

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：55402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560129

研究課題名（和文） 高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動のモデル化と接着接合金属板プレス成形解析への適用

研究課題名（英文） Modeling of viscoplastic behavior of highly ductile acrylic adhesive under cyclic torsion and its application for press-forming analysis of adhesively bonded sheet metals

研究代表者

瀧口 三千弘 (TAKIGUCHI MICHIMIRO)

広島商船高等専門学校・商船学科・教授

研究者番号：10163346

研究成果の概要（和文）：高延性接着剤を用いて接合した金属板のプレス成形加工時に生じる被着体の曲げ・曲げ戻し変形による接着層の繰返しせん断変形に注目し、主として次のことを行った。高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動把握実験を行い、その挙動を表現できる構成モデルを構築した。得られた構成式を汎用有限要素解析プログラムのユーザーサブルーチンに組み込んだ。接着板の引張り曲げ・曲げ戻し及びプレス成形加工（V曲げ加工：加圧曲げ）の各種実験及び解析を行った。

研究成果の概要（英文）：The cyclic torsion test was carried out by tubular butt-joint with highly ductile acrylic adhesive, and it was investigated the relation between shear stress and shear strain with various experimental conditions. In addition, the shear stress-strain constitutive equation was considered. And the constitutive equation was incorporated into the user subroutine of a general purpose finite element analysis program. Subsequently, the experiments and analysis of the stretch-bending/unbending and die-bending for adhesively bonded sheet metals were performed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：成形加工・接着接合板・接着剤の繰返し粘塑性・構成式

1. 研究開始当初の背景

(1) 今日市販されている構造用接着剤の中には非常に高い延性を有し、しかもはく離強度や衝撃強度に優れているものがある。申請者らはこうした特性を有するアクリル系の接着剤に注目し、「接着板の塑性加工」という新技術の提案を行い、一連の研究を進めているところである。

(2) これまでの研究から、接着板の塑性加

工においては、接着層に生じる大きなずれ変形（せん断変形）と接着板に生じる形状不良（カモメ折れ）が大きな問題点であることが明らかになっている。また、こうしたことから加工後の正確な製品形状予測も非常に難しい。なお、これまでの研究はV曲げ加工（三点曲げの範囲）で行われてきたものであり、接着層の挙動は曲げによる一方向せん断である。

(3) プレス成形加工は、これまでの三点曲げの範囲で行われたV曲げ加工とは異なり、被着体の曲げ・曲げ戻し変形に伴って接着層に繰返しせん断変形挙動が生じることが大きな特徴である。

(4) 本技術の実現には数値解析による成形後の高精度な製品形状予測が必要不可欠であり、プレス成形時の接着剤の変形挙動及び応力-ひずみ関係を精度よく表現できる材料モデルの確立が重要である。

(5) これまでの研究において、樹脂の繰返し変形を考慮した材料モデルについての報告例はあるが、接着剤の繰返しせん断変形を考慮した材料モデルに関する報告例はない。

2. 研究の目的

本研究では、高延性接着剤を用いて接合した金属板（以下、接着板と呼ぶ）のプレス成形加工時に、被着体が曲げ・曲げ戻し変形を受ける過程で接着層に繰返しせん断変形が生じることに注目し、高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動のモデル化を行い、接着板のプレス成形における高精度な製品形状予測の確立を目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、次の手順により遂行する。

(1) 高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動把握実験を行い、その構成式を構築する。図1に試験片と試験の概略図を示す。なお、本研究で使用する接着剤は、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）とする。

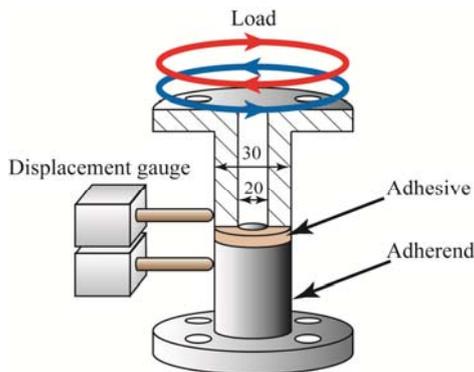


図1 試験片と試験の概略図

(2) 汎用有限要素解析プログラムへ、提案した構成式を組込む。

(3) 接着板の引張り曲げ・曲げ戻し実験及び解析を行い、得られた構成式及び解析の妥当性を検証する。図2に実験装置を示す。本装置は、接着板（厚さ約 2.1mm）を内側ダイと外側ダイとの間に挟み（隙間 2.2mm）、90度曲げて引き抜くというものである。被

着体には板厚が 1mm の冷間圧延鋼板（以下、SPCC と呼ぶ）と、同じく板厚が 1mm の銅板 C110P（以下、Cu と呼ぶ）を用いる。図3に被着体の応力-ひずみ曲線を示す。

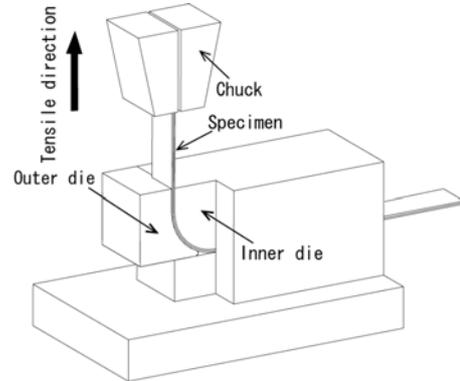


図2 引張り曲げ・曲げ戻し実験装置

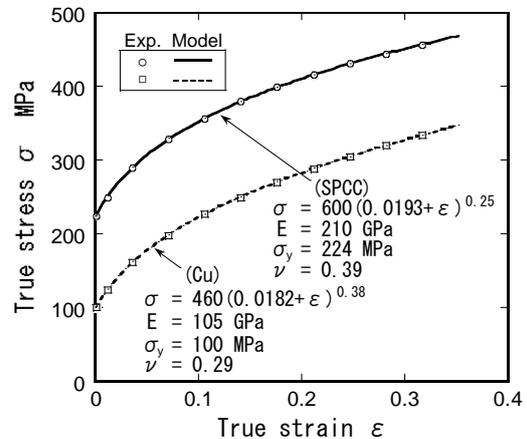


図3 被着体の応力-ひずみ曲線

(4) 接着板のプレス成形加工（V曲げ加工：加圧曲げ）実験及び解析を行う。被着体には図3に示した SPCC を用いる。図4にV曲げ加工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態（自由曲げと呼ぶ）である。さらにパンチの下降が進むと、接着板は(b)を

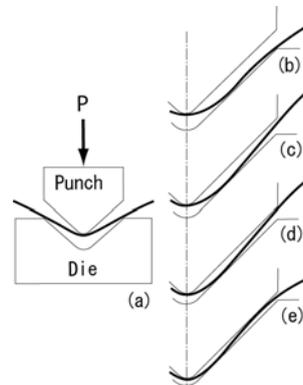


図4 V曲げ加工における接着板の変形過程の一例

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と呼ぶ。

(5) 本研究の成果を、高精度な製品形状予測の観点から総括する。

4. 研究成果

(1) 接着剤の繰返し粘塑性挙動とそのモデル化：一例として、図5にせん断ひずみ $0 \rightarrow 0.47 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0$ を1サイクルとしたときの繰返しねじり試験の結果を示す。せん断ひずみ速度 0.002 s^{-1} の場合である。図6に、せん断ひずみ速度の違い (0.002 s^{-1} , 0.02 s^{-1} , 0.2 s^{-1}) による比較を示す。せん断ひずみ幅 ± 0.5 の場合である。

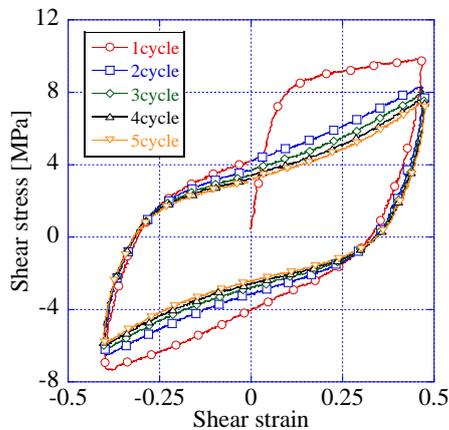


図5 繰返しねじり試験の結果(その1)

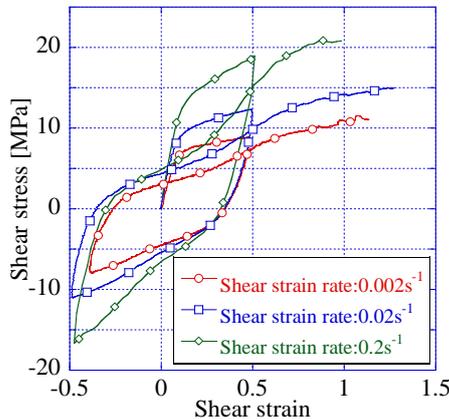


図6 繰返しねじり試験の結果(その2)

繰返しねじり試験の結果より、本接着剤には、①せん断ひずみ速度の増加に伴い変形抵抗が増加する速度依存性、②繰返し変形による繰返し加工軟化、③繰返し加工軟化後のせん断応力が急増、④せん断応力の急増後の単純ねじり試験結果への収束という特徴があることがわかった。こうした特徴に注目し、応力-ひずみモデル(構成式)の構築を行っ

た。詳細については、主な発表論文等〔雑誌論文〕④を参考にさせていただきたい。

図7に、繰返しねじり試験の結果と、得られた構成式により計算された結果(せん断ひずみ速度 0.02 s^{-1} の場合)についてのせん断応力-せん断ひずみ関係の比較の一例を示す。こうした結果から、各せん断ひずみ速度についての繰返し加工軟化を比較的精度良く表現できることがわかった。逆反り開始のせん断ひずみの変化についてはもう少し検討する必要がある。

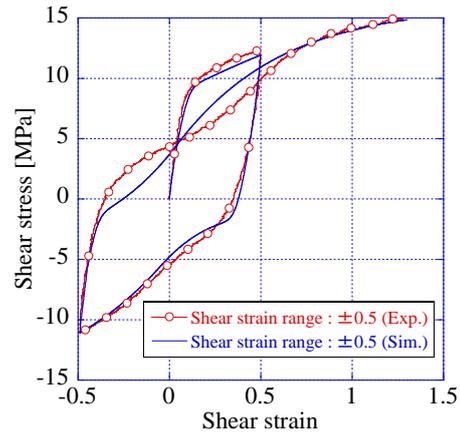


図7 実験結果と解析結果の比較の一例

(2) 汎用有限要素解析プログラムへの提案した構成式の組み込み：変形速度依存性・温度依存性を有する高延性アクリル性接着剤の変形挙動を有限要素法にて再現することを目的に、複素数階微分法(田中真人、藤川正毅、複素数階微分を用いた整合接線剛性の数値近似と大変形問題への応用、日本機械学会論文集A編、77-773、2011、pp.27-37)を汎用有限要素解析プログラム MSC.Marc2010のユーザーサブルーチンに導入した。詳細については、主な発表論文等〔学会発表〕①を参考にさせていただきたい。

構成式が組み込まれた有限要素解析の妥当性を検討するために、一要素単軸引張-圧縮解析を行った。図8にひずみ速度 $0.1 (1/\text{sec})$ と $0.001 (1/\text{sec})$ の場合における繰返し応力-ひずみ関係を示す。この結果より、接着材

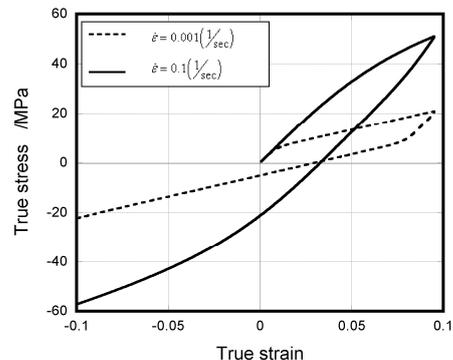
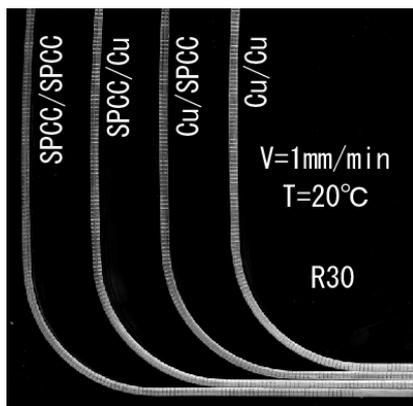


図8 引張圧縮応力-ひずみ関係

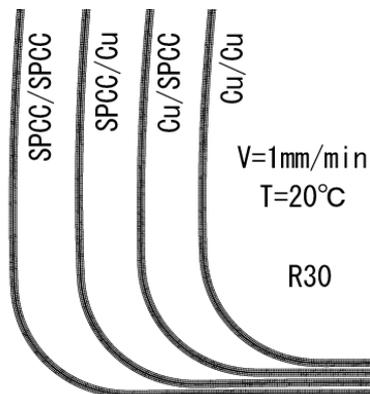
の弾性、その後の非常になだらかな非弾性挙動を再現できていることがわかる。また、圧縮変形時のパウシンガー効果や速度依存性もよく再現されている。本結果は別の数値解析結果とも一致しており、複素数階微分により、接着材のような変形速度に依存する場合の物体の変形を的確に再現できることがわかる。

(3) 接着板の引張り曲げ・曲げ戻し実験及び解析：一例として、図9にダイ半径がR30の場合の各種接着板の形状の比較を示す。さらに、図10に図9に対応したところの接着層のずれ変形の挙動を示す。

本研究の主な結論は、次のとおりである。
 ①接着板を90度曲げて引き抜くと、接着層の曲げによるずれ変形はダイコーナーに入る少し前から生じ始め、コーナーの途中から曲げ戻しが始まる。
 ②接着板の曲げ加工にはダイ半径の影響が大きい。
 ③二つの被着体の内いずれかに引張強さの小さな材料を用いると、接着層のずれ変形を小さく抑えることができる。
 ④曲げ加工は高速で行うことが望ましい。
 ⑤解析は、実験結果を比較的良好に表現できる。



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図9 各種接着板の形状の比較 (ダイ半径 R30 の場合)

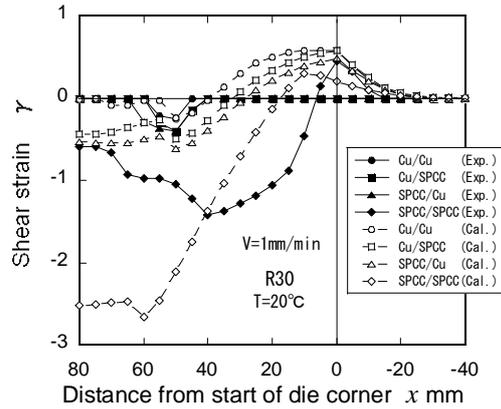
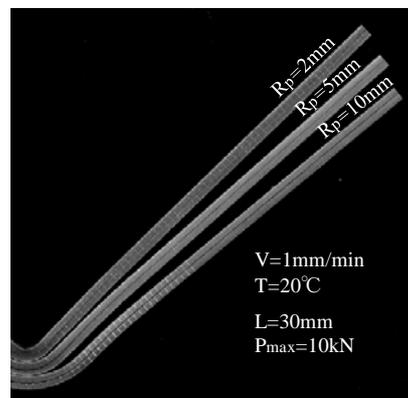


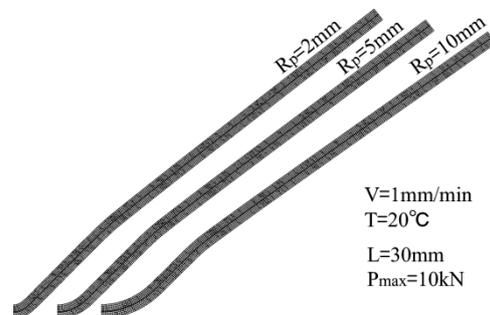
図10 図9に対応したところの接着層のずれ変形の挙動

(4) 接着板のプレス成形加工 (V曲げ加工：加圧曲げ) 実験及び解析：一例として、図11にパンチ半径の違いによる加圧曲げ後の形状の比較を、そして図12に対応するところ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。

本研究の主な結論は、次のとおりである。
 ①加圧曲げ過程における被着体の曲げ・曲げ戻し変形、さらにはそれにもなって生じる接着層の繰返し変形挙動を実験と解析の両方で確認することができた。ただし、その大きさは僅かであった。
 ②パンチ半径を大きくす



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図11 パンチ半径の違いによる加圧曲げ後の形状の比較

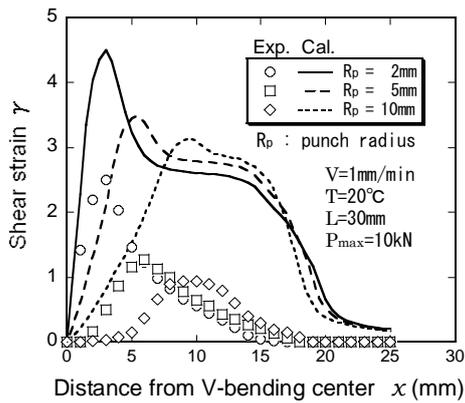


図12 図11に対応したところの接着層のずれ変形の挙動

ると、この実験条件下では形状不良(カモメ折れ)は大きくなるが、せん断ひずみは逆に小さくなる。③高速加工を行うと、加圧曲げ加工においても自由曲げの場合と同様に、接着層のせん断ひずみは小さくなる。④実験結果と解析結果は全体的な傾向はあっているものの、厳密には解析結果の方が実験結果よりもかなり大きい。

(5) その他の知見：本研究を遂行する中で、接着接合した金属薄板の塑性曲げ加工に及ぼす接着層厚さの影響について知見が得られた。詳細については、主な発表論文等〔雑誌論文〕③を参考にしていただきたい。なお、本研究はV曲げ加工(三点曲げ状態)で行われたものであり、変形解析法の詳細及び解析に用いた接着剤の構成式については、既報の参考文献〔①瀧口三千弘、吉田総仁、日本機械学会論文集A編、67-655、2001、pp. 580-587、②吉田哲哉、瀧口三千弘、吉田総仁、日本機械学会論文集A編、73-726、2007、pp. 292-299〕を参照されたい。

図13に、接着層厚さの違いによるV曲げ後の接着板のカモメ折れ角度の比較を示す。本結果から、接着層の厚さが厚くなるほど接着板のカモメ折れが大きくなっていることがわかる。形状不良を抑えるという意味では、

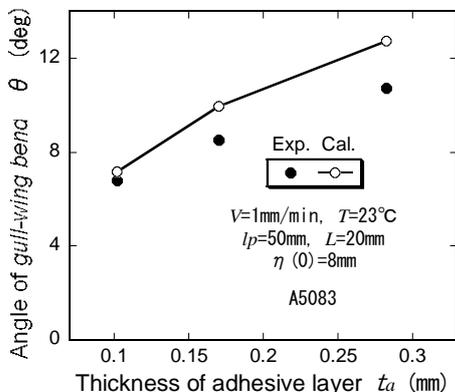


図13 接着層厚さの違いによるV曲げ後の接着板のカモメ折れ角度の比較

接着層の厚さは薄い方がいいといえる。図14に、接着層厚さの違いによるV曲げ後の接着層に生じるずれ変形の比較を示す。本結果から、接着層厚さが厚くなるほど接着層に生じるせん断ひずみが小さくなっていることがわかる。したがって、接着層のせん断変形の観点(せん断ひずみが大きくなると、はく離が生じる恐れがある)からは、接着層の厚さは厚い方がいいといえる。

以上の結果を整理すると、接着板の曲げ加工においては、接着層の厚さは接着層にはく離が生じない範囲で、できるだけ薄い方がいいということが結論付けられる。

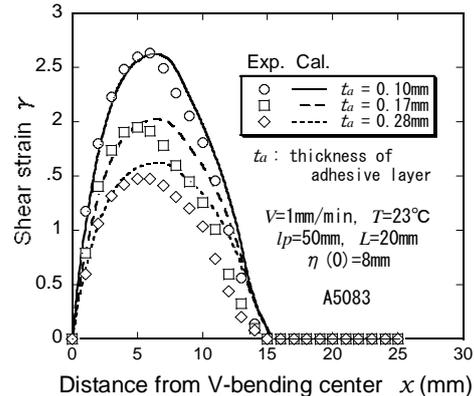


図14 接着層厚さの違いによるV曲げ後の接着板のずれ変形の比較

(6) 研究の総括：本研究で得られた内容を総括すると次のようになる。①高延性接着剤の繰返し粘塑性構成式を構築できた。②得られた構成式を複素数階微分法を用いて汎用有限要素法プログラムMSC.Marc2010のユーザーサブルーチンに組込んだ。③新たに提案した構成式の妥当性を検証するために、接着板の曲げ・曲げ戻し実験・加圧曲げ(V曲げ)実験及びそれらの解析を行った。④解析結果は、各種実験における接着板の変形及び接着層のせん断変形挙動を定性的には表せることがわかった。しかし、解析精度は十分ではなく、今後さらに研究を進めていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① M. Takiguchi, T. Tokuda, T. Yoshida, M. Funaki, H. Hamasaki, F. Yoshida, Plastic-bending of adhesively bonded dissimilar sheet metals, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 535-536, 2013, pp. 418-421
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.418

- ② M. Takiguchi, T. Yoshida, M. Funaki, F. Yoshida, Effects of Thicknesses of Sheet and Adhesive Layer on Plastic-bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 535-536, 2013, pp. 381-384
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.381
- ③ 瀧口三千弘, 吉田哲哉, 舟木弥夫, 吉田総仁, 接着接合した金属薄板の塑性曲げ加工に及ぼす被着体厚さと接着層厚さの影響、日本接着学会誌、査読有、Vol. 48、2012、pp. 430-435
- ④ T. Tokuda, T. Yoshida, M. Takiguchi, M. Funaki, N. Mizutani, F. Yoshida, Viscoplastic Behavior of Highly Ductile Acrylic Adhesive under Cyclic Torsion and Its Modelling, Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP2011), 査読有, 2011, pp. 249-252

[学会発表] (計10件)

- ① 上森武, 複素数階微分法による高延性接着材の弾粘塑性変形挙動有限要素解析、日本機械学会中国四国支部第51回総会・講演会、2013年3月8日、高知工科大学
- ② T. Tokuda, Plastic-bending of adhesively bonded dissimilar sheet metals, 11th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and its Applications (AEPA 2012), 2012年12月7日, Nanyang Executive Centre (Singapore)
- ③ M. Takiguchi, Effects of Thicknesses of Sheet and Adhesive Layer on Plastic-bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, 11th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and its Applications (AEPA 2012), 2012年12月6日, Nanyang Executive Centre (Singapore)
- ④ 吉田哲哉, 異種金属接着板の引張曲げ・曲げ戻しにおける接着層の変形挙動、日本機械学会第20回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012)、2012年12月1日、大阪工業大学 大宮キャンパス
- ⑤ 上村孝行, 異種金属接着板のV曲げ加工に及ぼす速度と温度の影響、日本接着学会第50回年次大会、2012年6月29日、コラッセふくしま
- ⑥ 徳田太郎, 接着接合板の引張曲げ・曲げ戻しにおける接着層の変形挙動、日本接着学会第50回年次大会、2012年6月29日、コラッセふくしま
- ⑦ T. Tokuda, Viscoplastic Behavior of Highly Ductile Acrylic Adhesive under Cyclic Torsion and Its Modelling, 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011), 2011年9月28日, Aachen (Germany)
- ⑧ 徳田太郎, 高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動とそのモデル化、日本接着学会第49回年次大会、2011年6月18日、愛知工業大学 八草キャンパス
- ⑨ 徳田太郎, アクリル系高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動とそのモデル化、日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会、2010年11月28日、東京大学工学部
- ⑩ 瀧口三千弘, 接着接合した金属薄板の塑性曲げ加工に及ぼす接着層厚さの影響、日本接着学会第48回年次大会、2010年6月25日、関西大学100周年記念会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧口 三千弘 (TAKIGUCHI MICHIIRO)
広島商船高等専門学校・商船学科・教授
研究者番号: 10163346

(2) 研究分担者

吉田 哲哉 (YOSHIDA TETSUYA)
広島商船高等専門学校・電子制御工学科・教授
研究者番号: 20182769

徳田 太郎 (TOKUDA TARO)
広島商船高等専門学校・商船学科・准教授
研究者番号: 20425143
(H23~H24)

舟木 弥夫 (FUNAKI MITSUO)
広島商船高等専門学校・一般教科・教授
研究者番号: 90209148

(3) 連携研究者

上森 武 (UEMORI TAKESHI)
近畿大学・工学部機械工学科・准教授
研究者番号: 70335701
(H24のみ)