伴い、 da/dN は、長いき裂のき裂進展速度に漸近する、である。(1)~(3)の挙動は、前報で示した常圧焼結窒化ケイ素および多結晶アルミナで得られた微視疲労き裂成長挙動と同じである。

これら(1)~(3)の特徴が現れる要因として、線形破壊力学の適用限界に対して検討を加えた結果、窒化ケイ素平滑試験片の欠陥から自然に発生した微視き裂に対しては、線形破壊力学は適用できないこと等がわかった。

結言・参考文献 省略