

# 特異応力場の強さに基づく単純重ね合わせ継ぎ手のはく離破壊基準の検討

宮崎 達二郎\*, 野田 尚昭\*\*, 李 戎\*\*\*, 内木場 卓巳\*\*\*, 佐野 義一\*\*

## Debonding Criterion for Single Lap Joints from the Intensity of Singular Stress Field

Tatsujiro MIYAZAKI\*, Nao-Aki NODA\*\*, Rong LI\*\*\*, Takumi UCHIKOBA\*\*\*, and Yoshikazu SANO\*\*

\* 琉球大学工学部機械システム工学科 (〒 903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

\*\* 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 (〒 804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*\* 九州工業大学大学院工学府機械知能工学専攻 (〒 804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*Department of Mechanical Engineering Systems, University of the Ryukyus (1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa 903-0213)

\*\*Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology (1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550)

\*\*\*Department of Mechanical and Control Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology (1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550)

**概要** 本研究では、接着継手の強度を界面端部に生じる特異応力場の強さの観点から検討した。具体的には最近行われた単純重ね合わせ継ぎ手の実験結果に注目して、その剥離条件が特異応力場の強さが一定で表現できるかを考察した。特異応力場の強さを求めるため、応力場の相似性に基づいて開発された第ゼロ節点法を用いることが有用であることを述べる。接着層の長さおよび厚さを種々に変化させながら行われた実験結果を、破断荷重時の界面端部の特異応力場の強さで整理した。単純重ね合わせ継ぎ手は、接着長さが極端に短い場合を除き、被着材と接着剤の界面端部よりのはく離が生じ、それがぜい性的に成長することで破断に至る。このような破断が生じる場合には、試験片の破断荷重時の特異応力場の強さは、接着長さおよび接着層厚さに関係なく一定となることが確認された。

### Abstract

In this study, adhesive strength is newly considered in terms of the singular stress appearing at the end of the interface between the adhesive and the adherent. Here the critical intensity of the singular stress is examined as the debonding criterion for all types of single lap joints having different adhesive thickness and overlap length. The intensity of the singular stress can be evaluated by the application of the finite element method focusing on the stress value at the end element of the interface. It should be noted that, except for the case of small overlap length, the separation always occurs at the edge of the interface causing unstable growth and final brittle fracture. In this type of fracture, it is found that the critical intensity of the stress singular field is constant independent of the adhesive thickness and overlap length.

**Key Words:** Adhesion, Interface, Intensity of Singular Stress Field, Finite Element Method

## 1. 緒言

近年、電子機器の小型・高機能・高性能化に伴い、半導体のパッケージング技術に対する要求は多様化し、その重要性も増している<sup>1),2)</sup>。半導体パッケージングでは、半導体と基板の接続、樹脂による封止、半導体チップおよび配線の多層構造化などさまざまな異なる材料の組み合わせによって構成された界面を数多く含んでいる。半導体パッケージングの信頼性を確保するためには、それらのはく離強度の適切な評価が必要不可欠である<sup>3)~5)</sup>。一般に、異種材料界面のはく離強度は、材料の組み合わせ、荷重形式、接着条件などによって大きく変化する。そのため、実験による評価では時間的、経済的負担が大きく、簡便で実用的なはずく離破壊基準、評価方法が求められる<sup>3)~7)</sup>。

一般に、接着接合部材において被着材と接着剤の間の界面では、端部で発散するような特異応力場が形成される<sup>8)</sup>。そのため、界面端部では被着材と接着剤がはずく離しやす

い。接着剤がぜい性的な性質を有する場合、はずく離によって生じたき裂がぜい性的に不安定伝ばし、部材を破壊に至らしめる。宮崎ら<sup>9)</sup>は、被着材と接着剤の界面端部より界面に沿って予き裂を導入した接着接合板を用いて破壊じん性値を測定している。そして、き裂先端での塑性域が接着層厚さに比べて十分に小さい場合であれば、破壊じん性値が接着層の厚さに関係なくほぼ一定となることを報告している。このように、界面き裂を有する接着接合板の破壊基準は破壊じん性値で記述することができる。

ところで最近、著者らはFig. 1に示すような2枚の板を接着剤で接合した接着接合板を模擬した完全接着モデル<sup>10),11)</sup>を用い、接着層厚さが特異応力場の強さ $K_0$ に与える影響を考察した。接着層が薄くなると、特異応力場の強さが小さくなることを明らかにした<sup>10),11)</sup>。さらに、接着接合板の引張接着強さが被着材と接着剤との界面端部の特異応力場の強さで記述できないか検討するため、Fig. 2(a)に示す炭素鋼S35C(縦弾性係数 $E_1=210$  GPa, ポアソン比

$\nu_1=0.3$ ) をエポキシ系接着剤 (縦弾性係数  $E_2=3.14$  GPa, ポアソン比  $\nu_2=0.37$ ) で接着接合した板の破断時の特異応力場の強さ  $K_{\sigma c}$  を求めた<sup>12),13)</sup>。Fig. 2(b) は  $K_{\sigma c}$  を接着層厚さ  $t$  で整理した結果である。 $K_{\sigma c}$  は  $t$  に関係なく一定となっている。しかしながら, このように  $K_{\sigma c}$  を接着接合された

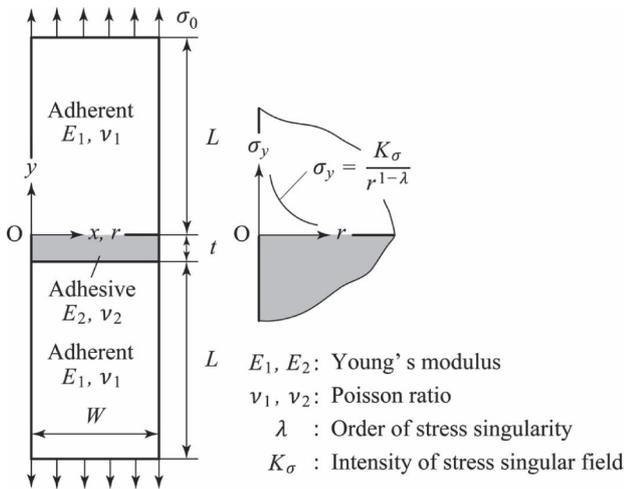


Fig. 1 Schematic illustration of perfectly bonded model<sup>10),11)</sup>

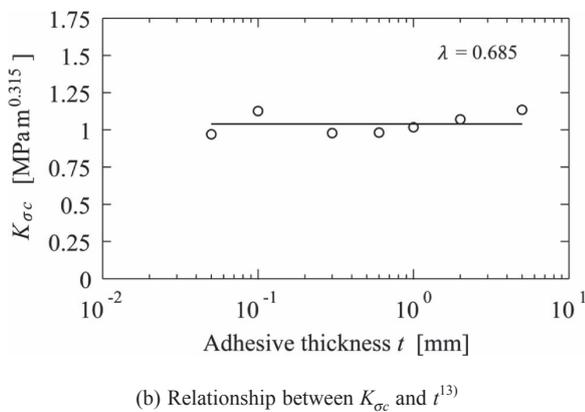
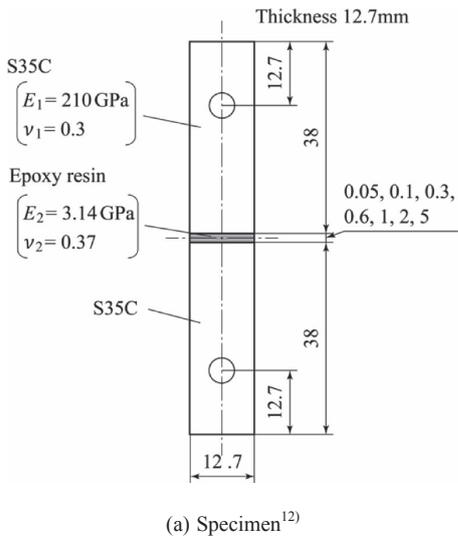


Fig. 2 Criterion for adhesive tensile fractures of bonded plates<sup>12),13)</sup>

部材の破壊基準として用い, 検討した研究は少ない<sup>6),7)</sup>。

そこで本研究では, 引張せん断を受ける単純重ね合わせ継ぎ手の破壊基準が被着材と接着剤との界面端部での特異応力場の強さ  $K_\sigma$  で記述できるかを最近の実験結果<sup>14)</sup>を用いて検討を行う。一般に, 単純重ね合わせ継ぎ手の破壊は, 界面端部のはく離によって生じたき裂がぜい性的に伝ばすることで生じる。具体的には, Park ら<sup>14)</sup>の実験結果より単純重ね合わせ継ぎ手が破壊に至る際の特異応力場の強さ  $K_{\sigma c}$  で求め,  $K_{\sigma c}$  = 一定で整理できるかを検討する。Park らの研究では, 被着材および接着剤の非線形な変形挙動を考慮しながら界面端部に生じる被害領域を求め, その大きさを強度評価を行っている。また, その他にもこれまでさまざまな評価法が検討されているが<sup>15),16)</sup>, いずれの方法も簡単な形式で破壊基準を表すことができず, 実用的な面で不便である。一方, 特異応力場の強さは, 破壊起点となる界面端部での塑性域が接着層厚さなどに比べて十分に小さければ, 破壊基準として有効であることが報告されている<sup>17)~19)</sup>。被着材および接着剤の非線形な変形挙動は考慮されないが, 本研究では簡便性および実用性の観点から特異応力場の強さを用いる。

## 2. 過去の単純重ね合わせ継ぎ手の実験結果

本研究では, Park ら<sup>14)</sup>の実験結果で用いてモデルおよび引張接着強さの評価法の有効性について検討を行う。実験では, 被着材にアルミニウム合金 6061-T6, 接着剤にエポキシ系接着剤が用いられている。Table 1 に被着材および接着剤の機械的性質, Fig. 3 に実験で用いられた試験片の形状をそれぞれ示す。試験片は, 全長が 225 mm となるように 2 枚の板を接着したものである。接着層の厚さ  $t_2$  は 0.15 mm から 0.9 mm まで, 長さ  $l_2$  は 15 mm から 50 mm まで種々に変化させられている。

Table 2 および Fig. 4 に引張せん断接着強さ  $P_{af}$  を示す。試験片 A10 を除いたいずれも荷重と変位の関係がほぼ直線的であることから, それらは界面端部より生じたはく離がき裂に成長し, それが不安定的に伝ばすることで破断して

Table 1. Material properties of adhesive and adherent<sup>14)</sup>

Material		Young's modulus $E$ [GPa]	Poisson's ratio
Adherent	6061-T6	68.9	0.30
Adhesive	Epoxy resin	4.20	0.45

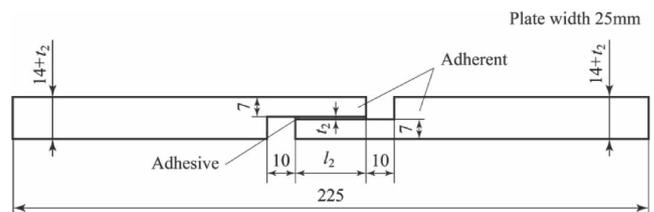
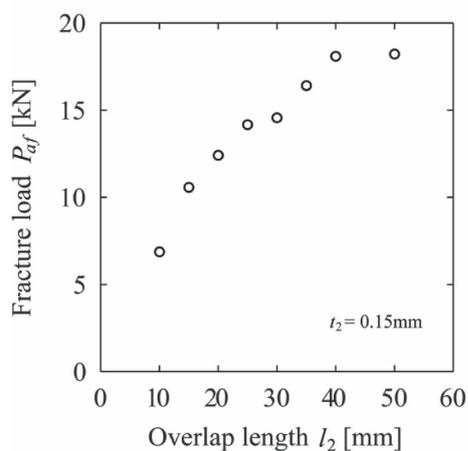


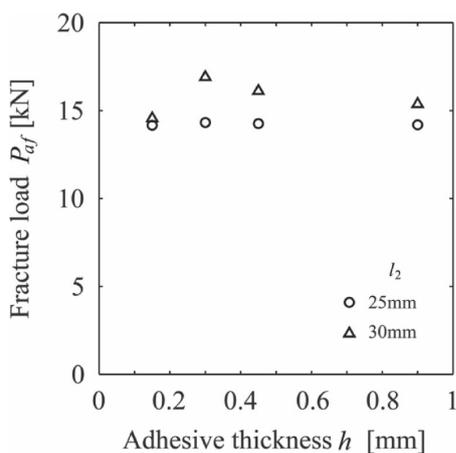
Fig. 3 Schematic illustration of single lap joint<sup>14)</sup>

Table 2. Experimental results<sup>14)</sup>

Specimen No.	$l_2$ [mm]	$t_2$ [mm]	$P_{af}$ [kN]
A10	10	0.15	6.87
A15	15	0.15	10.57
A20	20	0.15	12.41
A25	25	0.15	14.17
A30	30	0.15	14.56
A35	35	0.15	16.41
A40	40	0.15	18.09
A50	50	0.15	18.22
A25-30	25	0.30	14.32
A25-45	25	0.45	14.26
A25-90	25	0.90	14.19
A30-30	30	0.30	16.91
A30-45	30	0.45	16.12
A30-90	30	0.90	15.37



(a)  $t_2 = 0.15$  mm



(b)  $l_2 = 25, 30$  mm

Fig. 4 Adhesive tensile strength<sup>14)</sup>

いる。これらの結果は、破壊基準に界面端部の特異応力場の強さを用いることの妥当性を与えるものと考えられる。接着層厚さ  $t_2$  を一定とした場合、接着層長さ  $l_2$  が長くなるにつれて引張せん断強さ  $P_{af}$  は大きくなる傾向にある。一方、 $l_2$  を一定とし、 $t_2$  を変化させた場合、 $P_{af}$  の変化は小さく、ほぼ同じ値となっている。Fig. 5 に破断時の接着層での平均せん断応力  $\tau_c$  を示す。Fig. 5 に示すように  $l_2$  が 15

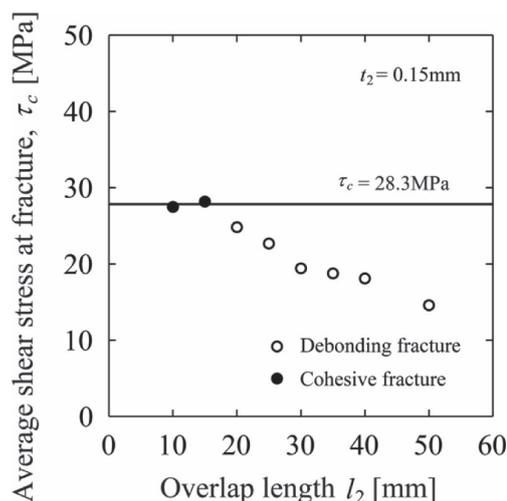


Fig. 5 Average shear stress at fracture of specimens with  $t_2 = 0.15$  mm<sup>14)</sup>

mm 以下の場合、 $\tau_c$  が約 28.3 MPa で一定となっている。しかしながら、 $l_2$  が 15 mm より長くなると、平均せん断応力は減少する傾向を示している。能野・永弘<sup>16)</sup> は、接着層長さが短い場合は接着層が全範囲で降伏して破壊に至ることを報告している。そして、そのような場合は、 $\tau_c$  が一定となる傾向を示す。本研究では  $l_2$  が 15 mm 以下では凝集破壊、それ以上では離破壊が生じたと考える。この実験結果からもわかるように、接着層から破壊が始まる場合は、平均せん断応力で破壊基準を記述できるが、接着層長さが長くなり、界面のはく離から破壊が始まる場合には平均せん断応力を破壊基準に用いることができない。

### 3. 解析モデルおよび解析方法

#### 3.1 解析モデル

Fig. 6 に解析モデルを示す。 $l_1$  および  $t_1$  は被着体の長さ、厚さ、 $l_2$  および  $t_2$  は接着層の長さ、厚さである。また、 $E_1$ 、 $G_1$ 、 $\nu_1$  および  $E_2$ 、 $G_2$ 、 $\nu_2$  はそれぞれ被着体および接着剤の縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比である。 $h$  はつかみ部の長さ、 $\sigma_0$  は作用応力である。Fig. 6 に示すような被着材と接着剤との界面端部には特異性指数  $\lambda$  によって支配される特異応力場が形成される。点 O での  $\lambda$  は、次の特性方程式を解くことによって得られる<sup>20)~22)</sup>。

$$\begin{aligned}
 & 4\sin^2(\pi\lambda) \left\{ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - \lambda^2 \right\} \beta^2 + 4\lambda^2 \sin^2(\pi\lambda) \alpha\beta \\
 & + \left\{ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - \lambda^2 \right\} \alpha^2 - 4\lambda^2 \sin^2(\pi\lambda) \beta \\
 & - 2 \left\{ \lambda^2 \cos(2\pi\lambda) + \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) \cos(\pi\lambda) + \frac{1}{2} \sin^2(\pi\lambda) \right\} \alpha \\
 & + \sin^2\left(\frac{3\pi}{2}\lambda\right) - \lambda^2 = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $\alpha$  および  $\beta$  は Dundurs の複合パラメータ<sup>23)</sup> であ

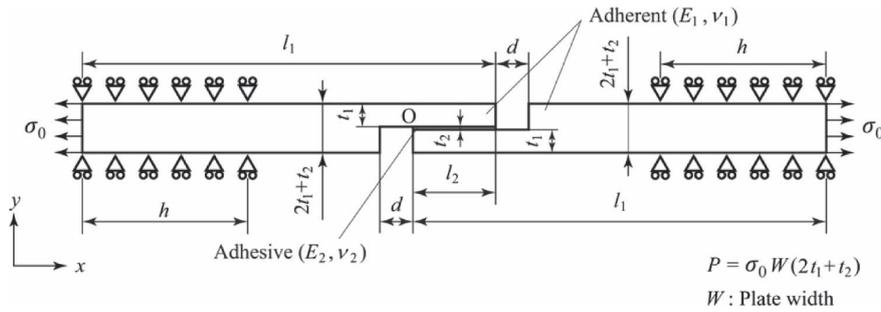


Fig. 6 Analysis model and boundary condition

り、横弾性係数  $G_j$  ( $j=1$  は被着材,  $2$  は接着剤を表す), ポアソン比  $\nu_j$  を用いて次のように定義される。

$$\alpha = \frac{G_2(\kappa_1 + 1) - G_1(\kappa_2 + 1)}{G_2(\kappa_1 + 1) + G_1(\kappa_2 + 1)}, \quad \beta = \frac{G_2(\kappa_1 - 1) - G_1(\kappa_2 - 1)}{G_2(\kappa_1 + 1) + G_1(\kappa_2 + 1)}$$

$$\kappa_j = \begin{cases} \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j} & (\text{Plane stress}) \\ 3 - 4\nu_j & (\text{Plane strain}) \end{cases} \quad (2)$$

式 (1) の特性方程式の解は、 $\alpha$  および  $\beta$  の組み合わせによって 2 実根, 複素根, 重根となることが知られている。Table 3 に本論文で用いる実験データ  $\alpha$ ,  $\beta$  および  $\lambda$  の値を示す。特性方程式の解は異なる 2 つの実数  $\lambda_1 = 0.6062$ ,  $\lambda_2 = 0.9989$  となることから, 界面端部の点 O では特異性を示す材料の組合せとなっている。また, このように特性方程式 (1) が 2 実根を有する場合, 界面端部の点 O から界面上を  $x$  軸方向に  $r$  だけ離れた位置での  $y$  方向応力  $\sigma_y$  およびせん断応力  $\tau_{xy}$  はそれぞれ次のように表される。

$$\sigma_y = \frac{K_{\sigma 1}}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{K_{\sigma 2}}{r^{1-\lambda_2}}, \quad \tau_{xy} = \frac{K_{\tau 1}}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{K_{\tau 2}}{r^{1-\lambda_2}} \quad (3)$$

### 3.2 特異応力場の強さの評価方法

有限要素法 (FEM) を用いた応力拡大係数の解析法の 1 つに, 第ゼロ節点法<sup>24),25)</sup>がある。これは, 西谷らによって開発された方法で, 既存の厳密解と FEM による近似解を組み合わせて, 簡便かつ高精度に応力拡大係数を決定することができる。また最近では, この第ゼロ節点法を拡張し, 小田らは界面き裂の応力拡大係数解析の高精度化を成し遂げ<sup>26)~29)</sup>, 張らは界面端部での特異応力場の強さの解析に成功している<sup>10),11)</sup>。そして, 野田らは引張せん断荷重を受ける単純重ね合わせ継ぎ手について広範囲に被着材および接着剤の組み合わせを変化させながら被着材と接着剤の界面端部近傍の応力分布を調べ, このような問題に対して第ゼロ節点法が有効であることを報告している<sup>22)</sup>。本研究では, 野田らと同じ手順で解析を行う。

有限要素解析コードには, 市販の MSC Marc 2007 R1 を用いた。平面ひずみを仮定し, 4 節点四角形要素を用いて 2 次元弾性応力解析を行った。Fig. 7 に界面端部およびその付近での要素分割を示す。 $e_{\min}$  は最小要素寸法であり, 界面端部で用いた要素の寸法となる。一般に, 第ゼロ節点法

Table 3. Dundurs' parameter and the order of stress singularity

$\alpha$	$\beta$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
-0.8699	-0.06642	0.6062	0.9989

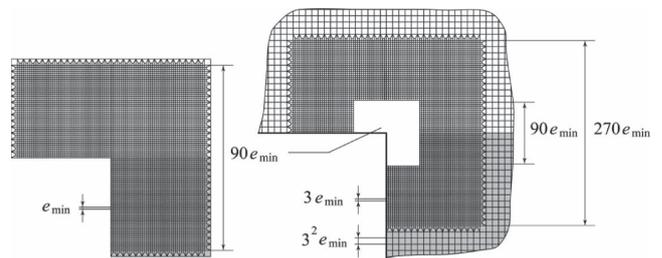


Fig. 7 Mesh pattern near the interface edge

の精度は, 第ゼロ節点を含む要素およびその周辺の要素に大きく影響を及ぼされる。本研究では, 界面端部およびその周辺の要素の形状, 寸法がすべてのモデルで同じになるようにした。そして, さらに  $e_{\min}$  を  $3^{-8}$ ,  $3^{-9}$ ,  $3^{-10}$ ,  $3^{-11}$  と変化させながら解析を行い, 要素分割が応力の値に及ぼす影響を調べた。

### 3.3 界面端部での特異応力場の特性

界面端部での特異応力場の特性について述べる。Table 4 に作用応力  $\sigma_0 = 1$  MPa のときの試験片 A25, A50 および A25-90 の界面端部から界面上の  $y$  方向応力  $\sigma_{y,FEM}$ , せん断応力  $\tau_{xy,FEM}$  の値を示す。また, Fig. 8 に  $\sigma_{y,FEM}^{A50} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A50} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  を界面端部からの距離  $r$  で整理した結果, Fig. 9 に第ゼロ節点での応力の比  $\sigma_{y0,FEM}^{A50} / \sigma_{y0,FEM}^{A25}$  および  $\tau_{xy0,FEM}^{A50} / \tau_{xy0,FEM}^{A25}$  を最小要素寸法  $e_{\min}$  で整理した結果を示す。接着層の厚さ  $t_2$  を一定にした場合, 応力の比はほぼ一定となり,  $e_{\min}$  に依存しないことがわかる。Fig. 10 に  $\sigma_{y,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  を  $r$  で整理した結果, Fig. 11 に第ゼロ節点での応力の比  $\sigma_{y0,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y0,FEM}^{A25}$  および  $\tau_{xy0,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy0,FEM}^{A25}$  を  $e_{\min}$  で整理した結果を示す。 $\sigma_{y,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  は  $\sigma_{y,FEM}^{A50} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A50} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  と大きくことなっている。これは,  $t_2$  が変化することで, 接着層に作用するモーメントに変化が生じるためである。しかしながら,  $r$  が  $10^{-4}$  mm より小さくなると,  $\sigma_{y,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  の増減は緩やかとなり, ほぼ一定となっている。そして, 第ゼロ節点での応力の比  $\sigma_{y0,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y0,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy0,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy0,FEM}^{A25}$  について

**Table 4.** Stress distributions on the interface of specimens A25, A50 and A25-90 when  $\sigma_0 = 1$  MPa

(a) $e_{\min} = 3^{-8}$ mm										
$r$ [mm]	A25		A50		A25-90		$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A50}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A50}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$	$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A25-90}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A25-90}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$
	$0/3^8$	108.089	-34.3491	82.2182	-26.1290	108.513	-34.4831	0.760653	0.760690	1.00392
$1/3^8$	60.9108	-17.5542	46.3257	-13.3538	61.1477	-17.6315	0.760550	0.760718	1.00389	1.00440
$2/3^8$	45.8040	-14.9598	34.8342	-11.3807	45.9878	-15.0364	0.760506	0.760752	1.00401	1.00512
$3/3^8$	36.3691	-13.4622	27.6575	-10.2414	36.5270	-13.5417	0.760467	0.760752	1.00434	1.00591
$4/3^8$	31.0483	-12.2658	23.6104	-9.33110	31.1985	-12.3473	0.760441	0.760741	1.00484	1.00664
$5/3^8$	27.6319	-11.3873	21.0119	-8.66264	27.7833	-11.4705	0.760422	0.760728	1.00548	1.00731
$6/3^8$	25.2208	-10.6877	19.1718	-8.13018	25.3777	-10.7719	0.760158	0.760704	1.00622	1.00788

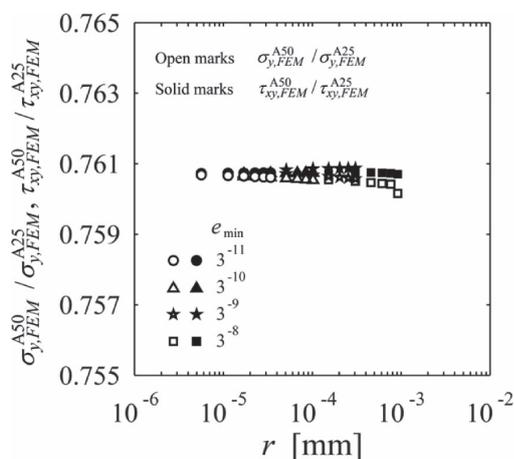
(b) $e_{\min} = 3^{-9}$ mm										
$r$ [mm]	A25		A50		A25-90		$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A50}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A50}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$	$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A25-90}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A25-90}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$
	$0/3^9$	166.786	-52.9838	126.890	-40.3108	167.437	-53.1844	0.760795	0.760814	1.00390
$1/3^9$	94.1356	-27.0860	71.6106	-20.6078	94.5200	-27.1886	0.760718	0.760828	1.00408	1.00379
$2/3^9$	70.8597	-23.0856	53.9015	-17.5648	71.1500	-23.1754	0.760679	0.760855	1.00410	1.00389
$3/3^9$	56.3325	-20.7848	42.8489	-15.8144	56.5654	-20.8701	0.760643	0.760864	1.00413	1.00410
$4/3^9$	48.1488	-18.9467	36.6227	-14.4159	48.3503	-19.0295	0.760615	0.760866	1.00419	1.00437
$5/3^9$	42.9020	-17.5971	32.6310	-13.3891	43.0839	-17.6794	0.760594	0.760870	1.00424	1.00468
$6/3^9$	39.2053	-16.5215	29.8186	-12.5708	39.3742	-16.6036	0.760576	0.760875	1.00431	1.00497

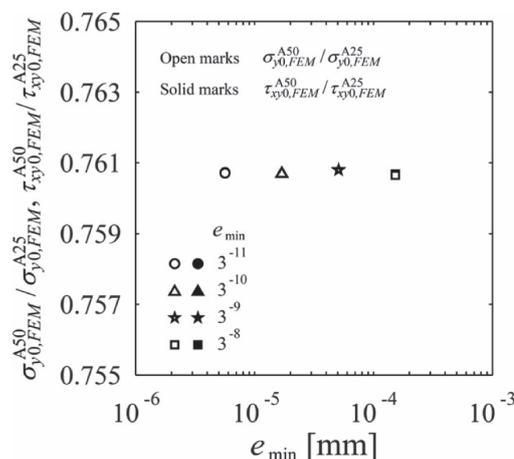
(c) $e_{\min} = 3^{-10}$ mm										
$r$ [mm]	A25		A50		A25-90		$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A50}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A50}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$	$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A25-90}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A25-90}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$
	$0/3^{10}$	257.283	-81.7065	195.713	-62.1545	258.259	-82.0100	0.760692	0.760704	1.00379
$1/3^{10}$	145.378	-41.7664	110.581	-31.7721	145.961	-41.9196	0.760645	0.760710	1.00401	1.00367
$2/3^{10}$	109.493	-35.5907	83.2818	-27.0748	109.940	-35.7181	0.760613	0.760727	1.00408	1.00358
$3/3^{10}$	87.0972	-32.0480	66.2452	-24.3799	87.4589	-32.1644	0.760589	0.760731	1.00415	1.00363
$4/3^{10}$	74.4815	-29.2193	56.6482	-22.2281	74.7940	-29.3262	0.760567	0.760733	1.00420	1.00366
$5/3^{10}$	66.3951	-27.1436	50.4968	-20.6492	66.6754	-27.2447	0.760550	0.760739	1.00422	1.00372
$6/3^{10}$	60.6994	-25.4900	46.1641	-19.3913	60.9560	-25.5860	0.760536	0.760741	1.00423	1.00377

(d) $e_{\min} = 3^{-11}$ mm										
$r$ [mm]	A25		A50		A25-90		$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A50}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A50}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$	$\frac{\sigma_{y,FEM}^{A25-90}}{\sigma_{y,FEM}^{A25}}$	$\frac{\tau_{xy,FEM}^{A25-90}}{\tau_{xy,FEM}^{A25}}$
	$0/3^{11}$	396.766	-125.975	301.826	-95.8324	398.250	-126.441	0.760715	0.760726	1.00374
$1/3^{11}$	224.377	-64.3886	170.680	-48.9821	225.258	-64.6264	0.760684	0.760726	1.00393	1.00369
$2/3^{11}$	169.059	-54.8550	128.597	-41.7302	169.735	-55.0544	0.760663	0.760736	1.00400	1.00364
$3/3^{11}$	134.534	-49.3942	102.333	-37.5760	135.084	-49.5722	0.760648	0.760737	1.00409	1.00360
$4/3^{11}$	115.084	-45.0352	87.5367	-34.2601	115.560	-45.1967	0.760633	0.760740	1.00414	1.00359
$5/3^{11}$	102.616	-41.8377	78.0522	-31.8277	103.046	-41.9899	0.760624	0.760742	1.00419	1.00364
$6/3^{11}$	93.8343	-39.2910	71.3715	-29.8904	94.2297	-39.4337	0.760612	0.760744	1.00421	1.00363



**Fig. 8** Relation between  $\sigma_{y,FEM}^{A50}/\sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A50}/\tau_{xy,FEM}^{A25}$  and  $r$  when  $\sigma_0 = 1$  MPa



**Fig. 9** Relation between  $\sigma_{y0,FEM}^{A50}/\sigma_{y0,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy0,FEM}^{A50}/\tau_{xy0,FEM}^{A25}$  and  $e_{\min}$  when  $\sigma_0 = 1$  MPa

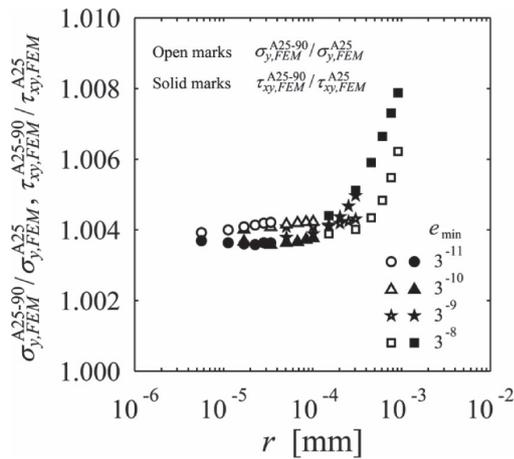


Fig. 10 Relation between  $\sigma_{y,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  and  $r$  when  $\sigma_0 = 1$  MPa

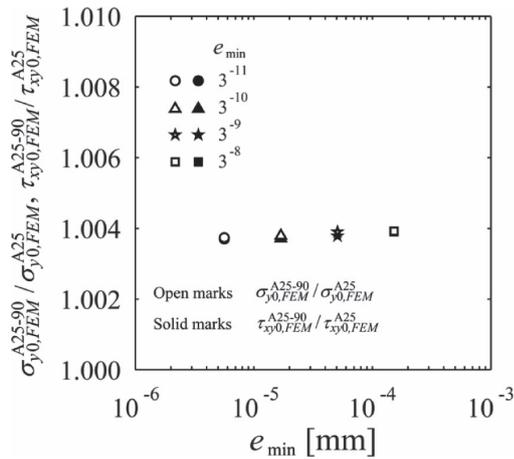


Fig. 11 Relation between  $\sigma_{y0,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y0,FEM}^{A25}$ ,  $\tau_{xy0,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy0,FEM}^{A25}$  and  $e_{min}$  when  $\sigma_0 = 1$  MPa

も  $e_{min}$  に関係なく一定となっている。これらの結果より、本研究で用いる実験データの試験片の界面端部近傍では、接着層の長さ  $l_2$  および厚さ  $t_2$  に関係なく、次式のような関係が成立すると考えられる。

$$\sigma_y = \frac{K_{\sigma 1}}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{K_{\sigma 2}}{r^{1-\lambda_2}} \cong K_{\sigma} \left( \frac{1}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{C_{\sigma}}{r^{1-\lambda_2}} \right) \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{\tau 1}}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{K_{\tau 2}}{r^{1-\lambda_2}} \cong K_{\tau} \left( \frac{1}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{C_{\tau}}{r^{1-\lambda_2}} \right) \quad (5)$$

ここで、 $C_{\sigma}$  および  $C_{\tau}$  は定数である。基本問題および未知問題の特異応力場の強さをそれぞれ  $K_{\sigma}^*$ ,  $K_{\sigma}$ , これらの問題を FEM で解いた場合の第ゼロ節点での  $y$  方向応力をそれぞれ  $\sigma_{y0,FEM}^*$ ,  $\sigma_{y0,FEM}$  とすると、これらは式 (4) より次のような関係を有すると考えられる。

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{\sigma}^*} = \frac{\sigma_{y0,FEM}}{\sigma_{y0,FEM}^*} \quad (6)$$

$K_{\sigma}^*$  および  $\sigma_{y0,FEM}^*$  は定数であることから、 $\sigma_{y0,FEM}$  が  $K_{\sigma}$  に相当することになる。せん断応力についても同様に次のよ

うな関係を有すると考えられる。

$$\frac{K_{\tau}}{K_{\tau}^*} = \frac{\tau_{xy0,FEM}}{\tau_{xy0,FEM}^*} \quad (7)$$

$K_{\tau}^*$  および  $\tau_{xy0,FEM}^*$  は定数であることから、 $\tau_{xy0,FEM}$  が  $K_{\tau}$  に相当することになる。

Fig. 8 では、 $r$  が小さくなるにつれて  $\sigma_{y,FEM}^{A50} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$  と  $\tau_{xy,FEM}^{A50} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  の値の差が小さくなっていることが認められる。Fig. 10 より、 $\sigma_{y,FEM}^{A25-90} / \sigma_{y,FEM}^{A25}$  と  $\tau_{xy,FEM}^{A25-90} / \tau_{xy,FEM}^{A25}$  の値の差についても同様の傾向が認められる。また、Fig. 9, 11 よりわかるように、第ゼロ節点では  $\sigma_{y0,FEM}^{A50} / \sigma_{y0,FEM}^{A25} = \tau_{xy0,FEM}^{A50} / \tau_{xy0,FEM}^{A25}$  となっている。これらの結果は、基本問題と未知問題の間で  $\sigma_{y0,FEM} / \sigma_{y0,FEM}^* = \tau_{xy0,FEM} / \tau_{xy0,FEM}^*$  の関係が成り立ち、特異応力場の強さに関して次のような関係を有することを意味する。

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{\sigma}^*} = \frac{K_{\tau}}{K_{\tau}^*} \quad (8)$$

#### 4. 特異応力場の強さによるはく離破壊基準の記述

Fig. 12 に  $K_{\sigma}|_{P=1} / K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  を接着層長さ  $l_2$  で整理した結果を示す。ここで、 $K_{\sigma}|_{P=1}$  は引張荷重  $P=1$  N での特異応力場の強さ、 $K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  は試験片 A25 の  $K_{\sigma}|_{P=1}$  である。接着層長さ  $l_2$  が 15 mm より大きくなると、 $K_{\sigma}|_{P=1}$  は減少傾向にあることがわかる。Fig. 13 に  $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  を  $l_2$  で整理した結果を示す。ここで、 $K_{\sigma c}$  は破断荷重  $P=P_{df}$  での特異応力場の強さ、 $K_{\sigma c}^{A25}$  は試験片 A25 の  $K_{\sigma c}$  である。黒塗りの丸印を見てわかるように、 $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  は  $l_2$  が 15 mm までは増加する傾向にある。しかしながら、それを超えると白抜き丸印のように、 $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  は  $l_2$  に関係なく一定となっている。これは、接着層内で生じていた破壊から界面端部のはく離による破壊に移ったことによるものと考えられる。白抜き丸印で表される  $l_2$  が 20 mm 以上の  $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  の値を平均したものを実線で示す。点は 10% 程度のばらつきで実線の周りに分布していることがわかる。

Fig. 14 に  $K_{\sigma}|_{P=1} / K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  を接着層厚さ  $t_2$  で整理した結果を示す。 $t_2$  が 0.45 mm を超えると、 $K_{\sigma}|_{P=1} / K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  は  $t_2$  に関係なくほぼ一定となっている。Fig. 15 に  $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  を  $t_2$  で整理した結果を示す。 $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  は  $t_2$  に関係なくほぼ一定となっている。 $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  の値を平均したものを実線で示す。点は、10% 程度のばらつきで実線の周りに分布している。

Fig. 16 に試験片 A25 に対する各試験片のはく離破壊基準  $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  を示す。実線は  $K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25}$  の平均値  $(K_{\sigma c} / K_{\sigma c}^{A25})_{ave}$  であり、その値は 0.997 であった。10% 程度のばらつきはあるが、接着層の長さ  $l_2$  および厚さ  $t_2$  に関係なくほぼ一定となっているのが確認される。

以上の結果より、引張せん断荷重を受ける単純重ね合わせ継ぎ手の破壊基準は、破壊の基点となる被着材と接着剤

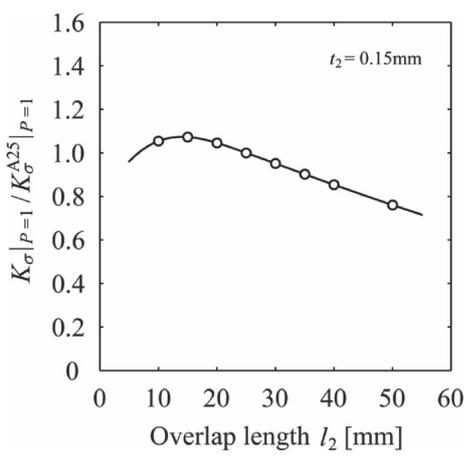


Fig. 12 Relation between  $K_{\sigma}|_{P=1} / K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  and  $l_2$

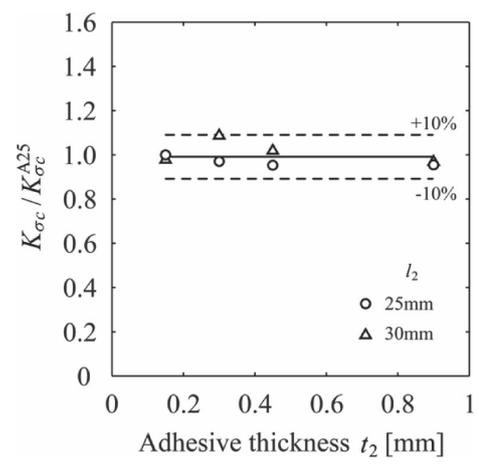


Fig. 15 Relation between  $K_{\sigma_c} / K_{\sigma_c}^{A25}$  and  $t_2$

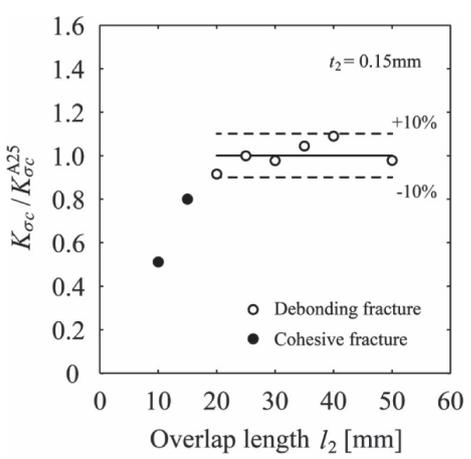


Fig. 13 Relation between  $K_{\sigma_c} / K_{\sigma_c}^{A25}$  and  $l_2$

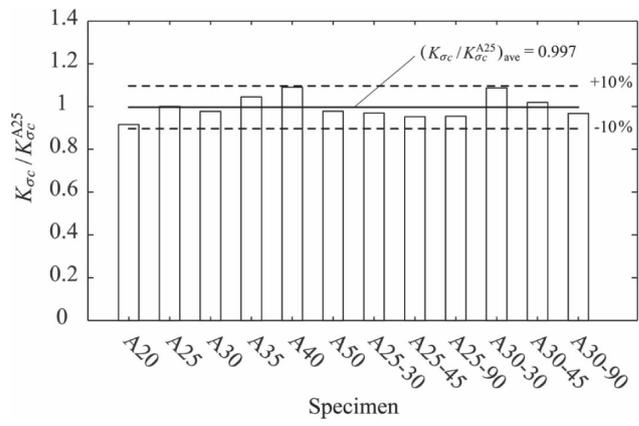


Fig. 16 Comparison between  $K_{\sigma_c} / K_{\sigma_c}^{A25}$  values

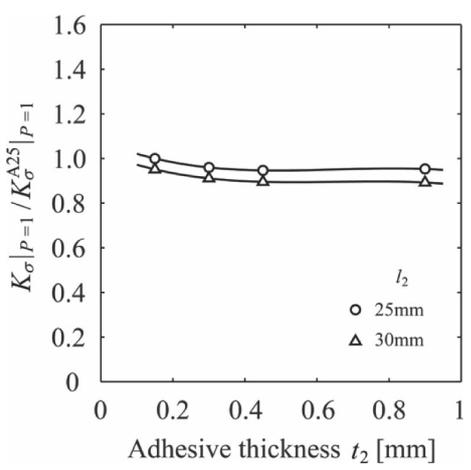


Fig. 14 Relation between  $K_{\sigma}|_{P=1} / K_{\sigma}^{A25}|_{P=1}$  and  $t_2$

の界面端部の特異応力場の強さで記述できることが示された。本方法で特異応力場の強さを得るには、基準となる問題での特異応力場の強さを要する。しかしながら、そのような基準問題がない場合においても、基準となる強度を実験で求めることができれば、本方法によって接着層の長

さ、厚さの異なる単純重ね合わせ継ぎ手の強度を合理的に予測することができる。このことは、時間的、経済的な負担を下げ、実用的にも十分に有益であると考えられる。

### 5. 結言

本研究では、単純重ね合わせ継ぎ手の引張せん断破壊基準を被着材と接着剤の界面端部の特異応力場の強さで表せるかについて最近の実験結果を用いて検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 最小要素寸法を変化させながら有限要素解析を行った結果、被着材と接着剤の界面端部近傍の特異応力場は接着層の厚さおよび長さに関係なく同じ型で表されることがわかった。
- (2) 接着層長さが極端に短い場合は接着層の平均せん断応力で表されるが、それ以外の場合は被着材と接着剤の界面端部での特異応力場の強さで破壊基準を表せることがわかった。

(2012.9.10- 受理)

## 文 献

- 1) 安田雅昭：“電子機器用実装材料システム,” 日立化成テクニカルレポート, No. 40, pp. 7-12, 2003
- 2) 中村正志：“先端半導体用封止材料の技術動向,” パナソニック電工技報, Vol. 56, No. 4, pp. 9-16, 2008
- 3) 澁谷忠弘：“異種材料接合端部のはく離発生強度の破壊力学的評価と電子デバイスへの適用,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 7, No. 7, pp. 639-644, 2004
- 4) 服部敏雄, 坂田莊司, 初田俊雄, 村上 元：“特異応力場パラメータを用いた接着界面強度評価,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 54, No. 499, pp. 597-603, 1988
- 5) 白鳥正樹：“電子デバイス実装における接合の諸問題,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 60, No. 577, pp. 1905-1912, 1994
- 6) 北村隆行, 澁谷忠弘, 上野貴司：“薄膜界面強度評価法の開発と先進 LSI 用銅薄膜のはく離への適用,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66, No. 648, pp. 1568-1573, 2000
- 7) 澁谷忠弘, 鶴賀 哲, 于 強, 白鳥正樹：“LSI 用サブミクロン薄膜のモード別界面端のはく離発生条件,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 69, No. 685, pp. 1368-1373, 2003
- 8) 結城良治, 石川春雄, 岸本喜久雄, 許金泉：“界面の力学,” 培風館, 1993
- 9) 池田 徹, 宮崎則幸, 山下 章, 宗像 健：“境界要素法と有限要素法の結合解法による接着継手中の界面き裂の応力拡大係数解析,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 60, No. 578, pp. 2220-2227, 1994
- 10) 張 玉, 野田尚昭, 高石謙太郎, 蘭 欣：“接着接合板における接着層厚さが特異応力の強さに与える影響,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 774, pp. 360-372, 2011
- 11) 張 玉, 高石謙太郎, 野田尚昭, 蘭 欣：“接着接合板における接着層厚さが特異応力場の強さに与える影響 (面内曲げと引張りの比較),” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 784, pp. 2076-2086, 2011
- 12) Y. Suzuki: “Adhesive Tensile Strengths of Scarf and Butt Joints of Steel Plates (Relation Between Adhesive Layer Thicknesses and Adhesive Strengths of Joints),” JSME International Journal, Vol. 30, No. 265, pp. 1042-1051, 1987
- 13) 野田尚昭, 内木場卓巳, 宮崎達二郎, 李 戎, 佐野義一：“特異応力の強さをを用いた接着接合板の剥離強度評価,” 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 2012
- 14) J.-H. Park, J.-H. Choi, and J.-H. Kweon: Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses, Composite Structures, Vol. 92, pp. 2226-2235, 2010
- 15) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三：“非対称形状の単純重ね合せ継手の強度評価 (第 3 報, 上下被着体が異種材料の場合),” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 52, No. 476, pp. 1050-1057, 1986
- 16) 能野謙介, 永弘太郎：“接着継手の予想強度と実験値の比較,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 52, No. 479, pp. 1698-1707, 1986
- 17) Z. Qian and A. R. Akisanya: “An Experimental Investigation of Failure Initiation in Bonded Joints,” Acta Materialia, Vol. 46, No. 14, pp. 4895-4904, 1998
- 18) A. R. Akisanya and C. S. Meng: “Initiation of Fracture at the Interface Corner of Bi-material Joints,” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 51, pp. 27-46, 2003
- 19) A. Mintzas and D. Nowell: “Validation of an  $H_{cr}$  - based Fracture Initiation Criterion for Adhesively Bonded Joints,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 80, pp. 13-27, 2012
- 20) D. B. Bogy: “Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading,” Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 460-466, 1968
- 21) D. B. Bogy: “Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different and Wedge Angles under Surface Traction,” Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 38, pp. 377-386, 1971
- 22) 野田尚昭, 張 玉, 高石謙太郎, 蘭 欣, 小田和広：“単純重ね合わせ接着継手の特異応力場の強さ,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 78, No. 789, pp. 651-655, 2011
- 23) J. Dundurs: “Discussion of Edge-Bonded Dissimilar Orthotropic Elastic Wedges Under Normal and Shear Loading,” Journal of Applied Mechanics, Vol. 36, pp. 650-652, 1969
- 24) 西谷弘信, 川村壮司, 藤崎 渉, 福田孝之：“FEM による板材の応力拡大係数と応力集中係数の高精度決定法,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 65, No. 629, pp. 26-31, 1999
- 25) 西谷弘信, 寺西高広, 福山慶介：“第ゼロ節点法による異種接合材の応力拡大係数解析,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 69, No. 684, pp. 1203-1208, 2003
- 26) 小田和広, 神杉一吉, 野田尚昭：“比例法による界面き裂の応力拡大係数解析,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 75, No. 752, pp. 476-482, 2009
- 27) 野田尚昭, 張 玉, 高石謙太郎, 蘭 欣：“任意の材料組合せに対する界面き裂の応力拡大係数 (き裂の相対長さの影響),” 材料, Vol. 59, No. 12, pp. 900-907, 2010
- 28) 野田尚昭, 蘭 欣, 道中健吾, 張 玉, 小田和広：“任意の材料組み合わせを考慮した縁面き裂を有する接合半無限板の応力拡大係数,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 76, No. 770, pp. 1270-1227, 2010
- 29) 蘭 欣, 道中健吾, 張 玉, 野田尚昭：“任意の材料組合せに対する縁面き裂を有する接合有限板の引張りにおける応力拡大係数,” 材料, Vol. 60, No. 8, pp. 748-755, 2011



**宮崎達二郎**（みやざき たつじろう）  
2003年九州大学大学院機械科学専攻博士後期課程修了，博士（工学）。同年琉球大学工学部機械システム工学科講師。現在，准教授。金属疲労とその補修，接着接合部材の強度に関する研究に従事。



**内木場卓巳**（うちこば たくみ）  
2012年九州工業大学工学部機械知能工学科卒業。現在，同大学大学院工学府機械知能工学専攻修士課程在学中。傾斜機能性材料，接着継手の強度評価に関する研究に従事。



**野田尚昭**（のだ なおあき）  
1984年九州大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程単位取得満期退学，工学博士。同年九州工業大学講師，87年助教授，03年教授。85年リーハイ大学客員研究員，96年山東工業大学客座教授，03年華東交通大学兼職教授，05年サリー大学客員研究員，08年山東大学客座教授，10年河南科技大学兼職教授。



**佐野義一**（さの よしかず）  
1964年九州大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年，日立金属（株）若松工場に入社。02年（株）日立金属若松技術顧問。04年九州職業能力開発大学校特任教授，九州大学学術研究員。10年より九州工業大学支援研究員。博士（工学），技術士（金属・金属加工部門）。



**李 戎**（り ろん）  
2013年河南科技大学応用力学専攻博士前期課程修了。2012年九州工業大学大学院工学府機械知能工学専攻特別研究学生。板殻の理論，接着継手の強度評価に関する研究に従事。