接着接合した金属薄板の塑性曲げに及ぼす温度・速度の影響*

吉田 哲哉^{*1}, 瀧口 三千弘^{*2}, 吉田 総仁^{*3}Effects of Temperature and Forming Speed on Plastic Bending
of Adhesively Bonded Sheet MetalsTetsuya YOSHIDA^{*4}, Michihiro TAKIGUCHI and Fusahito YOSHIDA^{*4} Department of Electronic Control, Hiroshima National College of Maritime Technology,
4272-1 Higashino, Osakikamijima-cho, Toyota-gun, Hiroshima, 725-0231 Japan

This paper deals with the temperature-dependent elasto-viscoplasticity behaviour of a highly ductile acrylic adhesive and its effect on plastic bending of adhesively bonded sheet metals. Tensile lap shear tests of aluminium single-lap joints were performed at various temperature of 10-40°C at several tensile speeds. Based on the experimental results, a new constitutive model of temperature-dependent elasto-viscoplasticity of the adhesive is presented. From V-bending experiments and the corresponding numerical simulation, it was found that the gull-wing type geometrical imperfection of the V-bent sheet is suppressed by high-speed forming at a lower temperature.

Key Words: Plastic Working, Bending, Adhesive Joints, Temperature and Rate-dependent Shear Strength, Experimental Strain Analysis, Numerical Analysis, Constitutive Equation

1. 緒言

著者らは接着接合した金属薄板の塑性加工という、これまで構造接着の分野ではあまり議論されることのなかった技術の提案を行い、その可能性や実現に向けた問題点を解明すべく研究を進めている^{(1)~(4)}。このときの最大の問題は、曲げ成形中の接着層のせん断変形(ずれ変形)であり、それに起因するはく離や形状不良(フランジ折れ曲がり、いわゆるカモメ折れ現象)⁽⁵⁾である。それを抑えるために、既報では接着ラップ長さに対してダイス肩幅を大きくすること⁽²⁾と、接着剤の変形抵抗の速度依存性を利用して高速に加工することが有効であること⁽⁴⁾を、実験と対応するシミュレーションにより確認した。一般的に高分子接着剤の変形

は、ランダム配置された鎖状分子の応力による再配列で、これは熱活性化過程であるので、変形抵抗(応力)は温度と速度に強く依存する。

本研究では、接着剤の弾粘塑性特性が温度と速度に強く影響されることを考え、接着接合金属板の加工に及ぼすその両方の影響について検討した。接着接合板の成形技術という応用を考えると、加工現場の雰囲気温度が必ずしも管理されているとは限らないので、温度が成形品の形状精度に及ぼす影響などを知っておくことは格別重要である。また、温度が管理できる場合には、本研究で得られる成果は温度と成形速度を最適に設定するために直接的指針を与えることになる。

具体的には、まずはじめに高延性高強度アクリル系接着剤の弾粘塑性特性に及ぼす温度の影響を、単純重ね合わせ継手引張りせん断実験により調べた。この結果をもとに、接着剤の温度・速度依存型弾粘塑性構成式を導いた。この構成式は既報⁽⁶⁾で提案した弾粘塑性構成式の枠組みに温度依存性を加えたものである。さらに、接着接合金属板の曲げ加工における成形不良を抑えるための最適な温度・速度条件を、実験と対応する数値シミュレーションにより明らかにした。

* 原稿受付 2006 年 8 月 17 日。

^{*1} 正員, 広島商船高等専門学校電子制御工学科(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野 4272-1)。^{*2} 正員, 広島商船高等専門学校商船学科。^{*3} 正員, 広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)。

E-mail: yoshida@hiroshima-cmt.ac.jp

2. 接着剤の応力-ひずみ関係の

温度・速度依存性挙動とそのモデル化

2.1 実験 接着剤には常温硬化型の二液主剤・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。本研究では強度と延性に及ぼす影響を調査するため、単純重ね合わせ継手を用いた引張りせん断試験を、10℃から40℃までの種々の温度 (加工現場の雰囲気温度を想定して決めた)、また0.01mm/minから100mm/minの試験速度において調べた。試験は、試験片全体をペルチェ素子制御による恒温チャンバー内に設置して行った。

図1に引張りせん断試験により得られた接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。それぞれ温度 T

が、(a)10℃、(b)20℃、(c)30℃、(d)40℃の場合である。なお、図中のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の値は、 $\dot{\gamma} = V/t_0$ により求めたものである。 t_0 は接着層厚さで、これは0.1mmを目標にしたが、実測値は0.097～0.128にばらついていた。なお、図中の各曲線は後述する温度・速度依存型弾粘塑性構成式による計算結果である。さらに図2には、一例として、 $\gamma = 1.0$ の時のせん断応力に及ぼす試験温度と速度の影響を示す。図より本接着剤のせん断応力に与える温度の影響が、10℃から40℃の範囲で試験速度に関わらずほぼ線形的に変化することがわかる。

2.2 温度・速度依存型弾粘塑性構成式

図1と図2の実験結果及びこれまでの研究の成果⁽³⁾を基に、温度と速度依存性の両方を考慮した新たな本接着剤の構成式の定式化を次のように行った。

接着剤のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、次式に示すような弾性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ の和からなる

Fig.1 Shear stress-strain curves of adhesive

ものとする。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

弾性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ についてはHookeの法則を仮定し、次式のように表す。

$$\dot{\gamma}_e = \frac{\dot{\tau}}{G} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\dot{\tau}$ はせん断応力速度、 G は横弾性係数である。粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ については、基本的枠組みとして超過応力 (overstress) 理論^{(6)~(8)}を用い、次式のように表現する。

$$\dot{\gamma}_p = \left[-\frac{1}{b} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau - (\tau^* + C\dot{\gamma}_p^n)}{D(1 + k\dot{\gamma}_p^a)} \right\} \right]^{\frac{1}{m}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 τ^* , C , n , D , k , a , b 及び m は材料定数である。なお、材料定数中、 G , τ^* , C 及び D については温度の影響を考慮するため、20℃における G_{20} , τ_{20} , C_{20} 及び D_{20} の値を基準として用い、次に示す関数で表す。

$$G = G_{20}\phi_1(T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau^* = \tau_{20}\phi_2(T), \quad C = C_{20}\phi_2(T) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$D = D_{20}\phi_3(T) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\phi_i(T)$ ($i=1,2,3$) は温度の影響を考慮する関数であり、次のように表す。

$$\phi_i = 1 + w_i \left(1 - \frac{T}{T_{20}} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 T は温度であり、 $T_{20} = 20^\circ\text{C}$ である。 w_i ($i=1,2,3$) は材料定数で、 $w_1=0.85$, $w_2=0.72$, $w_3=0.05$ である。表1に温度20℃時の各種材料定数を示す。

図1と図2において、各プロット記号が実験結果で

Fig. 2 Effects of temperature and strain rate on the flow stress (at $\gamma=1.0$)

Fig. 3 Effect of shear strain rate on limit shear strain of single-lap joint tested at various temperature

Table 1 Material parameters of acrylic adhesive resin (at $T=20^\circ\text{C}$)
(M-372-20 Hardrock, Denki-Kagaku kogyo, Co. Ltd.)

G	τ^*	C	n	D	k	a	b	m
(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)				
250	4.0	3.0	0.60	2.67	5.65	0.183	2.39	0.352

あり、実線は前述の構成式で表したものである。図において実験結果とシミュレーション結果はいずれもよく一致しており、本研究で提案した温度・速度依存性を考慮した構成式が妥当であることがわかる。

図3に温度の違いによるせん断ひずみ速度と限界せん断ひずみ (接着層のはく離の開始に伴い、引張りせん断応力が急速に低下しはじめる時点のひずみ) の関係を示す。本結果から温度が高くひずみ速度が小さいと限界せん断ひずみは大きく、温度が低くひずみ速度

が大きいほど限界せん断ひずみは小さいことがわかる。接着板の塑性加工時の接着層のはく離を考える上での重要なデータである。

3. 接着板の塑性曲げに及ぼす温度・速度の影響

3.1 実験方法 被着体には板厚が1mmのアルミニウム合金板 (A5083P-O) を用いた。図4に被着体の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線⁽¹⁾を示す。本

Fig.4 Stress-strain curve of aluminium (A5083) sheet

結果は引張り速度0.1mm/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⁽¹⁾

$$\sigma = C_{al} \epsilon^{n_{al}} \quad (C_{al} = 643, n_{al} = 0.316) \quad \cdots \cdots (8)$$

で表したものである。解析にはこれを被着体の構成式として用いる。なお、本アルミニウム合金板の引張強度には厳密には温度及び速度依存性があるが⁽⁹⁾、本実験の温度範囲(10℃から40℃)では、応力-ひずみ関係に及ぼす温度・速度依存性は極めて小さいので、本研究ではこれを無視した。

本論文におけるV曲げ試験は、これまでの研究成果^{(1),(2)}をもとに、接着層のずれを抑えるのに効果的な自由曲げ⁽¹⁰⁾で行った。図5(a)に試験片形状と寸法を、図5(b)にV曲げ試験の概略図を示す。実験はパンチ、ダイス、試験片の全てをペルチェ素子制御による恒温チャンパー内に入れて行った。図中Pはパンチ荷重、 l_p は接着ラップ長さ、Lはダイス肩幅、xは曲げ中心からの距離、 λ_s は接着層のせん断ずれ量、 t_s は接着層の厚さである。接着層のせん断ひずみ γ は、図に示すように試験片の接着部側面に1mm間隔のけがき線を入れ、上下の被着体のずれ量 λ_s をスキャナー(EPSON GT-7600U)で取り込み計測し、 $\gamma = \lambda_s / t_s$ により求めた。なお、 λ_s の読み取り誤差はおおよそ $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度であった。接着層の厚さは、接着ジグを作成し0.1mmになるようにスペーサを用いてコントロールした。本実験に用いた試験片の接着層の厚さは0.103～0.116であった。

表2にV曲げ条件を示す。なお、温度の違いによる影響を明確にするため、接着ラップ長さ50mmに対してダイス肩幅を20mmと短くし、カモメ折れを生じやすくした。パンチ速度は500mm/minとしたが、1mm/min, 20mm/minの場合(加工時の温度は40℃)につい

Fig.5 Specimen and experimental set-up for V-bending test

Table 2 Experimental conditions of V-bending

Lap length $l_p(\text{mm})$	Die span $L(\text{mm})$	Punch speed $V(\text{mm/min})$	Temperature $T(^{\circ}\text{C})$
50	20	500 (1, 20)	10
			25
			40

ても実験を行い、加工速度との関係についても比較検討した。押し込み量はいずれも8mmとした。

3・2 曲げ解析 接着板のV曲げの変形解析を自由曲げ(三点曲げ)として行った。本論文での解析における新規性は、接着層に対して式(1)～式(7)で示した温度・速度依存型構成式を用いているところにある。このことにより、変形挙動に及ぼす温度の影響を解析的に明らかにすることができる。なお、変形解析法については、既報^{(1),(4)}を踏襲しているので、詳細はそれを参照されたい。

3・3 結果と考察 図6に温度の違いによるV曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較を示す。この図から、温度が高いと、接着層のせん断ひずみ(ずれ変形)は大きくなるが、温度が低くなるとせん断ひずみはかなり小さくなるのがわかる。これは温度が低くなるに従い接着層の変形抵抗が上昇し、せん断変形が生じにくくなるためである。図

7, 図8に温度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較を示す. 図7が実験結果であり, 図8が対応する解析結果である. それぞれ温度 T が, (a) 10°C , (b) 25°C , (c) 40°C の場合である. また, 図9に図7と図8に示したV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較を示す. これらの結果から明らかなように, 温度が高い場合には非常に大きなカモメ折れが生じている. それに対して, 温度が低い場合にはカモメ折れがかなり小さいことがわかる. このカモメ折れ現象は接着層のせん断変形(ずれ変形)によって上下のアルミニウム板それぞれに大きな曲げモーメントが生じることに起因するものであり, ずれ変形についての図6の結果と, カモメ折れについての図7~図9の結果から, 温度が高い場合は接着層のずれ量が大きく, その結果, 大きなカモメ折れが生じていることがわかる. 一方, 温度が低くなるほど接着層のずれ量が小さくな

Fig.6 Effect of temperature on shear strain in the adhesive layers by V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $V=500\text{mm/min}$, $\eta(0)=8\text{mm}$)

(a) $T=10^{\circ}\text{C}$

(b) $T=25^{\circ}\text{C}$

(c) $T=40^{\circ}\text{C}$

Fig.7 Effect of the temperature on the sheet geometries in V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $V=500\text{mm/min}$, $\eta(0)=8\text{mm}$, experimental results)

(a) $T=10^{\circ}\text{C}$

(b) $T=25^{\circ}\text{C}$

(c) $T=40^{\circ}\text{C}$

Fig.8 Numerical simulation of V-bending corresponding to the experimental results shown in Fig.7

Fig.9 Effect of the temperature on angle of gull-wing bend in V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $V=500\text{mm/min}$, $\eta(0)=8\text{mm}$)

り、カモメ折れも小さくなっている。

加工速度の違いが接着板の曲げ加工に及ぼす影響については既報⁽⁴⁾で議論したところであり、接着板の曲げ加工には加工速度が速いほうが好ましいとの結論を得ているが、加工時の温度は室温で行ったものであった。図10に温度が40°Cの場合の加工速度の違いによるV曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較を示す。また、図11、図12に図10に対応するところのV曲げ後のカモメ折れの比較を示す。図

11が実験結果であり、図12が解析結果である。それぞれパンチ速度 V が、(a)1mm/min、(b)20mm/minの場合である。なお、 $V=500\text{mm/min}$ の場合については、図7(c)と図8(c)を参照されたい。また、図13に図11と図12に示したV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較を示す。これらの結果から明らかに、温度が高く加工速度が遅い場合には、予想通り接着層のせん断ひずみは非常に大きくなり、それに伴い接着板にも大きなカモメ折れが生じている。

Fig.10 Effect of the forming speed on shear strain in the adhesive layers by V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $T=40^\circ\text{C}$, $\eta(0)=8\text{mm}$)

(a) $V=1\text{mm/min}$

(b) $V=20\text{mm/min}$

Fig.11 Effect of the forming speed on the sheet geometries in V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $T=40^\circ\text{C}$, $\eta(0)=8\text{mm}$, experimental results)

(a) $V=1\text{mm/min}$

(b) $V=20\text{mm/min}$

Fig.12 Numerical simulation of V-bending corresponding to the experimental results shown in Fig.11

Fig.13 Effect of the forming speed on angle of gull-wing bend in V-bending ($l_p=50\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $T=40^\circ\text{C}$, $\eta(0)=8\text{mm}$)

なお、図10において $V=1, 20\text{mm/min}$ の場合は、図3に示した単純重ね合わせ継手における限界せん断ひずみを越えている部分があるが、外観からは接着層にはく離は見られなかった。これは、単純重ね合わせ継手では接合端部に応力集中が生じそこを起点としてはく離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ためと思われる。しかし、既報⁽¹⁾でも述べたように、外観にはく離が認められないが接着強度はかなり低下しているものと思われる。塑性加工時には図3に示す限界せん断ひずみデータを参考に、加工時の接着層のひずみがそれ以下になるように加工条件を設定することが推奨される。

温度の影響について調べた図6～図9の結果、さらには高温下での加工速度の影響について調べた図10～図13の結果、そのいずれにおいても実験結果と解析結果とはよく一致しており、接着剤の温度・速度依存型構成式を用いた本解析の妥当性が明らかになった。なお、図7と図8、図11と図12において、厳密にはV曲げ後の曲げ角度について、実験結果の方が解析結果に比べて少し大きくなっている（計算結果ではダイス間の曲げ角度がほぼ 90° なのに対し、実験結果ではそれ以上になっている）。これは、実験結果がV曲げ後に除荷した後の形状（スプリングバック後）であるのに対して、解析結果がV曲げ終了時の除荷前の形状（スプリングバック前）であることによる。また、図6と図10の実験結果と解析結果において、せん断ひずみのピーク以降に両者に差が生じている。このことについては現時点でその理由が明確ではないので、今後さらに細かく検討する必要がある。

これまでの一連の研究において、カモメ折れを抑え

るためには、接着ラップ長さに対してダイス肩幅をできるだけ大きくすること⁽²⁾と、加工速度を速くすることが有効であるということ⁽⁴⁾を報告したが、これらのことと加工現場の雰囲気温度は低い方がよいという本研究成果を併用することにより、接着板のV曲げ時に生じるカモメ折れをさらに小さく抑えることができるものと考えられる。

4. 結 言

接着接合した金属薄板を用いた曲げ加工に関する一連の研究として、本研究では接着剤の温度・速度依存性に注目した。とりわけ加工現場の雰囲気温度の影響について検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) 本研究に用いている接着剤のせん断強度特性には、非常に強い温度・速度依存性があること、さらには温度とひずみ速度の違いによって限界せん断ひずみが異なることが明らかになった。また、得られた結果をもとに温度と速度の依存性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式を提案した。

(2) 温度を低くすることにより、接着層に生じるせん断ひずみ（ずれ変形）と、接着板に生じるフランジ折れ曲がり（カモメ折れ）を小さく抑えることができる。これは接着剤の強度特性に起因するものであり、低温で加工することにより接着剤の強度が増し、せん断変形抵抗が大きくなるため接着剤のせん断変形が生じにくくなるためである。

(3) 接着板のV曲げの変形解析を、著者らの提案した接着剤の温度・速度依存型構成式を用いて行った。解析結果と実験結果はよく一致し、本解析の妥当性が明らかになった。

接着板の曲げ加工に関するこれまでの研究を通して、接着板の曲げ加工は低温かつ高速で行うことが望ましいということが明らかになった。

本研究を行うにあたり、試験片や実験治具の製作において広島商船高等専門学校の学生課実験実習係の森下義博氏に御尽力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は日本学術振興会平成18年度科学研究費補助金・基盤研究(C)(課題番号：18560123)の助成を受けて行われたことを付記する。

文 献

- (1) Takiguchi, M. and Yoshida, F., Deformation Characteristics and Delamination Strength of Adhesively Bonded Aluminium Alloy Sheet under Plastic Bending, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.67, No.655

- (2001), pp.580-587.
- (2) Takiguchi, M. and Yoshida, F., Plastic Bending of Adhesive-bonded Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.113 (2001), pp.743-748.
- (3) Takiguchi, M. et al., Rate-dependent Shear Strength and Stress Relaxation of Adhesive Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.68, No.665 (2002), pp.126-131.
- (4) Takiguchi, M. and Yoshida, F., Effect of Forming Speed on Plastic Bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.68, No.672 (2002), pp.1236-1242.
- (5) Yoshida, M., Press Formability of Vibration-Damping Sheets, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol.26, No.291 (1985), pp.394-399.
- (6) Liu, M.C.M. and Krempl, E., A Uniaxial Viscoplastic Model Based on Total Strain and Overstress, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.27 (1979), pp.377-391.
- (7) Chaboche, J. L. and Rousselier, G., On the Plastic Viscoplastic Constitutive Equations - Parts I and II, *Transaction of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.105 (1983), pp.153-164.
- (8) Yoshida, F., A Constitutive Model of Cyclic Plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol.16 (2000), pp.359-380.
- (9) Naka, T. and Yoshida, F., Tensile Behavior of Al-Mg Alloy Sheet at Wide Range of Strain Rate at Various Temperature, *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Symposium on Advances in Engineering Plasticity and Its Applications*, (1996), pp.413-418.
- (10) The Japan Society for Technology of Plasticity ed., *Bending*, (1995), p.46, CORONA PUBLISHING CO., LTD.