

## 5 薄板の逐次曲げ加工 (第2報)

安部重毅, 岡野仁, 大川正巳

Sequential forming method specialized for bending of thin metal sheet (Second Report)

ABE Shigeki, OKANO Hitoshi, OKAWA Masami

The "sequential forming method" of thin metal sheet is a method that makes it possible to form various complex shapes by gradually moving a narrow area to be deformed, using only one general-purpose tool. This forming method eliminates the need for a press die, which is a major issue for press forming. Adopting this formation method is DX at the production site.

The sequential forming methods include "incremental processing" specializing in stretching forming and "spinning processing" specializing in pipe materials, but not processing specialized for bending. Therefore, the authors proposed a new "sequential forming method specialized for bending" and showed in the previous report that this forming method was feasible. In this report, we will introduce an example of a sequential bending method that uses an S-shaped curve as a bending path to form a three-dimensional shape.

キーワード：逐次成形法, 曲げ加工, 薄板板金解析

### 1 緒言

インクリメンタル加工やスピニング加工といった“逐次成形法”は、1つの汎用ツールを使って、局所的な張出しや口絞り加工等を行いながら、加工部位を移動させることで、金型レス（若しくは金型数削減）にて、多様な複雑形状の板金成形を可能にする成形方法である。

この加工方法は、汎用ツールを移動させるための座標データ（経路データ）だけで多様な成形ができる。そのため、部品ごとに金型を製作する必要がなく、金型製作に係るコストと納期の課題を解消する生産現場における究極のDXといえる。しかし、一般的なプレス成形に比して、逐次成形法には加工制限が多い、加工時間が長いといった課題がある。そこで、筆者らは、比較的加工時間の短い“曲げ加工”に特化した「逐次曲げ成形法」という新規の成形方法を提案するに至った。

前報<sup>1)</sup>では、逐次曲げ成形法に特化した汎用ツールを開発した。このツールは上下一組の治具で構成され、治具間の距離制御により曲げ角度を変更できる。ツールに対して被加工ワークを一方向のみに往復できる「直線曲げ機」（曲げ角度は変更できるが直線経路に限定）に取り付けてトライアルを行い、その有用性を示した。

本報では、被加工ワークを二次元平面上で自由に移動できる搬送機構と汎用ツールを組み込んだ「曲線曲げ機」を開発し、曲げ角度及び曲げる経路を変更できる逐次曲げ成形（図1参照）の可否を検証する。そのために、①曲線曲げの机上計算、②計算結果を反映した曲げ機試作、③試作機でのトライアルを行ったので、これを報告する。

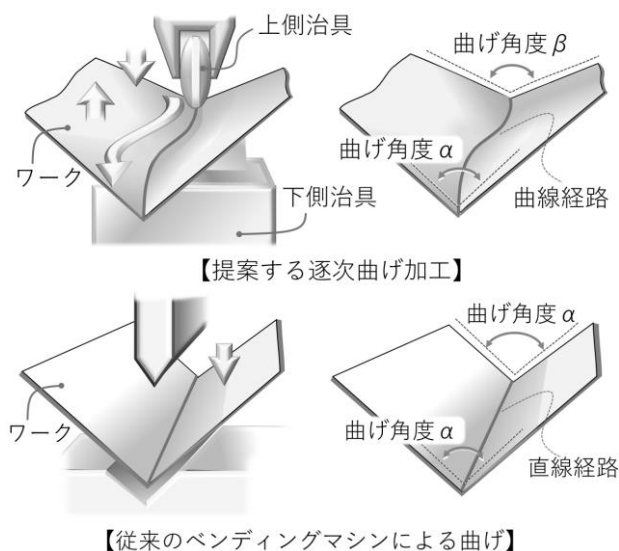


図1 従来の曲げ加工(左)と逐次曲げ加工(右)

### 2 曲線曲げ機

本研究で開発する曲線曲げ機は、被加工ワークに3点曲げで加工を加える「曲げツール」と、被加工ワークの位置・姿勢を制御する「搬送機構」等で構成される。

#### 2.1 曲げツール

曲げ機の基幹機構が曲げツールである曲げツールは、被加工ワークを挟むようにセットする上側治具と下側治具で構成される。上側治具には押込ローラが、下側治具には上下動するセンタローラとセンタローラの高さに合わせて傾斜する一組の肩ローラが付属する（図2参照）。

曲げ加工について述べる。被加工ワークを挟んだ状態で上側治具を降下させると押込ローラと被加工ワークが

接触し、更に押し込むと被加工ワークを介して下側治具のセンタローラが下がる。この時、センタローラの降下に伴い、リンク機構でつながっている左右の肩ローラはV字を形成するように傾斜する。その結果、押し込みローラと左右の肩ローラにより被加工ワークが3点曲げされる。また、上側治具の制御により押し込みローラを上昇させて戻すと、下側治具下に設置した復帰機構により、センタローラは追従して上昇し、肩ローラの傾斜角も小さくなる。このように上側治具の高さを位置制御することで、曲げ角度を変更できる加工が可能になる。

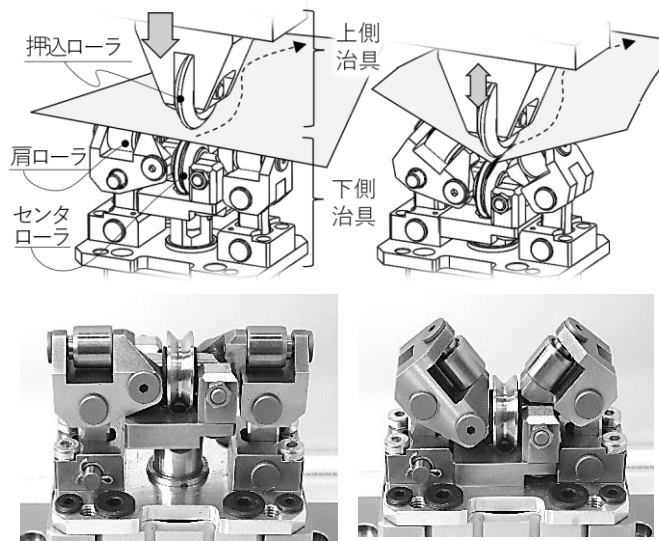


図2 曲げツールの加工の様子と下側治具

## 2.2 搬送機構

前報で報告した直線曲げ機の搬送機構は、被加工ワークを前後一方向にしか移動できないため、曲げ経路が直線の加工に限定されていた。

新たに開発した曲線曲げ機は、被加工ワークの位置・姿勢を2次元平面上で自由に制御できる搬送機構としたため、ユーザの設定した曲線経路に沿って曲げ加工ができる。曲線曲げ機を図3に示す。当該機器のフレームサイズはおおよそ幅940×奥行1340×高さ620mmである。基準となる被加工ワークのサイズは、□250mmを想定し、素材は板厚0.6mmの鋼板、若しくは板厚1.0mmアルミ板とする。この被加工ワークは、被加工ワークを把持するチャック機構を経由して位置・姿勢制御される。

曲線曲げ機の構成を次に示す。曲げ機中央に曲げツールを配置し、上側と下側治具は、「上側治具制御用電動スライダ」と「下側治具制御用電動スライダ」によって高さ制御を行う。それぞれの高さ方向の最大ストロークは50, 75mmとする。なお、下側治具制御用電動スライダは曲げ機本体を小型化するために、横置き配置とする。

一方、被加工ワークの搬送機構は、4本の電動スライ

ダを使用して被加工ワーク、つまりチャック機構の位置・姿勢制御を行う。曲げツールに対して前後方向の被加工ワークの移動制御には「前後制御用電動スライダ」を、左右方向の移動には「左右制御用電動スライダ」を使用する。また、被加工ワークの回転制御には、2本の「回転制御用電動スライダ」を使用する。

また、各電動スライダ（IAI製）は、PLCのFX-5U（三菱電機製）で制御する。被加工ワークの搬送制御用の電動スライダはSSC-NETで補完制御し、治具制御用の電動スライダはCC-Linkで制御する。また、ユーザインターフェイス用のタッチパネルとしてGOT（三菱電機製）を使用し、これは曲げ機から取り外して使用できる。

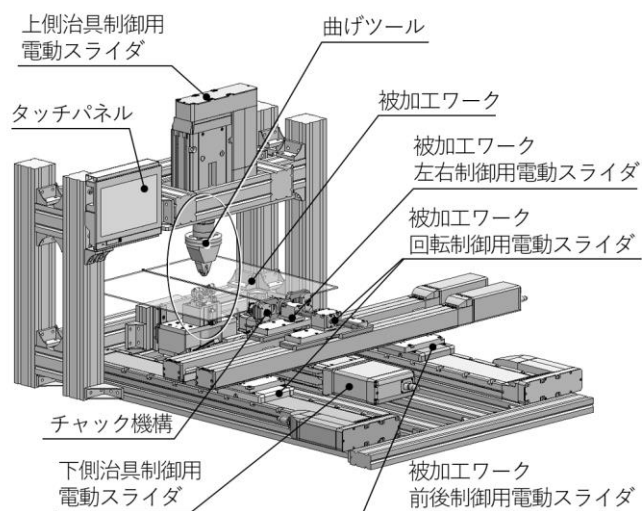


図3 曲線曲げ機

## 3 曲線曲げの解析

### 3.1 曲線曲げの解析モデル

前報で行った直線経路の逐次曲げ加工を模した机上計算と同様に、曲線経路においても机上計算を行い、事前に課題の洗い出しを行った。この計算には、前報と同様に、薄板成形に秀でており、かつ、工具の動きを自由に再現できることから、有限要素解析のソフトウェアPAM-STAMP（仏、ESI社製）を使用した。

机上計算で使用する曲げツールモデルを図4に示す。これは図2の曲げツールを基に被加工ワークと接触する部位だけを取り出し、剛体要素を貼り付けたモデルである。この曲げツールのモデルは、押し込みローラ、センタローラ、肩ローラなどで構成される。押し込みローラに下向きの強制変位を与えると、被加工ワークを経由して、ばね要素で支持されたセンタローラを押し込む。センタローラの下降に伴い、リンク機構により肩ローラが傾斜姿勢をとる。被加工ワークは、この押し込みローラと1対の肩ローラにより、3点曲げ加工を受ける。

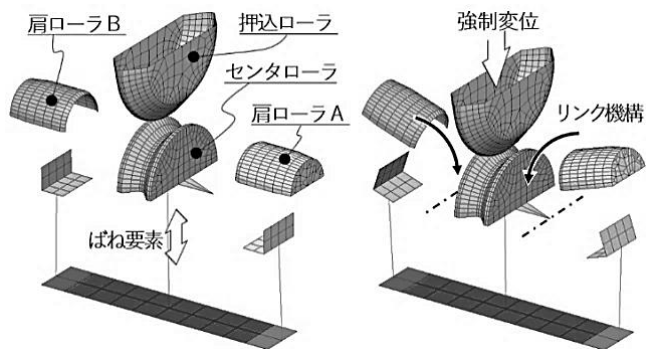


図4 曲げツールの解析用のモデル

### 3.2 曲線曲げの解析条件

次に計算における加工の様子を説明する。曲線曲げ機の試作機は、曲げツールを固定し、被加工ワークの位置と姿勢を制御した。このように、被加工ワークに強制変位を与え、かつ、変形を受ける解析条件にすると、設定が煩雑で計算が不安定になる。そこで、机上計算では、被加工ワーク端部を固定し、曲げツールを強制移動させる設定にした。

机上計算における曲げツールの動きについて説明する。はじめに曲げ経路の端部となる初期位置で押込みローラを規定量だけ被加工ワークに押込み、初期曲げを付与した。ついで、押込み深さは規定量のままで、曲げツールをS字経路に沿って移動させることで、S字経路上に曲げを付与した。経路の終端位置に至ると、工具の押込みを初期位置に戻すこととした(図5参照)。

前報で示したとおり、逐次曲げでは、一度に深く曲げるのではなく、複数回に分けて曲げる方が品質の高い曲げが得られる。そのため、机上計算においても、曲げ経路を複数回繰り返し通過させ、徐々に曲げ角度を深くした。複数回に分けて曲げを付与する場合は、終端位置で工具の押込みを解放した後に、もう一度初期位置に戻り、前回の規定値以上に押込みローラを押込み、その曲げ角度を維持しながら、同じ経路を通過して曲げ角度を深くした。解析条件は次のとおりである。

#### 【机上計算の解析条件】

- ・ 供試材は、軟鋼板 (SPCC) で板厚 0,6mm
- ・ 被加工ワークのサイズは、250×250mm
- ・ 曲線経路は机上計算で使用した図5のS字経路
- ・ 最大押込み深さ 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm の5条件
- ・ 1回ごとに増やす曲げ治具の押込みピッチは2mm (最大押込み深さ 10mm の場合、加工を5回繰り返す)

最終押込み深さの違いによる被加工ワークの形状を図6に示す。図6では、形状の差異を分かりやすくする

ために、等高線表示で示す。この計算結果から、曲線経路に沿った曲げ加工も可能であり、押込量を増やしつつ、曲げ経路を繰り返し通過することにより、曲げ角度を大きくできることを確認できた。

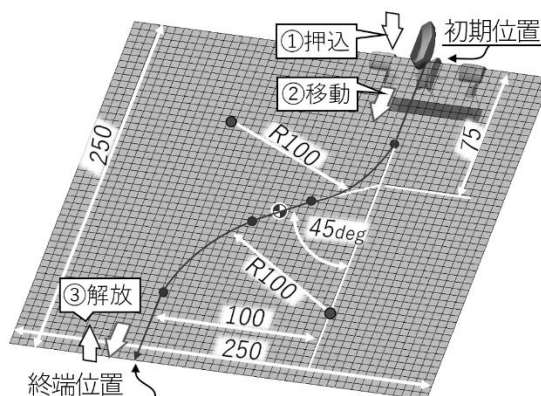


図5 S字状の曲げ経路

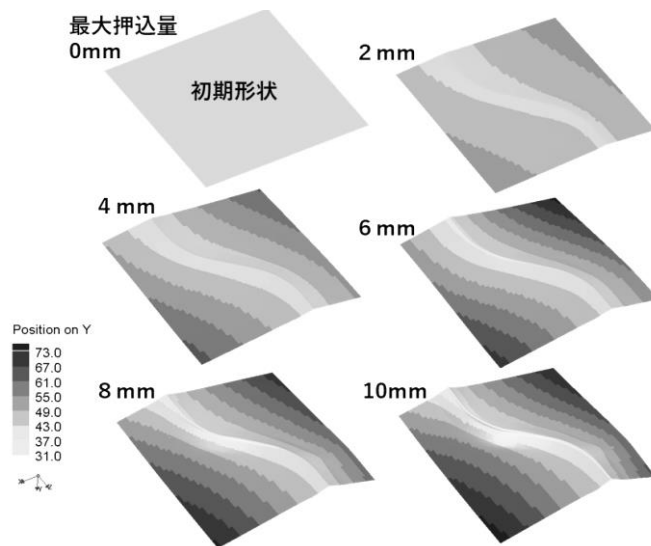


図6 曲線経路の曲げ計算の結果

次に、曲線曲げにおいても、複数回に分けて曲げ角度を深くする方が、曲げ品質が向上するのかを検証した。

最初から 10mm 押込み、1回経路を通過して加工を完了した計算結果(押込みピッチ 10mm)を等高線図で表したものを図7左に示す。押込みピッチ 2mm として、経路を5回通過して加工した結果を図7右に示す。

前者の加工では、図7左の矢印部のS字経路の凸側部位において、肩部ローラがワークへ食い込む現象がおき、窪みが生じた。これは、平板形状に対して肩ローラが押込まれるような変形となることが原因で、極端な歪みが生じやすい。一方、複数回の加工に分散した後者は滑らかな等高線となり、極端な歪みが発生しないことを確認した。

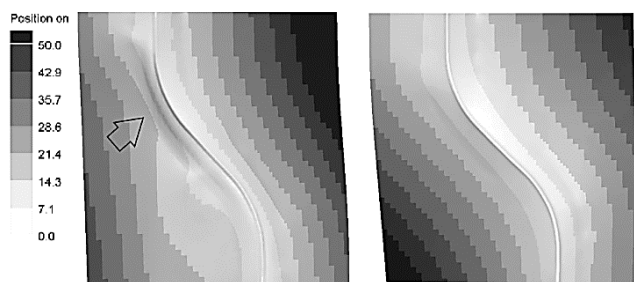


図7 経路の影響 (左：1回経路, 右：5回経路)

## 4 曲線曲げのトライアル

### 4.1 曲げる経路の計算

直線曲げの加工結果と曲線曲げの計算結果から得られた知見を基に、新たに曲線曲げ機を製作した(図8参照)。成形に必要な曲げる経路の生成・制御方法を次に示す。

#### 【STEP1】経路データ作成

- ・被加工ワーク上に自由曲線で曲げる経路を定義する。
- ・自由経路を直線補完する複数の加工点をプロットする。
- ・各加工点の2次元位置座標を順番に計算する。

#### 【STEP2】スライダ情報に変換, 送信

- ・被加工ワーク上の開始加工点の位置座標上に曲げツールがくるように4本の電動スライダの各位置を逆算する。
- ・この逆算を加工開始点から終了点に至るまで順番に行う。
- ・曲線曲げ機の制御用PLCに各スライダ位置を送信する。
- ・被加工ワークをセットしてタッチパネルGOTから開始の合図を送る。

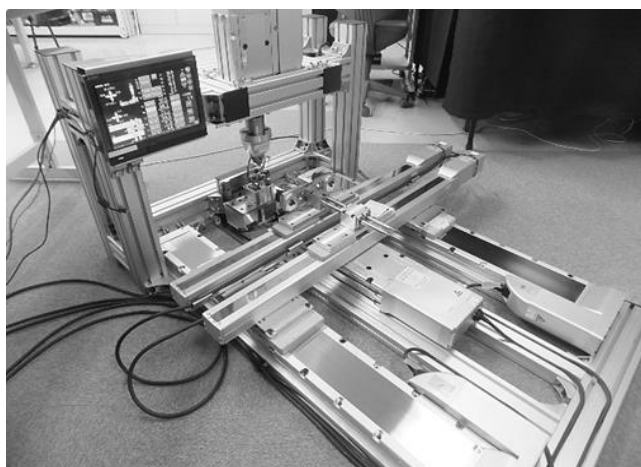


図8 曲線曲げ機

### 4.2 S字曲げ加工品

試作した曲線曲げ機を用いて、次の加工条件にて、ト

ライアルを実施した。

#### 【トライアルの加工条件】

- ・供試材は、軟鋼板 (SPCC) で板厚 0,6mm
- ・被加工ワークのサイズは、250×250mm
- ・曲線経路は机上計算で使用したS字経路
- ・最大押し込み深さを3mm, 6mm, 9mm, 12mmの4条件
- ・1回ごとに増やす曲げ治具の押し込みピッチは1mm (最大押し込み深さ12mmの場合、加工を12回繰り返す)

今回のトライアルから、「曲げツールの押し込みを深くするほど肩ローラでの折れが顕著になりやすい」、「チャック機構付近で無理な力がかかる場合がある」、「曲げ加工の繰り返しの途中で曲げ経路がずれる場合がある」などの課題を確認できた。

最大押し込み深さを3mmおきに変え、肩折れ対策を行った加工品を図9に示す。このように、机上計算と同様に曲線に沿った曲げ加工ができ、押し込み量を増やすことで、曲げ深さの異なる加工ができることも分かった。

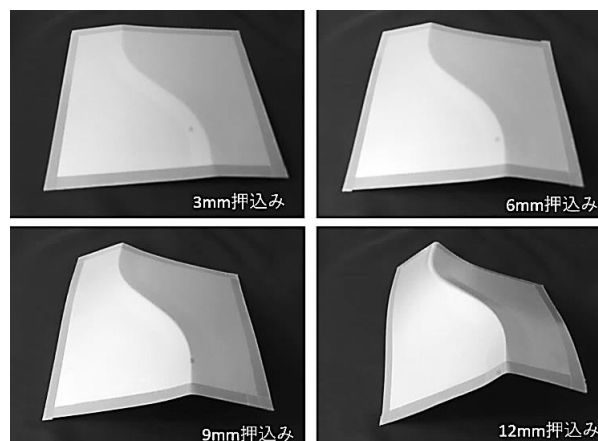


図9 S字経路に沿って曲げた加工品

## 5 結 言

逐次曲げ加工の初期検討を行うために、曲線曲げ加工の机上計算、曲線曲げ機の試作機開発、トライアルなどを順次行った。その結果、当初の予定とおりの曲げ角度と曲げる経路を制御できる曲げ加工が可能であることを示した。また、試作を行う中で、肩折れやチャック機構でのゆがみなどの加工に伴う課題を把握できた。今後はこれらの課題対策を検討するとともに、更に自由度の高い薄板成形を可能にする技術開発に取り組む。

本研究を遂行するに当たり、公益財団法人天田財団から援助を頂きましたことに感謝いたします。

## 文 献

- 1) 安部 他：広島県立西部工技研究報告, 62(2019), 25