アルミナセラミックス接合体の静疲労特性*

笹木 一 憲^{*1}, 元家 勝 彦^{*1}, 川 崎 正^{*1}

Static Fatigue Behavior of Alumina Ceramic Joint

Kazunori SASAKI, Katsuhiko MOTOIE and Tadashi KAWASAKI

A study was made to investigate the static fatigue behavior with alumina-alumina and alumina-stainless steel butt joints. The static fatigue test was performed under a constant bending moment at constant temperatures ranging from 580 to 888 K. For the specimen bonded at 903 K, static fatigue life, t_f , is related to the applied stress σ and test temperature T , regardless of the adherent materials, as follows; $1/t_f = (1/t_0^*) (1/\sigma)^{m_0} \exp \{-(Q_0 - \alpha \ln \sigma)/RT\}$, where t_0^* , m_0 and α are material constant, R the gas constant and Q_0 is activation energy of the fatigue process. While for the specimen bonded at higher temperature of 1073 K, t_f is expressed as following form; $1/t_f = (1/t_0) \sigma^m \exp \{-Q/RT\}$, where t_0 and m are material constant. A good agreement between the calculated and the observed value of fatigue life of the joint is obtained. The SEM observation of the fracture surface was also made and a possible mechanism for static fatigue process in the bonded zone was discussed.

Key Words: Ceramics, Life Prediction, Fatigue, Alumina Joint, Static Fatigue Process, Void Nucleation, Activation Energy

1. 緒 言

セラミックスと金属,あるいはセラミックス同士の接合は,構造部材としてセラミックスの特性を無駄なく十分に利用する上で重要なことである。セラミックスの接合については近年かなり多くの研究があり⁽¹⁾,接合そのものは可能であるが,接合工程中に生じる接合層の組織や微視接合欠陥,接合後冷却中に生じる残留応力などが接合体の強度に敏感に影響するようであって^{(2)~(5)},接合体の強度並びに信頼性については必ずしも十分には研究が進んでいない。またアルミナそのものの静疲労や繰返し疲労に関しては既にいくつかの研究はあるが⁽⁶⁾⁽⁷⁾,セラミックス接合体の疲労強度や寿命特性についての研究はまだあまり多くは行われていないように思われる。

この研究はアルミナとステンレス鋼,およびアルミナ同士の接合体について高温で静疲労試験を行い,負荷応力および温度と静疲労寿命の関係を明らかにし,疲労破面を観察して接合層における静疲労過程について考察して,その静疲労特性をよく把握することを目

的としたものである。

2. 実 験 方 法

実験に用いたセラミックスはSiO₂を3%含む純度95.4%の常圧焼結アルミナの角棒(7×7×10 mm)で,室温における曲げ強度290 MPa,線膨張係数7.2×10⁻⁶ K⁻¹である。図1に接合試験片の作製手順を示す。接合面を約10 μmの粗さに機械研磨してアセトン,アルコールの順に洗浄を行った後厚さ約15 μmのAl薄膜を真空蒸着した。このように接合面を前処理したアルミナ同士を厚さ0.1 mmのAl箔を中間材として重ね合わせ,24 MPaの圧力を加えて拡散接合してAl₂O₃-Al₂O₃接合体を作製した。接合温度を1073 KとしたものAl₂O₃-Al₂O₃(H)と呼び,接合層の厚さは約0.03 mm,室温での曲げ強度 σ_B =250 MPaであった。また接合温度を903 KとしたものをAl₂O₃-Al₂O₃(L)と呼ぶことにし,その接合層の厚さは約0.15 mm, σ_B =120 MPaであった。

アルミナと同じ形状寸法のオーステナイト系ステンレス鋼SUS304角棒を作り,その一つの端面をアルミナの接合面と同じように前処理し,前述と同じ方法で接合を行ってAl₂O₃-SUS接合体を作製した。アルミナ-ステンレス鋼系ではステンレス-Al側の強度は約

* 原稿受付 平成4年6月18日。

*¹ 正員,広島電機大学工学部 (〒739-03 広島市安芸区中野6-20-1)。

900 K で最高となるので⁽⁴⁾、この実験ではアルミナ-ステンレス系の接合温度を 903 K に選んだ。接合層の厚さは 0.15 mm, $\sigma_B=85$ MPa であった。先に述べた $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{L})$ は $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SUS}$ 接合体の静疲労特性と比較するために同じ接合温度でアルミナ同士を接合したものである。

接合強度は接合層の厚さに支配されるので、接合層の厚さを一定に制御することが好ましいが、接合技術の点から、この研究においては接合圧力をすべて 24 MPa と一定とした。

アルミナと銅との拡散接合においては、一定の接合圧力に繰返し応力を付加して接合することによって高い接合強度が得られるので⁽⁸⁾、一定の圧力 24 MPa に ± 5 MPa の繰返し応力を付加して接合したアルミナ-ステンレス鋼接合体を $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SUS}(\text{A})$ と呼ぶことにし、一定圧力下で接合した試料と静疲労特性の比較を行うことにした。この場合繰返し応力の付加は試料

の温度が 473 K に達した時から開始して、接合後の冷却過程で 473 K になった時繰返し応力の付加を停止した。接合層の厚さは約 0.15 mm, $\sigma_B=90$ MPa であった。このように 4 種類の接合体を作製し、これら接合体を図 1 に示すようにダイヤモンドカットで 4 分割した後各面を研磨したものを接合試験片とした。試験片の寸法は各試験片によって多少異なった値になったが、平均すると幅、高さおよび長さはそれぞれ約 3.3, 3.0 および 20 mm のく形棒である。

静疲労試験はレバー式曲げ試験機で行い、試験温度の範囲は 580 K から 888 K までとし、試験雰囲気の温度の時間的変動は ± 1 K 以内である。

3. 実験結果および考察

3.1 静疲労試験 4 種類の接合試験片について静疲労試験を行ったところ、すべての試験片は例外なく接合部で破壊した。寿命 t_f を測定して負荷応力 σ との関係を両対数グラフにプロットすると図 2~4 が得られた。図 2(a) と (b) はそれぞれ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SUS}$ および $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SUS}(\text{A})$ 試験片に対する結果で、接合において繰返し応力を付加してもしなくても静疲労挙動にはほとんど相違はみられない。測定点は多少のばらつきはあるが、いずれもそれぞれ一つの直線上に乗っており、その傾きは試験温度が高いほど大である。図 2(a) の点線は最小二乗法で求めた最適実験線で、実線は後で導いた寿命評価式から求めた計算線である。両者はかなりよく一致しているので、この図以外においては煩雑を避けるために実験線の点線を入れることを省いた。図 3 は $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{L})$ 試験片についての結果で、図 2 とほとんど同じ傾向である。1073 K で接合した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H})$ 試験片の結果は、図 4 に示したように $\ln t_f$ と $\ln \sigma$ との関係はやはり直線であるが、その傾きは温度によってほとんど変わらないようである。

図 1 接合試験片の作製手順

(a) 一定圧力で接合した接合体〔図中の点線は実験線で、実線は式(8)による計算線〕

(b) 繰返し応力を付加した接合体〔図中の実線は式(8)による計算線〕

図 2 アルミナ-SUS 接合体の負荷応力と静疲労寿命の関係

表 1 A , m および σ_F の実験値

Fatigue Test Temp. T, K	Al_2O_3 -SUS			Al_2O_3 -SUS (A)			Al_2O_3 - Al_2O_3 (L)			Al_2O_3 - Al_2O_3 (H)		
	σ_F, MPa	A	m	σ_F, MPa	A	m	σ_F, MPa	A	m	σ_F, MPa	A	m
580	82	4.83×10^{28}	12.9	77	1.78×10^{28}	11.3						
631	59	2.15×10^{20}	8.7	58	7.52×10^{20}	8.9						
683	43	2.34×10^{18}	7.0	44	2.66×10^{18}	7.0	39	7.68×10^{18}	7.5			
734	25	4.50×10^{13}	6.2	25	1.35×10^{13}	5.8	23	0.99×10^{13}	6.0			
788	19	3.72×10^{10}	4.9	16	3.72×10^{10}	4.9	12	1.83×10^{10}	4.9	52	4.65×10^{28}	13.7
838	7.5	5.75×10^8	4.3	7.4	5.17×10^8	4.3	6.6	4.47×10^8	4.3	35	6.76×10^{24}	13.0
888	3.3		3.9	3.0	5.44×10^6	4.3				22	2.46×10^{21}	11.2

図 3 アルミナ-アルミナ接合体 (接合温度 903 K) の負荷応力と静疲労寿命の関係 (図中の実線は式 (8) による計算線)

図 4 高温で接合したアルミナ-アルミナ接合体 (接合温度 1073 K) の負荷応力と静疲労寿命の関係 (図中の実線は式 (9) による計算線)

このような結果からアルミナ接合体の静疲労寿命 t_f は負荷応力の関数として次式で表される。

$$t_f = \frac{A}{\sigma^m} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで A と m とは一般に温度に依存する材料常数である。図 2~4 の実験データから A および m の値を求めて表 1 に示した。またこれらの図から内挿によって 10^5 秒に対する静疲労強度 σ_F を読取ってその値を表 1 に示した。低温で接合した 3 種類の試験片では σ_F も応力指数 m も互いにほぼ同じ値となっており、被接合体に関係なく、また接合中における繰返し応力の付加にも関係なく、全く同じ静疲労特性をもつことが

図 5 $\ln(1/t_f)$ と $1/T$ の関係

わかった。

高温で接合した Al_2O_3 - Al_2O_3 (H) の接合強度は Al_2O_3 - Al_2O_3 (L) の約 2 倍であったが、静疲労強度 σ_F は約 5 倍も高い。その原因の一つは接合層の厚さが薄いためであろう。

3・2 静疲労寿命の評価式 各温度において一定の応力 σ に対する静疲労寿命 t_f を図 2 および図 3 から求め、静疲労損傷 (強度劣化) の平均進行速度が $1/t_f$ で与えられるものとし、損傷速度の温度依存性を調べると図 5 が得られた。三つの接合体に対して多少のばらつきはあるが、それぞれの応力に対して測定点の一つの直線上に乗っているとみなすことができる。したがって t_0 を応力 σ に依存する一つのパラメータとすれば、 $1/t_f$ は次式で与えられる。

$$\frac{1}{t_f} = \frac{1}{t_0} \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで Q は見かけの活性化エネルギーである。 Q と応力の関係を調べると図 6 の実線のように直線関係が得られた。すなわち

$$Q = Q_0 - a \ln \sigma \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで Q_0 と α は材料常数である。

また $\ln(1/t_0)$ と $\ln \sigma$ との間には図 6 の点線で示す直線関係が得られたので、

$$\frac{1}{t_0} = \left(\frac{1}{t_0^*} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{m_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで t_0^* および m_0 は材料常数である。この式と式 (3) の関係を式 (2) に代入すると、

$$\frac{1}{t_f} = \left(\frac{1}{t_0^*} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{m_0} \exp \left\{ -\frac{Q_0 - \alpha \ln \sigma}{RT} \right\}$$

よって

$$\frac{1}{t_f} = \left(\frac{1}{t_0^*} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{m_0 - (\alpha/RT)} \exp \left\{ -\frac{Q_0}{RT} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで

$$m = \frac{\alpha}{RT} - m_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A = t_0^* \exp \left\{ \frac{Q_0}{RT} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

とおけば式 (5) から実験式 (1) が導かれる。

低温で接合した 3 種類の接合体に対する m の値 (表 1 参照) を図 7 に $1/T$ を関数としてプロットした。この図の実線は式 (6) による計算直線である。図のよう

図 6 Q および $\ln(1/t_0)$ と $\ln \sigma$ の関係

図 7 m と $1/T$ の関係

に実測値と計算値とは極めてよく一致している。また式 (5) を書き替えて寿命 t_f を温度および応力の関数として表すと次の式が得られる。

$$t_f = \frac{t_0^*}{\sigma^{(\alpha/RT) - m_0}} \exp \left\{ \frac{Q_0}{RT} \right\} \quad [\text{s}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式から寿命を計算し、その計算曲線を図 2 および図 3 の実線で示した。図のように 580 K の場合を除けば静疲労寿命の実測値と計算値との一致は良好であり、式 (5) によって静疲労寿命を評価することができる。これらの計算に用いた各パラメータの数値は、図 6 の実線および点線から求め、 $Q_0 = 573 \text{ kJ/mol}$, $m_0 = 9.0$, $\alpha = 93.57 \text{ kJ/mol}$, $t_0^* = 1.770 \times 10^{-27} \text{ s}^{-1}$ である。

次に高温で接合した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H})$ では表 1 に示したように、 m の値は温度が高くなるほどわずかに小さくなっているが、この実験の温度範囲ではほぼ一定とみなすと、活性化エネルギーは応力には無関係に一定となる。パラメータ $1/A$ と $1/T$ との関係を図 8 に実線で示したが、アレニウス型温度依存性であり、見かけの活性化エネルギーとして 501 kJ/mol が得られた。よって

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{t_0} \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\}$$

ここで $1/t_0$ は材料常数で、その値は 6.03×10^6 である。この A を式 (1) に代入すると次式が得られる。

$$\frac{1}{t_f} = \frac{1}{t_0} \sigma^m \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\} \quad [\text{s}^{-1}] \quad \dots\dots\dots (9)$$

この式から t_f を計算し、その計算曲線を図 4 に実線で示した。この場合にも実測値との一致は良好である。

3・3 疲労破面

(a) 低温で接合した試験片

接合温度 903 K の 3 種類の試験片で同じような静疲労特性を示したが、疲労破面もまた全く同じ特徴を

図 8 $\ln(1/A)$ および $\ln k$ と $1/T$ の関係

もった模様を示している。その代表的な例として 734 K で $\sigma=30$ MPa を負荷して 4×10^4 秒で破壊した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{L})$ 試験片の破面写真を図 9 に示した。破壊した一対の破面に対応するものを左右に並べて示している。図の (a) はマクロ写真で引張側には全面にわたってほぼ一様な網目模様、また圧縮側には放物線模様が見られる。引張側の拡大写真が (c) で、左側の写真では網目が浅く、その底にはアルミナ母地が見えている。これに相對する破面 (右側の写真) では網目が深く、その底にはかなり厚い Al 層^{**1}が残っており、矢印で示したように等方的な割れが方々に生じている。また図 9 の A 同士、あるいは B 同士のように、相對する面のどちら側でも同じ模様の島がいくつか見られ

る。このような島は空泡ではなく、接合層の Al が分離破壊してできた破面であろう。図 9 (b) は圧縮側の拡大写真であるが、相對するどちらの面にもアルミナの母地は見られないので、圧縮側ではき裂は接合層の中を進んでいる。多数の偏平な放物線模様は破断の直前に接合層の中をき裂がかなり急速で伝ばしたことを物語っている。

接合層は金属 Al の薄膜が被接合体に挟まれた状態にある。接合境界での滑りは生じないと仮定すると、接合層内における曲げひずみは一軸の状態に拘束されるので、応力は圧縮側ではほぼ静水圧縮、引張側ではほぼ静水引張の状態となり、引張側では空泡が発生しやすい⁽⁹⁾。図 9 に見られる網目模様は発生した空泡が

圧 縮 側

引 張 側

(a) 破面のマクロ写真 (×35)

(b) 圧縮側の破面に見られる放物線模様 (×200)

(c) 引張側の破面に見られる網目模様 (×200)

図 9 アルミナ-アルミナ接合体 (接合温度 903 K) の疲労破面の SEM 写真

^{**1} 接合層に純 Al が残っているとは思われないが、どのような合金化合物、あるいはそれらの混合物であるか確かめていないので以下の論文では Al 層、あるいは Al 薄膜と呼ぶことにした。

(a) $d=20.3\ \mu\text{m}$, $\sigma=58\ \text{MPa}$, $t_f=0.14\ \text{ks}$ (b) $d=57.9\ \mu\text{m}$, $\sigma=30\ \text{MPa}$, $t_f=40\ \text{ks}$ (c) $d=136\ \mu\text{m}$, $\sigma=21.5\ \text{MPa}$, $t_f=143\ \text{ks}$

図 10 負荷応力と網目模様の大さきの関係 ($\times 200$)

図 11 $\ln(\sigma t_f)$ と $\ln d$ の関係

成長し、互いに合体してできたものと思われる。したがって網目模様と放物線模様との境界は破壊時における中立軸の位置に対応している。

接合層に生じた空泡核の直径を d_0 として Al の表面エネルギーを γ 、応力を σ とすると、

$$\frac{d_0}{2} \geq \frac{2\gamma}{\sigma} \quad (10)$$

なる条件を満足する核、すなわち半径が $2\gamma/\sigma$ より大きな核は成長することができる⁽¹⁰⁾。核生成が接合層内ではほぼ均一に起こって、それらすべての核が一様に成長したとすれば、破面に見られる網目は式(10)の関係から、負荷応力が高いほど小さくなるはずである。試験温度 734 K において負荷応力が異なる場合の破面を図 10 に示したが、期待したように応力が高いほど明らかに網目は小さい。

核と核との間隔が a である方陣状に均一な核生成が起こり、それらの空泡が一様に成長して合体するまでの時間 t を原子空孔の拡散に基づいて計算した結果

によると⁽⁹⁾,

$$t \approx C \frac{Ta^3}{D_g \sigma'} \quad (11)$$

ここで T は温度、 D_g は粒界拡散係数、 σ' は偏差応力、また C は物性常数である。この式の a は破面の網目の平均直径 d にほぼ対応し、また t は疲労寿命 t_f に比例していると考えてよい^{**2}。破面写真から d を測定し、 $\ln(\sigma t_f)$ と $\ln d$ とをプロットして図 11 に示した。静疲労寿命が数分以内のもの（ひげのついた三つの測定点）を除けば、ほぼ直線関係にあるとみてよい。したがって k を温度に依存する常数とすれば、

$$t_f = \frac{d^n}{k\sigma} \quad (12)$$

この式の指数 n を求めて図中に示してあるが、その平均値は 2.68 となり、3 に非常に近い値である。またパラメータ k の温度依存性を図 8 の点線で示してあるが、アレニウス型で見かけの活性化エネルギーとして $Q=160\ \text{kJ/mol}$ が得られた。この値は Al の自己拡散に対する活性化エネルギーに極めて近い値である。したがって式(12)の k は原子空孔の拡散と密接な関係にあるパラメータであって、実験式(12)は式(11)によく対応していることがわかる。

このような考察から接合層における曲げ静疲労の過程は、(i)引張側における空泡核の生成、および生じた空泡の成長、その結果として起こる(ii)セラミックスと接合層とはく離によるき裂の生成、(iii)き裂の成長および最終破断からなるものと思われる。

(b) 高温で接合した試験片

接合温度 1073 K の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H})$ 試験片は静疲労の試験温度や負荷応力の値、したがって寿命にもあまり関係なく、疲労破面はほぼ同じような模様を示している。一例として温度 788 K で $\sigma=48.2\ \text{MPa}$ を負荷

^{**2} 厳密には式(11)の t は空泡成長の時間であるから、 t_f から核生成までの時間を差し引いた時間にほぼ等しい。ここでは簡単のため $t = \beta t_f$ ($\beta < 1$) と考える。

して 46 900 秒で破壊した試験片の破面を図 12 に示した。写真(a)はマクロ写真で、圧縮側に薄黒く見える層があり、その境界線(矢印)は引張り-圧縮の境(中立軸)に対応しているようである。この境界部を拡大した写真が(b)で、明らかに組織の相違が見られる。引張側および圧縮側を 1 000 倍に拡大して(c)および(d)に示した。引張側ではほぼ全面にわたって約 2~5 μm 程度の粒が多数見られ、これはアルミナ母材の表面である。細い網目は Al 薄膜で、図 9 の網目に比べてその大きさは極めて小さく、また網目の大きさは負荷応力や試験温度によって大きな変化は見られなかった。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H})$ は静疲労強度が高いから、負荷応力も高いので式(10)から網目は当然小さくなるが、式(12)から期待される大きさよりもはるかに小さいようである。図(e)は網目の拡大写真で、Al 薄膜が緻密にアルミナ粒子群を囲い込み機械的な結合のようである。図(d)は圧縮側の破面で、図 9 の場合、圧縮側には空泡が見られなかったことに対応して、この写真には網目は全く見られない。静水圧のもとでは空泡核の生成は起こらないのであるから⁽⁹⁾、網目が見られない境界線[図(a)矢印]は中立軸が破面の中央からこま

で移動してきたことを示している。相対する破面もこの写真と同じような模様を示しており、き裂は接合境界に沿うのではなく接合層の中を横切って最終破断が起こったと思われる。

3・4 低温で接合した継手(L)³と高温で接合した継手(H)**³との比較** 以上に述べた結果および考察により、903 K で接合した 3 種類の継手は同じような特性を示したが、これに対して 1 073 K で接合した継手の静疲労特性の相違点を挙げると、(i)静疲労強度は(H)のほうが(L)よりも約 5 倍高い。(ii)疲労寿命の応力指数 m は(L)では著しい温度依存性を示したが、(H)では顕著でない。(iii)破面観察により(L)では空泡成長の過程が明白に伺われたが(H)ではあまり明らかでなく、負荷応力や試験温度によって破面模様に著しい変化は見られなかった。(iv)(L)では引張側破面に等方性の割れが観察されたが(H)には見られなかった。このような相違点が接合層の厚さが薄く、したがって変形拘束が厳しいことによるものか、あるいは高温で接合したものでは化学的な接合反応が一部進行しているためであるか⁽¹¹⁾、今のところ明らかでない。しかし両方で静疲労の基本的過程そのものは同じ

図 12 高温で接合したアルミナ-アルミナ接合体(接合温度 1 073 K)の疲労破面の SEM 写真

**³ 低温で接合した三種類の接合体を(L)と略記し、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H})$ を(H)と略記する。

であろうと思われる。また被接合体を剛体とみなしたが、実際には被接合体の変形が接合層の挙動に影響を与えることも考えられ、接合体全体の静疲労特性についての詳細は今後の研究にまきたい。

4. 結 論

接合温度 903 K で接合したアルミナ-ステンレス鋼およびアルミナ同士、並びに 1073 K で接合したアルミナ同士の接合体について曲げモーメント一定の静疲労試験を行い、次のような結論が得られた。

(1) Al_2O_3 -SUS 接合においては、繰返し応力を付加しても静疲労特性に対する影響はほとんどない。そしてアルミナ接合体の疲労特性は被接合体の種類や接合法に関係なく、接合層の強度特性に支配される。

(2) 低温で接合した継手では応力指数 m の温度依存性が顕著であり、寿命評価式として次式が導かれた。

$$\frac{1}{t_f} = \left(\frac{1}{t_0^*} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{m_0} \exp \left\{ -\frac{Q_0 - \alpha \ln \sigma}{RT} \right\}$$

(3) 高温で接合した継手では m の温度依存性はあまり顕著ではないので、 m を温度には無関係なパラメータとし寿命評価式として次式を得た。

$$\frac{1}{t_f} = \frac{1}{t_0^*} \sigma^m \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\}$$

これらの式から計算した t_f の値と実測値との間にこの実験の温度範囲ではよい一致が得られた。

(4) 疲労破面の SEM 観察により $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 接合は主として Al 薄膜とアルミナ粒子群との機械的結合

によると思われる。

(5) 低温で接合した継手の破面観察から曲げ静疲労の過程は (i) 静水引張応力のもとにおける空泡核の生成とその成長, (ii) 空泡の成長と平行して起こる接合境界層のはく離破壊, (iii) はく離によって生じたき裂の成長から成るものと思われる。

この研究を進めるに当たり研究費の一部は浅野スレート(株)奨学金(平成3年度)によるものであることを付記して謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば, Kumar, P. and Greenhut, V. A. 編, "Metal-Ceramic Joining", *The Minerals, Metals and Materials Soc.*, (1991), 103-119.
- (2) Kirchner, H. P., Conway, J. C. and Segal, A. E., *J. Am. Ceramic Soc.*, **70**(1987), No. 2, 104-109.
- (3) Zdaniewski W. A., Conway, J. C. and Kirchner, H. P., 文献(2)の 110-118 ページ.
- (4) Nicholas, M. G. and Crispin, R. M., *J. Mater. Sci.*, **17**(1982), 3347-3360.
- (5) Nicholas, M. G. and Crispin, R. M., *Proc. Int. Symp. Ceramic Mater. and Component for Engine*, (1986), 470-476.
- (6) Krohn, D. A. and Hasselman, D. P., *J. Am. Ceramic Soc.*, **55**(1972), 208-211.
- (7) Chih-Kuang Tack Lin and Socie, D. F., *J. Am. Ceramic Soc.*, **74**(1991), 1511-1518.
- (8) 笹木・元家・川崎, 日本金属学会誌, **53** (1989), 445-451.
- (9) Hull, D. and Rimmer, D. E. *Philos. Mag* **4** (1959), 673-687.
- (10) 横堀, 材料強度学 第2版, (1974), 第9章, 第10章, 岩波書店.
- (11) Haber, R. A. and Greenhut, V. A., 文献(1)の 119-131 ページ.