

512 球転がり疲労下における窒化けい素の表面き裂進展に及ぼす 潤滑油浸入効果の検討

大阪大学 正 ○ 木田 勝之 大阪大学 正 小倉 敬二
大阪大学 [院] 元木 俊史

1. 緒言

軽量、高強度、高耐摩耗性を有するセラミックスを材料に用いた軸受の開発が行われるにいたり、軸受の高性能化実現への期待が高まっている。これまでの長年にわたって、玉軸受（軸受鋼）の疲労寿命は、内部き裂の発生寿命に支配されると考えられてきた。しかし、 Si_3N_4 製玉軸受では、表面で発生したき裂が進展する場合もあることが明らかにされている^{1),2)}。つまり、鋼製軸受で考えられているような表面き裂の摩滅³⁾が、 Si_3N_4 の高耐摩耗性によって、 Si_3N_4 製玉軸受では起こらない。また、表面き裂の進展挙動については、破壊力学的にも研究が進んでおり、例えば、圧延ローラーに見られる従動側表面き裂の進展挙動は、摩擦力と潤滑油のき裂内への浸入効果（くさび効果）によって説明できる⁴⁾ことが知られている。しかし、玉軸受については、表面き裂の進展挙動に注目した解析例がほとんどなく、球が接触する場合の表面き裂の進展機構が明らかとなっていない。

著者らは、 Si_3N_4 製玉軸受の表面き裂進展機構について研究を行ってきた^{1),2)}。本報では、特に、表面き裂の進展に潤滑油の浸入が影響を及ぼすのかどうかについて力学的に調べた。

2. 転がり疲労試験

疲労試験には、スラスト玉軸受を模した寿命評価試験機を用いた。この試験機では、荷重軸と球の遊星回転軸が一致する（Fig.1）。試験条件を Table I に示す。

供試材である HIP- Si_3N_4 （平板試験片）の機械的性質を Table II に示す。試験片には、ピッカース圧痕（荷重 10kgf）により、ラジアルき裂を初期き裂として付与した。付与位置は、Fig. 1 に示すように、球の転走軌道の内側と外側の 2箇所である。ピッカース圧痕の付与による残留応力の影響をなく

Table I Experimental conditions of contact fatigue test.

Load (N)	Hertzian maximum stress (MPa)	Half width of contact area (μm)	Frequency (Hz)
294	3979	188	40.0

Table II Mechanical properties of the specimen.

Bulk density ρ (g/cm^3)	Bending strength σ_B (MPa)	Fracture toughness K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
3.23	1011	6.6	294	0.27

すため、初期き裂の付与後、試験片表面を $60\mu\text{m}$ 除去し、表面粗さが、 $0.1\mu\text{m} : R_{\text{max}}$ 以下になるように、ラップ加工を施した。このときの表面き裂の長さ（表面での長さ）は、約 220 から $260\mu\text{m}$ となる。試験には、6個の Si_3N_4 の玉（平板試験片と同様の材質）を用いた。

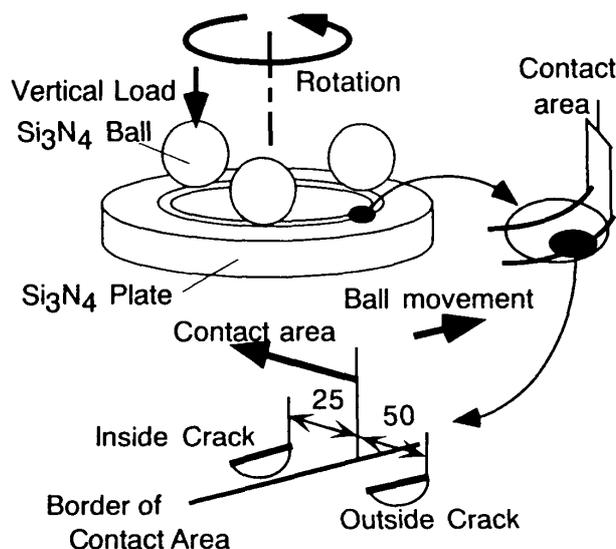


Fig.1 Schematic of rolling contact fatigue test. (Unit: μm)

3. 実験結果および考察

進展挙動の観察は、球の転走方向と平行方向に進展するき裂（Fig.1）について行なった。き裂は、接触領域の中央部に位置し、転走方向と直角方向に進展する場合に、最も進展することがわかっている¹⁾。本報で注目したき裂は、この中央部のき裂と異なり、境界近傍のき裂である。これは、接触圧の影響を受けるき裂（接触領域内）と受けないき裂（接触領域外）について、球の転走方向と平行方向には、ほぼ同様の接触応力履歴を持つことに注目したためである。両位置ともに、表面近傍で進展し、かつ、平行方向へ進展するき裂には、ゆるやかな分布を持つ引張応力場でせん断応力が作用する。

繰返し数の増加にともなうき裂進展量の変化を Fig.2 に示す。

Fig.2 から、き裂は初期から安定成長することがわかる。また、初期き裂の大きさが異なるものの、接触領域内と領域外のき裂は、よく似た進展挙動を示すことがわかる。

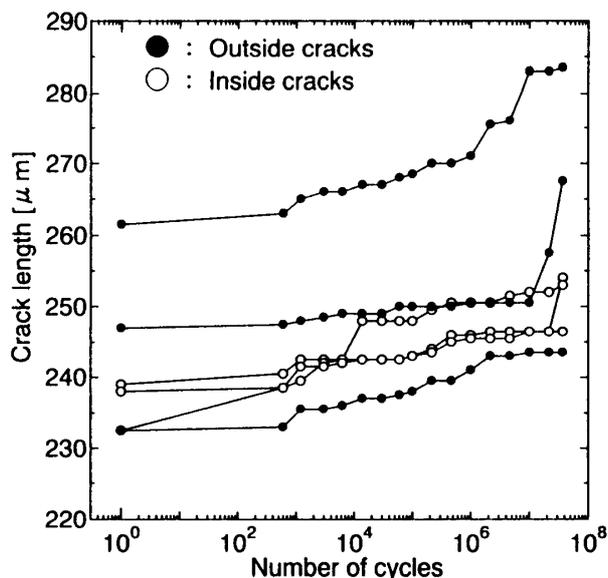


Fig. 2 Crack growth behavior. Competition between the inside cracks and the outside cracks.

接触領域内のき裂に対して、くさび効果が影響する、つまり、き裂内に油の浸入があり、かつ接触圧がき裂内面に引張応力として作用するのであれば、領域外のき裂に比べ、領域内のき裂は、顕著に進展するはずである。しかし、領域内と領域外のき裂の進展挙動には、大きな差はみられなかった。これは、接触応力によって、き裂開口部で接触圧が作用しても、くさび効果、つまり、き裂面に働く油圧（引張応力）が進展駆動力としての支配的な役割を果たしていないことを意味するものと思われる。

Fig. 3 は、き裂の進展にともなう応力拡大係数の変化を解析した結果である。応力拡大係数の解析では、まず、球面ヘルツ接触に対する Hanson の弾性理論解⁶⁾を用いてき裂面上の応力分布を計算した。次に、無限体中に位置するき裂（アスペクト比 1 の円形き裂）が任意分布応力を受ける場合の Fabrikant の弾性理論解⁶⁾を用いて、応力拡大係数（表面先端）を計算した。したがって、本報での解析では、半無限体表面の影響と、き裂の成長にともなう形状（アスペクト比）の変化は考慮に入れていない。また、領域内のき裂については、実験結果から、領域外のき裂と進展挙動に大きな差がないことがわかっているため、本解析では、油圧の影響は考慮に入れないこととした。

き裂進展挙動は、モード I 型進展に対しては $K_{I\max}$ で、モード II 型と III 型進展に対しては、それぞれ、 ΔK_{II} と ΔK_{III} で評価した。

Fig. 3 から、接触領域内では、初期から ΔK_{II} が最も大きく、き裂が進展しても、ほぼ定常であること、また、 ΔK_{III} は、進展にともなって増加することがわかる。 ΔK_{II} が最も大きく、 $K_{I\max}$ が小さいこと、さらに、初期からき裂が進展している実験結果から、き裂は、初期からモード II 型を主進展モードとして進展したと考えることがわかる。

さらに、接触領域外では、他の応力拡大係数値に比べて、初期から ΔK_{II} が最も大きく、き裂が進展しても、ほぼ定常であることがわかる。ここで示した接触領域外の解析結果から、き裂は、油圧の影響を受けない領域でも、せん断応力によるある程度の ΔK_{II} が作用すると進展しうることがわかる。

以上の考察に加え、接触領域内のき裂に対する ΔK_{II} は、接触領域外のき裂に対する値よりも大きいことから、必ずしも油圧による引張応力の作用（くさび効果）を仮定しなくても、き裂は、モード II 型で進展すると考えてよいようである。

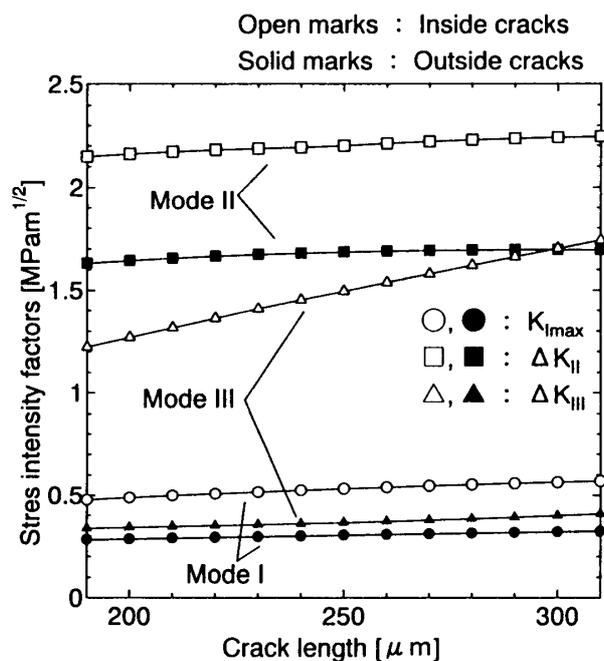


Fig. 3 Stress intensity factor ranges as a function of crack length.

4. 結言

Si_3N_4 製玉軸受の転がり疲労現象を明らかにするには、接触応力下の表面き裂進展問題を研究する必要がある。本報では、表面き裂進展機構を明らかにするため、き裂進展におよぼす油圧の影響（くさび効果）を調べた。その結果、油圧による引張応力を仮定しなくても、ある程度の ΔK_{II} が作用する場合には、き裂はモード II 型進展しうることが明らかとなった。

文献

- 1) 木田勝之, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, A-65, 846 (1999).
- 2) 木田勝之, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, A-65, 2113 (1999).
- 3) T. M. Clarke, G. R. Miller, L. M. Keer and H. S. Cheng, *ASLE Trans.*, 28, 111 (1985).
- 4) Y. Murakami, M. Kaneta and H. Yatsuzuka, "Analysis of Surface Crack Propagation in Lubricated Rolling Contact", *ASLE Trans.*, 28, 60 (1985).
- 5) M.T. Hanson, *Trans. ASME, J. Tribol.*, 114, 606 (1992).
- 6) Y. Murakami, (Editor-in-Chief), *Stress Intensity Factors Handbook*, 3, Pergamon Press, 434 (1992).