

G040055

## 高温における接着剤の物性と残留応力によるはく離現象

大淵竜也<sup>\*1</sup>, 佐藤千明<sup>\*2</sup>, 宮崎隼人<sup>\*3</sup>, 須藤洋<sup>\*3</sup>, 楊瀾<sup>\*3</sup>, 原賀康介<sup>\*3</sup>

### Mechanical properties of adhesives at high temperature and debonding process of joints bonded by the adhesives due to residual stress

Tatsuya OBUCHI<sup>\*1</sup>, Chiaki SATO<sup>\*2</sup>, Hayato MIYAZAKI<sup>\*3</sup>, Hiroshi SUTO<sup>\*3</sup>, Lan YANG<sup>\*3</sup> and Kosuke HARAGA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School, Tokyo Institute of Technology  
Nagatsuta 4259, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

<sup>\*2</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology  
Nagatsuta 4259, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

<sup>\*3</sup> Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha  
Nihonbashi Mitsui Tower, 1-1, Nihonbashi Muromachi 2-Chome, Chuouku, Tokyo 103-8338, JAPAN

The use of adhesive bonding has recently been expanding to join metal panels. However, pre-curved metal adherends can cause residual stress, and it leads to the fracture of the joints, especially at high temperature caused in paint baking process for instance. The purpose of this study is to establish a method for predicting the fracture phenomena of joints bonded with a second generation acrylic adhesive (SGA) at high temperature. The stress-strain curves of the adhesive at various temperatures were measured experimentally. The debonding process of the joints, which had pre-curved adherends having constant curvatures, was also investigated experimentally. The deformation of the adhesive layer was predicted analytically using Dillard's model and finite element method. The debonding temperature was also predicted based on the stress-strain curves and the analytical results. The predictions showed fairly good agreements with the experimental results.

**Key Words** : Mechanical Engineering, Adhesion

### 1. 緒 言

接着接合法には、異種材料の接合が可能、他の接合法と比較して軽量等の利点がある。そのため近年では、板金の接合にも接着が用いられている。この際、金属被着体が予め変形していると、接合部を加圧しつつ接着剤を硬化させる必要が生じ、また、被着体のスプリングバックにより接着剤中に残留応力が生じる。この残留応力は、常温ではあまり問題とならないが、塗装の焼付け時など、高温に曝される場合にははく離の原因となる。この現象は、製品の生産性を低下させるにも関わらず、未だ十分な知見があるとは言いがたい。そこで、本研究では、接着接合法により接合した板金接合部のはく離現象について調べる。具体的には2液性アクリル接着剤 (SGA) を用い、接着剤の各物性値を異なる温度で測定し、その値を用いて有限要素解析と Dillard モデルによる計算を行う。その後、はく離試験を実施し、両者の結果を比較する。

<sup>\*1</sup> 学生員, 東京工業大学 大学院 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

<sup>\*2</sup> 正員, 東京工業大学 精密工学研究所

<sup>\*3</sup> 電気化学工業株式会社

E-mail: obuchi.t.ac@m.titech.ac.jp

## 2. 物性値の測定

### 2・1 熱機械特性

SGA の熱軟化特性および線膨張係数を熱機械測定装置 (TMA) で測定した。試験片としては、 $\phi 6\text{mm} \times 6\text{mm}$  の円柱を使用した。図1に SGA の熱軟化特性を示す。この結果、2段階の熱軟化特性、並びにガラス転移温度が  $50^\circ\text{C}$  付近にあることがわかった。図2に本試験片の熱膨張特性を示す。これも2段階に変化することがわかった。また、線膨張係数は  $80^\circ\text{C}$  以上で  $231 \times 10^{-6} (1/\text{K})$  であった。

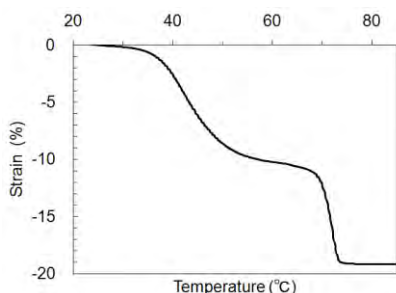


Fig.1 Heat softening properties of the SGA

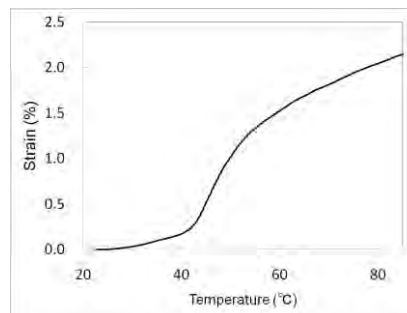


Fig.2 Expansion of the SGA

### 2・2 縦弾性係数

接着剤のバルク試験片を作成し、各温度 ( $23, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200^\circ\text{C}$ ) における応力 - ひずみ特性を測定した。図3に  $80^\circ\text{C}$  以降の応力 - ひずみ特性を示す。図3より  $80^\circ\text{C}$  以降ではヤング係数が一定であることがわかる。また、本 SGA の縦弾性係数は  $20 \sim 40^\circ\text{C}$  では  $289\text{MPa}$ ,  $50 \sim 60^\circ\text{C}$  では  $3.59\text{MPa}$ , および  $80^\circ\text{C}$  以降では  $2.38\text{MPa}$  であった。引張試験と TMA 試験の結果より、熱軟化特性が同様の範囲において SGA のヤング率は一定であることがわかった。図4に試験時の破断応力 - 温度の関係を示す。図4より破断時の最大ひずみは、温度の上昇と共に単調に減少していきことがわかった。また同様の傾向は、破断応力 - 温度関係にも見られた。

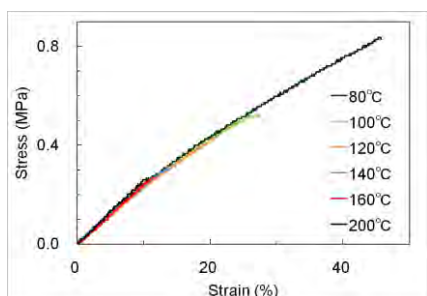


Fig.3 Stress-strain curves of the SGA

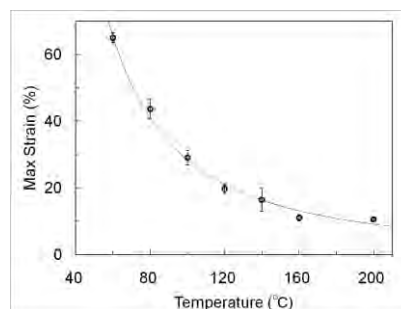


Fig.4 Relation between maximum stress and temperature

## 3. はく離試験

曲率を有する被着体が平面になるよう治具で加圧しつつ、接着剤を硬化させ、その後に治具を取り除き、加熱による被着体のはく離を観察した。被着体は、端部が  $2\text{mm}$  反ったもの ( $200 \times 25 \times 13$ ) を用いた。また、はく離の同定は、被着体先端に設置した高温用ひずみゲージで行った。測定結果を図6に示す。  $60^\circ\text{C}$  付近までひずみが徐々に減少するが、これは SGA の熱軟化により被着体が曲率を回復し、ひずみゲージに圧縮力が生じたためと考えられる。また  $70^\circ\text{C}$  付近でひずみが急速に減少しており、この温度域で被着体のはく離したものと考えられる。

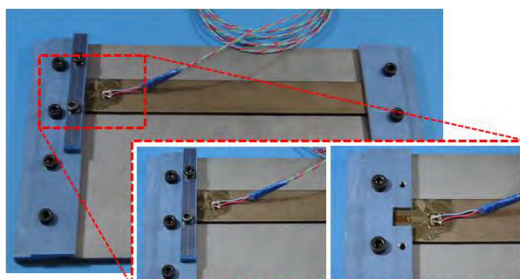


Fig.5 Set up for debonding test

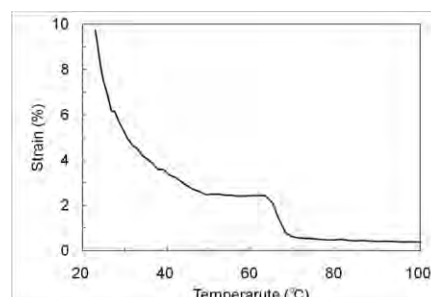


Fig.6 Strain gauge's output

#### 4. Dillard モデル

曲率を有する被着体を加圧しつつ剛平面に接着した場合、接着剤に生じる最大応力およびひずみは、式 (1) に示す Dillard の式<sup>(1)</sup>より算出できる。ここで  $D_{max}$  は端部の反り、 $l$  は接着長さ、 $E$  はヤング率、 $t$  は厚さを表す。また、添字の A は接着剤、S は被着体を表す。図 7 に、Dillard モデルより算出した、接着剤層の最大ひずみと、接着剤バルクの引張試験結果を示す。この図において、Dillard モデルの計算結果と接着剤バルクの引張試験結果が交差する点で、接合部のはく離が生じると予想され、その点は 70°C 付近にあると予想される。また、この予想値は、はく離試験の結果と一致した。

$$\sigma_{max} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \sqrt{\frac{E_A E_S t_s^3 D_{max}}{t_A l^2}}, \quad \varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E_A} \quad (1)$$

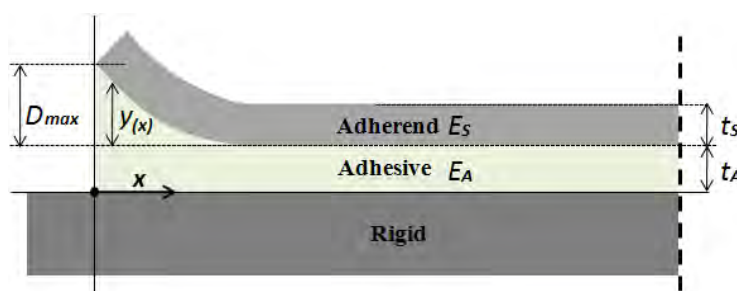


Fig.7 Configuration and dimensions for Dillard model

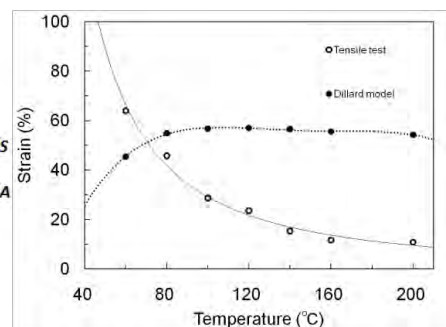


Fig.8 Comparison of test results with Dillard model

#### 5. 有限要素解析

はく離試験を行うに際し、その現象を予測するアプローチの1つとして有限要素解析を行った。解析は試験片の四分の一モデルを作成して行った。このモデルは試験片を仮想剛体と連結させ、その剛体に仮想的なモーメントを加えることにより試験片に任意の反りを与えた(図9)。はく離試験と同様の条件で計算した結果を図10に示す。図10より引張試験との交点は75~80°Cであり、Dillard モデルとの誤差は少々あるものの、はく離試験の結果とおおよその一致が見られた。

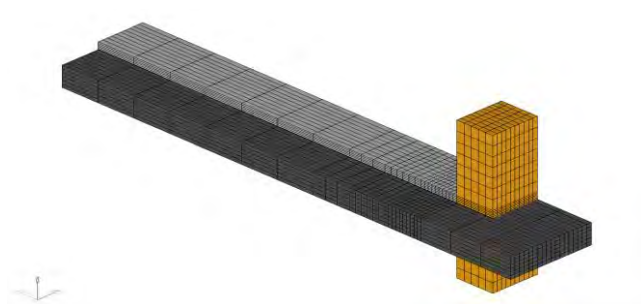


Fig.9 Meshing condition for FEA

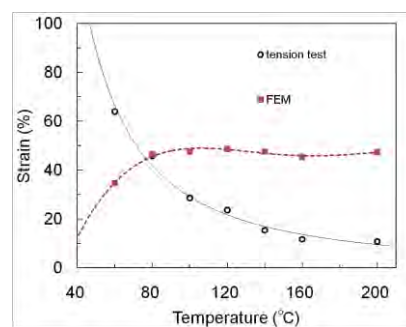


Fig.10 Comparison of test results and FEA

#### 6. 結 語

SGA は温度の上昇とともに、熱軟化し、また最大ひずみも徐々に低下することがわかった。また、Dillard モデルおよび有限要素解析によるはく離温度の予測値は、はく離試験の結果とほぼ一致した。しがたがって、SGA による接着接合部のはく離現象は、ある程度予測可能であると考えられる。

#### 文 献

- (1) David A. Dillard, "Stress between Adherends with Different Curvatures", *The journal of Adhesion*, Vol.26, No.1, (1988), pp.59-69