

長岡技科大 [院]
長岡技科大樋口 大介
○武藤 睦治長岡技科大
東 芝許 金泉
高橋 雅士

1. 結 言

地球環境および省エネルギーといった観点から、エネルギー機器の高効率化が求められており、たとえば、ガスタービンの作動温度は上昇の一途をたどっている。このような、材料に対する過酷な要求に応えるため、遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating, TBC) の実用化が進められている。TBCは、コーティング膜であるセラミックの有する耐食性、耐熱性および低熱伝導率により、基材である金属を酸化や高温から保護する。しかし、実機においては、熱的および機械的応力の作用による、セラミックコーティングのはく離損傷が問題となる。そこで本研究では、はく離損傷につながる、基材/コーティング界面に沿った疲労き裂の進展挙動を実験的および解析的に検討した。

2. 実 験 方 法

2・1 供試材および試験片 供試材は、セラミックコーティング層、中間層 (ボンドコーティング) および基材により構成されている。ボンドコーティングは、セラミックコーティングと基材の密着性の向上および熱膨張係数差の低減、そして耐食性の向上を目的としている。セラミックコーティングとして 8% Y_2O_3 - ZrO_2 、ボンドコーティングとして NiCoCrAlY、そして金属基材として Co 基超合金 FSX-414 を用いた。セラミックコーティングおよびボンドコーティングは、プラズマ溶射により成膜されている。本供試材のセラミックコーティングの気孔率は 15% であり、気孔は、コーティング膜の熱伝導率低減を目的としている。セラミックコーティング、ボンドコーティングおよび基材のヤング率およびポアソン比を表 1 に示す。試験片形状は、図 1 に示す曲げ試験片形状である。界面近傍に高い応力を作用させ、基材/コーティング界面にき裂が発生するように、基材にノッチを導入した。以後、図 1 におけるノッチ先端から左側を左き裂、右側を右き裂と呼ぶ。

2・2 試験装置 疲労試験機は、容量 10kN の電気油圧サーボ式疲労試験機 (島津製作所) を用いた。試験片を片持ちはりの状態で治具に取り付け、曲げ応力を負荷した。試験条件は、室温、応力比 0.1、周波数 10Hz、正弦波の荷重制御とした。なお、き裂長さ

の測定には、最小目盛り 10 μm の読み取り顕微鏡を用いた。

2・3 境界要素法解析 境界要素法解析は、試験片を 4 つの領域に分割して行った。すなわち、ノッチの左側と右側の金属基材をそれぞれ領域 (1) および (2)、ボンドコーティングを領域 (3)、セラミックコーティングを領域 (4) とした。実際にき裂が発生する、領域 (3) と (4) の界面にき裂を導入し、解析を行った。境界要素法解析には、FORTRAN 言語で作製したプログラムを用い、界面近傍の応力分布を求めるとともに、式 (1) ~ (4) を用いて、界面き裂の K_I 、 K_{II} 、 K_I および $K_{\theta \max}$ を算出した。なお、解析には、表 1 に示す材料定数を用いた。

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (1)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (2)$$

$$K_I = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (3)$$

$$K_{\theta \max} = \frac{\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}}{2 \cosh(\varepsilon \pi)} B(\vartheta_0, \varepsilon, \gamma) \quad (4)$$

3. 結果および考察

3・1 境界要素法解析結果 境界要素法解析によって得られた、 K_I 、 K_{II} 、 K_I および $K_{\theta \max}$ とき裂長さの関係を図 2 に示す。同図より、左右いずれのき裂先端においても、混合モード状態となっているが、左右で異なるモード比となっている。さらに、き裂の進展にともない、モード比は変化している。図 2 より、右き裂は、き裂長さ 1.3mm 以下では、モード比が 1~3 程度で、モード II 成分が支配的である。き裂長さ 1.3mm 以上では、モード比はほぼ 1 程度となっている。左き裂は、き裂長さ 1.1mm 以下では、モード比が 0.5~1 程度であり、き裂長さ 1.1mm 以上では、モード比が 0.2~0.5 と、モード I 成分が支配的である。今回解析を行った全き裂長さにおいて、 K_I は $K_{\theta \max}$ よりも低い値を示しているが、全体的な傾向は両者で等しい。すなわち、 K_I および $K_{\theta \max}$ は、右および左それぞれのき裂で、き裂長さ 1.4 および 1.1mm ま

Table 1 Young's modulus and Poisson's ratio for materials used.

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
8wt% Y_2O_3 - ZrO_2	29.8	0.1
CoNiCrAlY	178.0	0.3
FSX-414	194.0	0.3

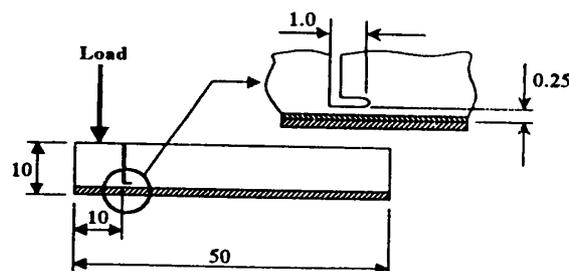


Fig.1 Specimen geometry.

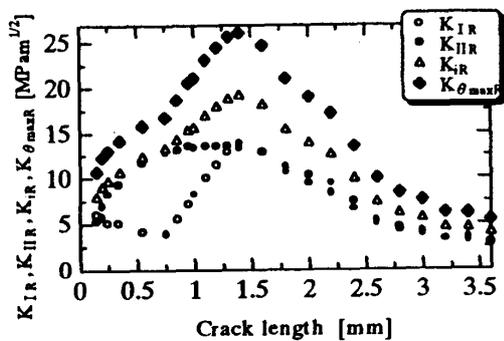
で増加し、その後減少している。

3.2 疲労き裂伝ば試験結果 疲労試験により発生したき裂長さは、右き裂 0.18mm, 左き裂 0.5mm, 合計で 0.68mm であった。図3に、き裂を導入していない試験片のノッチ近傍のせん断および引張り応力の解析結果を示す。同図より、せん断応力は左側よりも右側で高い値を示しているが、実験結果では、左側の方が右側より初期き裂長さが長かった。したがって、初期き裂は、せん断よりも引張り応力が支配的となって発生していると考えられる。発生したき裂は、繰返し荷重により、右側に 1.3mm, 左側に 2.3mm, 合計 3.6mm まで進展した。図4に、初期き裂長さにおけるき裂近傍の応力解析結果を示す。ここで、本実験における全き裂長さにおいて、図4とほぼ同様の応力分布を示すと仮定すると、左右いずれの場合も、せん断および引張り応力の両者がほぼ 0 となるまでき裂が進展していることがわかる。図5に、疲

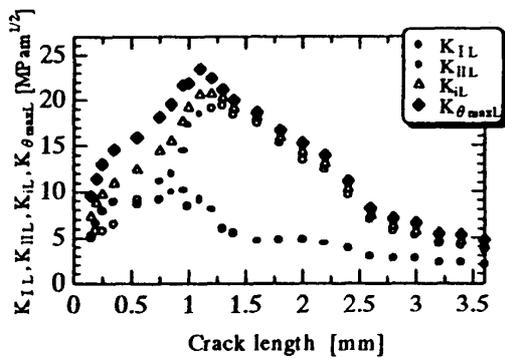
勞き裂伝ば試験結果を K_I , K_{II} および $K_{\theta \max}$ で整理した図を示す。同図より、 K_I で整理した場合に比べて、 K_{II} もしくは $K_{\theta \max}$ で伝ば挙動を整理することにより、左右それぞれのき裂の伝ば曲線は、ほぼ一致する傾向にある。すなわち、 K_{II} もしくは $K_{\theta \max}$ により、モード比の異なる左右それぞれのき裂伝ば挙動を等価に評価できる。また、 $K_{\theta \max}$ で整理した場合には、 K_I で整理した場合に比べて、左右それぞれのき裂伝ば挙動に若干の相違が認められる。これは、界面におけるコーティング層の密着状態および空孔の寸法、形状および位置によって、実際にはき裂が必ずしも $K_{\theta \max}$ 方向に進展しないためと考えられる。したがって、コーティング界面に沿った疲労き裂伝ば挙動においては、 K_I が最も支配的であると考えられる。

4. 結言；省略。

参考文献；省略。



(a) right crack tip



(b) left crack tip

Fig.2 Result of BEM (Boundary Element Method) analysis.

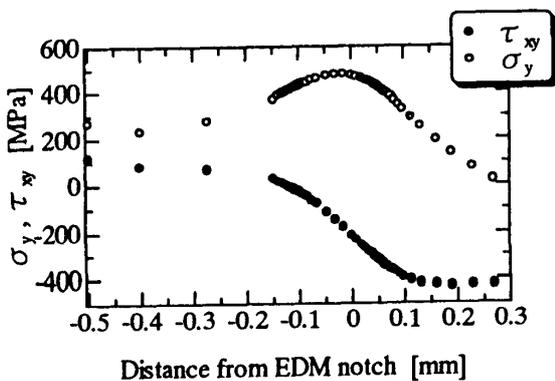


Fig.3 Stress distribution on the specimen without crack.

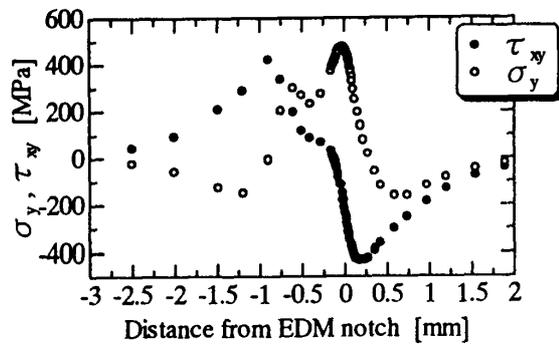
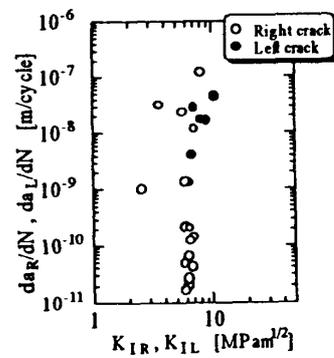
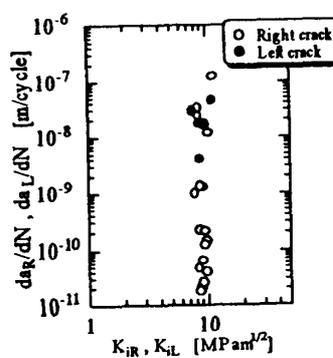


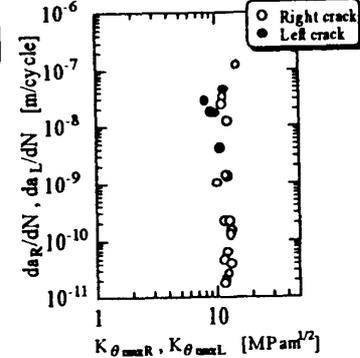
Fig.4 Stress distribution on the specimen with initial crack.



(a) $da/dN - K_I$



(b) $da/dN - K_I$



(c) $da/dN - K_{\theta \max}$

Fig.5 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor, K_I , K_{II} , $K_{\theta \max}$.