接着接合したアルミニウム合金板の塑性曲げ における変形特性とはく離強度*

瀧 口 三千弘^{*1}, 吉 田 総 仁^{*2}

Deformation Characteristics and Delamination Strength of Adhesively Bonded Aluminium Alloy Sheet under Plastic Bending

Michihiro TAKIGUCHI^{*3} and Fusahito YOSHIDA

^{*3} Hiroshima National College of Maritime Technology, Dept. of Maritime Technology,
4272-1 Higashino-cho, Toyota-gun, Hiroshima, 725-0200 Japan

Press-formed sheet metal parts are usually adhesively bonded together at the final stage of assembly. Instead of such a conventional process, a new technology of press-forming of adhesively bonded sheet metals was investigated. In this process, first flat sheets are adhesively bonded, and then press-formed into final shapes. From V-bending experiments on adhesively bonded aluminium alloy sheets, it was found that large shear deformation occurred in the adhesive layer during the bending, which in some cases lead to the delamination. Both from the experimental observations and numerical simulation, it is concluded that the large shear deformation of the adhesive layers can be suppressed when performing air-bending of enough long span, rather than die-contact V-bending.

Key Words: Plastic Working, Bending, Adhesive Joints, Aluminium Alloy Sheet, Experimental Strain Analysis, Numerical Analysis, Delamination Strength

1. 緒 言

近年の構造用接着剤の急速な進歩により、接着接合が構造組立物へ多く用いられるようになってきた。接着接合は異種材料との接合が容易であることや、軽量化の実現、溶接工法の問題点である熱ひずみの解消、面接合による部材剛性の向上、さらには製品の寸法精度や意匠性の向上といった多くの利点を有している。しかしながら、今日までの接着接合は構造組立の最終段階において行われることが一般的であり、板材を接着接合後プレス成形により加工して製品を作るといったことはほとんど行われていない。もしこうした利用方法が可能であるならば、接着接合は今後さらに用途が広がってくるものと思われる。板材の接着接合後の成形加工を考える際に参考になるのが、制振鋼板等の樹脂複合鋼板の曲げ加工に関するいくつかの論文^{(1)~(4)}

である。しかし、これらの論文はフランジ折れ曲がり等の成形不良現象の解明や対策といった成形性が議論の的であり、樹脂層の強度評価に関しては検討がなされていない。また、接着接合後の加工に対してはラップ長さが変形挙動や接着強度に大きく影響するであろうことは推測されることであるが、その程度や成形限界については全く未知である。

こうしたことから、本研究では接着接合した金属薄板のプレス成形という新しい技術の可能性について検討した。具体的には、まず接着後のプレス成形が可能な高延性接着剤の基本的変形・接着強度特性を調べた。次に接着接合したアルミニウム合金板のV曲げ試験を行い、接着部のずれ（せん断）変形およびはく離の有無等を調べた。また、V曲げ後のせん断接着強度も調べた。さらに、接着板のV曲げの変形解析を行い、接着部のずれ変形の発生メカニズムやそれを抑えるための曲げ加工条件について検討を行った。

2. 接着板の引張りせん断における変形と強度

2・1 供試材 接着剤には常温硬化型の二液主

* 原稿受付 2000 年 5 月 29 日。

^{*1} 正員、広島商船高等専門学校商船学科(〒725 0200 広島県豊田郡東野町 4272-1)。

^{*2} 正員、広島大学工学部(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)。
E-mail: taki@hiroshima-cmt.ac.jp

剤・変性アクリル系構造用接着剤ハードロックM-372-20（電気化学工業(株)製）を用いた。この接着剤は、通常のエポキシ系接着剤と同程度の接着強度を持ちながら同時に高い延性を有するという特徴がある。被着体は板厚が1mmのアルミニウム合金板（A5083P-O）を用いた。図1に引張りせん断用の試験片形状と寸法を示す。(a)と(b)は単純重ね合わせ継手（以下、SLJと略す）の試験片であり、(b)は(a)のSLJに厚さ2.6mmの鋼板（SS400）を裏打ちしたものである。これは、V曲げ時の接着層のせん断特性を把握するために、引張りせん断によって誘起される被着体の曲げ変形がせん断特性に与える影響をより小さくするためのものである。また、接着部のラップ長さを8mmとしたのは、接着部が破断する前に被着体が降伏しないようにするためである。なお、試験片の作成において、被着体は圧延方向と長手方向が一致するように切り出した。

接着にあたっては、被着体を#150のサンドペーパーで研磨後アセトン脱脂処理を行った。接着時の温度は $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度は $60 \pm 10\%$ であった。なお、試験片の接着部側面に1mm間隔のけがき線を入れ、上下の被着体間のずれ量を50倍のマイクروسコープを通して観測し、ビデオに記録したものから接着層のせん断ひずみを求めた。

図2に被着体（A5083P-O）の応力-ひずみ曲線を示す。本結果は平行部長さ60mm、幅12.5mmの試験片（引張り軸と圧延方向が一致）を用いて、引張り速度 $V=0.1\text{mm/min}$ で行ったものである。この図において、プロット記号が実験結果であり、実線はそれを剛塑性近似式

$$\sigma = c\varepsilon^n \quad (c=643, n=0.316) \quad \cdots \cdots (1)$$

Fig.1 Two types of single-lap joint specimens

で表したものである。4章の解析ではこれを被着体の構成式として用いる。

2.2 引張りせん断試験 接着接合部の変形や強度には接着条件や接着層厚さなど多くの因子が関係していることが指摘されている⁽⁶⁾ことを踏まえ、まず初めに固着時間と接着層厚さについて検討した。その結果、本接着剤は1日あれば十分固着し、その後わずかな強度増加はあるが接着後1週間以内であればほぼ同じ強度特性とみなせれることがわかった。また接着層の厚さについては約0.1mmの時に最も強度が高く、それより厚くても薄くても強度が低下することがわかった。したがって、以下に述べる実験結果は全て固着時間は1週間以内、接着層の厚さは約0.1mmの場合のものである。引張りせん断試験は、試験機速度 $V=0.1$ と 0.01mm/min （準静的速度）で行った。

図3に接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。この図から本接着剤は延性が高く、また非常に強い速度依存性があることがわかる。また、SLJの試験

Fig.2 Stress-strain curve of aluminium (A5083) sheet

Fig.3 Shear stress-strain curves of adhesive

片とSLJに鋼板を裏打ちした試験片でかなりの違いが見られる。これは、引張りせん断試験において板に作用する曲げモーメントに起因するピール力（接着面に垂直に作用する力）に対して本接着剤が予想以上に敏感であるためと思われる。このことからV曲げ試験時の接着層のせん断特性としては、ピール力の影響を比較的受けにくいSLJに鋼板を裏打ちした試験片を用いた結果が妥当と考えられる。4章の解析では、SLJ+Steel, $V=0.01\text{mm/min}$ の場合に対応する図中の太い実線で示す構成式

$$\tau_a = c_a \gamma_a^{n_a} \quad (c_a = 11.56, n_a = 0.234) \dots\dots\dots (2)$$

を接着剤の特性として用いる。

曲げ加工後の接着層の強度評価を行うにあたり、接着層のせん断ひずみ（ずれ変形量）が重要である。すなわちどれくらいのせん断ひずみまでなら加工が許されるかということである。本接着剤においては、SLJに鋼板を裏打ちした試験片を用いた結果からは最大せん断ひずみが約2.1（接着層のせん断変形速度が準静的速度の場合）であり、SLJでは約2.6となっているので限界せん断ひずみを明確には定めにくい、概ね2.1～2.6が限界と考えられる。

上記いずれの実験においても、本接着接合部の破面については、わずかに界面破壊の部分も見られるが、ほぼ凝集破壊であることを観察している。

3. 接着板の曲げ加工

3・1 曲げ加工における変形挙動 本論文における曲げ加工はV曲げ加工とする。図4(a)に試験片形状と寸法を、図4(b)にV曲げ試験の概略図を示す。実験条件を表1に示す。接着部のラップ長さ lp に応じてダイス肩幅 L を20, 27, 34, 48mmと変えたのは、予備実験の段階で lp に対して L が狭いとフランジ折れ曲がり（いわゆるカモメ折れ）が大きくなる⁽⁴⁾ことを確認したためである。本実験においてはV曲げを完了した時のダイス肩からの突出部の長さがほぼ一定（約2.5mm）になるように lp に対して L を決めた。したがって、以下に述べる実験結果や解析結果において、ラップ長さ lp による比較は、それに応じてダイス肩幅 L も異なることを断っておく。V曲げの押し込み速度は $V=1\text{mm/min}$ で行った。この速度を接着層のせん断変形速度に換算すると約 0.01mm/min 前後の値（せん断ひずみの大きな箇所での概算値）となり非常にゆっくりとした変形速度であり、本論文ではこの速度を準静的な押し込み速度として扱うことにする。

図5にV曲げにおける接着板の変形過程の一例を模式的に示す。(a)はダイス端部を支点とした三点曲げ状

Fig.4 Specimen and experimental set-up for V-bending test

Table 1 Experimental conditions of V-bending

Punch radius Rp (mm)	Lap length lp (mm)	Die span L (mm)
0.5, 5.0	30	20
	40	27
	50	34
	70	48

Fig.5 Schematic illustration of deformation behavior of adhesively bonded sheet metals during V-bending process

態（以下、自由曲げ⁽⁶⁾と呼ぶ）である。さらにパンチの下降が進むと、接着板は(b)を経て(c)のようにダイス肩からダイス斜面の途中へと当たりが移っていく。そして、さらに(d), (e)と進んでパンチとダイスの斜面の間で接着板はさらに加圧される。以下、(b)～(e)の過程を総称して加圧曲げ⁽⁶⁾と呼ぶ。なお、本実験における加圧曲げはいずれの実験においても(d)の寸前の(c)の状態を終了させることとし、最大押し込み荷重 P_{max} は11.8kNとした。これは、(d), (e)の過程では接着板に曲げおよび曲げ戻しの変形が生じ、せん断ひずみの値による接着層の強度評価が困難になると考えたからである。

図6にV曲げ試験後の試験片の例（ $l_p=50\text{mm}$, $L=34\text{mm}$, $R_p=0.5\text{mm}$ の場合）を示すが、フランジ折れ曲がり（カモメ折れ）もほとんど見られず良好な曲げ

Fig.6 Adhesively bonded specimen after V-bending
 ($l_p=50\text{mm}$, $L=34\text{mm}$, $R_p=0.5\text{mm}$, $P_{max}=11.8\text{kN}$)

Fig.7 Distribution of shear strain of adhesive layer after V-bending ($R_p=0.5\text{mm}$)

ができていることがわかる。ただし、曲げ部分では上下の板の相対的なずれ（接着層の大きなせん断変形）が観察される。図7には種々のラップ長さの試験片に対するせん断ひずみの分布を示す。この結果はパンチ先端の丸み半径 $R_p=0.5\text{mm}$ の場合であるが、 $R_p=5\text{mm}$ の場合にもほぼ同様な結果が得られている。この図から加圧曲げ後の接着層のせん断ひずみの分布は曲げ中心からわずかに離れたパンチ先端のR止まり近傍で最大となり（ R_p が5mmの場合はより顕著）、その後曲げ中心から離れるに従ってしだいに小さくなることがわかる。この結果は制振鋼板で確認されている結果⁽¹⁾と同様である。 R_p が5mmのものについては、最大せん断ひずみ $\gamma_{a(max)}$ は R_p が0.5mmのものより小さいが、ひずみの解消は R_p が0.5mmの方がはやく解消される。これらの接着層のずれ変形挙動は、パンチ先端の丸み半径 R_p 、ダイス肩幅 L および曲げの最終段階に加

(a) Load vs. displacement curve

(b) Distribution of shear strain of adhesive layer

Fig.8 Deformation behavior of adhesive layer in V-bending process ($l_p=50\text{mm}$, $L=34\text{mm}$, $R_p=0.5\text{mm}$)

えるパンチ荷重 P の大きさによって大きく変化するものである。ラップ長さ lp とせん断ひずみ分布との関係については、 lp が30mmの場合は R_p によらずいずれの箇所においてもかなり大きなせん断ひずみが生じている。 lp が30mmから40mmになると $\gamma_{a(max)}$ の値はわずかに小さくなるが、 lp が40mm以上になるとほとんど差がなくなる。これは加圧曲げにおいては必要以上にラップ長さ lp を長くしても最大せん断ひずれ $\gamma_{a(max)}$ をある値以上に小さくできないということを示している。なお、2・2節で引張りせん断試験における限界せん断ひずみが2.1～2.6であることを述べたが、接着板の曲げではこれを越えるせん断ひずみまではく離が生じていない点は興味深い（これらの実験中で $lp=30mm$ の場合にのみはく離が見られたが、その時のせん断ひずみはおおよそ3.2程度であった）。これは、引張りせん断試験ではSLJの接合端部に応力集中が生じるのに対して、V曲げ試験においてはこうした応力集中が生じないので破断延性が高められているものと思われる。

図8にV曲げ過程の変形挙動($lp=50mm$, $L=34mm$, $R_p=0.5mm$ の場合)を示す。(a)には押し込み荷重と押し込み変位の関係を、(b)には(a)の図中に示したA～F位置での接着層のせん断ひずみの分布を示す。この図から、接着層のずれ変形は自由曲げ過程(A, B点)ではさほど大きくないが、加圧曲げ過程(C～F点)の比較的初期の段階において急激に大きくなることがわかる。このことから、接着板のV曲げにおいてずれ変形を抑制するためには自由曲げ加工の方が加圧曲げ加工よりも適しているものと考えられる。

3・2 曲げ加工後の接着強度 図9(a)にV曲げ後の各部の接着強度を調べるために、V曲げ後の試験片を短冊状に切断した圧縮せん断用の試験片形状と寸法を示す。図9(b)にせん断試験概略図を示す。試験方法は試験片を上部と下部のせん断治具の間に挟み、これを両側から板で押さえて引張試験機で引張った。引張り速度は $V=0.1mm/min$ とした。その際、各摺動部にはワセリンを塗りテフロンシートを2枚挟み摩擦による影響を小さくするよう配慮した。最大せん断応力を求めるにあたっては摩擦分は差し引いた。

図10に、図7に示したV曲げ後の試験片に対するせん断試験の結果を示す。図中、破線はV曲げ前のずれ変形のない状態の試験片を短冊状に切断したものの接着強度であり、V曲げ後の接着強度を評価する上での基準となるものである。また、参考までに短冊状試験片の中央におけるせん断ひずみの値を記した。これらの結果より、せん断ひずみの大きい($\gamma_a=2.4\sim 3.0$)

Fig.9 Shearing test for strength evaluation of adhesive layer

Fig.10 Shear strength of adhesively bonded sheet which had been subjected to V-bending ($R_p=0.5mm$)

場合には接着強度 τ_a が明らかに低下しているが、せん断ひずみが比較的小さい($\gamma_a \leq 1.7$)場合にはせん断ひずみにより接着強度が低下することがないことがわかる。これは、せん断ひずみがあまり大きくならないように加工条件を設定すれば、接着後に曲げ加工を行っても接着強度は十分保たれるということであり、こうした技術の可能性を裏付ける結果である。

4. 曲げ変形解析にもとづく加工条件の検討

3章における実験結果から、接着板のV曲げには自由曲げ加工の方が加圧曲げ加工よりも適していることが明らかになった。このことから本章では、接着板のV曲げの変形解析を自由曲げ(三点曲げ)モードで行い、接着部のずれ変形の発生メカニズムやそれを抑えるための曲げ加工条件について検討を行う。

4.1 変形解析 図11に接着板の各層の変形を、図12に各層に作用する力とモーメントの関係を示す。図中、 γ_a , τ_a , t_a はそれぞれ接着層のせん断ひずみ、せん断応力および接着層の厚さである。また、 t_f , N_f , M_f はそれぞれ被着体の厚さ、被着体に生じる軸力と曲げモーメントである。ここで、被着体はKirchhoff-Loveの仮説に従うものとし、せん断変形を生じないと仮定するが、接着層はあらかじめ軸線に垂直であった平面が変形後も平面を保つが、その平面はかならずしも軸線には垂直とならず、せん断変形を許すものとする。この仮定は吉田ら⁽³⁾によって樹脂サンドイッチ鋼板の三点曲げの弾塑性解析に使われたものと同じである。

接着層の中央面をx軸、それに直交する方向をy軸とおくと、接着層の軸方向ひずみ ϵ_a は次のようになる。

$$\epsilon_a = \{\kappa_0 - (d\gamma_a/dx)\}y \quad \dots\dots\dots (3)^{*}$$

ここで、 κ_0 は接着層の中央面の曲率である。したがって、被着体①、②のひずみはそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= -\frac{1}{2}t_a\left(\frac{d\gamma_a}{dx}\right) + \kappa_0 y \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{2}t_a\left(\frac{d\gamma_a}{dx}\right) + \kappa_0 y \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。接着層中央面($y=0$)から板の中立面までの距離 y_n は、 $\epsilon_1=0$ とおくと

$$y = y_n = \frac{t_a}{2\kappa_0}\left(\frac{d\gamma_a}{dx}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となるから、被着体中央面から中立面までの距離を a とすると

$$a = \frac{1}{2}(t_a + t_f) - y_n = \frac{1}{2}(t_a + t_f) - \frac{t_a}{2\kappa_0}\left(\frac{d\gamma_a}{dx}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。なお、被着体中央面を原点位置とする $\tilde{y}$ 座標を考えると、被着体①、②のひずみはそれぞれ次のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \kappa_0(\tilde{y} + a) \\ \epsilon_2 &= \kappa_0(\tilde{y} - a) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

被着体①、②に働く軸力の合力はゼロとなるので、

(a) Adhesive layer

(b) Sheet metals

Fig.11 Deformation of adhesively bonded sheet metal

Fig.12 Stress resultants and bending moments acting on each layer

Fig.13 Three-point bending

*注 この場合の γ_a はせん断ひずみ γ_{xy} とは符号が逆になっている。すなわち、 $\gamma_a = -\gamma_{xy}$ である。同様に接着界面に作用するせん断応力についても $\tau_a = -\tau_{xy}$ として定義している。

①, ②には図12に示すようにそれぞれ N_f , $-N_f$ の力が作用しており, x 方向の力のつり合いより次式が得られる.

$$dN_f/dx = -\tau_a \quad \dots\dots\dots(8)$$

接着板全体のモーメントのつり合いは次式で与えられる.

$$2M_f + (t_a + t_f)N_f = M \quad \dots\dots\dots(9)$$

なお, 被着板のひずみ ε_1 , ε_2 が式(7)のように曲率 κ_0 と鋼板中立面位置 a の関数で与えられるので, 構成式(2)を考えると, N_f , M_f は次式のように κ_0 と a の陰関数として表わされることがわかる.

$$N_f = \int_{-t_f/2}^{t_f/2} \sigma_f d\tilde{y} = N_f(\kappa_0, a) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$M_f = \int_{-t_f/2}^{t_f/2} \sigma_f \tilde{y} d\tilde{y} = M_f(\kappa_0, a) \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで, σ_f は被着体に生じる応力である.

図13に示すような板とダイスの接触が二支点(支点間距離が L)である場合を考えると, 境界条件は, 次のように与えられる.

$$x=0 \text{ で } \gamma_a = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$x=lp/2 \text{ で } \kappa_0 = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

なお, 曲げモーメント M は次式で与えられる.

$$M = P(\xi \tan \theta_d + \eta)/2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで, 軸線上の座標点 $A(\xi, \eta)$ は既知ではないので, 数値計算過程における1ステップ前の曲率を用いて求めることとする.

計算は次の手順で行う.

- (i) 時刻 t における荷重 P を与える.
- (ii) $x=0$ における κ_0 と η を仮定する. これにより, 式(7), (9)~(11)から $a(0)$, $N_f(0)$, $M_f(0)$ が求まる.
- (iii) 式(6), (8)を x に関して数値積分することにより $\gamma_a(x)$, $N_f(x)$ が求まり, 式(9)より $M_f(x)$ が計算される. なお, 式(8)の数値積分に関しては, τ_a が式(2)のように γ_a の関数として与えられていることを用いている. また, 式(10), (11)より $\kappa_0(x)$, $a(x)$ を求める.
- (iv) 式(13)の境界条件を満足するまで, 初期値 $\kappa_0(0)$, $\eta(0)$ の修正をくり返す. なお, 支点と接合端部($x=lp/2$)の間で $\kappa_0=0$ となる場合も解となる.
- (v) 目標値(曲げ角 θ_d または曲げ荷重 P)になるまで, (i)~(iv)のプロセスをくり返す.

4.2 数値シミュレーションによる曲げ加工条件の検討 図14に自由曲げによるV曲げ($\theta_d = 45^\circ$)の場合の解析結果と実験結果の比較を示す. 解析結果と実験結果はよく一致しており, 本解析方法の

妥当性が明らかになった. また, 図7で示したように加圧曲げ後の接着層のずれ変形がラップ長さ lp やダイス肩幅 L の大きさによらずかなり大きくなるのに対して, 図14からわかるように自由曲げによるV曲げでは, lp と L が大きいほどずれ変形が生じていないことがわかる. なお, せん断ずれに関してはダイス肩幅 L が支配要因であり, 同じ L に対しラップ長さ lp を変化させてもせん断ずれ自体は大きく変化しない. ただし, 3.1節で述べたように, ダイス肩幅に対して大きすぎるラップ長さ lp を選ぶとフランジ折れ曲がりが大

Fig.14 Comparisons between calculated and experimental results for bending-induced shear deformation of adhesive layer ($\theta_d = 45^\circ$)

Fig.15 Influence of strength properties of adhesive on shear strain

きくなるので好ましくない。

接着剤の変形抵抗(強度)の違い($l_p=30\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $\theta_d=45^\circ$ とした場合)が接着層のせん断変形挙動に及ぼす影響をシミュレーションにより調べた結果を図15に示す。本結果は図3で示した接着剤の変形抵抗を用い、さらにその1.5倍および2倍したものについて計算し比較してある。この結果から、接着強度が高くなると接着層のずれ変形が生じにくくなることがわかる。このことは、速度依存性の強い本接着剤を用いた高速での曲げ加工では、さらに接着層のせん断ずれを抑えることができることを示唆するものである。

5. 結 言

本研究では、接着接合した金属薄板のプレス成形という新しい技術の可能性について検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 接着接合した板の曲げにおいては上下板の大きなずれ(接着層のせん断変形)が見られるが、せん断ひずみがある値(今回の実験においては1.7以下)を越えないように加工条件を設定すれば、接着後に曲げ加工を行っても接着強度は十分保たれる。このことから、接着接合後にプレス成形などにより加工して製品を作るという技術の可能性が明らかになった。

(2) 接着板のV曲げ過程における接着層のずれ変形は、自由曲げ過程よりも加圧曲げ過程の比較的初期の段階で急激に大きくなる。また、加圧曲げ後の接着層のずれ変形は、ラップ長さやダイス肩幅の大きさによらずかなり大きくなる。これらのことから、接着板のV曲げ加工には自由曲げ加工(加圧曲げ加工を避けること)が推奨される。

(3) ダイス肩幅に対して長いラップ長さをとることはフランジ折れ曲がり(カモメ折れ)を生じるために避ける必要がある。自由曲げ時の接着層のずれ変形

は、ラップ長さが長く、ダイス肩幅が大きいほど生じにくい。

(4) 接着板のV曲げ時の変形解析を自由曲げ(三点曲げ)モードで行った。解析結果は実験結果とよく一致し、本解析方法の妥当性が明らかになった。本解析を用いた数値シミュレーションは、接着接合した金属薄板のV曲げ(自由曲げ)加工に対する接着強度の評価、加工条件の設定に有効である。

(5) 本実験で用いた接着剤は延性が高く、また非常に強い速度依存性がある。この速度依存性に関する特性は接着剤の変形抵抗が大きいほど接着層のせん断変形が小さくなるという解析結果から考えると、接着後の高速プレスでの曲げ加工という技術を考える上で好ましい特性であるといえる。

なお、本研究を行うにあたり、接着剤は電気化学工業(株)の田口広一氏より提供していただいた。また、軽金属学会アルミニウム構造接着接合部会所属の多くの委員の方々に貴重な御助言をいただいた。さらに、試験片や実験治具の製作では広島大学工学部の廣田秀徳技官と広島商船高等専門学校の森下義博技官に御尽力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 由田征史, 塑性と加工, 26-291(1985), 394.
- (2) 牧野内昭武・吉田茂・小川秀夫, 塑性と加工, 29-330(1988), 755.
- (3) 吉田総仁・本屋敷洋一, 塑性と加工, 30-340(1989), 716.
- (4) 伊藤耿一・佐川武俊・寺田正徳, 塑性と加工, 30-346(1989), 1490.
- (5) 池上皓三ほか7名, 機論, 63-608, A(1997), 830.
- (6) 日本塑性加工学会編, 曲げ加工(塑性加工技術シリーズ14), 1995, 46.