境界要素法による熱残留応力を考慮した
三次元接合体角部における界面強度の評価*古口 日出男^{*1}, 明 尾 伸 基^{*2}An Evaluation of Interface Strength at a Vertex in
a Three-Dimensional Joint Considering Residual Thermal Stresses
Using Three Dimensional Boundary Element MethodHideo KOGUCHI^{*3} and Nobuki MEO^{*3} Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

A mismatch of different material properties may cause stress singularities, which lead to the failure of the bonding part in joints. It is very important to analyze a stress singularity field for evaluating the strength of interface in three-dimensional joints. Thermal residual stresses occur in a cooling process after bonding the joints, and the stress singularity for thermal stresses also occurs. In the present study, a boundary element method and an eigen value analysis based on finite element method are used for evaluating the intensity of stress singularity. Three-dimensional boundary element program based on the fundamental solution for two-phase isotropic body is used. The strength of interface in two kinds of Si-resin specimen with different bonding area is investigated analytically and experimentally. Stress singularity analysis for acting a delamination force to the specimen is firstly carried out. After that, stress singularity field for the residual stresses varying material property in resin with temperature is determined. Combining the stress singularity fields for the delamination force and the residual thermal stress yields a final stress distribution for evaluating the strength of interface. Finally, the strength of interface in three-dimensional joints was determined as 0.0914-0.133 MPa·m^{0.68}.

Key Words: Elasticity, Boundary Element Method, Stress Singularity, Adhesive Joints, Three-Dimensional Joints

1. 結 言

一般に接合体の接合界面端部に生じる特異応力場は、 $\sigma_{ij} = \sum_m K_{ij}^m(\theta, \phi) r^{-\lambda_m} = \sum_m \bar{K}_m r^{-\lambda_m} f_{ij}^m(\theta, \phi)$ のような式で表される。ここで、 r は特異応力場中心からの距離、 $\bar{K}_m$ は特異応力場の強さの係数、 $f_{ij}^m(\theta, \phi)$ は応力場の角度依存性を表す関数である。また、 λ_m は特異性のオーダーで、 $0 < \lambda_m < 1$ の場合特異性があり、 $\lambda_m < 0$ の場合特異性がないという。このような応力場の級数展開表示は、等方等質弾性体中のき裂先端近傍の応力場を表す際に見られる。通常、応力場は上式の無限級数で表されるが、応力場が特異性を持つ場合の特異点近傍の応力場は、特異性を示す λ_m に対応する項の和で表される。ところで、接合体の一例として、電子デバイスあるいは各種マイクロセンサーのパッケージングがある。例え

ば、IC と基板を封止樹脂を用いて接着する CSP (Chip Size Package) は、IC と封止樹脂・基板と封止樹脂のような異材接合体である。これまで多くの二次元応力特異場の解析が行われてきた⁽¹⁾⁻⁽¹¹⁾。しかし、CSP のような角部を有する接着接合体においては三次元角部の界面からはく離が発生することが多くある。そのため、三次元角部における三次元応力特異場⁽¹²⁾解析に基づく界面強度評価が必要と考えられる。また、界面はく離を引き起こす要因として接着時の残留応力・厳しい温度環境下で使用される際に発生する熱応力が考えられる。最近、Labossiere らは角柱接合体の曲げ試験を行い、三次元接合端角部の強度評価を行っている⁽¹³⁾。彼らの解析では接合している材料特性の違いが小さいため、接合体中に通常存在する接着時の残留応力は考慮していない。本論文では、電子デバイスの CSP を構成する Si-封止樹脂界面端角部における残留熱応力および外力に対する三次元応力特異場を境界要素法を用いて解析する。そして、三次元接着構造の接合端部のはく離荷重をはく離実験により求め、封止樹脂熱圧着時の残留熱

* 原稿受付 2006 年 6 月 20 日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学工学部 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)。^{*2} 長岡技術科学大学大学院工学系研究科。

E-mail: koguchi@mech.nagaokaut.ac.jp

応力を考慮した三次元接着構造体の角部界面強度の推定を行う。

2. 三次元接着構造体の応力解析

2.1 三次元境界要素法 本論文では、次式に示す境界要素法⁽¹⁰⁾を用いて三次元接合体の応力解析を行う。

$$c_{ij}(P)u_j(P) = \int_{\Gamma} U_{ij}^*(P, Q)t_j(Q)dS(Q) - \int_{\Gamma} T_{ij}^*(P, Q)u_j(Q)dS(Q) \dots (1)$$

ここで、 U_{ij}^* および T_{ij}^* は変位および作用力の基本解、本論文ではRongvedの解⁽¹¹⁾を基本解として用いる。また、観測点 P およびソース点 Q は境界上の点である。 t_j および u_j は作用力および変位ベクトルである。Rongvedの解を用いることにより接合面上の要素分割は必要なくなり、高精度に接合面および接合体内部の任意の場所における応力および変位を求めることができる。

2.2 固有値解析方法 特異応力場の特異性のオーダーは次式の有限要素法による固有値解析により求める⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾。

$$(p^2[A] + p[B] + [C])\{u\} = 0 \dots (2)$$

ここで、 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ は弾性定数、幾何形状データからなるマトリックス、 p は特性根で特異性のオーダーと $\lambda=1-p$ のような関係がある。

2.3 残留熱応力解析方法⁽¹⁵⁾ 等方・均質な弾性体において、 ΔT の温度変化を受ける時の自由膨張に伴う熱ひずみ ϵ_j^T は、次式で与えられる。

$$\epsilon_j^T = \alpha \Delta T \delta_{ij} \dots (3)$$

ここで、 α は線膨張係数、 δ_{ij} はkroneckerのデルタである。自由膨張が拘束されていると熱応力が発生し、この応力はHooke則に従うものとする、ひずみ ϵ_j は次式で表せる。

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1-2\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right\} + \alpha \Delta T \delta_{ij} \dots (4)$$

式(4)を応力とひずみの関係で表すと、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} + \frac{E}{1-2\nu} \alpha \Delta T \dots (5)$$

二つの材料がある温度 T で完全に接合された後、温度変化 ΔT を受ける場合、Duhamelの定理により仮想表面力が作用する通常の弾性問題を解けば良い。そして、その後仮想表面力を取り除くことで残留熱応力を求める。

また、材料特性に温度依存性がある場合は、例えば図1に示すように残留熱応力を求める温度域を材料特性が一定とみなせる幾つかの温度範囲に分割する。この図で k 番目の温度範囲の温度に対する弾性率 E^k 、熱膨張係数 α^k を用いて温度変化 ΔT^k における残留熱応力 $\sigma_{ij}^{(k)}$ を求め、式(6)のように足しあわせることで最終温度の残留熱応力を求める。

$$\sigma_{ij}^{thermo} = \sum_k \sigma_{ij}^{(k)} \dots (6)$$

ここで、 $\sigma_{ij}^{(k)}$ は分割した k 番目の温度範囲の応力を表す。

Fig.1 An example of division for elastic modulus against temperature

Fig.2 Test equipment

Fig.3 Test part

3. 実験方法

3.1 実験方法および試験片 はく離試験に用いた装置は図2に示すような引張り試験機にロードセルを取り付けたものである。また試験部周辺は、図3のようになっておりロードセル（定格荷重10N）側の治具に $\phi=2.0\text{mm}$ の鋼鉄球を取り付け、反対側の治具に試験片を取り付けてある。試験片は2枚のSiチップ(6.0×6.0

Fig.4 Test piece

Fig.5 Experimental result

Fig.6 Fracture surface

$\times 0.4[\text{mm}]$)を封止樹脂により接着したもので、接着面積の異なる2種類である。試験片形状・寸法を図4に示す。なお、かつこ内は接着面積の小さい試験片の値である。接着面積はそれぞれ $2.25, 1.00[\text{mm}^2]$ である。試験片製作時には180度の電気オーブンで10分程度加熱圧着し、空气中で室温まで冷却した。また、封止樹脂厚さは 0.05mm である。

3.2 実験結果 はく離は脆性的で、最大荷重に達した後、一瞬ではく離した。はく離時の最大荷重を接着面積で除して得られたはく離応力を図5に示す。接着面積の大きい試験片では平均はく離荷重 1.627N で応力の平均値は 0.72MPa 、また小さい試験片では平均はく離荷重 0.927N で応力の平均値は 0.93MPa であった。また、図6にはく離面のSEM写真を示す。面が荒れているように見えるのは、封止樹脂がSiに付着して剥がれたためである。断面の詳細な観察によると先端部は界面であることがわかった。

4. 特異応力場解析

4.1 固有値解析 はく離は、図7(a)に示す接封止樹脂上面とSiの三次元角部から発生していることから、その角部における応力解析を行う。はじめに特異応力場の特異性のオーダを求める。固有値解析のために使用する要素分割を図7(b)に示す。この図は、特異

(a) A spherical coordinate system with an origin at a vertex

(b) A mesh division for eigen analysis

Fig.7 Model for eigen analysis using FEM

点を中心とする球表面を要素分割し、要素分割面を ϕ - θ 平面に展開したものである。要素寸法は、 $\phi \times \theta = 15^\circ \times 15^\circ$ 、総節点数および要素数はそれぞれ600、180である。また、解析に用いた物性値はSiおよび封止樹脂の室温における値である。ヤング率はそれぞれ169.10、2.97GPa、ポアソン比はそれぞれ0.26、0.38とした。

4.2 外力を与える場合の解析モデルおよび条件

図8に示すように試験片に対するモデルを作成し、三

Fig. 8 Analysis model

Fig. 9 Spherical coordinate system with an origin at the singularity point (3D-corner)

Fig. 10 Distribution of several stresses at $\phi=45^\circ$ and $\theta=90^\circ$

次元境界要素法により解析を行う。境界条件（荷重位置・固定条件等）は、実験と同様にした。またその際の寸法等については、図4に示す。特異点周辺の最小メッシュサイズは、約 $1 \times 1 \mu\text{m}$ とした。また総節点数および総要素数については、接着面積の大きい試験片に対するモデルがそれぞれ4252、1426、接着面積の小さい試験片に対するモデルが4161、1393である。なお、集中荷重の作用する位置には微小な要素を配置し、集中荷重の代わりに小さい領域に分布荷重 P を加えた。荷重作用領域の面積は、接着面積の小さいモデルの場

Table 1 A list of eigen value

	p		λ	
	Real	Imaginary	Real	Imaginary
1	0.2818	0.0000	0.7182	0.0000
2	0.3517	9.7244×10^{-3}	0.6483	9.7244×10^{-3}
3	0.3517	-9.7244×10^{-3}	0.6483	-9.7244×10^{-3}
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0004	0.0000	-0.0004	0.0000
6	1.0007	0.0000	0.0007	0.0000
7	1.0645	0.0000	-0.0645	0.0000
8	1.1711	0.0000	-0.1711	0.0000

Fig. 11 Distribution of stress $\sigma_{\theta\theta}$ for various angles of θ

Fig. 12 Distribution of stress $\sigma_{\theta\theta}$ at $\phi=45^\circ$ and $\theta=90^\circ$

合0.145908mm², 大きいモデルの場合0.104447mm²である。また, 分布荷重の大きさは $P=1\text{MPa}$ である。

4.3 解析結果 解析結果は x - y - z 直交座標系の応力成分を, 図9に示す特異点を中心とする r - θ - ϕ 球座標系に対する応力成分に変換して示す。解析結果の一例として接着面積の大きいモデルの $(\phi, \theta)=(45^\circ, 90^\circ)$ における各応力成分の分布を図10に示す。ここで, r は角部からの距離で, L は接着領域の辺の長さ2.12mmである。図10より, 応力 $\sigma_r, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{\phi\phi}$ が界面上で引張であることがわ

かる。その中で, はく離を引き起こす応力として $\sigma_{\theta\theta}$ が考えられる。図11に接着面積が大きいモデルの異なる θ における $\sigma_{\theta\theta}$ 分布を示す。封止樹脂内部方向に最大の $\sigma_{\theta\theta}$ 分布が発生していることが分かる。また, 図12に異なる接着面積における $(\phi, \theta)=(45^\circ, 90^\circ)$ における $\sigma_{\theta\theta}$ 分布を示す。接着面積の小さいモデルの方が, 応力特異場の応力が大きくなっている。

つぎに, 固有値解析の結果を表1に示す。表1から特異性を示すオーダー λ の値として実数0.7182, 複素数の $0.6483 \pm 9.7244 \times 10^{-3}i$ の3つがあることがわかる。古口⁽¹⁴⁾らは, 有限要素法に基づく特性方程式(2)において重根が存在する場合, $\ln r, (\ln r)^2$ の特異性があることを理論的に示した。そこで, 接合界面端部の応力分布を表す式として, 対数特異性を考慮した次式を用いる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(r, \theta, \phi)/P = & \bar{K}_{ij1} f_{ij1}(\theta, \phi) \bar{r}^{-\lambda_1} + \bar{K}_{ij2} \bar{r}^{-\xi} \\ & \times (f_{ij2}^R(\theta, \phi) \cos(\eta \ln \bar{r}) - f_{ij2}^I(\theta, \phi) \sin(\eta \ln \bar{r})) \\ & + \bar{K}_{ij3} f_{ij3}(\theta, \phi) + \bar{K}_{ij4} f_{ij4}(\theta, \phi) \ln \bar{r} + \bar{K}_{ij5} f_{ij5}(\theta, \phi) (\ln \bar{r})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, 複素特異性を示す指数を $\xi+i\eta$ とおいた。また, $\bar{r}=r/L$, $\bar{K}_{ijk}$ ($k=1\sim 5$) はそれぞれ特異性の強さを表し, $f_{ijk}(\theta, \phi)$ は応力成分の角度依存性を表す関数で, 複素特異性に対しては $f_{ij2}^R + if_{ij2}^I$ とおいた。図13に各固有値 p に対応する固有変位ベクトル(式(2)の $\{u\}$)から得られる $f_{\theta\theta}$ の分布を示す。これらの図は接合面近傍($\theta=90.5\text{deg}$)における分布である。図13(a)から表1の一番目の固有値 p_1 に対する $f_{\theta\theta}$ の分布は, $\phi=45^\circ$ について反対称であることがわかる。本研究の荷重条件および接合体の形状から $\sigma_{\theta\theta}$ の応力分布は $\phi=45^\circ$ について対称である。このことから p_1 に対する項は応力式に入れる必要はないと言える。また, 図13(b)および(c)に複素

(a) Profile of $f_{\theta\theta}$ for $\lambda_1=0.718$

(b) Profile of $f_{\theta\theta}^R$ for $\lambda_2=0.6483+0.0097i$

(c) Profile of $f_{\theta\theta}^I$ for $\lambda_2=0.6483+0.0097i$

Fig.13 Stress distributions for eigen values

Fig.14 Profiles of $f_{\theta\theta}^R$ and $f_{\theta\theta}^I$ at $\phi=45^\circ$ for $\lambda_2=0.6483+0.0097i$

Table 2 Coefficients in eq.(7) and (8)

	$k'_{\theta 02}$	$k_{\theta 03}$	$k_{\theta 04}$	$k_{\theta 05}$	$\bar{K}_{\theta 02}$
Large area	0.127	1.615	0.448	0.0297	1.14
Small area	0.273	5.036	1.435	0.1010	2.45

ここで, $k'_{\theta 02} = \bar{K}_{\theta 02} f_{\theta 02}^R(\pi/2, \phi)$

Table 3 Coefficients in eq.(9)

	$k^*_{\theta 02}$	$k^*_{\theta 03}$	$k^*_{\theta 04}$	$k^*_{\theta 05}$	$\bar{K}_{\theta 02}^*$
Large area	0.127	1.435	0.373	0.0222	1.14
Small area	0.274	4.968	1.377	0.0912	2.46

固有値 p_2 に対する $f_{\theta 02}^R$ および $f_{\theta 02}^i$ の分布を示す。この図から複素特異性に対する応力場は $\phi=45^\circ$ に対して対称であることがわかる。したがって、本研究では複素数の固有値に対する応力特異場の応力分布の式を用いる。さらに、 $f_{\theta 02}^R$ および $f_{\theta 02}^i$ の $\phi=45^\circ$ における θ に対する分布を図14に示す。この図から界面における複素特異場の係数 $f_{\theta 02}^i$ の値がほとんど0であることがわかる。

そのことから、式(7)の $\sin(\eta \ln \bar{r})$ の項を除いた式(8)で応力分布を近似する。つぎに $\phi=45^\circ$ における分布から最小二乗法により式(8)の係数を求めた結果を表2に示す。表中の $\bar{K}_{\theta 02}$ は図13(b)の $\phi=45^\circ$ における値(0.1113)から求めた値である。

$$\sigma_{\theta 0}\left(\bar{r}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right) / P = k'_{\theta 02} \bar{r}^{-0.65} \cos(\eta \ln \bar{r}) + k_{\theta 03} + k_{\theta 04} \ln \bar{r} + k_{\theta 05} (\ln \bar{r})^2 \dots \dots \dots (8)$$

また、複素固有値の虚部 η の応力分布に対する影響を調べるために、式(9)で応力分布を近似し、式(8)の係数と比較する。求めた値を表3に示す。

$$\sigma_{\theta 0}\left(\bar{r}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right) / P = k^*_{\theta 02} \bar{r}^{-0.65} + k^*_{\theta 03} + k^*_{\theta 04} \ln \bar{r} + k^*_{\theta 05} (\ln \bar{r})^2 \dots \dots \dots (9)$$

表2と表3の係数の値を比較すると、指数特異性の係数を除いた項の値は若干変化しているが、指数項の値はほとんど変わらない。以上の係数を用いて得られる応力をプロットの線種を変えて図12に示した。式(9)のプロットは式(8)のそれに重なる。図には式の第1項だけを考慮した場合と4項全てを考慮した場合を示した。本解析の場合、特異性の大きい複素特異性オーダの実部だけを用いても、BEMの結果を表すには十分であることがわかった。

4.4 熱残留応力解析のための解析モデルおよび条件

つぎに接合体の強度に影響を与える接合体製作時に

発生する熱残留応力を求める。この解析を行うために樹脂の温度に対する材料特性を 298K から 423K の温度範囲で 8 分割し、各温度帯域における封止樹脂の物性値を一定として解析を行う。そして、最後に各温度帯域の応力の総和をとることにより 423K (ガラス転移点) から室温まで冷却した際の残留応力を求める。解析に用いた物性値を温度帯域とともに表3に示す。Si の物性値は、全温度帯域において同じで一定とし、ヤング率 = 169.1GPa, ポアソン比 = 0.26 とした。図15に示す解析モデルを用いて、三次元境界要素法により解析を行った。境界条件は全側面より仮想表面力をつけるものである。また、図15に示すように接合体の自由収縮を妨げないように、対称軸上で y 方向、Si チップ底面の1節点を x 方向、3節点を z 方向の変位を固定した。

4.5 熱残留応力の解析結果 解析結果の一例として接着面積の大きいモデルの ($\phi, \theta = (45^\circ, 90^\circ)$) における室温における各応力成分の分布を図16に示す。この図で $\sigma_{\theta 0}$ が圧縮応力となっていることがわかる。外力による応力特異場の解析と同様に、熱残留応力においても $\sigma_{\theta 0}$ に着目する。図17に接着面積が大きいモデルの異なる

Fig.15 Boundary condition for thermal analysis

Table 3 Material property in Resin

Temperature T [K]	Young's modulus E [GPa]	Thermal expansion [ppm/K]	Poisson's ratio ν
298-314	2.86	33	0.38
314-330	2.66	33	0.38
330-346	2.57	33	0.38
346-362	2.37	33	0.38
362-378	2.11	33	0.38
378-393	1.96	40	0.38
393-408	1.56	66	0.38
408-423	0.78	86	0.38

θ に対する $\sigma_{\theta\theta}$ の分布を示す。封止樹脂内部に大きい圧縮の $\sigma_{\theta\theta}$ が発生していることがわかる。また、図18に異なる接着面積に対する $(\phi, \theta)=(45^\circ, 90^\circ)$ における $\sigma_{\theta\theta}$ の分布を示す。接着面積の小さい方が大きい圧縮の $\sigma_{\theta\theta}$ が発生していることがわかる。

表4に各温度帯域における応力特異性オーダー λ の値を示す。本研究では表4に示した複素特異性のオーダーの各温度帯域に対する平均値 $0.65+0.022i$ を残留応力の分布を表す式に用いる。熱残留応力特異場を次式で近似し、図18からその係数を求めた。

$$-\sigma_{\theta\theta}\left(\bar{r}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right) = k_{\theta\theta 2}^{*T} \bar{r}^{-0.65} \cos(\eta \ln \bar{r}) + k_{\theta\theta 3}^{*T} + k_{\theta\theta 4}^{*T} \ln \bar{r} + k_{\theta\theta 5}^{*T} (\ln \bar{r})^2 \quad (10)$$

その結果を表5に示す。さらに、複素特異性の実部だけを考慮した次式で応力分布を近似した結果を表6に示す。

$$-\sigma_{\theta\theta}\left(\bar{r}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right) = k_{\theta\theta 2}^{*T} \bar{r}^{-0.65} + k_{\theta\theta 3}^{*T} + k_{\theta\theta 4}^{*T} \ln \bar{r} + k_{\theta\theta 5}^{*T} (\ln \bar{r})^2 \quad (11)$$

Fig. 16 Distribution of stress components($\phi=45^\circ$, $\theta=90^\circ$)

Fig. 17 Distribution of $\sigma_{\theta\theta}$ for several angles of θ ($\phi=45^\circ$)

Table 4 Order of stress singularity for each temperature range

Temperature, K	λ_1	$\text{Re}(\lambda_2)$	$\text{Im}(\lambda_2)$
298	0.718	0.648	9.72×10^{-3}
298-314	0.720	0.650	1.43×10^{-2}
314-330	0.721	0.650	1.59×10^{-2}
330-346	0.723	0.651	1.89×10^{-2}
346-362	0.724	0.652	2.11×10^{-2}
362-378	0.727	0.654	2.39×10^{-2}
378-393	0.731	0.657	2.79×10^{-2}
393-408	0.739	0.662	3.41×10^{-2}
408-423	0.744	0.665	3.72×10^{-2}

Table 5 Coefficients in eq.(10)

	$k_{\theta\theta 2}^{*T} \times 10^{-3}$	$k_{\theta\theta 3}^{*T} \times 10^{-2}$	$k_{\theta\theta 4}^{*T} \times 10^{-3}$	$k_{\theta\theta 5}^{*T} \times 10^{-4}$	$K_{\theta\theta 2}^{*T} \times 10^{-2}$
Large area	1.16	1.08	2.45	1.10	1.04
Small area	1.90	1.89	4.04	1.53	1.71

Table 6 Coefficients in eq.(11)

	$k_{\theta\theta 2}^{*T} \times 10^{-3}$	$k_{\theta\theta 3}^{*T} \times 10^{-2}$	$k_{\theta\theta 4}^{*T} \times 10^{-3}$	$k_{\theta\theta 5}^{*T} \times 10^{-5}$	$K_{\theta\theta 2}^{*T} \times 10^{-2}$
Large area	1.15	1.00	2.00	5.68	1.03
Small area	1.88	1.67	2.92	2.99	1.69

図18に式(11)の指数項だけおよび4項で応力を計算した結果を破線、実線で示した。外力に対する応力分布と同様に、 r/L の小さい範囲では複素特異性の実部に対する指数項だけでも十分に応力を表せることが、図18からわかる。

5. 界面強度の推定

つぎに、熱残留応力を考慮した界面強度の推定を行う。図19に接着面積の大きい場合、図20に接着面積の小さい場合の熱残留応力と外力を重ね合わせた $\sigma_{\theta\theta}$ の

Fig. 18 Distribution of $\sigma_{\theta\theta}$ at $\phi=45^\circ$, $\theta=90^\circ$

分布を示す。図中の3本のプロットはそれぞれ実験から得られたはく離時の荷重の最大・平均・最小値に対応している。ちなみに、図21は異なる接着面積の接合体における、はく離試験時の特異応力分布である。図中の破線は、特異性のオーダ-0.65の指数特異性のみで

Fig.19 Distribution of $\sigma_{\theta\theta}$ (Adhesive area: Large)

Fig.20 Distribution of $\sigma_{\theta\theta}$ (Adhesive area: Small)

Fig.21 Stress distribution of stress $\sigma_{\theta\theta}$ for average delamination load

応力分布を近似した線である。前章までの解析と同様に、指数特異性で外力と熱残留応力による応力場を表すことができると言える。

つぎに、はく離強度を推定するために、指数項の係数を接着面の平均応力 σ_{ave} の関数として表す。ここで用いる係数は、次式で定義される。 σ_{ave} は外力 F を接着面積で除したものである。

$$K_{\theta\theta 2}^* = \bar{K}_{\theta\theta 2}^* \sigma_{ave} + K_{\theta\theta 2}^{*T} \quad (12)$$

接着面積の大きい試験片の場合

$$K_{\theta\theta 2}^* = 24.41 \sigma_{ave} - 1.03 \times 10^{-2} \quad (13)$$

接着面積の小さい試験片の場合

$$K_{\theta\theta 2}^* = 23.42 \sigma_{ave} - 1.69 \times 10^{-2} \quad (14)$$

式(13)および(14)をプロットした図22から $K_{\theta\theta 2}^*$ の臨界値 $K_{\theta\theta 2}^C$ の値として $5.0 \sim 7.3 \times 10^{-3}$ GPa が得られる。さらに、 $L = 2.12 \times 10^{-3}$ m であることから、界面強度として $K_{\theta\theta 2}^C = 0.0914 \sim 0.133$ MPa·m^{0.68} が得られる。ここで得られた特異性のオーダに対する $K_{\theta\theta 2}$ の臨界値は界面上の値である。図22から熱残留応力を考慮しなかった場合、臨界値の値は考慮した場合より接着面積で大きく異なってくるのが推察される。しかし、今回得られた臨界値の値は、若干接触面積に依存している。これは試験片製作上のばらつきなどのためであろうと考えられる。このことから、図22は接着接合体の強度評価における残留応力の重要性を示唆していると言える。

6. 結 言

本研究では、三次元境界要素法を用いて電子デバイスに見られる Si-封止樹脂界面端の外力および熱残留応力に対する特異応力場解析を行い、その結果を用いて界面強度の推定を行った。

Fig.22 Determination of critical stress intensity factor for bonded joints

1. 2枚のSiチップを封止樹脂で接着した接着面積が2.25, 1.00mm²と異なる2つの試験片のはく離実験を行った。接着面積が大きい試験片では0.72MPa, 小さい試験片では0.93MPaとはく離時の平均応力を得た。接着面積の大きい試験片の方が, はく離時の平均応力は小さいことがわかった。
2. 三次元境界要素法を用いて三次元接着構造体のはく離開始点近傍の応力解析を行った。さらに有限要素法による固有値解析を行い, 外力および熱残留応力の室温における特異応力場における特異性オーダーに対する強さを求めた。
3. 熱残留応力を考慮した界面強度の値として, $K_{\theta\theta c} = 0.0914 \sim 0.133 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.68}$ が得られた。

文 献

- (1) Bogy, D.B., On the Problem of Edge-Bonded Elastic Quarter-Planes Loaded at the Boundary, *Int. J. Solids Structures*, Vol.6, (1970), pp.1287-1313.
- (2) Bogy, D.B., Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction, *J. Appl. Mech.*, Vol.38, (1971), pp.377-386.
- (3) Bogy, D.B., On the Plane Elastostatic Problem of a Loaded Crack Terminating at a Material Interface, *J. Appl. Mech.* Vol.38, (1971), pp.911-918.
- (4) Bogy, D.B. and Wang, K.C., Stress Singularities at Interface Corners in Bonded Dissimilar Isotropic Elastic Materials, *Int. J. Solids Structures*, Vol.7, (1971), pp.993-1005.
- (5) Dempsey, J.P. and Sinclair, G.B., On the Stress Singularities in the Plane Elasticity of the Composite Wedge, *J. Elasticity*, Vol.9, (1979), pp.373-391.
- (6) Inoue, T. and Koguchi, H., Influence of the Intermediate Material on the Order of Stress Singularity in Three-Phase Bonded Structure, *Int. J. Solids Structures*, Vol.33, (1996), pp.399-417.
- (7) Qian, Z. Q. and Akisanya, A. R., An Investigation of the Stress Singularity near the Free Edge of Scarf Joints, *Eur. J. Mech. A/Solids*, Vol.18, (1999), pp.443-463.
- (8) Reedy, JR. and Guess, T. R., Interface corner failure analysis of joint strength: Effect of adherend stiffness, *Int. J. Fracture*, Vol.88, (1997), pp.305-314.
- (9) Yang, Y.Y., Stress Analysis in a Joint with a Functionally Graded Material under a Thermal Loading by Using the Mellin Transform Method, *Int. J. Solids Structures*, Vol.35, (1998), pp.1261-1287.
- (10) Munz, D. and Yang, Y. Y., Stresses near the free edge of the interface in ceramic to metal joints, *J. Euro. Ceramic Soc.*, Vol.13, (1994), pp.453-460.
- (11) Munz, D. and Yang, Y. Y., Stress Singularities at the Interface in Bonded Dissimilar Materials under Mechanical and Thermal Loading, *J. Appl. Mech.*, 59, (1992), 857-861.
- (12) Koguchi, H. and Muramoto T., The Order of Stress Singularity near the Vertex in Three-Dimensional Joints, *Int. J. Solids Structures*, Vol.37, (2000), pp.4737-4762.
- (13) Labossiere, P. E. W. and Dunn, M. L., Fracture Initiation at Three-Dimensional Bimaterial Interface Corners, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.49, (2001), pp.609-634.
- (14) Pageau, S.S. and Bigger, Jr S.B., Finite Element Evaluation of Free-Edge Singular Stress Fields in Anisotropic Materials, *Int. J. Numer. Methods Eng*, Vol.38, (1995), pp.2225-2239.
- (15) Yuuki, R.ed., *Mechanics of Interface*, (1993), p.55, Baifuukan.