

# 汎用ツールによる金型レスの逐次曲げ成形技術の高度化

広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター 生産技術アカデミー 製品設計研究部  
担当部長 安部 重毅  
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020028-B3)

キーワード：ベンディング，インクリメンタル，薄板鋼板

## 1. 研究の目的と背景

薄板鋼板の板金成形といえば、プレス成形が主流であるが、プレス成形に必要な金型は、製作費が高い、制作期間がかかる、生産には大型プレス機が必要等の観点から、金型レスもしくは金型数削減への要望が強い。

これらの要望に対し、1つの汎用ツールを使って局所加工を行いながら、加工部位を移動させることで、金型レス（もしくは金型数削減）にて、多様な複雑形状の板金成形ができる逐次成形方法がある。特に張り出し成形を主体とするインクリメンタル加工は実用化レベルに達している。

筆者らは、逐次成形方法の1つである“逐次曲げ加工”を提案した。従来のベンディングマシンは、真直ぐ、正確な角度で、短時間で曲げることができるため、箱物等の製作に強いが、それ以外への展開は難しい。一方、提案する逐次曲げ加工は、曲線経路に沿った曲げや曲げ深さを変更でき、より自由度の高い曲げ加工ができる（図1）。

なお、この逐次曲げ加工は全く新しい技術であり、基礎的な加工データが皆無であるため、これを取得する必要がある。本報では、前半で逐次曲げ加工および曲げ機について説明し、中盤では加工条件を変更しつつ、その加工挙動を精査して得た知見について報告する。

また、本成形方法を有効に活用するためには、得意な領域を見つけ、実用化の出口を模索する必要がある。そこで、本報の後半では、プレス成形後の追加工や形状不良（スプリングバック）矯正や現状で成形できるデモパネルの事例などを紹介する。

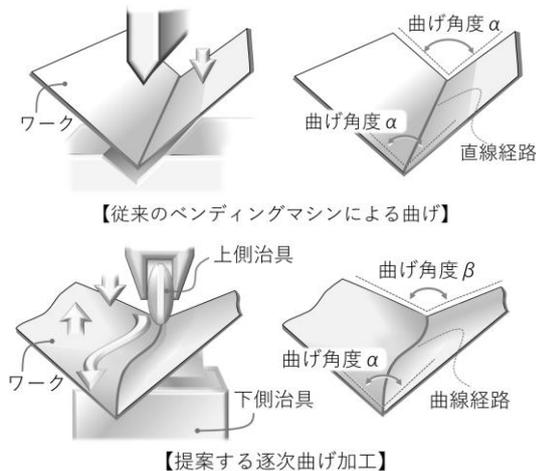


図1 従来の曲げ加工（上）と逐次曲げ加工（下）

## 2. 逐次曲げ加工の基本的な考え方

### 2・1 曲げツールの機構

逐次曲げ加工で被加工ワークを直接加工する曲げツールについて説明する。これは、上下1組の治具（図2）で構成し、この間に被加工ワークを挟み込み、上側治具を下側治具に押し込み加工する。

この押し込み量を多くするほど、肩ローラの傾斜はきつくなり、曲げ角度が深くなる機構である。また、曲げツールで加工しつつ、加工経路に沿うように考慮しながら、被加工ワークの位置・姿勢を移動制御することで、自由な経路の曲げが実現できる。

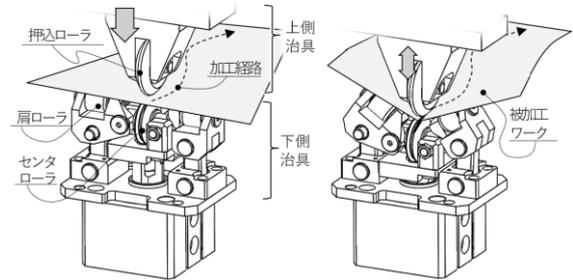


図2 曲げツール

### 2・2 曲線曲げ機（試作機）

逐次曲げ加工を実現するために、図3に示す曲線曲げ機を試作した。当該機器は、前述した曲げツールを中核機構とし、「曲げツールを構成する上・下治具の高さ位置を制御する機構」と、「被加工ワークの位置・姿勢を2次元平面上で制御できる搬送機構」を有する。加工対象は、軟鋼板（□250mm、板厚0.6mm）もしくはアルミ鋼板（□250mm、板厚1.0mm）を想定して設計した。

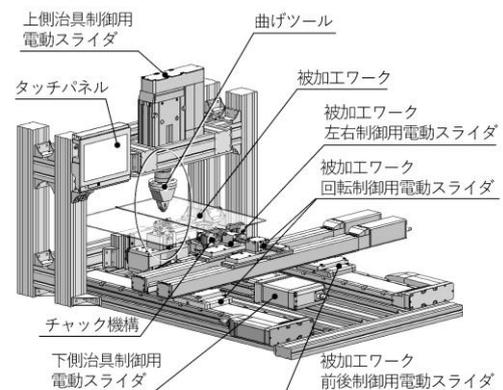


図3 曲線曲げ機

### 2・3 逐次曲げ加工の課題

逐次曲げ特有の課題として、平面の歪み、肩折れ、繰返し経路のずれ等の不良がある。

【平面の歪み】左右対称の2曲線経路にて曲げを加えた場合に、パネルトップ面を平坦にしたいが、欠肉・肉余りに起因したゆがみが発生し、高低差の生じる形状になる。

現在、改善策を検討中である。(図4)

【肩折れ】下側治具の肩ローラ端で浅い折れが発生する。肩当たりを緩和する補助機構等で対策すれば改善できる。

【繰返しりのずれ】深く曲げる場合、徐々に押し込み量を増やしながらか、同じ加工経路を通る曲げを複数回繰返す。曲げが深くなると、加工品形状が立体的になるため、平面基準での被加工ワークの位置・姿勢制御では、加工位置が徐々にずれる。深く曲げるにつれて経路補正を入れる対策をすれば改善できる。

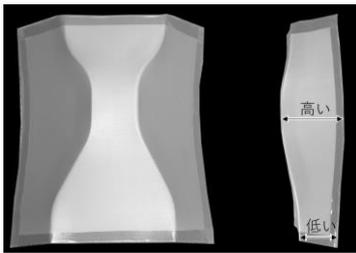


図4 2本の曲げ加工結果

## 3. 研究方法と成果 (基本挙動の把握)

### 3・1 逐次曲げ加工の評価

逐次曲げ加工の不具合と相関が高い加工条件を調べるために、加工条件を変え、S字経路に沿った逐次曲げを行う。“機器への負荷”が高く、肩折れなどの“曲げ品質”を低下させるような傾向を示す加工条件を探す。

前者の“機器への負荷”は、曲げツール上側治具に取り付けたロードセルで押し付け加重を計測して評価する。

後者の“曲げ品質”は、加工済みパネル形状を三次元形状測定機 GoSCAN (CREAFORM 社製) を用いて計測し、図5上図に示す5断面(断面A, B, C, D, E)での“曲げ角”や“肩折れ角”を用いて“曲げ品質”を評価する。

“曲げ角”は、図5下図のように曲げ中心付近の角度とし、曲げが深いほど角度は小さくなる。一方、“肩折れ角”は各断面において、曲げ中心点から30mm離れた点を結んだ直線と、肩折れ位置手前の点を結んだ直線の挟角と定義し、左右とも計測する。“肩折れ角”は角度が小さいほど、肩折れが目立たなく、曲げ品質が高いと評価する。

変更する加工条件は、①曲げ加工経路の複雑さ、②最終曲げ角度となるまでの反復加工回数、③被加工ワークの材種及び板厚、④加工ワークの幅、⑤加工速度の5項目とする。変更する加工条件の詳細を次に示す(表1)。

【①加工経路】S字経路の端部/中央直線の構成角(進行方向に対して向きを変更する転進角度)を標準条件45度に対し、30度、60度に変更する。角度が小さいほど直線に近い緩やかな加工経路になる(図6)。

【②反復回数】押込ローラの最終押込量(9mm)は統一し、最終押込みに至るまでに繰返す加工回数を変更する。標準条件は6回(1.5mm/回)とし、4回(2.25mm/回)や8回(1.125mm/回)に増減させた条件で比較する。

【③材種】被加工ワークの材種と板厚を変更して加工する。標準条件の供試材は軟鋼板(板厚0.6mm)とし、より変形抵抗の高い5000系アルミ(板厚1.0mm)と60k級ハイテン(板厚1.0mm)と比較する。

【④ワーク幅】加工前の基本寸法は幅、奥行きとも250mmとし、比較条件として、加工開始方向に対して直角方向の幅を、300mmや200mmに変更して比較する。

【⑤加工速度】標準条件は10mm/secとし、加工速度を5mm/secや20mm/secに増減して比較する。

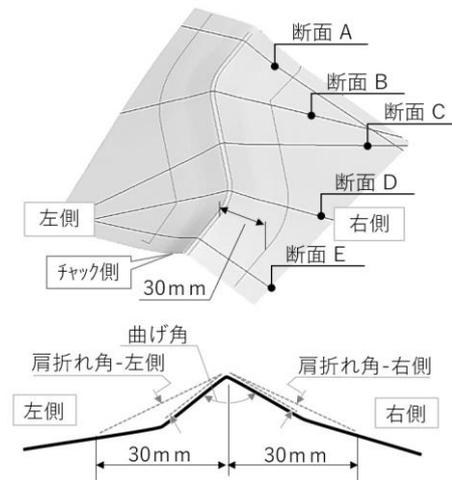


図5 曲げ角度の評価

表1 影響を調査する5項目と代表的な加工条件

条件	①加工経路の種類	②反復回数(回)	③材種/板厚(mm)	④ワーク幅(mm)	⑤加工速度(mm/sec)
標準	45度経路	6	軟鋼 t0.6	250	10
①	30/ 45/ 60	↑	↑	↑	↑
②	45度経路	4/ 6/ 8	↑	↑	↑
③	↑	6	軟鋼 t0.6/ アルミ t1.0/ ハイテン t1.0	↑	↑
④	↑	↑	軟鋼 t0.6	200/ 250/ 300	↑
⑤	↑	↑		250	5/ 10/ 20

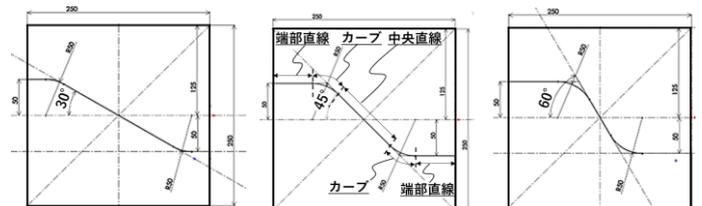


図6 加工経路(左から転進角度30, 45, 60度経路)

### 3・2 標準条件での加工結果

標準条件で逐次曲げ加工を行い、“曲げ品質”と“機器への負荷”を確認した。図7に、縦軸に加工時の加重を、

横軸に曲げツールの移動距離（加工位置）を取った折れ線グラフを示す。6本の折れ線は、6回の繰り返し（押込量1.5mmの1回目、・・・、押込量9.0mmの6回目）加工における、各回の加工時の加重を示す。また、縦に入れた点線は、S字経路〔端部直線→カーブ→中央直線→カーブ→チャック側の端部直線〕の各境界を示す。

図7のグラフから、次の2点のことが言える。

1点目はS字経路の加工では、カーブ通過時の2か所で、加重が増加する2瘤のピークが出るグラフとなる。つまりカーブ通過時では変形抵抗が大きくなる。

2点目は繰り返しの加工順番が後になるほど、つまり変形が進んだ形状にさらに厳しい曲げを追加工しようとするほど、変形抵抗が大きくなる。ただし、4回目の加工は、中央直線部の領域で、5、6回目より加重が高くなるなど、一部の加工領域で反転する場合もある。

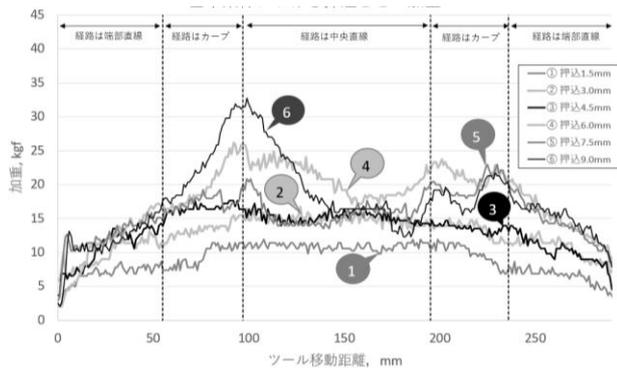


図7 標準条件での押込加重

次に、加工済みパネルの“曲げ品質”の形状評価を整理した結果を図8に示す。このグラフは、図5上図の断面A～Eにおける“曲げ角”を折れ線で、“肩折れ角”（左側と右側肩折れの合計）を棒グラフで示したものである。

また、加工の再現性を示すために、繰り返し数N3の結果も併記しており、同条件での加工では、バラつきが少なく、再現性があることが分かる。

折れ線（曲げ角）は、右下がりの傾向にあり、チャックから遠い断面A側ほど曲げ角は大きく、曲げが浅い。チャックに近い断面E側ほど曲げ角が小さく、曲げが深い。また、カーブ経路上の断面BとDでは、局所的に曲げが浅くなる。

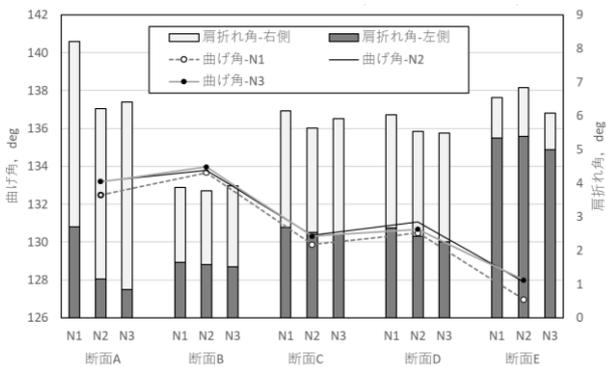


図8 標準条件での曲げ角と肩折れ角

以上のことから、押し込み量一定で加工した場合でも、経路位置によって変形抵抗が変わり、曲げ角度が一定にならない。対策として、経路位置によって見込み分の押し込み量を増減する制御を行うことである程度は改善できる。

左右の肩折れ角（図8棒グラフ）の比較をすると、カーブや中央直線では左右均等である一方、チャックから遠い（断面A）側では右側の折れ角、近い（断面E）側では左側の折れ角が大きくなる。つまり、端部直線領域では曲げ中心から幅方向のワーク端部までが長い側の方が、変形抵抗が大きく、肩折れが大きくなる傾向にある。

### 3・3 ①加工経路の影響

転進角度が30、45、60度の3種類の加工経路（図6）の逐次曲げ加工を行った。加工済みパネルを図9に、転進角度が30度と60度にて加工した加重のグラフを図10に示す。

図7の標準条件と比較すると、2か所のカーブ経路で急増していた加重が、30度経路では低減し、60度経路では極端に増加した。これは転進角度が大きいほど加工パネルの形状剛性が上がり、追加加工時に変形抵抗が増えることが原因である。

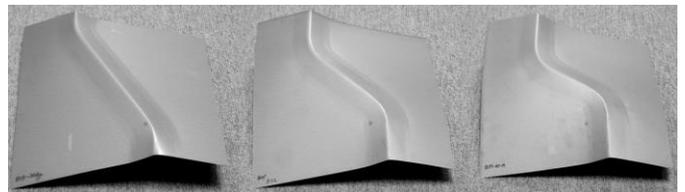


図9 加工済みパネル（左から30, 45, 60度経路）

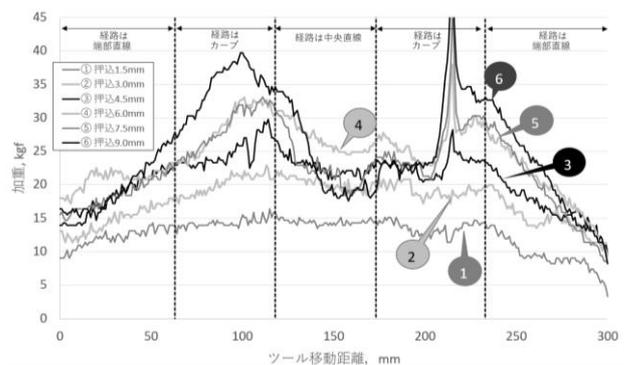
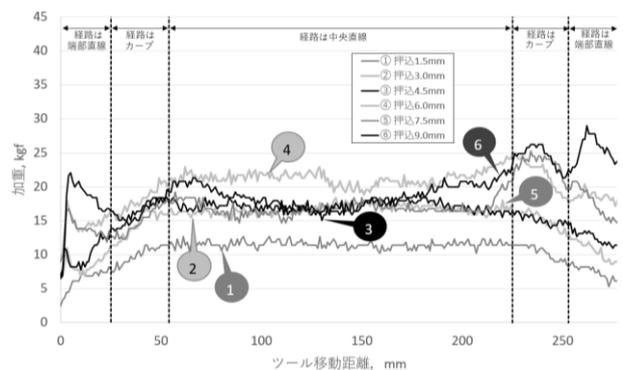


図10 30度（上）と60度（下）経路での加重

図11に、加工経路を変更した場合の“曲げ角”と“肩折れ角”のグラフを示す。

折れ線グラフから、60度経路の曲げ角は標準経路と同様にカーブ経路上の断面BとDで浅くなる一方、30度経路は直線曲げに近くなり、曲げ角は浅くならない。

棒グラフの左右の肩折れ角度を見ると、転進角度が30、45、60度と大きくなるほど、端部直線で片側に偏る。転進角度の小さい30度経路は、直線加工に近く、曲げ角度や肩折れ角の合計は、他に比べて各断面での変動が少ない。

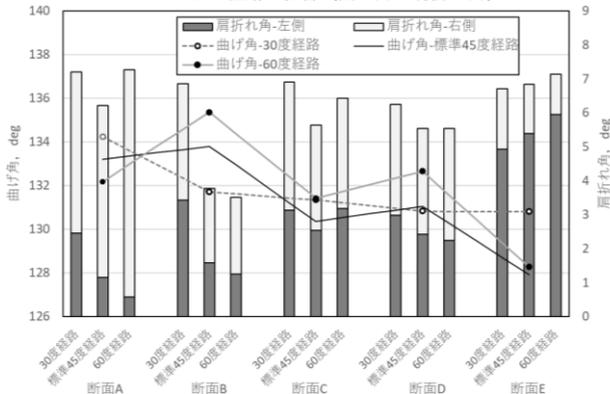


図11 加工経路変更時の曲げ角と肩折れ角

### 3・4 ②反復回数の影響

逐次成形では、繰り返し加工が不可欠であり、加工時間が課題の1つである。そのため、繰り返し回数を削減した場合に、加工にどのような影響を与えるかを検証する。

ここでは、繰り返し回数6回の標準条件に対し、4、8回と繰り返し数を変更して加工した。

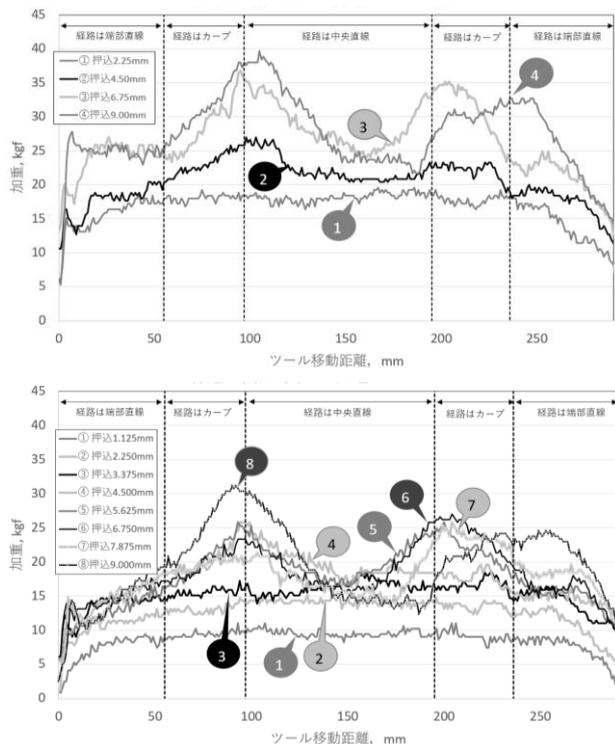


図12 繰り返し4回(上), 8回(下)に変更時の加重

繰り返し回数を4回と8回に変更した場合の加重のグラフを図12に示す。少ない回数では全経路で押込加重が増加する。一方、回数を8回に増やしても標準の6回に比し、押し込み加重が減少する傾向は見られず、回数を増やす利点はなかった。

同条件の“曲げ角”と“肩折れ角”を表したグラフを図13に示す。曲げ角および肩折れ角とも繰り返し数を変更しても形状への影響はほとんどない。

このことから、今回のようなS字加工では、肩ローラが被加工ワークに食い込むような繰り返し数(1~2回)まで減らさなければ、曲げ品質に影響を与えない。

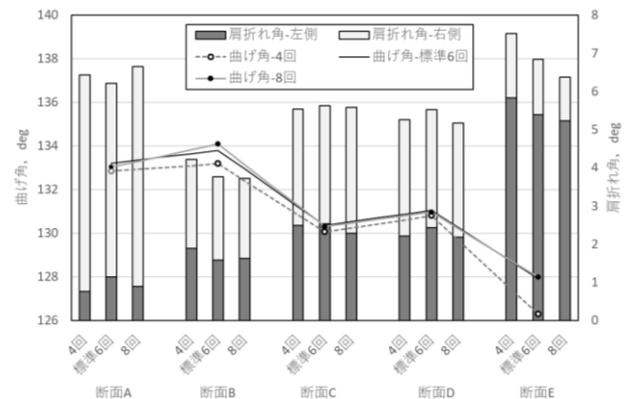


図13 繰り返し回数を変更時の曲げ角と肩折れ角

### 3・5 ③材種と板厚の影響

被加工ワークの材種と板厚といった変形抵抗を変更した場合の加工への影響を検証する。標準条件は軟鋼板 t0.6 に対し、5000 系のアルミ t1.0 と 60k 級のハイテン t1.0 を用いて加工した(図14)。

材種と板厚を変更して加工した場合の加重を図15に示す。図7の軟鋼板 t0.6 のグラフと比較すると、アルミ t1.0 では最大加重は約2倍に、ハイテン t1.0 では約5倍に増加した。また、カーブ経路にて急激に加重が立ち上げる傾向は緩やかになり、繰り返しの加工順番の通りに加重が増加する傾向となり、反転することはほとんどない。

図16に材種と板厚を変更して加工した時の“曲げ角”と“折れ角”を表すグラフを示す。

この曲げ角の折れ線から、軟鋼板 t0.6 をアルミ t1.0 やハイテン t1.0 といった変形抵抗の高い材種と板厚に変更すると、曲げ角度が浅くなるとともに、肩折れ角も極端に少なくなることがわかる。曲げ角度が全体的に浅くなる傾向は、アルミやハイテンのスプリングバックが強く発生することが原因の1つと考えられる。

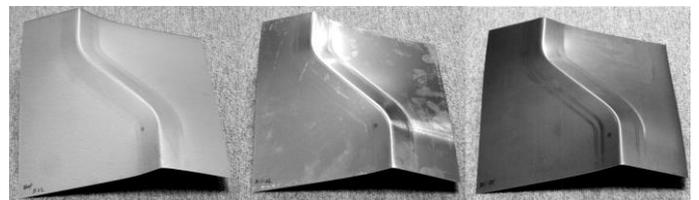


図14 加工済みパネル(左から軟鋼板, アルミ, ハイテン)

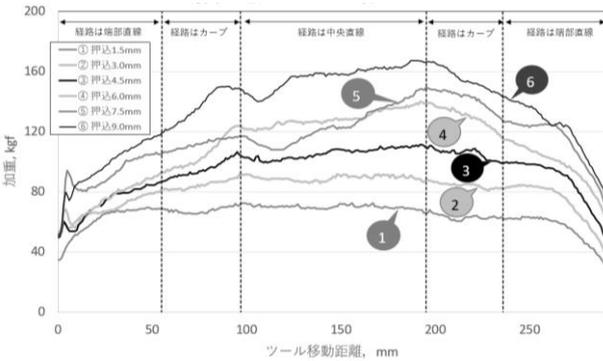
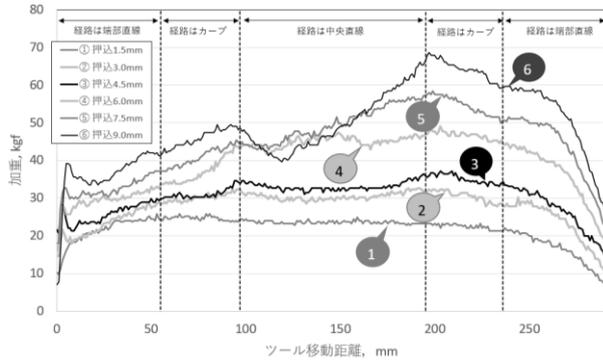


図 15 アルミ t1.0mm(上), ハイテン t1.0mm(下)の加重

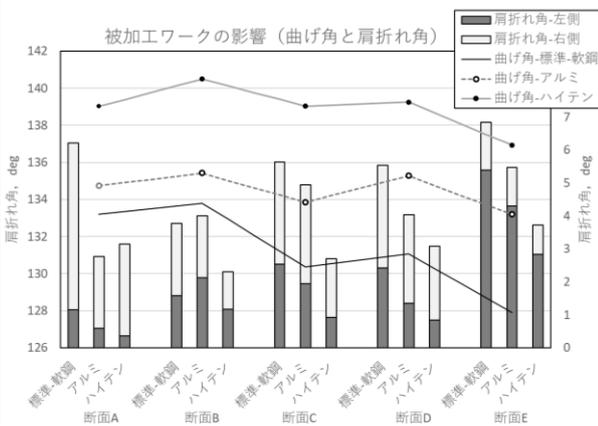


図 16 アルミ t1.0mm, ハイテン t1.0mm の曲げ角と肩折れ角

3・6 ④⑤その他の項目 (サイズや加工速度)

④加工ワークの寸法 (図 17) と⑤加工速度の影響についても同様にデータを取得したが、①経路、②半副回数や③材料違いほどの明確な差異が出なかった。これらのデータについては、紙面の関係で割愛する。



図 17 加工済みパネル

(左: 幅 200, 中: 幅 250 (標準条件), 右: 幅 300)

4. 逐次曲げの活用事例

4・1 追加工によるスプリングバック矯正

逐次曲げ加工単体では、成形の自由度に限界がある。そこで、プレス成形で生じるスプリングバックへの対策など他用途で使用できるかを検証する。

なお、標準の軟鋼板では、スプリングバックの度合いが少ないことから、ヤング率の低い 5000 系アルミ (350×60mm) を使い、ハット曲げにおける壁の反り対策で使用できるか検証する。

ここでは、押し込み深さ 100mm のハット曲げを実施し、曲げ機で簡単に加工できるように中央から加工品を半分 に切って 1 組の試験片 (図 18) を作成する。この試験片の底部とフランジ部が平行になるような矯正ができるかを次の 3 種類の対策で検証した。

- ① 1 本の少し深い曲げを壁に水平に加える。
- ② 2 本の浅い深い曲げを壁に水平に加える。
- ③ 形状ビードのように浅い曲げを壁に垂直に加える。

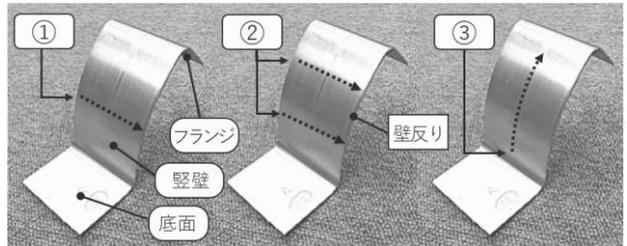


図 18 スプリングバック対策としての曲げ矯正

図 19, 表 2 に矯正した結果を示す。①, ②とも角度  $\beta$  を 2.5 度程度 (0 度が平行) まで矯正できたが、高さ  $\alpha$  は低くなった。①と②の長さでは、2 本入れた②の長さ  $\alpha$  の方が高く、曲げる本数を増やすことでさらに高くなる。③は、垂直に加えた加工が浅く、わずかな改善にとどまり、当初想定した形状凍結ビードとして機能しなかった。

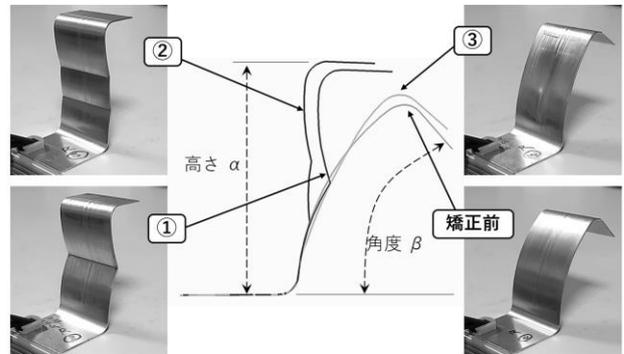


図 19 曲げ矯正後の様子

表 2 曲げ矯正の結果

	矯正前	①水平 1本	②水平 2本	③垂直 1本
高さ $\alpha$	83.4mm	98.8mm	102.6mm	-88.1mm
角度 $\beta$	49.33deg	2.37deg	2.45deg	41.71deg

#### 4・2 逐次曲げの加工事例

0.6mmの軟鋼板を使い、曲げ機のトライアルを実施した。

図20は、2本の深い曲げを左右対称に付与したものである。右図は経路が外側に膨らむ例で中央面がへこむ。一方、左図は経路が内側にへこむ例で中央面は逆に膨らむ。これは経路上の曲げ限定の加工であることが原因である。

図21は、トップ面がS字であるモデル「Sレイル」をまねて加工したものである。4本の深い曲げを順(①⇒④)に加えることで、2枚のフランジと側壁と1枚のトップ面で構成する加工ができることが分かった。

図22は、前報で報告した浅い曲げを多数加えた意匠用加工品と深い曲げを組合せた加工も実現できた。これは、一部の領域にのみ浅い凹凸が出るように事前に加工①し、最後に深く大きな曲げを2か所加工②したものである。

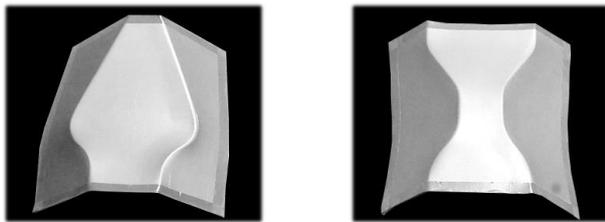


図20 2本の曲げ経路による加工品  
(パネル周囲のテープは怪我防止用で加工後に養生)

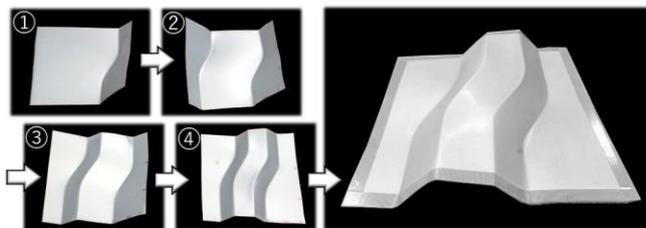


図21 4本の曲げ経路によるSレイル加工品

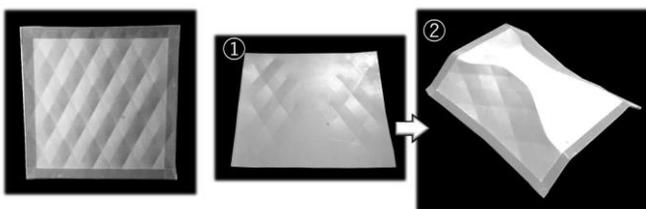


図22 浅い曲げと深い曲げの複合加工品

#### 5. 結論

逐次曲げ加工の挙動を把握するために、加工条件を変えてS字経路の曲げ加工を行い、次の知見を得た。

- ・曲げ経路途中の転進角度が大きいと、曲げが浅くなる。
- ・材種や板厚を変えて変形抵抗の強いワークを使って加工すると加工に要する荷重は増えるが、肩折れが低減し曲げ品質があがる。
- ・反復回数を減らすと1度に深く曲げるため、加工に要する荷重は増える。一方、極端に回数を減らさない限り、曲げ品質は大きく悪化しない。

併せてプレス部品加工時に生じるスプリングバック対策に適用できないかを検討した。ハット部品の壁に曲げを入れて底面とフランジ面を平行にする矯正を試し、次の知見を得た。

- ・反った壁に対し、フランジ面に平行に曲げを入れる矯正では、ほぼフランジ面を平行にできるが壁高さが低くなる。
- ・反った壁に対し、フランジ面に垂直に曲げを入れた矯正では、あまり改善できず、形状凍結ビードの機能を果たせなかった。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の研究助成(AF-2020028-B3)の支援のもと実施しました。また、研究の推進にあたり、広島大学 日野隆太郎先生には多くのご助言を賜り、広島県立総合技術研究所の岡野仁主任研究員と岩谷稔主任研究員には制御系の開発等に尽力いただきました。ここに、深く感謝の意を表します。