セラミックス/金属接合材の破壊のシミュレーション解析*

結 城 良 治^{*1}, 許 金 泉^{*1}

Simulation Analysis of Fracture in Ceramic/Metal Bonded Joints

Ryoji YUUKI and Jin-Quan XU

Fracture of metal/ceramic bonded joints usually occurs at the edge of an interface. If the residual stress is small, a crack propagates along the interface to a critical length and then kinks into ceramics. If the residual stress is large, a crack directly kinks into ceramics. It is known that the strength and the fracture path are strongly dependent on the residual stress and the strength of the bonded interface. In this study, a method to simulate the fracture and strength of the metal/ceramic bonded joint is proposed based on the interfacial fracture mechanics, and some simulation results on 4-point bending specimens of ceramic (Si_3N_4)/metal (S45C) bonded joint are presented. It is found that the fracture path and fracture load can be well simulated by this method.

Key Words: Simulation, Fracture Criterion, Interface Crack, Fracture Toughness, Metal/Ceramic Bonded Joint, Residual Stress, Boundary Element Method

1. 緒 言

セラミックス/金属などの異材接合材は応力特異点となる界面端を起点として、一般に低荷重で破壊が生じることが予想されるが、母材側に屈折したり、界面に沿う場合など多様な破壊形態を呈し、また応力特異性の問題もあって、まだ定量的な強度評価法・破壊予測法が確立していないのが現状である。特にセラミックス/金属接合材は負荷応力のみならず、接合に伴う残留応力も界面端で特異性を呈し、この残留応力が接合材の強度および破壊形態に大きな影響を及ぼすことが知られているが、残留応力も解析・評価して、セラミックス/金属接合材の強度・破壊を定量的に評価した研究は、まだ見当たらない。異材接合材の強度評価に当たっては、どこからどのように破壊するか、すなわち破壊径路の予測が重要となり、一方の母材側に屈折する場合はその母材の強度に、界面に沿う場合は界面固有の接合強度に支配されると考えられる⁽¹⁾。したがって、異材接合材の定量的な強度評価法として界面破壊

力学が有力な手法となると期待される。

著者らは今まで異材接合材の応力(残留応力も含む)の BEM 解析法を確立するとともに、界面き裂の応力拡大係数の解析および界面き裂の破壊クライテリオン⁽¹⁾⁽⁸⁾の検討などを行ってきた⁽¹⁾⁽⁸⁾。また、前報⁽⁹⁾では界面き裂を有するセラミックス/金属直接接合材の破壊靱性試験を対象として、界面破壊力学に基づく強度評価法と破壊径路のシミュレーション解析法を提案し、実験結果とよく一致することを確認した。

本研究では前報⁽⁹⁾と同じくセラミックス/金属直接接合材の四点曲げ試験片を対象として、その接合残留応力も解析・評価し、界面端からセラミックス側に破壊する場合や界面に沿って破壊した後、セラミックス側に屈折する場合について、界面破壊力学に基づく強度評価および破壊径路のシミュレーション解析の手法を提案する。また、本シミュレーション解析に基づき、接合材の強度および破壊形態、界面はく離長さに及ぼす接合残留応力および界面接合強度の影響を定量的に明らかにする。

2. 解析モデルと応力解析

2・1 解析モデル 本研究では図 1 に示すセラミックス(Si_3N_4)/金属(S 45 C)接合材の四点曲げ試験片

* 平成 6 年 3 月 31 日 日本機械学会第 71 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 平成 6 年 4 月 18 日。

^{*1} (故) 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)。

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所。

を対象とする。その材料定数を表1に示す。ここでは両材料が高温で完全接合され、室温まで冷却された段階で、両材料のミスマッチにより接合に伴う残留応力が存在するものとする。武藤ら⁽¹⁰⁾は活性銀ろう材を用いて各種金属材料とセラミックス(Si_3N_4)の直接接合材を作成し、その四点曲げ試験を行い、本接合材では、残留応力のためセラミックス単体の強度より、曲げ強度が低下することを報告している。実際の接合材ではこの残留応力の緩和を目的として中間層として銅(Cu)を用いた接合が行われているが⁽¹¹⁾、銅の塑性変形を考慮した残留応力などの解析⁽¹²⁾および後述のような界面破壊力学による強度評価は困難なのが現状である。したがって、ここでは解析・評価を容易とするため、図1のモデルを対象とした。

2.2 応力解析 セラミックス/金属接合材の強度評価に当たっては、残留応力および負荷応力の解析が必要となる。両応力とも界面端で応力特異性が生じるため、界面端近傍の応力を高精度に解析しなければならない。本解析には著者らが開発した汎用の二次元境界要素弾性解析プログラムBEM2D/EWSを用いた⁽¹³⁾。詳細は省略するが、本プログラムは異材接合材の負荷応力のみならず残留応力も解析でき、特に界面上および界面端近傍の応力が高精度かつ効率的に解析できる。図2は本試験片のBEM解析に用いた要素分割の一例を示す。

表1 材料定数と強度

Material	Young's modulus E (MPa)	Poisson ratio ν	Thermal expan. coef. α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Bending strength σ_b (MPa)	Fracture toughness K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
Si_3N_4	289	0.25	4.2	680	6.4
S45C	206	0.30	11.2	490	---

図1 セラミックス/金属接合材の四点曲げ試験片

図2 BEM解析の要素分割例

図3はBEM解析で得られた本試験片の界面上の応力分布を示す。本解析はすべて平面ひずみ条件とした。図3(a)は接合残留応力の界面上の分布を示す。ただし、残留応力は、 $\mu_1|C_a\Delta T|$ で無次元化して表示した。ここで、 μ_1 は材料1(セラミックス)のせん断弾性係数、 ΔT は温度差である。また、 $C_a=(1+\nu_1)\alpha_1-(1+\nu_2)\alpha_2$ である。ここで、 ν_1 、 α_1 は材料1(セラミックス)のポアソン比と線膨張係数であり、 ν_2 、 α_2 は材料2(S45C)のそれである。また、図3(b)には曲げ負荷の場合の界面上の応力分布であり、 $\sigma_0=6M/(W^2B)$ (B :板厚、 M :曲げモーメント)で無次元化した。いずれの場合も界面端で応力特異性を示すが、特に残留応力のせん断応力の界面端での集中が著しいことがわかる。また界面端A(図1参照)で残留応力および負荷応力ともはく離応力成分 σ_x が引張りとなるので、破壊はこのA端から発生することが予想される。なお、本材料組合せにおいて界面端の応力特異性のオーダー $\lambda(\sigma_{ij} \propto 1/r^\lambda)$ は0.015となる。ただし、残留応力の特異性は、この λ の特異性に加え、新たに $\log r$ の特異性が出現することを著者らは明らかにしている⁽¹⁴⁾。

2.3 σ_0 の分布 破壊の起点となることが予想される界面端Aの極近傍($r/W=0.05/4.5$)における σ_0 の分布を詳細に調べた結果を図4に示す。図4(a)は

(a) 界面上の残留応力分布

(b) 界面上の負荷応力分布

図3 界面上の応力分布

残留応力の σ_θ 、図 4 (b) は負荷応力の σ_θ のセラミックス中の分布状況を無次元化して示している。著者は界面端からの破壊はこの σ_θ が最大の方角 ($\sigma_{\theta\max}$ 基準) に生じるとの説を提案している⁽²⁾。この説に従えば、接合時に残留応力のみで破壊が生じるとすれば、図 4 (a) に示すように $\theta=29^\circ$ の方向に破壊することになる。また、残留応力がなく負荷応力で破壊するものとする図 4 (b) からわかるように界面上ないしは $\theta=7^\circ$ の方向に破壊することが予想される。実際には残留応力が存在した状態で負荷応力がかかるので、その場合は両者の応力分布を重ね合わせて評価する必要がある。図 5 は破壊荷重 P_f を各種に与えて、重ね合わせにより σ_θ の分布を求めたものである。 P_f が大きくなるとともに σ_θ が最大となる角度は小さくなることからわかる。

この手法では破壊荷重 P_f が与えられれば破壊の角度は予測できるが、破壊荷重 P_f を予測するのは困難である。また、どういう条件で界面破壊が生じるか説明できないなど問題がある。そこで以下では界面端に

図 4 界面端付近の σ_θ の分布 図 5 $\sigma_{\theta\max}$ 基礎理論による破壊方向の予測

微小き裂を想定し、界面破壊力学に基づき、この強度・破壊を定量的に評価する手法を提案する。

3. 界面破壊力学の適用方法

3.1 初期き裂長さの想定 破壊力学に基づく評価ではまず想定するき裂長さをいかに取るかが問題となる。ここでは以下の方法で初期き裂長さを決めた。最近セラミックスの破壊靱性試験が活発に進められ、図 6 のようにそのき裂長さの依存性が知られている。すなわち、あるき裂長さ a_0 以下では破壊靱性値 K_{Ic} が見掛け上低下し、線形破壊力学が適用できない限界がある。この a_0 はセラミックス平滑材の曲げ強度 σ_b および破壊靱性値 K_{Ic} が与えられれば、次式より決められる。

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_b F_I} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで補正係数 F_I は、試験片形状に依存するが、ここでは片側き裂試験片 ($a/W \rightarrow 0$) を想定して、 $F_I = 1.12$ にとった⁽¹⁵⁾。セラミックス (Si_3N_4) の σ_b および K_{Ic} として表 1 の値を用いると、上式より a_0 は約 25 μm となる。

3.2 応力拡大係数の解析 図 7 に示すように上述した長さ a_0 のき裂が界面端から任意方向に入った状態を想定し、その応力拡大係数の解析を行った。本解析にも前述の BEM を使い、応力外挿法により応力拡大係数を求めた⁽¹⁾。表 2 にセラミックス側に角度 θ で屈折したき裂の応力拡大係数の解析結果を示す。この場合は $\theta=0$ を除き、き裂先端はセラミックス中にあるので通常の均質材の応力拡大係数 K_I , K_{II} として

(a) 破壊靱性値とき裂長さの関係 (b) 破壊荷重とき裂長さの関係

図 6 破壊靱性と曲げ強度による初期き裂長さの決定法

図 7 初期き裂の想定

取り扱える。屈折角度は図4、図5の結果から $0 \leq \theta < 30^\circ$ と予想されるので、この範囲で解析した。表2には残留応力場の応力拡大係数 K^{res} と負荷応力による応力拡大係数 K^P をそれぞれ示している。なお、 K^{res} は温度差 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ 、 K^P は荷重 $P = 1\text{ kN}$ 時の値を示している。応力拡大係数は ΔT 、 P に比例するので、任意の ΔT 、 P に対する応力拡大係数もこの表から容易に計算できる。実際の応力拡大係数は次式のように重ね合わせとして求められる⁽⁹⁾。

$$K_j(a, P, \Delta T) = K_j^P(a, P) + K_j^{res}(a, \Delta T) \cdots (2)$$

$$j = \text{I, II or 1, 2}$$

表2中に $\theta = 0$ すなわち界面き裂の応力拡大係数も示している。振動応力特性を有する界面き裂の応力拡大係数 K_1 、 K_2 は均質材の応力拡大係数 K_I 、 K_{II} と定義が異なるので注意が必要となる⁽¹⁾。また、表3には後述のシミュレーション解析に必要となるため、界面き裂の長さを変えて応力拡大係数 K_1 、 K_2 を求めた結果を示す。この場合も、 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ として残留応力場の K^{res} を、 $P = 1\text{ kN}$ として負荷応力の K^P を示している。界面き裂の場合も上式の重ね合わせにより実際の K が求められる。表3から残留応力場の K^{res} は K_2 が支配的であり、負荷応力の K^P は K_1 が支配的であることがわかる。これは図3で示したき裂がない場合の界面上の応力分布で、残留応力はせん断応力が支配的であり、負荷応力ははく離応力が支配的であったことと対応する。また表3で K_2 が負となっているのは界面き裂がセラミックス側に屈折する傾向となること

表2 各種方向に生じた界面端き裂の応力拡大係数 ($\Delta T = 300^\circ\text{C}$, $P = 1\text{ kN}$)

$\theta (^\circ)$	$K^{res} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$		$K^P (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	
	K_I^{res}	K_{II}^{res}	K_I^P	K_{II}^P
0*	1.035	-2.650	2.871	-0.174
10	1.499	-1.600	2.872	0.182
15	1.963	-1.223	2.748	0.416
20	2.126	-0.760	2.656	0.588
25	2.221	-0.274	2.531	0.798
30	2.357	0.043	2.327	0.913

* Stress intensity factors (K_I , K_2) for interface crack

表3 界面端から出た界面き裂の応力拡大係数 ($\Delta T = 300^\circ\text{C}$, $P = 1\text{ kN}$)

$a (\text{mm})$	$K^{res} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$		$K^P (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	
	K_1	K_2	K_1	K_2
0.025	1.035	-2.650	2.871	-0.174
0.050	1.021	-3.262	4.020	-0.243
0.100	0.989	-4.506	5.752	-0.326
0.200	0.829	-5.871	7.815	-0.360
0.400	0.575	-7.752	10.941	-0.378

を意味する⁽⁶⁾。

3.3 破壊クライテリオン 界面破壊力学により強度評価を行うためには、前述のように想定したき裂の応力拡大係数の解析とともに、想定される破壊形態に応じてさまざまな混合モード破壊クライテリオンを応力拡大係数の関数として用意する必要がある。本接合材では図8に示すような三つのケースが考えられる。ケース1は界面端から直接セラミックス側にき裂が発生する場合である。ケース2は界面に沿ってき裂が進展する場合である。またケース3は界面き裂がセラミックス側に屈折する場合である。以下ではそれぞれのケースについて、適用する破壊クライテリオンを簡単に説明する。

(1) $K_{I\theta\text{max}}$ 基準(ケース1) 界面端から母材側へ直接屈折する場合は図4、5に示したように $\sigma_{\theta\text{max}}$ 基準により、その方向は予想できるが、破壊荷重が求められない。そこで、微小な長さ a_0 のき裂を任意方向に想定し、その応力拡大係数 K_I が最大の方角 ($K_{II} = 0$ の方向) にき裂が進展し、次式のようにその方向の最大の K_I が屈折する側の母材単体の破壊靱性値(この場合はセラミックス) K_{Ic} に達すると破壊が開始するという基準を新たに提案する。

$$K_{I\theta\text{max}} \geq K_{Ic} \cdots \cdots (3)$$

表2に示した各方向のき裂の K_I 、 K_{II} 値を用い、また表1に示したセラミックスの K_{Ic} 値を用いれば、与えた ΔT 、 P に対して実際の K_I 、 K_{II} が各方向 θ に対し求められ、 K_I の最大となる角度から初期屈折角が得られ、また破壊荷重 P_f も上式から決められる。

(2) 界面破壊の混合モード破壊基準(ケース2) 著者ら⁽⁷⁾はAl/樹脂の界面き裂の破壊試験を行い、広範囲な混合モード状態における界面き裂の破壊靱性は、界面き裂の応力拡大係数 K_1 、 K_2 を用いて次式の円則が成立することを明らかにした。

$$\left(\frac{K_1}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_{2c}}\right)^2 \geq 1 \cdots \cdots (4)$$

ここで K_{Ic} 、 K_{2c} はそれぞれ純粋な K_I ないし K_2 に対する破壊靱性値である。界面き裂の場合、モードとは

図8 界面端からの破壊形態の分類

厳密な対応がないが、 K_I ははく離、 K_{II} がせん断モードに対応し、界面はせん断に強く、はく離に対して弱い。一般に K_{2c} は K_{Ic} の 2~3 倍となる。本基準を適用するに当たり、界面き裂の K_I 、 K_{II} の値は表 3 から計算できるが、本接合材の界面強度 K_{Ic} 、 K_{2c} の実測値がないのが現状であり、後述のシミュレーション解析ではこの値を各種の値に想定した。

(3) 界面き裂の屈折破壊基準(ケース 3) 界面き裂が母材側へ屈折する場合について、著者らは界面き裂先端近傍の極座標表示の応力成分 σ_θ が最大となる方向 ($\theta = \theta_0$) に屈折し、その方向における次式で定義される $K_{\theta\max}$ がセラミックスの K_{Ic} に達すると破壊が開始するという説を提案し、実験よりその有効性を確認している⁽⁶⁾。

$$K_{\theta\max} = \frac{\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}}{2\sqrt{2\pi r \cosh(\varepsilon\pi)}} B(\theta_0, \varepsilon, K_{II}/K_I) \geq K_{Ic} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ε はパイメタル定数である。式の詳細は文献⁽⁶⁾を参照されたい。上式により、界面き裂の K_I 、 K_{II} および二つの材料の材料定数で決まる ε を求め、セラミックス単体の K_{Ic} 値が与えられると初期の屈折角度および破壊荷重が求められる。なお、屈折後のセラミックス中のき裂の進展径路については、時々刻々のき裂先端の K_I 、 K_{II} を計算すればよく知られている均質材の混合モード破壊クライテリオン ($\sigma_{\theta\max}$)⁽¹⁶⁾ により予測できる。

4. 界面端からの破壊のシミュレーション解析

以上の準備のもと、まず界面端から直接セラミックス側へ破壊する場合の破壊荷重 P_f および破壊径路のシミュレーションを行う。初期き裂を $a_0 = 25 \mu\text{m}$ とし

て、残留応力は温度差 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ とする⁽⁹⁾。各方向 ($0 \leq \theta \leq 30^\circ$) のき裂の応力拡大係数 K_I 、 K_{II} は表 2 および式 (2) より、荷重 P が与えられれば求められる。しかし、破壊時の荷重 P が未知のため、図 9 に示すように P を任意に与え、 K_I 、 K_{II} の角度 θ に関する分布を図示する。このうち、 K_I の最大値がセラミックスの K_{Ic} 値に達する荷重を破壊荷重 P_f とし、そのときの角度を破壊方向とする。このように前述の $K_{\theta\max}$ 破壊基準を図式的に適用すると、破壊荷重 P_f と破壊方向が同時に求められる。

図 9 から本試験片では荷重 $P_f = 1600 \text{ N}$ で破壊し、界面から約 18° の方向に破壊が開始することが予想される。図 9 から $\theta = 18^\circ$ で K_I が最大となるとともに $K_{II} = 0$ となっていることがわかる。またこの角度は図 6 に示したき裂がない場合の界面端近傍の σ_θ の分布で、 $P_f = 1500 \text{ N}$ で σ_θ が最大となる角度が約 20° となっており、 $\sigma_{\theta\max}$ 基準で予測される角度ともよい対応があることが確認される。この予測した荷重から、均質材とみなした見掛けの曲げ強度を求めると、 $\sigma_b = 474 \text{ MPa}$ となり、これはセラミックス単体の曲げ強度 $\sigma_b = 680 \text{ MPa}$ に比べ、約 30% ほど強度が低下したことになる。

約 18° 方向に破壊が開始し、その後のセラミックス中の破壊径路は時々刻々の K_I 、 K_{II} を計算し、均質材の混合モード破壊クライテリオンを適用すれば解析できる。図 10 は破壊径路をシミュレーションしたものである。また図 11 はこの曲折き裂の各段階での次式で定義される $K_{\theta\max}$ の値を示す⁽¹⁶⁾。

$$K_{\theta\max} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left\{ K_I \cos^2 \left(\frac{\theta_0}{2} \right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 9 $K_{\theta\max}$ 理論による破壊荷重・方向の決定

図 10 界面端から直接母材破壊する場合の破壊径路のシミュレーション

図 11 界面端から直接母材破壊する場合の K の変化

ここで θ_0 は各段階での屈折角度である。なお、式(5)で示した界面き裂の $K_{\theta\max}$ の式において、 $\varepsilon=0$ とするとこの式と一致する。図 11 に示すように $K_{\theta\max}$ が急増することから、セラミックス側に破壊が始まるとただちに不安定破壊することが予想される。

5. 界面破壊のシミュレーション解析

4 章では界面端から直接セラミックス側に破壊する場合を取り扱ったが、界面の接合強度が弱く、残留応力が小さい場合には界面に沿った破壊も起こり得る。したがって、界面き裂を想定した解析も必要となる。界面にき裂を想定するとその応力拡大係数や破壊基準は前述の均質材としての取扱いとまったく異なってくるので、ここで別々に論じるものとする。

5・1 シミュレーション解析法 まず界面に想定する界面き裂長さをどう決めるかが問題となるが、界面き裂の破壊靱性値など界面強度に関するデータがないのが現状であるため、ここでは 4 章と同じく $a_0=25\ \mu\text{m}$ に想定した。この応力拡大係数 K_1 , K_2 は表 3 から計算できる。まず ΔT を与えて、残留応力場の K^{res} を計算し、曲げ荷重 P を零から徐々に増加させると、図 12 に示すように界面破壊の混合モード破壊基準(ケース 2)か界面き裂の屈折破壊基準(ケース 3)のどちらかのクライテリオンを満たすことになり、この荷重を破壊荷重 P_f とする。図 12 は前述の二つの破壊基準を K_1 - K_2 図上に書いたものである。図 12 に示すようにセラミックスの強度と界面の強度は比較的近いと考えられるので、両破壊基準は交差する。残留応力が大きい場合や大きな界面き裂がある場合は、最初に屈折破壊基準に到達し、セラミックス側へ屈折することになる。一方、残留応力が十分緩和されると最初に界面破壊基準に達し、界面に沿ってき裂が進展することになる。

図 12 破壊基準と破壊形態の判定図

図 13 限界はく離長さと破壊荷重の決定法

このように界面き裂が屈折するか、界面に沿って進展するか二つの領域が存在する。どちらの破壊が生じるかは、 $P=0$ 時の残留応力のみ K^{res} と P 増加に伴う K の変化直線(試験片形状に依存)の傾斜によって決まることになる。二つの領域の境界線は両破壊基準の交点を通り、あるき裂長さ a_{cr} に対し、 P を増加させた場合の変化直線(残留応力や試験片形状に依存)で与えられるものと考えられる。図 12 に示すように最初に界面破壊基準に達し、界面に沿ってき裂が進展すると荷重一定でも、き裂進展に伴い K_1 , K_2 が変化し、この境界線に達し、セラミックス側に屈折するものと考えられる。このときの界面き裂進展の限界長さを a_{cr} とする。なお、この際の界面に沿うき裂進展は安定成長と想定した。

以上に述べた手法に基づき、具体的に破壊のシミュレーションを試み、図 13 に示す。破壊基準はセラミッ

クスの $K_{Ic} = 6.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とすると屈折破壊基準は図のように書けるが、本接合材の界面強度はわからないので、 $K_{Ic} = 4.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $K_{2c} = 2K_{Ic}$ と仮定してだ円則で表すものとする。残留応力の計算に必要となる ΔT は既報⁽⁹⁾ を参考にして 300°C とした。また $a_0 = 25 \mu\text{m}$ とすると $P=0$ 時の K^{res} は図の A 点となる。P を増加させるとこの場合 $P_f = 930 \text{ N}$ で界面破壊が開始し、 $a_{cr} = 60 \mu\text{m}$ まで進展後セラミックス側に屈折することが予想される。図 13 のように両破壊基準とともに K_1 - K_2 図上にあらかじめ P および a 一定の曲線座標系を表示しておく、図式的に簡便に求められる。

5.2 界面強度の影響 前述の手法でシミュレーション解析する上で問題となるのは、セラミックスの K_{Ic} はわかるが、界面破壊の強度値 K_{Ic} 、 K_{2c} が不明な点である。ここでは、 $K_{2c} = 2K_{Ic}$ と仮定し、 K_{Ic} を界面強度の代表値として、図 14 に示すように各種の値を与え、その破壊荷重・破壊径路に及ぼす影響のシミュレーション解析を行った。図 14 には $a_0 = 25 \mu\text{m}$ の界面き裂 ($\Delta T = 300^\circ\text{C}$) の K の P の増加に伴う変化

図 14 破壊荷重に与える界面強度、母材強度の影響

図 15 界面強度と破壊荷重、限界はく離長さの関係

を示している。この図から破壊が開始する荷重 P_f を求め、 K_{Ic} について整理すると、図 15 の結果が得られる。また、図 15 には界面はく離長さ a_{cr} も示している。この図から、界面強度 K_{Ic} が強いほど接合体の強度 P_f が大きくなり、はく離長さ a_{cr} が小さくなることがわかる。これは小林ら⁽¹¹⁾ の Cu を中間層とするセラミックス/金属接合材の実験結果とよく対応している。また、図 15 から界面強度がある値を越えると、それ以上界面強度を増強しても、接合材の強度は上がらないことがわかる。これはその界面強度に到達する前に、母材が先に破壊するためである。

5.3 残留応力の影響 セラミックス/金属接合材の強度は接合時の残留応力に強く支配されることが知られている。そこで残留応力の影響を定量的に把握するために、界面強度 $K_{Ic} = 4.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を一定とし、 ΔT を変化させ、シミュレーション解析した。図 16 に接合体の強度 P_f およびはく離長さ a_{cr} の解析結果を示す。 ΔT が増加、すなわち残留応力の増加とともに、 P_f は急速に低下し、 a_{cr} も小さくなる。残留応力があ

図 16 残留応力と破壊荷重、限界はく離長さの関係

図 17 界面破壊の後、屈折する場合の破壊径路のシミュレーション

図 18 セラミックス側への屈折後の応力拡大係数の変化

まり大きすぎると、 $P_f=0$ でも、すなわち残留応力だけでセラミックス側へ破壊することになる。この結果から接合材の強度を向上するためには、残留応力を軽減することが重要であることがよく理解できる。

5.4 破壊径路のシミュレーション 図 17 には $K_{IC}=4.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $\Delta T=300^\circ\text{C}$ として、破壊径路のシミュレーション解析した一例を示す。ただし、き裂進展の段階では荷重の変化がなく、初期き裂が界面に沿って進展し始める破壊荷重 $P_f=930 \text{ N}$ を保持するものとした(図 15 参照)。図 17 から $a_{cr}=60 \mu\text{m}$ まで界面に沿って進展した後、約 45° の角度でセラミックス側へ屈折し、セラミックスへ屈折した後は残留応力の影響が小さくなり、界面にほぼ平行な方向に破壊が進展することがわかる。また、図 18 にはき裂進展の各ステップでの応力拡大係数の変化を示している。その変化の傾向は前報⁹⁾の予界面き裂の破壊の場合の傾向とほぼ一致している。すなわち、屈折直後では、 $K_{\theta\text{max}}$ はほぼ一定か、小さくなり、その後はき裂の進展に伴い急速に増加する。

初期界面き裂から直接セラミックス側へ破壊する場合の破壊径路をシミュレートした結果を図 19 に示す。これは界面強度を十分大きく $K_{IC}=5.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とし、 $\Delta T=300^\circ\text{C}$ とした場合の解析例であり、図 15 に示したように $P_f=1210 \text{ N}$ となり、セラミックス側に直接屈折したケースである。図 19 には図 10 で示した界面端から直接セラミックス側へ屈折する場合のシミュレーション結果も示しているが、破壊径路に関しては両シミュレーション結果に大きな相違は見られないが、予想した破壊荷重は図 10 では $P_f=1600 \text{ N}$ となり、かなりの差が生じた。この原因はセラミックス中にき裂を想定する場合と界面き裂を想定する場合とで、その長さを同一に取ったためと考えられる。

図 19 初期き裂を母材に想定した場合と界面に想定した場合の破壊径路の比較

本研究ではセラミックス材中および界面上の二通りの初期き裂を想定し、別個にシミュレーション解析を行い安全側評価として小さいほうの破壊荷重をとるものとしたが、実用的には界面にのみき裂を想定したほうが、界面接合強度も考慮でき、二つの破壊形態に対応できるので簡便であろう。ただし、この場合、界面端からセラミックスへ直接屈折するとして予想される破壊荷重より、前述のように過小に評価される可能性があるが、初期き裂長さを小さく想定することで、この問題は解決できるものと考えられる。

6. 結 論

セラミックス/金属接合材の四点曲げ試験片を例として、接合残留応力および接合界面強度も考慮し、界面破壊力学に基づき、その破壊をシミュレーション解析する手法を開発した。本手法に基づき、残留応力および界面強度が接合体の強度および破壊形態に及ぼす影響をシミュレーション解析し、以下の主要な知見が得られた。

(1) 接合材の強度は残留応力を軽減するほど向上する。また残留応力が大きくなると界面はく離が小さくなり、ある限界以上ではセラミックスへの破壊が起こる。

(2) 界面の接合強度を上げると、接合材の強度も向上し、界面はく離長さは小さくなるが、接合強度を十分強くするとセラミックス側への破壊が生じるようになり、接合材の強度はそれ以上向上しない。

(3) 界面端からセラミックス側への破壊や界面に沿う破壊、さらに界面に沿っての進展の後セラミックス側へ屈折するなど多様な破壊形態がよくシミュレーションできた。

まだ、初期き裂長さの決め方、残留応力の求め方、

界面強度の求め方など検討すべき課題が多く残されているが、本研究によりセラミックス/金属接合材などの異材接合材の強度・破壊の定量的評価に界面破壊力学が有効に適用できることを明らかにした。

文 献

- (1) 結城編, 界面の力学, (1992), 125-157, 培風館.
- (2) 結城・許・S. Schmauder, 機論, 57-536, A (1991), 864.
- (3) 結城・Cho, 機論, 55-510, A (1989), 340.
- (4) 結城・許, 機論, 56-527, A (1990), 1517.
- (5) 結城・許, 生産研究, 42-8 (1990), 508.
- (6) Yuuki, R. and Xu, J. Q., *Eng. Fract. Mech.*, 41-5 (1992), 635.
- (7) 結城・ほか4名, 機論, 59-557, A (1993), 74.
- (8) 結城・ほか3名, 材料, 39-443, A (1990), 1095.
- (9) 結城・許・武藤, 機論, 60-569, A (1994), 37.
- (10) 武藤・湯本, 機講論, No. 900-50 (90-8), 185.
- (11) 小林・ほか5名, 機論, 60-569, A (1994), 65.
- (12) 羅・小林・佐藤, 機論, 60-569, A (1994), 59.
- (13) 結城・許, 生産研究, 43-7, (1991), 306.
- (14) 結城・許, 機論, 58-556, A (1992), 2394.
- (15) 中沢・岡村・国尾・林, 破壊力学実験法, (1984), 241, 朝倉書店.
- (16) Erdogan, F. and Sih, G. C., *Trans. ASME, Ser. D*, 85 (1963), 519.