

# テーラードブランク材のV曲げ加工の高精度化

福井大学大学院 工学研究科機械工学専攻  
教授 大津 雅亮  
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013032)

キーワード：テーラードブランク，V 曲げ，多段曲げ

## 1. 研究の目的と背景

近年の自動車産業では環境対策や商品魅力の向上のための車体の軽量化や衝突安全性を同時に向上させられるために、テーラードブランク材が使用されるようになってきている。しかし、異種材を突合せ溶接したテーラードブランク材では、低強度材、溶接部、高強度材の3種類の变形特性が異なった部位が存在し、溶接部の延性低下や低強度側母材の応力集中のため破断が発生、材料のねじれが起りやすく、1枚板と比べ均一に曲げ成形することが難しい<sup>1)</sup>。テーラードブランク材の曲げ加工において、高精度加工を達成するためには、スプリングバックに起因するねじれ変形を抑制する必要がある。

本研究では、テーラードブランク材の高精度加工のために、接合線と曲げ稜線が直交する場合のV曲げ加工について実験および解析を行った。また、高精度加工法の提案の一つとして、工具を傾斜して加工し、板材と工具接触角度の検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置および成形方法

成形にはハイブリッド AC サーボプレス (コマツ産機社製, H1F150) を使用した。使用したパンチとアンビルの寸法を図1に示す。使用したパンチの先端の角度は $84^\circ$ 、半径は $0.6\text{ mm}$ である。アンビルのV溝角度は $84^\circ$ 、V溝底部の半径は $0.6\text{ mm}$ 、幅 $8\text{ mm}$ 、肩部半径が $1.5\text{ mm}$ のものを使用した。パンチ、アンビルともに奥行きは $75\text{ mm}$

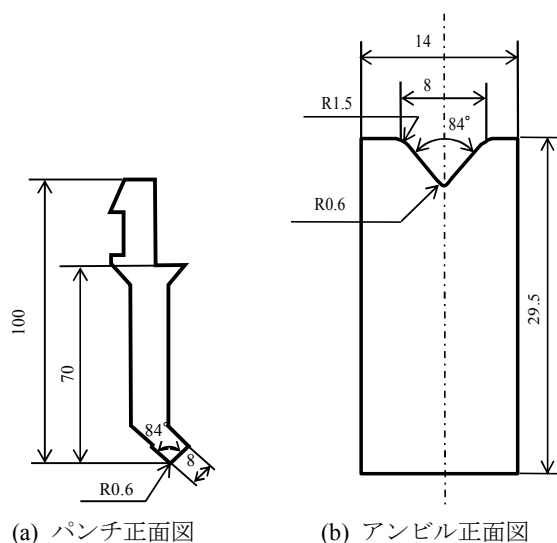


図1 パンチとアンビルの寸法

である。

試験に使用した板材は、 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ のSPFC980Y板とSPC板を $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ になる様にレーザ溶接したものを用いた。成形条件はプレス押込み量を $3.0\text{ mm}$ とし、下死点停止時間を $0\text{ s}$ とした。下死点位置はリニアゲージ (Mitutoyo 製, LGF-110ZL) を用いて実験開始時に設定した。サーボプレスのラム速度は板材と接触時からパンチ下死点までの平均速度を $1.5\text{ mm/s}$ とした。また、加工条件ごとに曲げ角を3回測定し平均値を求めた。曲げ角度の測定はビデオカメラで側方から撮影した画像からと三次元変形計測システム (GOM 社製, ARAMIS) によって計算した。前者ではアンビルからレンズまでの距離を $110\text{ mm}$ とし、レンズの焦点はアンビルの中心に合わせた。

### 2.2 組織観察

SPCとSPFC980Yを溶接したテーラードブランク材の溶接部分およびその近傍の断面の組織観察を行った。変形を抑えるために非圧縮である冷間樹脂埋めを行った。樹脂が凝固したらマイクロカッターで切断し、切断面を耐水研磨紙200番、800番、1500番の3種類を用いて研磨し、粒径 $1\text{ }\mu\text{m}$ のアルミナ懸濁液でバフ研磨を行い、最後にナイタル液で150s腐食させた。そして、光学顕微鏡 (OLYMPUS 製, BX51M) を用い、倍率200倍で組織の観察を行い、カメラ (OLYMPUS 製, DP22) で撮影した。

### 2.3 硬さ試験

供試材の断面の硬さ試験を行った。試験片はSPCとSPFC980Yを溶接したテーラードブランク材の母材と溶接部分およびその近傍、またSPFC980Yをマuffle炉で加熱したものを用いた。変形を抑えるために非圧縮である冷間樹脂埋めを行った。樹脂が凝固したらマイクロカッターで切断し、切断面を耐水研磨紙200番、800番、1500番の3種類を用いて研磨し、板の断面の硬さを測定した。硬さ試験には、微小硬さ試験機 (SHIMADZU 製, HMV-2000) を使用した。測定条件は、圧子にビッカース型 (対面角 $136^\circ$ の正四角錐形) のダイヤモンド圧子を用い、試験荷重を $0.9801\text{ N}$ 、荷重保持時間を $10.0\text{ s}$ として測定を行った。

### 2.4 解析方法

有限要素解析には商用の塑性加工用コードであるSimufact. forming13.0を用い、三次元解析を行った。解析モデルを図2に示す。モデルは、パンチとアンビルの細部の形状を実験と同様とし、被加工材は、熱影響領域を考慮したモデルと熱影響領域を考慮しないモデルを使用した。

アンビルを完全に固定し、パンチを動かしてプレスモーションを再現した。熱影響域の寸法は3・2・2項の結果を用いた。要素分割はSPFC980YとSPCの部分を1辺が1mmの六面体要素に分割し、板厚方向に4分割し、曲げ線に沿って細分化した。熱影響領域は、1辺が0.25mmの六面体要素に分割し、板厚方向に4分割した。熱影響領域を考慮しないものでは、考慮したものと要素数が同様になるようにSPFC980Yの部分を4分割した。それぞれの要素数と寸法、真応力-真ひずみ曲線および変形抵抗曲線を表1と表2、図3に示す。溶接部分の変形抵抗曲線は、縦軸にF値のFを横軸に硬さのhを取り、母材であるSPFC980YとSPCのそれぞれの値から直線式(1)を求めた。

$$F = 7.73 h + 730.55 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

溶接部の硬さを500HVと仮定し、F値を算出した。n値はSPFC980Yの値を使用した。計算条件は、プレス速度を $v = 1.5 \text{ mm/s}$ に固定し、下死点停止時間を0sとして1段曲げの計算を行った。計算ステップは全行程を500ステップで計算した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 V曲げ加工

テーラードブランク材で押し込み量を3mmとして溶接線に垂直にV曲げ加工を行った。ビデオカメラで板の両端を測定し、スプリングバックと曲げ角度を測定した結果を図4に、三次元変形計測システムで溶接線から両方向に距離0mm, 2mm, 4mm, 20mm, 40mmの位置で曲げ角度の測定を行ったものと、一枚板のSPCとSPFCの曲げ角

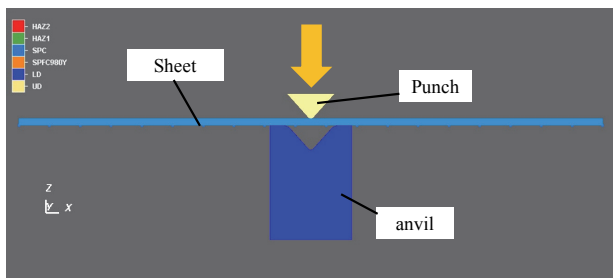


図2 解析モデル

表1 解析に用いた要素数

	HAZあり	HAZなし
SPFC980Y	27300	43300
SPC	29396	29396
HAZ	8000	
接合領域	8000	
総数	72696	72696

表2 板材の寸法

	100×48×1.2	100×50×1.2
SPFC980Y [mm×mm×mm]	100×48×1.2	100×50×1.2
SPC [mm×mm×mm]	100×50×1.2	100×50×1.2
HAZ [mm×mm×mm]	100×1×1.2	
接合領域 [mm×mm×mm]	100×1×1.2	

度を比較した結果を図5に示す。SPC側とSPFC980Y側で下死点での曲げ角度が3°以上異なっている。このことと材料ごとのスプリングバック量の差が板材曲げ角度不均一化の原因だと考えられる。溶接部近傍を除いてSPFC980YからSPCに向かって直線的に曲げ角度が増加している。溶接部分ではレーザー溶接による局所加熱で焼きが入って硬化することで、変形しづらくなっていると考えられる。また、一枚板の曲げ角度と比較するとSPC側では小さくなり、SPFC980Y側では曲げ角度が大きくなっている。これは2種類の材料を溶接したことで、変形する際に引張られ、互いの変形特性に近づいたためと考えられる。

### 3.2 解析モデル作成

#### 3.2.1 組織観察

テーラードブランク材の溶接部分およびその近傍の断面を光学顕微鏡によって組織観察した結果を図6、図7に示す。図7(a)はSPCの相であり、フェライトに微量のパーライトの相が広がっている。図7(b)は、溶接部分であり針状組織が広がっている。図7(c)はSPFC980Yの層であり、微細化された緻密な相が広がっている。

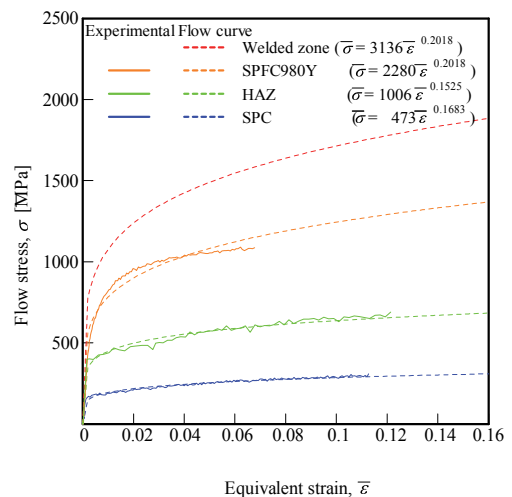


図3 実験で求めた真応力-真ひずみ曲線と解析に用いた変形抵抗曲線

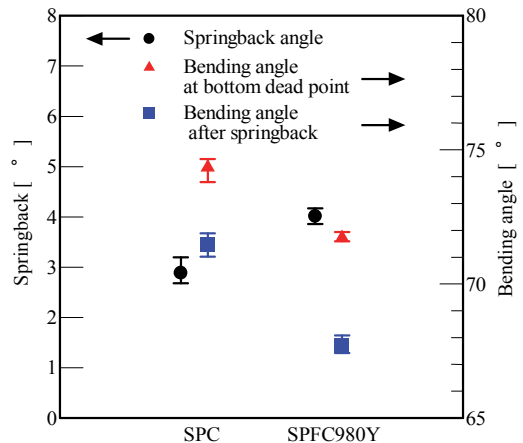


図4 異種接合(SPC-SPFC980Y)のテーラードブランク材のスプリングバックと曲げ角

### 3.2.2 硬さ試験

溶接部分およびその近傍の硬さの分布図を図8に示す。母材であるSPCとSPFC980Yの硬さの平均はそれぞれ155HVと389HVであり、SPCの硬さの平均から±10%以内の部分年青、SPFC980Yの硬さの平均から±10%以内の部分オレンジ、SPCとSPFC980Yの間の硬さの領域を緑、SPFC980Yの硬さを超える領域の中でも500HV未満の部分ピンク、それ以上の部分を赤で色分けしている。SPCの母材から緩やかに溶接部に向かって硬さが増加し、組織の境界で急激に硬さが増加している。SPFC980Yの部分では、母材側から溶接部手前で一度硬さが減少した後、溶接部付近で急激に硬さが増加している。これは、SPFC980Yが入熱によって軟化する熱影響領域と、急激な温度上昇で焼入れしている部分がある可能性があるためだと考えられる。硬化した溶接部分と軟化した熱影響領域の長さを測定するとどちらの領域も幅1mm程度であった。

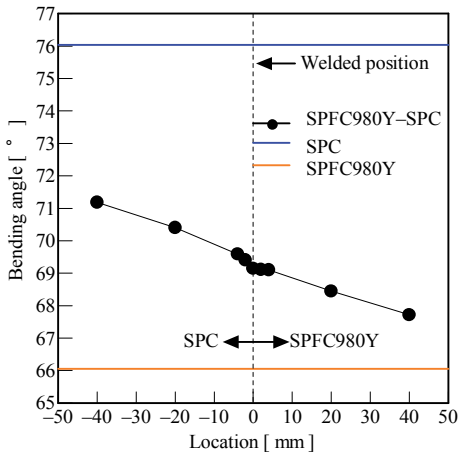


図5 異種接合(SPC-SPFC980Y)のテーラード blanks 材の曲げ角分布

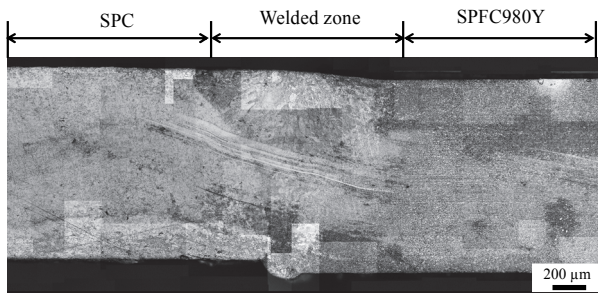


図6 接合部近傍のマクロ組織

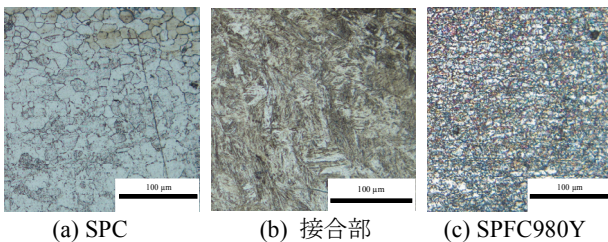


図7 接合部近傍の各部のミクロ組織

SPFC980Yの軟化した部分の材料を再現するために、マッフル炉を使用し加熱した供試材の硬さを測定した。加熱温度は200℃から1100℃とし加熱時間は5分、冷却方法は空冷とした。加熱温度の硬さへの影響を図9に示す。700℃のとき最も軟化していることが分かる。硬さの違いが引張試験から変形抵抗曲線を作成した際の塑性係数に影響してくる。材料ごとの変形に差がある方が、解析の際にテーラード blanks 材の特徴が得られやすいと考え、700℃の材料データを解析値として選択した。

### 4. 解析結果

#### 4.1 熱影響領域を考慮した場合としない場合の比較

熱影響を考慮したモデルと考慮していないモデルで、押込み量を3mmとして溶接線に垂直にV曲げ加工を行った場合の曲げ角度分布の比較を行った結果を図10に示す。曲げ角度分布では優位な差は得られなかった。レーザ溶接で作成した供試材をもとにしたモデルのため熱影響領域が狭く影響が少なかったためだと考えられる。熱影響領域を考慮するモデルを使用すると材料データが増え、解析時間が増加する。そこで、熱影響領域を考慮しないモデルで解析を進めた。

#### 4.2 解析値と実験値での曲げ分布の比較

押込み量を3mmとして溶接線に垂直にV曲げ加工を

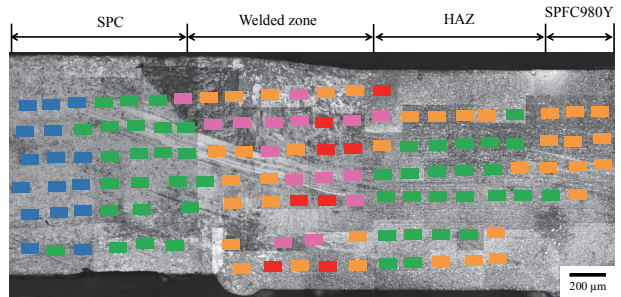


図8 異種接合(SPC-SPFC980Y)のテーラード blanks 材の接合部近傍の硬さ分布

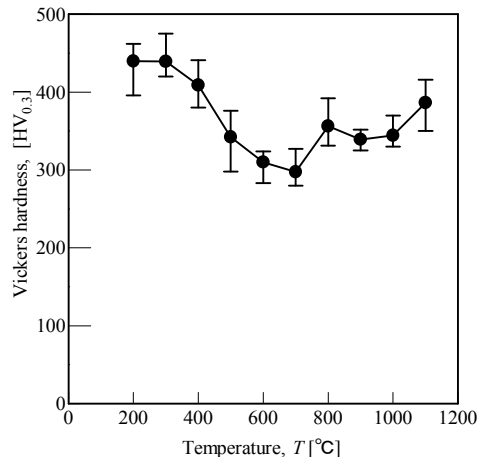


図9 SPFC980Y材の熱処理温度と硬さの関係

行った場合の解析値と実験値での曲げ角度の分布の比較を図1 1に示す. 実験値の曲げ角度に比べ, 解析値の曲げ角度のほうが, 大きくなった. 解析では実際のプレスモーションを十分に再現できていなかった可能性がある. しかし, どちらの結果でも1枚板を曲げた場合に比べ, 溶接された材料の変形特性に近づくという傾向がみられた.

### 4.3 パンチの接触角度の変更による曲げ角度の均一化

図1 2に示すように, 板材の端でパンチを傾斜させ, 板とパンチの接触角度 $\theta$ を変化させ, SPFC980Yの板材の端である点AとSPCの板材の端である点Bで曲げ角度を測定した結果を図1 3に示す. 傾斜角度 $0^\circ$ の場合では点Aと点Bの曲げ角度の差が $2.2^\circ$ あったが, 傾斜角度を増やすことで, 曲げ角度の差を減らすことができ, 傾斜角度 $0.17^\circ$ のとき点Aと点Bの曲げ角度の差が, $0.1^\circ$ と最も少なくなった. 板との接触角度を変えることでSPFC980Yの部分とSPCの部分で押し込み量を変化させることができたためだと考えられる.

## 5. まとめ

テーラードブランク材の有限要素解析を行った. 結果,

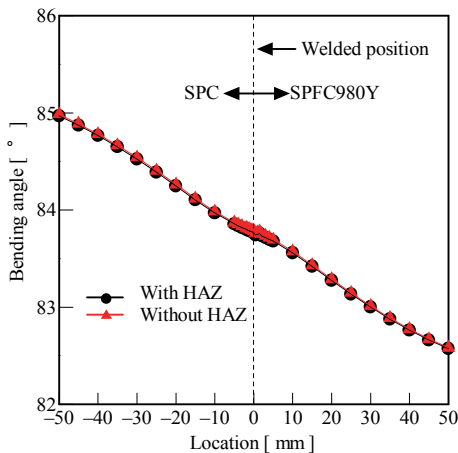


図1 0 解析における曲げ角分布に及ぼす熱影響域の影響

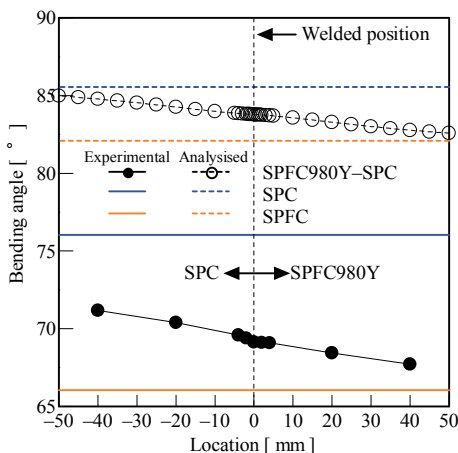


図1 1 曲げ角分布の実験結果と解析結果の比較

以下の知見が得られた.

- (1) テーラードブランク材を曲げ線に垂直に曲げた場合, 一枚板の曲げ角度と比較するとSPC側では小さくなり, SPFC980Y側では曲げ角度が大きくなり母材とは, 曲げ角度が変化した. 2種類の材料を溶接したことでもう片方の材料の変形に引きずられ, 互いの材料特性に近づいたためだと考えられる.
- (2) 熱影響領域を考慮したモデルとしていないモデルで曲げ角度の分布の比較を行ったが, 優位な差は見られなかった. レーザ溶接で作成した供試材をもとにしたモデルのため溶接部分と熱影響域が狭く影響が小さくなかったと考えられる.
- (3) パンチを傾斜させ, 板との接触角度を変更することで, 板材全体での曲げ角度の差を減らし, 均一化することができた. 板とパンチの接触角度を変えることでSPFC980Yの部分とSPCの部分で押し込み量を変化させ, 曲げ角度を調節できたためだと考えられる.

## 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 AF-2013032 によって行われた. ここに感謝の意を記す.

## 参考文献

- 1) 杉山隆司: 塑性と加工, 45-526(2004), 892.

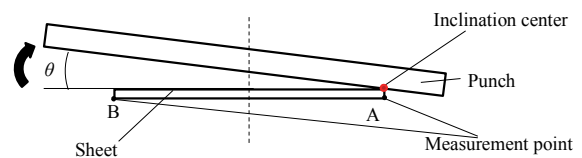


図1 2 傾斜したパンチの接触角

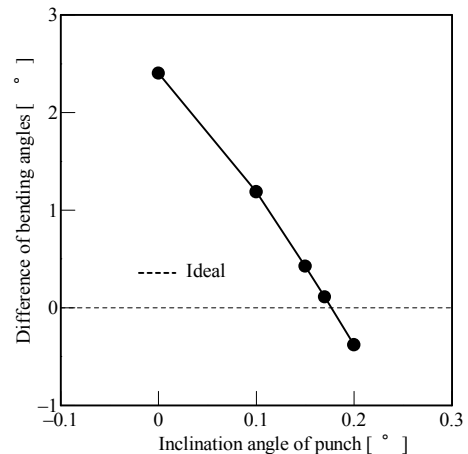


図1 3 傾斜したパンチの接触角が曲げ角分布におよぼす影響