

セラミックス/金属接合残留応力の
弾塑性特異性に及ぼす接合体寸法の影響*荒 居 善 雄*¹, 小 林 英 男*²Influence of Size of Joint on Elastic-Plastic Singularity
of Residual Stresses of Ceramic-Metal Joints

Yoshio ARAI and Hideo KOBAYASHI

Joining residual stresses at the ceramic near the interface were measured nondestructively by the X-ray method for the Si_3N_4 -S45C joints. Four specimens of different sizes were used to clarify the influence of size on the distribution of the residual stresses and the change of the intensity of the stress singularity. Analytical studies on the joining residual stresses for the Si_3N_4 -S45C joint specimen were performed using the finite-element method. The intensity of the residual stress singular field is proportional to the ratio between the interface length and the interlayer length. It is also proportional to the interface length raised to the λ power.

Key Words: Residual Stress, Experimental Stress Analysis, Size Effect, Ceramic-Metal Joint

1. 緒 言

セラミックスと金属の接合技術はセラミックス材料の機械部品化技術として注目を集めている⁽¹⁾⁽²⁾。セラミックス/金属接合材料を機械構造材料として用いる場合、その強度評価方法が重要となる⁽³⁾。セラミックス/金属接合材の強度を支配する力学因子として、接合残留応力があり⁽⁴⁾、界面端部で弾塑性特異場を形成していることが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。強度評価方法の検討項目の一つとして試験片寸法があり、切断による残留応力再配分に関する研究が行われている⁽⁷⁾。しかし、接合残留応力特異場に及ぼす接合体寸法の影響は明らかにされていない。

本研究では、セラミックス/金属接合残留応力特異場の強さに及ぼす接合体寸法の影響を明らかにする目的で、寸法の異なる 4 種類の窒化けい素と炭素鋼 S45C の接合体の窒化けい素側の残留応力を X 線法を用いて測定するとともに、二層接合体の端部応力特異場の強さの解析結果と中間層を有する接合体の弾塑性有限要素解析結果を用いて接合残留応力特異場の強さ

と接合体寸法の影響を明らかにした。

2. 実験方法

セラミックスには常圧焼結窒化けい素(東芝製 TSN03)を、金属には構造用炭素鋼(S45C)を用いた。セラミックスと金属を機械加工し、表 1 に示す熱処理を施した後、接合に供した。接合は活性金属法で行い、中間層として Cu を用いた。供試材の材料特性を表 2 に、接合条件を表 3 に示す。

寸法の異なる 4 種類の窒化けい素と炭素鋼 S45C の接合体の窒化けい素側の界面垂直残留応力 σ_x を、X 線法により測定した。接合体形状および測定位置を図 1 に、試験片番号と幅 W 、厚さ B の対応を表 4 に示す。試験片番号は、接合体の幅と厚さの数値の組合せで表す。接合体の残留応力は界面近傍に集中するので、

表 1 熱処理条件

Jointed materials	Heat treatment conditions
Sintered Si_3N_4	In air, 1000° C×24 hour annealing
S45C	In vacuum, 900° C×1 hour annealing

* 原稿受付 平成 4 年 8 月 24 日。

*¹ 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。*² 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

各接合体の残留応力の代表値として、界面から0.5 mm($x=0.5$)の線上の端面から0.5 mm($y=0.5$ または $y=W-0.5$ で $z=0$)または($y=0$ で $z=-0.5$ または $z=-B+0.5$)、これらの点を以下ではEdgeと称する]と幅中央[($y=W/2$ で $z=0$ または $z=-B$)、これらの点を以下ではCenterと称する]の三点を採用した。さらに、接合残留応力特異場の分布特性を検討するために、端面から0.5 mmの界面に垂直な線上[図1の測定線AA($y=0.5, z=0$)および測定線A'A'($y=0, z=-0.5$)]の分布測定を行った。X線応力測定条件を表5に示す。

表2 材料特性

	Si ₃ N ₄	Cu	S45C
E (GPa)	304	108	206
ν	0.27	0.33	0.30
α ($\times 10^{-6}$)	3.0	17.7	12.0

表3 接合条件

Brazing filler	: Ti-Ag-Cu
Temperature	: 1073~1123K
Atmosphere	: Vacuum, 1×10^{-5} torr
Interlayer	: Cu (thickness 0.2mm)

表4 試験片番号と寸法

T. P. No.	W	B	H (mm)
30-14	30	14	110
30-5	30	5	44
15-14	15	14	110
15-5	15	5	44

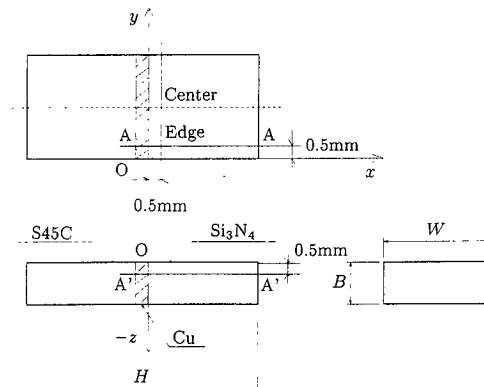


図1 試験片形状および測定位置

3. 実験結果

寸法の異なる4種類の窒化けい素と炭素鋼S45Cの接合体の窒化けい素側の界面垂直残留応力 σ_x の、X線法による測定結果と接合体寸法(厚さ B または幅 W)の関係を図2に示す。ここで、横軸の接合体寸法は図1のCenterおよび測定線AA上のEdgeの場合、厚さ B を、測定線A'A'上のEdgeの場合、幅 W を採用した。板幅端部近傍(Edge)および板幅中央部(Center)の界面垂直残留応力 σ_x の測定結果は接合体寸法の増加に伴い増大している。厚さ30 mm, 幅14 mmの接合体(試験片30-14)の測定線AA上の残留応力は幅の相違にもかかわらず幅15 mm, 厚さ14 mm(試験片15-14)のそれとほぼ等しい。幅30 mm, 厚さ

表5 X線応力測定条件

System	PSPC/RSF system(Rigaku)
Characteristic X-ray	Cu-K α
Diffraction plane	β -Si ₃ N ₄ (323)
Filter	Ni
Tube voltage	35kV
Tube current	40mA
Focus size	0.4 \times 0.6mm
Collimeter	ϕ 0.5mm
Method	$\sin^2 \phi$ iso-inclination method
Incident angle	$\phi=0, 15, 25, 35, 45^\circ$
Fixed time	150sec/1 ϕ
Stress constant	-806.5MPa/deg
Peak position	Parabola peak top method after LPA correction

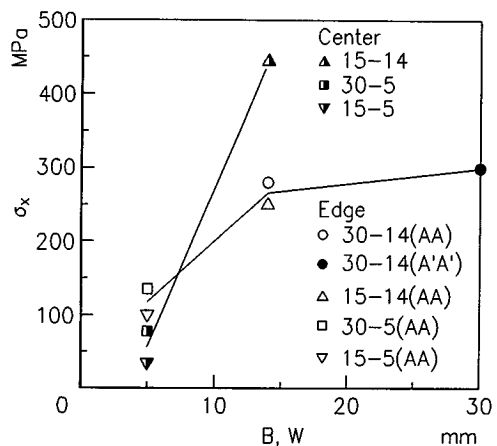


図2 残留応力と接合体寸法の関係

5 mm の接合体 (試験片 30-5) の残留応力は、厚さ 14 mm の接合体 (試験片 30-14 および 15-14) のそれよりも小さく、厚さの影響が存在する。

端部から 0.5 mm 離れた界面垂直線上の界面垂直方向残留応力 σ_x の分布測定結果を図 3 に示す。黒丸印は試験片 30-14 の図 1 における測定線 A'A' 上の結果、白丸印は同一試験片の測定線 AA 上の結果を示す。三角印は試験片 15-14 の結果、四角印は試験片 30-5 の結果で、両者とも測定線 AA 上の結果を示す。図中の実線は厚さ 14 mm の試験片の応力分布を定性的に示す。いずれの場合も結果は同様であり、 σ_x は界面からの距離 x の増大に伴い急激に低下している。

4. 接合残留応力特異場の評価

図 4 のような異材の突合せ単純接合体の界面端部近傍において、 σ_x の x 方向分布は残留応力特異性を表す次式で近似できる⁽⁸⁾。

$$\sigma_x = K/x^\lambda \quad (y=0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K は接合端の残留応力特異場の強さ、 λ は特異性の指数である。弾性変形を仮定すれば、相似則

よりすべての長さは界面長さ d (図 4 参照) で基準化でき、残留応力の大きさは、接合された 2 材料の熱膨張係数差 $\Delta\alpha$ 、弾性係数の組合せによって決まる定数 ΔE 、接合過程における温度変化 ΔT の積に比例するので、式 (1) は次式で表される⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$\sigma_x = \Delta\alpha\Delta E\Delta T/(x/d)^\lambda \quad (y=0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、式 (1) の K は次式で表示される。

$$K = \Delta\alpha\Delta E\Delta Td^\lambda \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上の考察から、突合せ単純接合体の場合、残留応力特異場の強さは界面長さ d の λ 乗に比例する。

中間層を有する実際の接合体の場合、残留応力特異場の力学因子 (λ と K) を解析するためには、中間層の塑性変形を考慮しなければならない⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。そこで、銅を中間層とした窒化けい素と炭素鋼の接合体について、二次元弾塑性有限要素解析を行い、実験結果と比較し、その結果に基づき、残留応力特異場の力学因子に及ぼす接合体寸法の影響を評価した。解析モデルを図 5 (a) に、要素分割図を図 5 (b) に示す。平面応力状態を仮定し、8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。要素数は 532 であり、端部特異点近傍の最小要

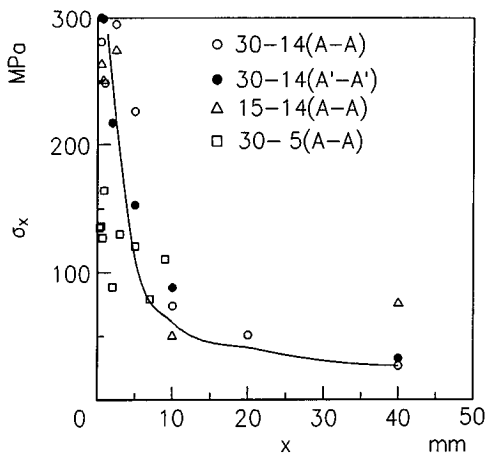


図 3 残留応力の界面垂直方向分布

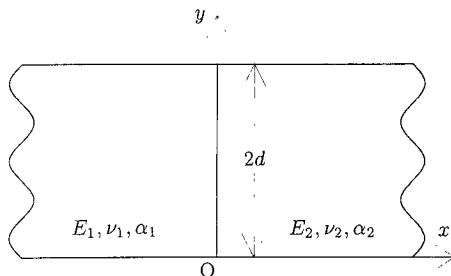


図 4 突合せ単純接合体モデル

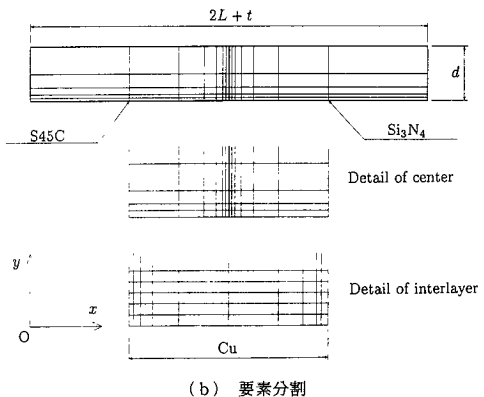
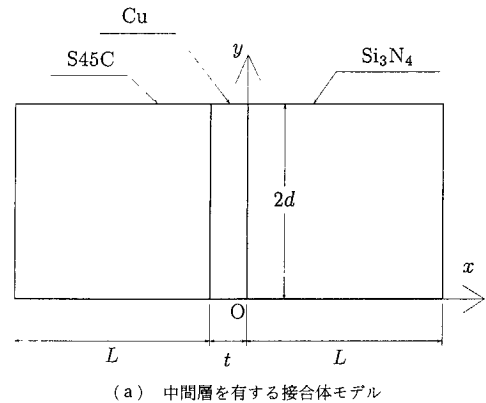


図 5 解析対象の形状

素寸法は x 方向に $L/2560$, y 方向に $d/2560$ である。接合体中の温度分布は一定とし、ろう材が強度を持ち始める 800 K から 300 K まで一様に冷却された場合の残留応力を解析した。縦弾性係数 E , 熱膨張係数 α の温度依存性と銅 (中間層) の応力-ひずみ関係を図 6 に示す。銅は線形加工硬化を仮定し、降伏応力 $\sigma_{ys}=10$ MPa, 加工硬化係数 $H'=42$ MPa を用いた。

有限要素法による接合残留応力分布の解析結果を図 7 に示す。図 7 (a) は試験片 30-14 の xy 面内の解析結果で、界面近傍 ($x=0.002$ mm) の σ_x の界面平行方向 (y 方向) 分布である。最大応力は端部に生じている。接合残留応力は界面の表面端で特異性を有するので、表面の面内応力分布を解析する際に、表面をそのまま平面応力モデルに置き換えることはできない⁽¹³⁾。しかし、実際の三次元分布を二次元解析結果の適切な重ね合わせによって近似可能である⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。三次元接合体の直交する二つの表面の交差部 (角部) 近傍の一つの表面上の残留応力分布は、その表面を対象とした二次元解析結果 (平面応力) と、その表面に垂直な (他の表面に平行な) 断面を対象とした二次元解析の端部の結果 (平面応力あるいは平面ひずみ) の重ね合わせによって得られる。X線法による測定線 AA および A'A' (図 1 参照) は、測定表面上で角部から 0.5 mm の内側 ($y=0.5$) にあり、この位置の σ_x を図 7 (a) で参照すれば、残留応力はほとんど零とみなせる。したがって、X線法による測定線 AA または A'A' 上の残留応力は、AA または A'A' を端部とする断面を対象とした二次元解析結果 (平面応力) で与えられることになる。すなわち、測定線 AA の場合、角部からわずかに内側に入

れば、残留応力分布に及ぼす表面の幅方向の拘束の影響は小さく、断面の厚さ方向の拘束の影響が支配的になると考えられる。この場合、接合体の界面長さ $2d$ は板幅 W でなく、板厚 B となる。測定線 A'A' の場合、界面長さ $2d$ は板幅 W となる。図 7 (b)~(d) は界面近傍セラミックス側の界面垂直方向応力 σ_x の界面垂直方向分布を両対数表示した結果であり、白丸印が X線法による測定結果、黒丸印が有限要素解析結果を示す。有限要素解析結果の両対数直線関係が、特異応力場を示す結果と判断される。 $x/d \leq 0.1$ の解析結果を用いて両対数直線関係を最小二乗法近似した結果を実線で示す。試験片 30-5 [図 7 (b)] と試験片 15-14 および 30-14 の測定線 AA の測定結果 [図 7 (c)] は、界面に最も近い測定結果が解析結果と一致している。しかし、測定結果の両対数関係は解析結果の特異場の傾きと一致せず、界面に最も近い測定結果以外は、特異応力場の外側の測定結果と考えられる。試験片 30-14 の測定線 A'A' の測定結果 [図 7 (d)] は両対数関係が解析結果の特異場の傾きと一致している。すなわち、界面長さ $2d$ が 30 mm と最も大きい試験片 30-14 の測定線 A'A' の場合、界面から 0.5~5 mm の範囲で、X線法により残留応力特異場を測定できる。

図 7 において有限要素解析結果の $\log \sigma_x - \log x$ 関係を最小二乗法近似して残留応力特異場の力学因子 (λ と K) を算出した。 λ と中間層厚さ t で基準化した界面長さ $2d$ の関係を図 8 (a) に示す。 λ は $2d/t$ の増加に伴い減少している。佐藤らは中間層厚さと λ の関係を中間層の塑性変形領域と合わせて考察し、中間層の薄い場合には鋼の弾性係数の影響を受けて λ が小

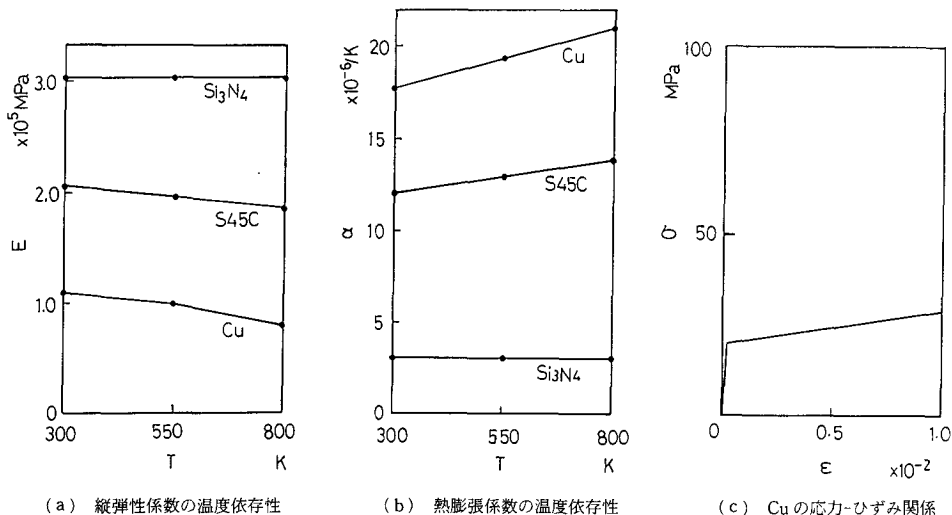
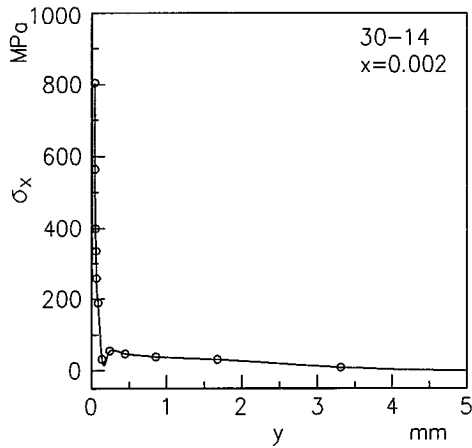
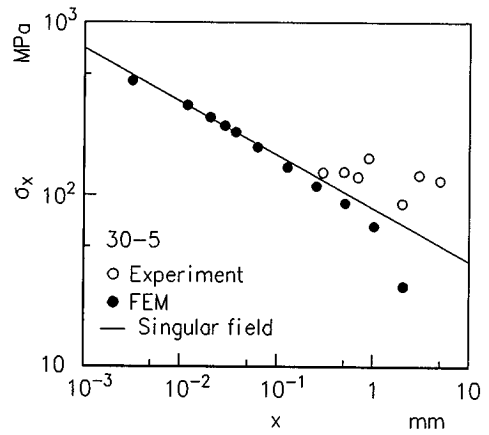


図 6 解析に用いた各材料の特性



(a) 残留応力の界面平行方向分布



(b) 残留応力の界面垂直方向分布 (試験片 30-5, 両対数)

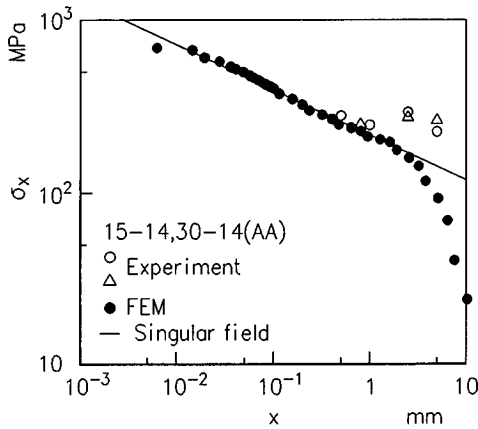
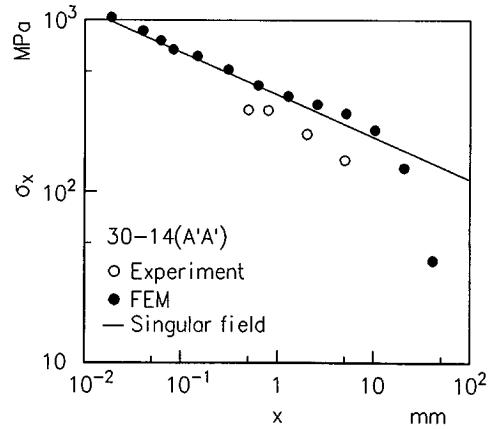
(c) 残留応力の界面垂直方向分布
[試験片 15-14, 30-14(AA), 両対数](d) 残留応力の界面垂直方向分布
[試験片 30-14(A'A'), 両対数]

図 7 有限要素解析結果

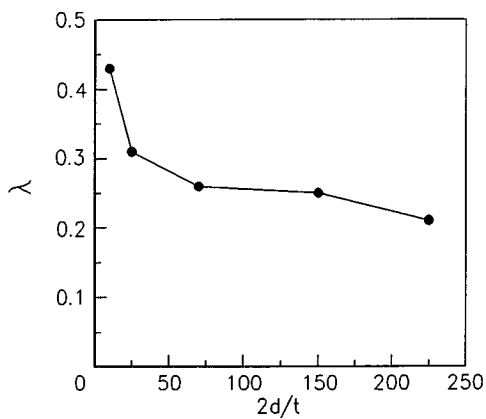
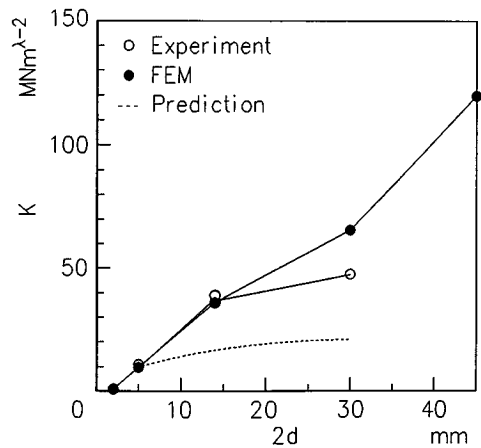
(a) 特異性の指数 λ と相対界面長さ $2d/t$ の関係(b) 特異場の強さ K と界面長さ $2d$ の関係

図 8 特異性の力学因子

さくなり、中間層の厚い場合には銅の塑性変形特性のために λ が大きくなることを示した⁽⁶⁾。図8(a)は中間層厚さが一定で界面長さ(試験片厚さや幅)を増加させた場合であり、相対的に中間層を薄くしたことになり、 λ の挙動は佐藤らの結果と一致している。この試験片ごとの λ を用い、界面長さ $2d$ の5%以内に位置するX線法による測定結果と式(1)から試験片ごとの K を算出した。 K と界面長さ $2d$ の関係を図8(b)に示す。 K は $2d$ の増加に伴い増大しており、残留応力特異場の強さには寸法依存性が認められる。また、実験結果と有限要素解析結果はよく一致している。図中の $2d=5\text{ mm}$ の K の評価結果と式(3)から $\Delta\alpha\Delta E\Delta T$ の値を算出し、この値が界面長さによって変化しないと仮定して、試験片ごとの λ から評価した K の予測結果を図8(b)に破線で示す。予測結果は実験結果および有限要素解析結果と、定量的に一致せず、 K の寸法依存性は異材の突合せ単純接合体(図4参照)に対する弾性解析結果[式(3)]のみでは説明できない。

接合後の中間層の変形状態の有限要素解析結果の一例を図9に示す(試験片30-14の xy 面内)。熱膨張係数の差異に起因する界面における変形の食違いの大部分が中間層(Cu)のせん断変形で吸収されている。この中間層のせん断ひずみ γ は、界面長さ d と中間層厚さ t の比 d/t によって支配されると考えられる。図9を参照して、端部の中間層セラミックス側の y 座標 y_1 と金属側の y 座標 y_2 と中間層厚さ t から中間層端部の厚さ方向平均せん断ひずみ $\gamma=(y_1-y_2)/t$ を算出し、 $\gamma-2d/t$ 関係を図10に示す。ここで、黒三角印が γ 、白丸印が K の実験結果、黒丸印が K の解析結果を示す。 $2d/t$ の増加に伴い γ は増大し、それとともに、残

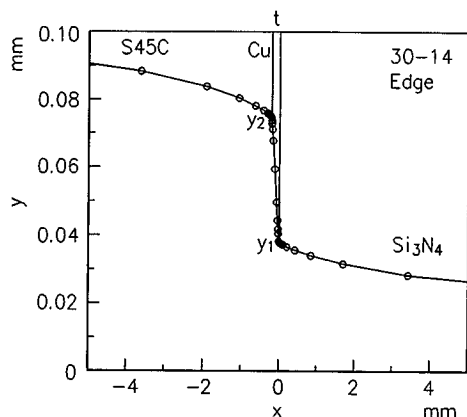


図9 界面端部近傍の中間層せん断変形状態

留応力特異場の強さ K も増大している。すなわち、接合体が厚く、 d/t が大きい場合、熱膨張の食違い変形は厚さに比例するから、中間層には端部近傍で局所的に大きな弾塑性せん断ひずみが生ずる。一方、接合体が薄く、 d/t が小さい場合、熱膨張の食違い変形は小さく、弾塑性せん断ひずみは高くならない。前述したように、突合せ単純接合体(図4参照)の場合、弾性変形を仮定した残留応力特異場の強さを支配する外力としての残留応力は、 $\Delta\alpha\Delta E\Delta T$ で一義的に定まる[式(2)参照]。これに対して、中間層が存在する実際の突合せ接合体[図5(a)参照]の場合、中間層の弾塑性変形を考慮すれば、残留応力特異場の強さを支配する外力としての残留応力は、中間層の端部近傍の局所的な弾塑性せん断ひずみによって定まるが、弾塑性ひずみは接合体寸法と中間層厚さの比 d/t に依存する。したがって、式(3)は以下のように修正される。

$$K = \Delta\alpha\Delta E\Delta T f(d/t) d^{\lambda} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $f(d/t)$ は接合体寸法と中間層厚さの比 d/t の関数であり、図10の解析結果から、本研究の材料組合せの場合、 $10 \leq 2d/t \leq 225$ において、 $\Delta\alpha\Delta E\Delta T f(d/t)$ は d/t の一次式として次式で近似できる。

$$\Delta\alpha\Delta E\Delta T f(d/t) = 1.86(d/t) + 22.6 \dots \dots \dots (5)$$

すなわち、接合残留応力特異場の強さに及ぼす接合体寸法の影響を要約すれば、界面長さの λ 乗に比例するとともに、界面長さ d と中間層厚さ t の比に比例し、 $\lambda \leq 0.5$ であるから、界面長さ d と中間層厚さ t の比の影響が支配的である。

5. 結 言

セラミックス/金属接合残留応力特異場の強さに及ぼす接合体寸法の影響を明らかにする目的で、寸法の異なる4種類の窒化けい素と炭素鋼S45Cの接合体の

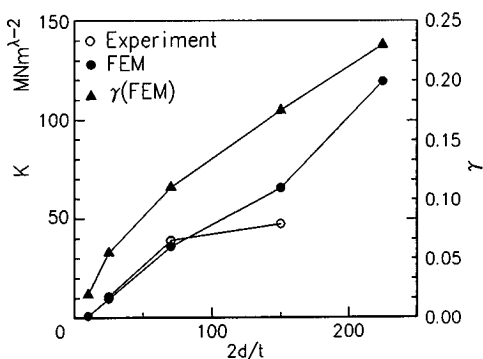


図10 中間層のせん断ひずみと相対界面長さの関係

窒化けい素側の残留応力をX線法を用いて測定するとともに、突合せ単純接合体の端部応力特異場の強さの解析結果と中間層を有する接合体の弾塑性有限要素解析結果を用いて接合残留応力特異場の強さと接合体寸法の関係を明らかにした。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 板幅端部近傍および板幅中央部の界面垂直残留応力は接合体寸法の増加に伴い増大する。厚さ 30 mm, 幅 14 mm の接合体の残留応力は幅の相違にもかかわらず幅 15 mm, 厚さ 14 mm のそれとほぼ等しい。幅 30 mm, 厚さ 5 mm の接合体の残留応力は、厚さ 14 mm の接合体のそれよりも小さく、厚さの影響が存在する。

(2) 角部からわずかに内側に入れば、残留応力分布に及ぼす表面の幅方向の拘束の影響は小さく、断面の厚さ方向の拘束の影響が支配的になる。この位置における界面長さは板幅でなく、板厚となる。

(3) 残留応力特異場の強さは界面長さの増加に伴い増大しており、残留応力特異場の強さには寸法依存性が認められる。

(4) 接合残留応力特異場の強さは、界面長さの λ 乗に比例するとともに、界面長さと中間層厚さの比に比例する。そして、 $\lambda \leq 0.5$ であるから、界面長さよりも界面長さと中間層厚さの比の影響が支配的である。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により、日本溶接協会セラミック部材接合技術の試験・評価方法の研究委員会(委員長、小林英男東京工業大学教授)が実施した「セラミック部材接合技術の試験・評価方法の開発」の一環として行われた。関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 岩本・須賀, セラミックス接合工学, (1990), 1, 日刊工業新聞社.
- (2) 豊田, インターフェイスメカニクス, (1991), 67, 理工学社.
- (3) 小林, 機論, 57-535, A(1991), 476.
- (4) 小林・荒居・中村・中村, 機論, 55-512, A(1989), 750.
- (5) 佐藤・小林・荒居, 機論, 57-543, A(1991), 2702.
- (6) 佐藤・小林・荒居, 機論, 58-548, A(1992), 552.
- (7) 佐藤・小林・荒居, 機論, 57-540, A(1991), 1801.
- (8) Bogy, D. B., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 35(1968), 460.
- (9) Blanchard, J. P. and Ghoniem, N. M., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 56(1989), 756.
- (10) Mizuno, K., Miyazawa, K. and Suga, T., *J. Faculty Eng., Univ. Tokyo(B)*, XXXIX-4(1988), 401.
- (11) 古口・賀屋・矢田, 機論, 55-520, A(1989), 2527.
- (12) 村田・向井, 材料, 41-466(1992), 1101.
- (13) 栗田・狩野・佐藤, 機論, 57-536, A(1991), 907.
- (14) Kobayashi, H., Arai, Y., Nakamura, H. and Sato, T., *Mater. Sci. Eng., A*, 143(1991), 91.
- (15) 佐藤・小林・荒居, 圧力技術, 29-4(1991), 230.