

320 熱負荷を受ける傾斜機能平板のき裂進展挙動に関する研究

CRACK GROWTH IN FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL UNDER THERMAL SHOCK

○学 山本 記之 (静大) 正 野田 直剛 (静大)
正 石原 正行 (静大)

Noriyuki YAMAMOTO, Shizuoka University, 3-5-1, Johoku, Hamamatu, Shizuoka
Naotake NODA, Shizuoka University
Masayuki ISHIHARA, Shizuoka University

This paper examines the problem of thermal cracking under a transient temperature field in a ceramic/metal functionally graded plate. When the functionally graded plate is cooled from high temperature, it could be observed that curved or straight multiple cracks occur on the ceramic surface. In addition, those multiple cracks influence each other and form complex arrays. To investigate mutual effect among multiple cracks, crack paths are simulated using finite element method. Transient thermal stress field and crack growth are treated as a linear quasi-static thermoelastic problem for a plane strain state.

Key Words : Multiple Crack Growth, Functionally Graded Plate, Thermal Shock, Finite Element Method

1. 緒言

航空, 宇宙, 原子力分野において, 宇宙往還機(スペースプレーン)や原子炉などの高性能化を目指した研究開発が行われている。それに伴い, 苛酷な熱的環境で使用可能な新しい耐熱材料として, 熱応力緩和型傾斜機能材料の研究が進められている。傾斜機能材料は高温側にセラミックスを配置して耐熱性を与え, 反対側に金属を配置し, 高熱遮蔽性と機械的強度を与え, その間の組成・組織の分布を連続的に制御することにより, 熱応力を緩和するものである。

傾斜機能材料の加熱試験において, 加熱後の冷却時にセラミックス層にき裂が発生することが確認されている⁽¹⁾。また, き裂の進展経路が傾斜機能材料の組成分布により変化し, き裂の進展経路が曲がることによる表層剥離が観察されている^(1, 2)。これらのき裂はき裂同士の相互干渉により, 複雑なき裂形状になることがある。藤本・野田⁽³⁾は1本のき裂進展についての研究を行っている。本研究では表面に複数の初期き裂を有した傾斜機能平板に熱負荷を与え, セラミックス表面から発生するき裂の進展経路を有限要素法により検討した。

2. 傾斜機能平板

本研究で解析を行う傾斜機能平板は, 図1に示すようにセラミックス (ZrO_2) と金属 (Ti-6Al-4V) で構成され, 高温側 ($x=0$) にセラミックスを, 低温側に金属を配置する。平板内部はセラミックスと金属を混合し, それぞれの材料の混合割合を式(1)で規定し, 平板の厚さ方向 x の関数として変化させる。

$$V_m = \left(\frac{x}{b}\right)^m, V_c = 1 - V_m \quad (1)$$

ここで, V_m , V_c は金属とセラミックスの体積分率である。パラメータ m を変化させることにより, 傾斜機能平板の組

成を変化させることができる。傾斜機能平板の物性値は混合則⁽⁴⁾を用い, セラミックス表面は, 長さ a の初期垂直き裂が存在しているものとする。

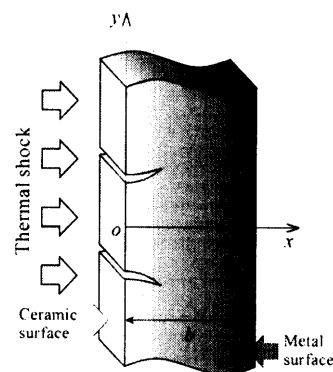


Fig. 1: Functionally graded

傾斜機能平板は初期温度 $T_0 = 300$ [K] とし, このときを無応力状態とする。温度条件は, 図2に示すように金属側表面を $T_L = T_0$ に保ち, セラミックス側表面を T_H に加熱し, 温度分布が定常状態に達した後, 金属側表面を T_L に保った

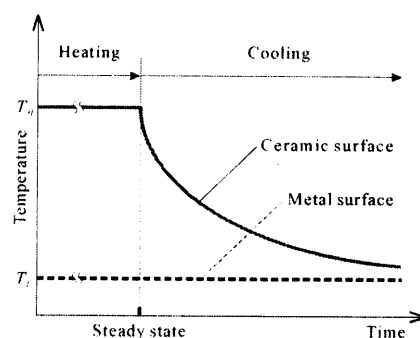


Fig. 2: temperature conditions

状態のまま、セラミックス表面を雰囲気温度 T_0 との間で熱放散により冷却されるとする。このとき、熱伝達係数を $h=2.0 \times 10^{-6}$ [W/m²K] とする。

き裂の進展条件と進展方向はそれぞれ式 (2), (3) で与えられる。

$$K \geq K_{Ic}, \quad K = (K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - k_{II} \sin \theta) \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (3)$$

破壊靱性値は式 (4) で与えられる。

$$K_{Ic} = V_m K_{cm} + V_c K_{cc} \quad (4)$$

ここで、 K はモード I とモード II の混合モードの応力拡大係数で、 K_{Ic} 、 K_{cc} 、 K_{cm} はそれぞれ傾斜機能平板、セラミックス、金属の破壊靱性値である。

また、き裂の進展は準静的変化として扱い、進展速度は考慮しない。よって、安定き裂伝播条件は

$$\frac{\partial K}{\partial a} < \frac{\partial K_{Ic}}{\partial a} \quad (5)$$

で与えられる。

3. 解析結果

図 3 に体積率が直線的に変化する $m=1.0$ の傾斜機能平板に、長さ $a=0.16$ [mm] の初期垂直き裂が 2 本ある場合のき裂伝播経路を、加熱温度 T_H が 1300 [K], 1700 [K] の場合について示す。き裂進展経路はき裂が 1 本の場合と同様に、平板と平行な方向に成長を続ける場合と、直線的に進展し × 印でき裂が停止する場合がある。図 3 より、加熱温度が高くなるほどき裂が急激に曲がり、平板と平行な方向へき裂が進展する。き裂 2 本のほうがき裂 1 本よりもき裂が曲がりやすくなり、はく離深さは短くなる。直線的に進展する場合は、き裂が停止する深さはほぼ同じとなる。

図 4 に $m=1.0$, $T_H=1700$ [K] の場合についてセラミックスの破壊靱性値が $K_{cc}=3, 5, 10$ [MPa√m] のときのき裂伝播経路を示す。き裂進展経路はき裂が 1 本の場合と同様に、破壊靱性値が小さいほどき裂は急激に曲がり、平板と平行な方向へと進展する。き裂 2 本のほうがき裂 1 本よりもき裂が曲がりやすくなり、はく離深さは短くなる。直線的に進展する場合は、き裂が停止する深さはほぼ同じとなる。

図 5 に体積率の係数 m が $m=0.5, 1.0$ の場合のき裂伝播経路を $K_{cc}=5$ [MPa√m], $T_H=1700$ [K] に対して示す。 m が小さい値の時はき裂は曲がらず、平板内部で停止する。き裂 2 本のほうがき裂 1 本よりもき裂が曲がりやすくなり、はく離深さは短くなる。直線的に進展する場合は、き裂が停止する深さは浅くなる。

図 6 に 2 本のき裂の間隔 s が $s=a, 3a, 5a, 8a$ の場合のき裂伝播経路を示す。図 6 よりき裂間隔 s が狭くなるほどき裂が急激に曲がり、最終的に平板と平行な方向へき裂が進展する。き裂 2 本のほうがき裂 1 本よりもき裂が曲がりやすくなり、はく離深さは短くなる。

き裂が 1 本の場合と比較して、き裂が 2 本の場合は曲がり方が急激であり、はく離する層が薄くなっていることが

わかる。

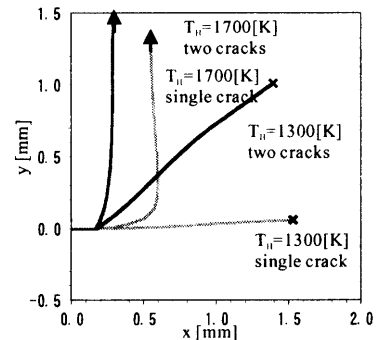


Fig.3: The effect of heating temperature T_H on the crack path

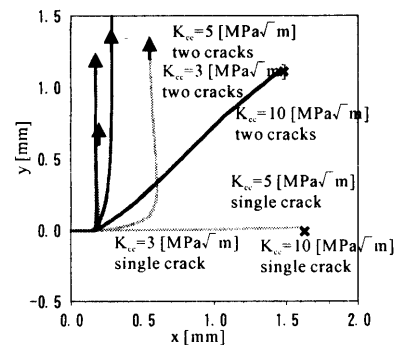


Fig.4: The effect of volume function m on the crack path

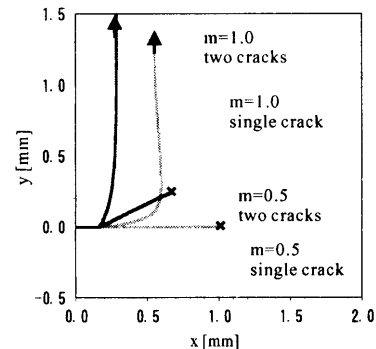


Fig.5: The effect of stress intensity factor K_{cc} on the crack path

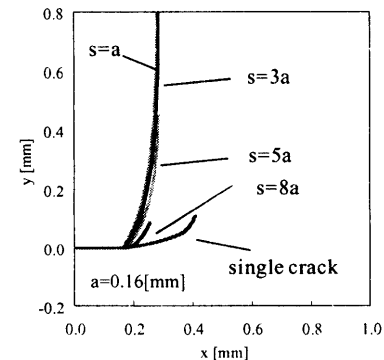


Fig.6: The effect of crack space s on the crack path

参考文献

- (1) A. Kawasaki, R. Watanabe, *NATO Asi.*, E241 (1993), 509-520.
- (2) H. A. Bahr, et al., *Frac. Mec. Ceram.*, 11 (1996), 507-522.
- (3) T. Fujimoto, N. Noda, *Arc. Appl. Mech.*, 70 (2000), 377-386.
- (4) A. Hibino, A. Kawasaki, R. Watanabe, 4th FGM Sympo, (1991), 311-314.