

U00165

## 突合せ継手における特異応力場の解析と 破断面観察による破壊メカニズムについての考察

### Consideration of Fracture Mechanism by Analysis of Intensity of Singular Stress Field and Fracture Surface Observation

○正 高木 怜<sup>\*1</sup>, 野田 尚昭<sup>\*1</sup>, 王 思瑞<sup>\*1</sup>, 佐野 義一<sup>\*1</sup>,  
高瀬 康<sup>\*1</sup>, 宮崎 達二郎<sup>\*2</sup>, 鈴木 靖昭<sup>\*3</sup>  
Rei TAKAKI<sup>\*1</sup>, Nao-Aki NODA<sup>\*1</sup>, Sirui WANG<sup>\*1</sup>, Yoshikazu SANNO<sup>\*1</sup>,  
Yasushi TAKASE<sup>\*1</sup>, Tatsuijro MIYAZAKI<sup>\*2</sup> and Yasuaki SUZUKI<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> 九州工業大学 Kyushu Institute of Technology

<sup>\*2</sup> 琉球大学 University of the Ryukyus

<sup>\*3</sup> 鈴木接着技術研究所 Suzuki Adhesion Institute of Technology

Adhesive bonding is light weight, low cost and easy to manufacture, so it is used in various industrial fields. In order to ensure the reliability of adhesive bonding, an appropriate evaluation of adhesive strength is indispensable. However, since experimental evaluation has a large time and economic burden, a simple and practical delamination criterion and evaluation method are required.

The authors proposed a method for evaluation adhesive strength by Intensity of singular stress field (ISSF) and showed that bond strength can be easily evaluated. In the previous study, analysis was performed in consideration of the three-dimensional geometry of the specimen, and it was shown that the ISSF distribution at the interface end was obtained accurately. In this study, the fracture surface of the actual specimen was observed, and the mechanism by which the fracture occurred was considered from the comparison with the analysis result.

The distribution of ISSF is constant at most positions, but once it approaches the fillet, it decreases once and then increases again, returning to almost the same value as the center. It was also found that the position where the ISSF decreases becomes closer to the center as the adhesive layer becomes thicker. As a result of observing the fracture surface, the fracture origin occurred not in the corner but in the straight part of the bonded end face, which is considered to be in good agreement with the analysis result.

**Key Words** : Butt joint, Adhesion, Intensity of Singular Stress Field(ISSF), Interface, Fracture surface

## 1. 緒 言

接着接合は軽量・低コストかつ製造が容易であるため、集積回路技術をはじめとしたさまざまな産業分野に使用されている<sup>(1)-(5)</sup>。一般に、異材接着界面のはく離強度は、材料組合せ、荷重形式、接着条件などによって大きく変化する。また、被着材と接着剤の間の界面では、接着端部で応力が無限大に発散するような特異応力場が形成され<sup>(6)</sup>、これが原因ではく離を生じる<sup>(7)-(9)</sup>。そのため、接着接合の信頼性を確保するためには、はく離強度の適切な評価が必要不可欠である<sup>(10)-(12)</sup>が、実験的な評価では時間的、経済的負荷が大きいので、簡便で実用的なはく離破壊基準、評価方法が求められる<sup>(10)-(14)</sup>。

先の研究で著者らは2次元接着モデル<sup>(8),(15)</sup>を用い、接着層厚さが特異応力場の強さ(ISSF)に与える影響について考察した。また、図1に示すように破断時のISSFが接着層厚さによらず一定で整理できることを示した。

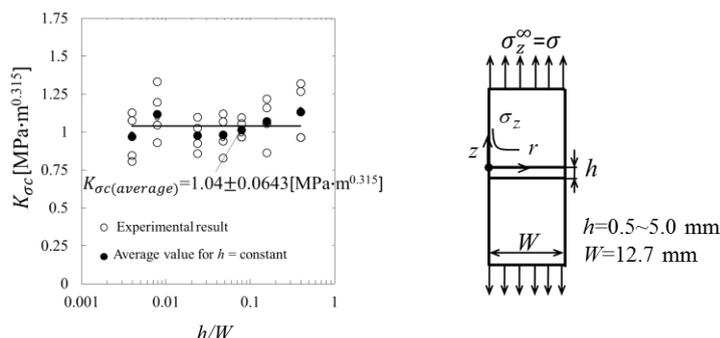


Fig. 1 Prismatic butt joint and experimental results

本研究では Suzuki<sup>(16),(17)</sup>の実験で用いられた試験片を対象に3次元接着モデルを作成し、有限要素解析によって接合界面端に現れる ISSF を有限要素法解析によって求める。また、実際の試験片の破面の観察を行い、解析結果と破壊起点の位置などの比較から接着継手の破壊メカニズムについて考察を行う。

## 2. 解析モデルおよび解析結果

本研究では、実際の試験片の角部には必ず丸みが存在することを考慮し、図2に示すような解析モデルを作成した。このモデルでは接着界面端の特異性指数が直線部と円弧部で同じになるためその ISSF を比較し大小を評価できる利点がある。ここでは、フィレット半径  $\rho/W$  を実際の試験片に近い  $\rho/W=0.01$  として、接着層厚さ  $h=0.3, 0.6, 1.0$  ( $h/W=0.0236, 0.0472, 0.0787$ ) における ISSF を求めた。

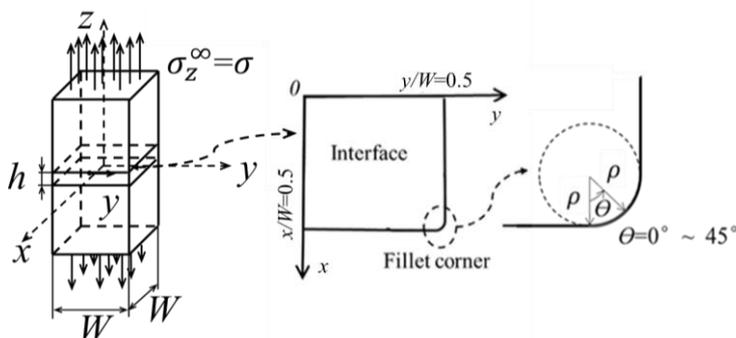


Fig. 2 Prismatic butt joint and experimental results

図3に接着層厚さ  $h$  の異なる試験片に  $\sigma_z^\infty = \sigma$  を負荷させたときの ISSF の分布を示す。図3(a)は直線部における ISSF の分布であり、図3(b)はフィレット部における ISSF の分布である。また、図中の赤点は後述する実際の試験片における破壊起点と思われる位置を示している。図3に示すように ISSF の分布はほとんどの範囲で一定となるが、フィレット部近傍で ISSF が減少し、フィレット部で再び増加して中心部 ( $y/W=0$ ) とほぼ同じ値になることがわかる。図3より ISSF が低下し始める位置は接着層が厚くなるにつれて中心側に寄ることがわかる。これらのことから、実際の破壊は角部近傍ではなく直線部を起点に発生し、その傾向は接着層が厚くなると特に顕著であることが明らかとなった。

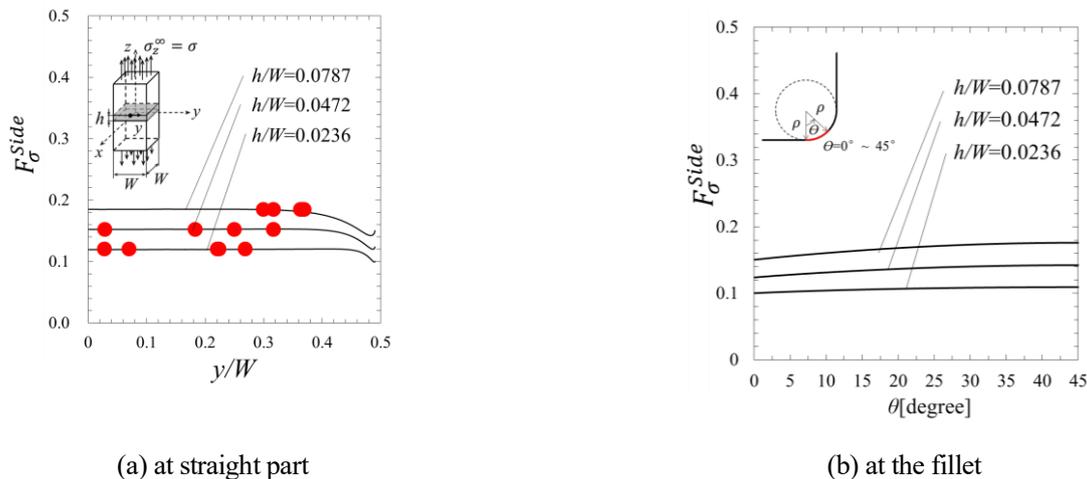
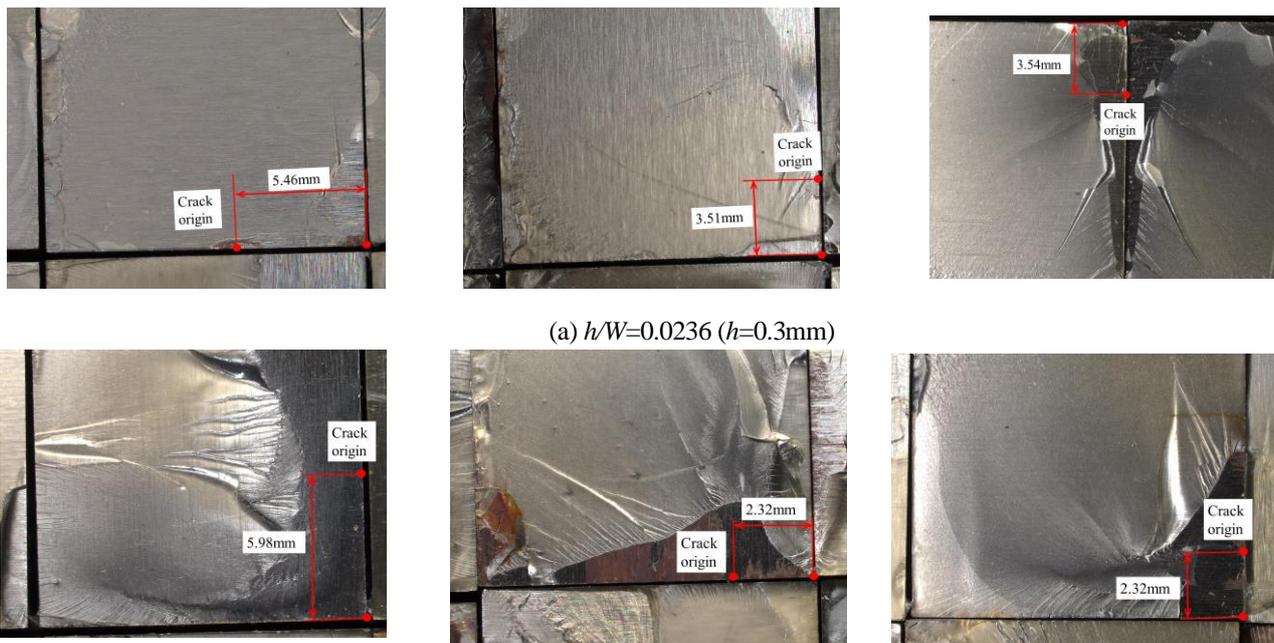


Fig. 3 ISSF distributions for prismatic butt joint

### 3. 破断面観察と解析結果との比較

図 4 に Suzuki<sup>(16), (17)</sup>の行った実験における試験片の破断面を示す．ここでは(a) $h/W=0.0236(h=0.3mm)$ , (b) $h/W=0.0472(h=0.6mm)$ , (c) $h/W=0.0787(h=1.0mm)$ それぞれ 3 本の試験片について示す．図中表示されている距離は角部から破壊起点までの距離を示している．図 3 および図 4 に示すようにいずれの接着剤厚さにおいても角部そのものから破壊が生じておらず，角部から離れた縁部に破壊起点が生じていることがわかる．破壊起点の位置は試験片によって大きくばらつきはあるもののいずれの試験片においても解析において ISSF が 10%以上減少する範囲では生じていないことがわかる．このことから，実際の実験では角部で破壊が生じることはなく，ISSF の最大値で一定となっている縁部から破壊が生じると考えられる．また，解析では角部のごく近傍の ISSF は中央部( $y/W=0$ )の ISSF と同じ値となるため解析上では角部のごく近傍で破壊が生じる可能性もあるがその範囲はごく狭い範囲であるため，角部から破壊が生じることは現実的ではないと考えられる．



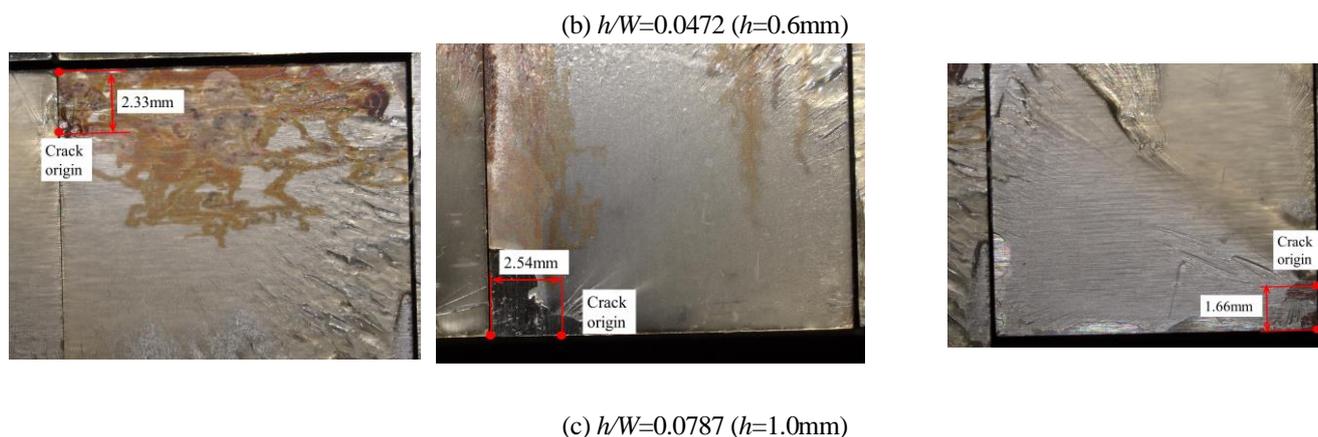


Fig. 4 The fracture surface in the Suzuki's specimens

#### 4. 結 言

本研究では Suzuki<sup>(16),(17)</sup>の実験で用いられた試験片を対象に 3 次元接着モデルを作成し、有限要素解析によって接合界面端に現れる ISSF を有限要素法解析によって求め、実際の試験片の破面の観察との比較から接着継手の破壊メカニズムについて考察を行った。以下に得られた結論を示す。

- (1) 接合界面端部に表れる ISSF はほとんどの範囲で一定の値となるが角部近傍では減少する。また、ISSF が減少する範囲は接着層厚さが大きくなるにつれて広がる。
- (2) 実際の試験片の破断面において、破壊起点は角部からではなく縁部から生じており、ISSF の最大値が広い範囲で現れている縁部のほうがはく離が生じやすい。

#### 文 献

- (1) Naito, K., Ontaand, M., and Kogo, Y., "The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive" *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 36 (2012), pp. 77-85.
- (2) Liu, Z.X., Huang, Y.A., Yin, Z.P., Bennati, S., and Valvo, P.S., "A general solution for the two-dimensional stress analysis of balanced and unbalanced adhesively bonded joints" *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 54 (2014), pp. 112 – 123.
- (3) Uddin, M.A., Ali, M.Y., and Chan, H.P., "Achieving optimum adhesion of conductive adhesive bonded flip-chip on flex packages." *Reviews on Advances Materials Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 165 – 172, 2009.
- (4) Huang, Z., Kumar, P., Dutta, I., Pang, J.H.L., and Sidhu, R., "A general method ology for calculating mixed mode stress intensity factors and fracture toughness of solder joints with interfacial cracks" *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 131 (2014), pp. 9 – 25.
- (5) Kitasako, Y., Burrow, M.F., Nikaido, T., Harada, N., Inokoshi, S., Yamada, T., and Takatsu, T., "Shear and tensile bond testing for resin cement evaluation." *Dental Materials*, Vol. 11, No. 5 – 6 (1995), pp. 298 – 304.
- (6) 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
- (7) Qian, Z., and Akisanya, A.R., "An experimental investigation of failure initiation in bonded joints", *Acta Materialia*, Vol.46, No.14 (1998), pp.4895-4904.
- (8) 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場の強さに与える影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 774 (2011), pp. 360 – 372.
- (9) 宮崎達二郎, 井上卓真, 野田尚昭, 佐野義一, “3 次元異材接合体の界面端角部に生じる特異応力場の簡便で効率的な評価法について”, 日本機械学会論文集 Vol. 84, No. 864 (2018), pp. 18 – 00013.
- (10) 渋谷忠弘, “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 (2004), pp. 639 – 644.

- (11) 服部敏雄, 坂田荘司, 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 (1988), pp. 597 – 603.
- (12) 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 (1994), pp. 1905 – 1912.
- (13) 北村隆行, 渋谷忠弘, 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 (2000), pp. 1568 – 1573.
- (14) 渋谷忠弘, 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はく離発生条件”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 1368 – 1373.
- (15) 野田尚昭, 宮崎達二郎, 内木場卓巳, 李戎, 佐野義一, 高瀬康, “接着接合板における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法について”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 17, No. 2 (2014), pp. 132 – 142.
- (16) Suzuki, Y., “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 (1987), pp. 1042 – 1051.
- (17) 鈴木靖昭, “鋼のスカーフおよびバット継手の引張接着強度 (第 1 報, ぜい性接着剤の場合)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 50, No. 451 (1984), pp. 526 – 533.