

# 汎用ツールによる金型レスの逐次曲げ成形技術の開発

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  
部長 安部 重毅  
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017033)

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では、金型を使用したプレス成形が主流であるが、金型の製作費が高い、製作期間がかかる、大型の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、インクリメンタル成形やスピニング成形といった“逐次成形法”がある。逐次成形法とは、1つの汎用ツールを使って張出し等の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を可能にする成形方法である。

筆者らは、この逐次成形法に注目し、張出し等の加工に代わり局所的な“曲げ”加工を行いつつ、加工部位を連続的に移動制御することで、板金成形を行う“逐次曲げ加工”方法を提案する。

本提案方法により、従来のベンディングマシンでは、同一の曲げ角度、かつ曲げ中心を結ぶ線（以下、曲げ経路）が直線でしか加工できなかったものが、曲げ角度を任意に変更でき、曲げ経路を曲線とする加工が可能になる（図1参照）。

本報では、このような加工を実現するために、要となる汎用“曲げツール”と、曲げツールとワーク間の相対制御を行う“曲げ機”の開発を行い、これらを用いて曲線経路に沿って薄板鋼板を曲げる加工を実現したので、これを報告する。

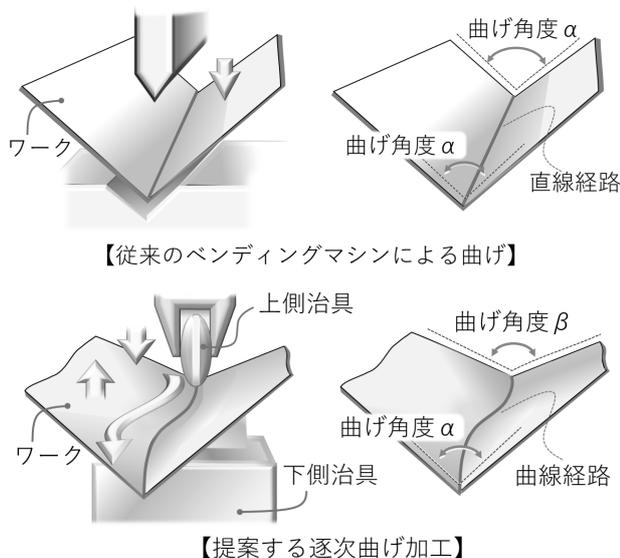


図1 従来の曲げと提案する逐次曲げ

## 2. 研究方法と成果

### 2.1 逐次曲げ加工の基本機構

逐次曲げ加工では曲げ加工に特化した汎用ツールを使用する。この曲げツールは、上側に配置する上側治具と、下側に配置する下側治具の1組のツールで構成し、一方の治具を相手側治具に押込むことで、局所的なV曲げを行う。

曲げの機構を具体的に示す。図2の概念図の例から、曲げ機の機構により、上側治具を下側治具に押し付けると、上側治具の押込みローラがワークを經由して、下側治具の受けパッドを押し込む。パッドの下降により、下側治具のリンク機構を介して、受けパッド先端を中心に1組の肩ローラがV字を形成するように傾斜しながら持ち上がる。ワークは、こうして持ち上がった1組の肩ローラと押込みローラ間の3か所の接触部で曲げられる。

図2左のように、押込みローラを微量だけ押し込むと、肩ローラの傾斜は少なく、浅い曲げとなる。一方、押込み量を増やすと、図2右のように、より深い曲げに加工できる。

逆に押込み量を減らすと、内挿バネ力による復帰機構により、受けパッドを初期位置の状態へ戻そうとする力が働く。これにより、1組の肩ローラは深いV字から浅いV字に移行する。

提案する逐次曲げ加工では、ワークを任意の曲げ経路に沿って移動させつつ、順次曲げを加える。そのため、曲げ経路の移動中に押込み量を増加、減少させる制御を行うことで、ワークの曲げ経路の任意の部位で、深い、浅いといった“曲げ角度を調整”した加工ができる。

なお、この曲げツールは、加工力低減やこすれ傷防止のために、V曲げ時にワークと接触する3か所の部位は、摩擦抵抗の少ない“ローラ構造”を採用する。

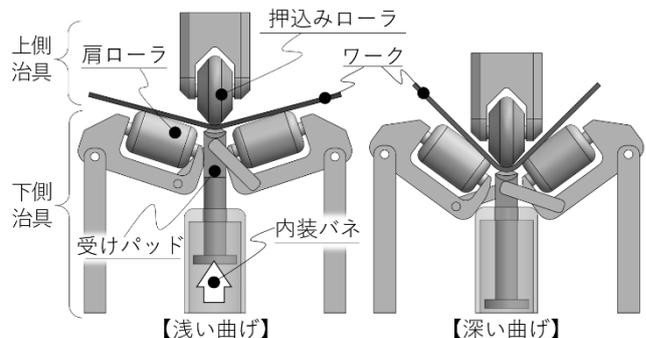


図2 提案する曲げツールの概念図



ム製)で形状計測を行い、長手方向断面の形状評価を行う。

図5に、最終押し込み深さを変えた場合の中央断面における夾角をプロットしたグラフを示す。夾角と最終押し込み深さはほぼ比例関係となった。

最終押し込み深さ 18mm の加工品に対して、長手方向の断面位置における夾角をプロットしたグラフを図6に示す。加工品の形状内での最大ずれ角度量は 2.83deg であった。

固定側端部付近での曲げが浅くなるのは、曲げ機の構造上、ワーク固定機構と曲げツールが衝突するため、ワークの端部まで加工ができないことが原因である。

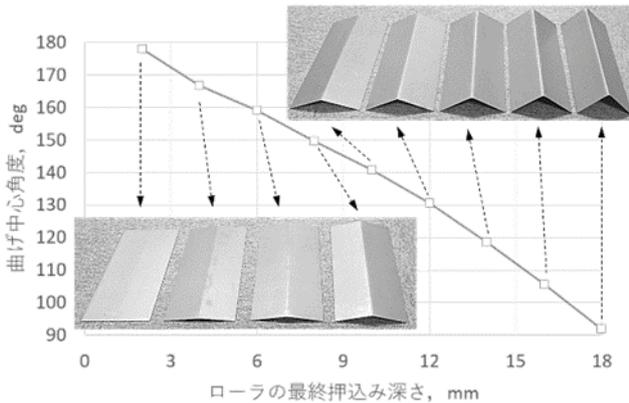


図5 最終のローラ押し込み深さと夾角の関係

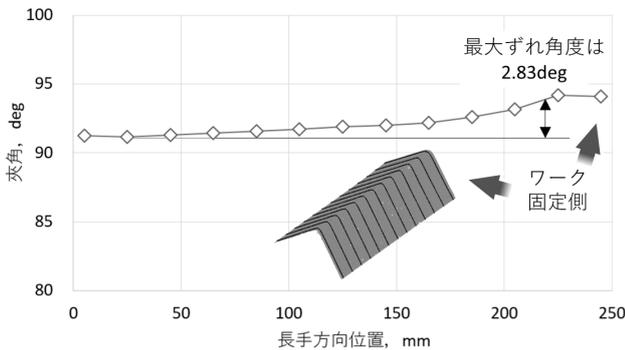


図6 曲げ角度の変化

次に、従来のベンディングマシンでは加工できない曲げ角度を徐変する加工トライを行う。

曲げツールの押し込み深さは、経路の開始端から 70mm 地点までは 0mm とし、そこから徐々に押し込み深さを増やし、110mm 地点までに規定押し込み深さにする。この規定押し込み深さのまま 30mm 進むとまた押し込みを徐々に減らし、押し込み深さを 0mm にもどす加工経路とする。

押し込みピッチは 1mm、最も押し込みが深い部位の最終押し込み深さは 6mm、8mm、10mm、12mm、14mm の 5 条件とする。各条件における繰り返しの最後に通る押し込み経路を図7上に示す。

図7下に加工品を示す。最終押し込み深さを大きくするほど、最深部での曲げ角度は深くなった。また、最終押し込み深さが 6mm と浅い曲げでも、浅いエッジが立ち、キャラクターラインのような特徴のある曲げを局部的に付与できた。

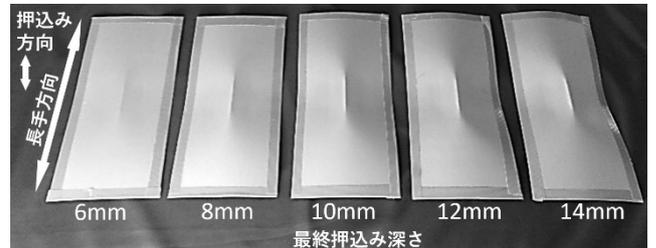
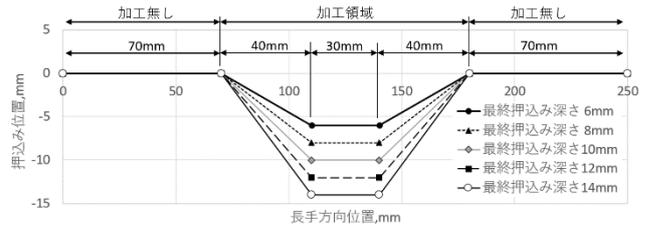


図7 曲げ角を徐変する押し込み経路とその加工品

次に、最終押し込み深さ 14mm、押し込みピッチ 1mm として、急激に押し込む経路 1 と、緩やかに押し込む経路 2 の異なる 2 種類の押し込み経路の加工を実施した。

押し込み経路 1 を図8上に、経路 1 で加工した加工品形状を図8左に示す。また、経路 2 を図8下に、経路 2 で加工した加工品形状を図8右に示す。なお、図8に示す加工品形状は、三次元測定器で計測し、計測結果データを等高線表示したものである。

押し込み経路により傾斜を示す等高線が大きく変わり、形状に変化を持たせることができた。

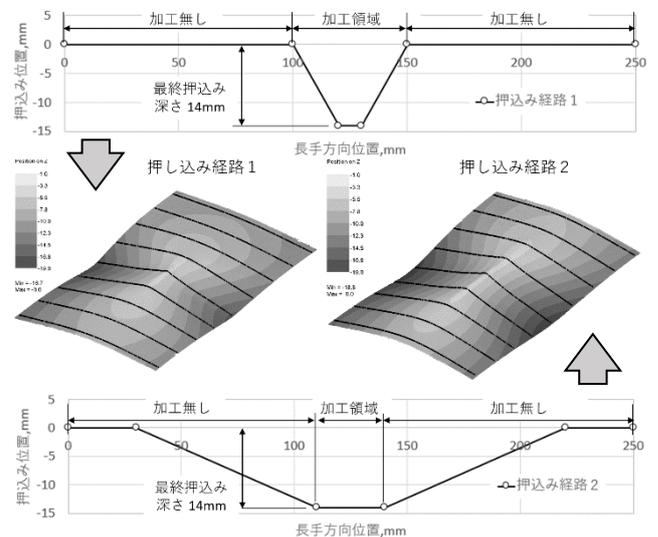


図8 押し込み経路による加工品形状の影響

## 2.5 曲線曲げの解析

直線曲げ機によるトライ結果から、曲線曲げ加工も可能と判断し、曲線曲げ機の開発に着手した。開発の前段階として、曲線曲げ特有の課題を洗い出すために、曲線曲げの加工計算を行う。この計算には、有限要素解析のソフトウェア PAM-STAMP (仏, ESI 社製) を使用する。

計算で使用する曲げツールモデルを図9に示す。これは

図4の曲げツールをもとにワークと接触する部位だけを取り出し、この部位に剛体要素を張り付けたものである。

この曲げツールモデルは、押し込みローラ、センタローラ、肩ローラなどで構成する。押し込みローラに下向きの強制変位を与えるとワークを経由して、センタローラが押し込まれ、それに伴いリンク機構により肩ローラが傾斜姿勢をとる。ワークは、この押し込みローラと1組の肩ローラにより、局所的な3点曲げ加工を受ける。

次に計算における加工の様子を説明する。

製作する曲げ機では、曲げツール側を固定、ワークを移動制御するが、その場合、ワークを進行方向に対して接線方向を保ちつつ移動させる必要があるため、移動と姿勢変更を同時に設定する必要がある。そのため、計算では、製作する曲げ機とは異なるが、ワーク側を位置固定し、曲げツールを強制移動させる方法で加工を模擬する。

はじめにワーク端部となる初期位置で押し込みローラを規定量だけ押し込み、初期曲げを付与する。ついで、押し込み深さは規定量のままで、曲げツールを曲線経路に沿って移動させることで、S字経路全体に曲げを付与する。経路の終端位置に至ると、工具の押し込みを解放する(図10参照)。

曲げ経路を複数回通過して、徐々に深く加工をする場合は、工具の押し込みを解放した後に、もう一度初期位置に戻る。ついで、初期位置にて、前回の規定値以上に曲げツールを押し込み、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する。

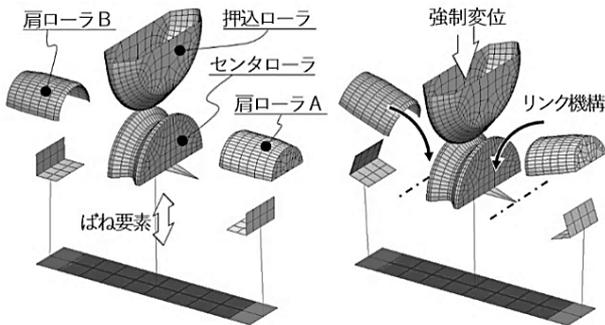


図9 曲げツールの解析用のモデル

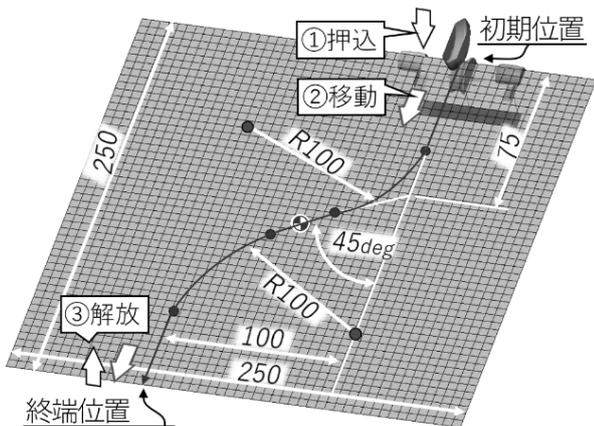


図10 S字状の曲げ経路

計算条件を次に示す。ワーク形状は250×250mm、材料は板厚0.6mmの軟鋼板(SGCC)とする。曲げ経路は図10のS字経路とし、押し込みピッチ2mm、最終押し込み深さを10mmの加工を想定した計算を行う。

最終押し込み深さを2mm、4mm、6mm、8mm、10mmとした計算結果に対して、等高線表示したものを図11に示す。この計算結果から、曲線経路の加工も可能であり、押し込み量を増やしつつ、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。

次に、曲線曲げにおいても、徐々に曲げ角度を深くしつつ曲げ角度を深くする加工の方が、高い曲げ品質の成形ができるかを計算で検証する。

初期位置で10mm押し込み1回経路を通過して加工を完了した計算結果(押し込みピッチ10mm)を図12左に、押し込みピッチ2mmとして、経路を5回通過して加工した結果を図12右示す。

前者の加工では、図12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、もともと平板形状から急激な曲げ変形を付与することが原因で、極端なゆがみが生じやすい。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できた。

以上のように、曲線経路の曲げ加工の計算においても、複数回に分けて曲げ加工を行う方が品質的に望ましいことを確認できた。

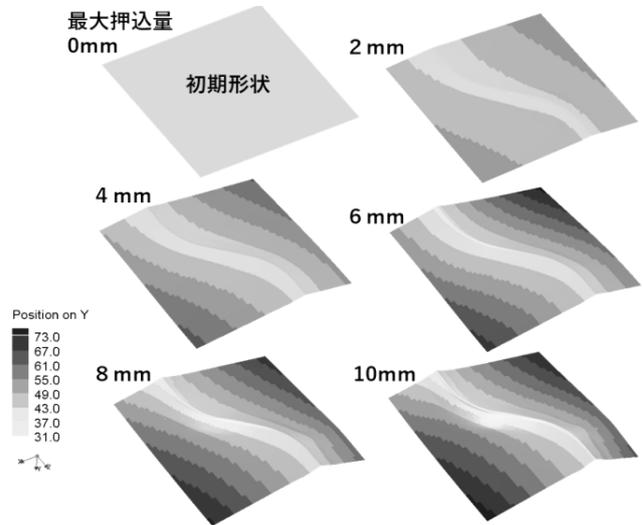


図11 曲線経路の曲げ計算の結果

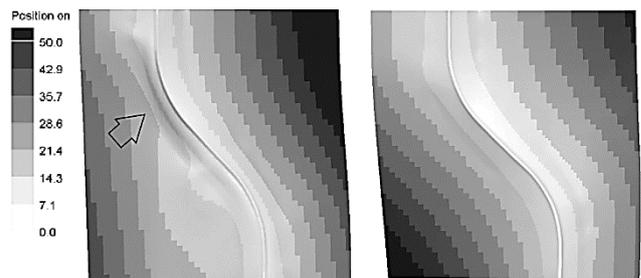


図12 繰り返しかえし経路の影響(等高線図)

## 2・6 曲線経路の曲げ機による加工

直線曲げトライアルと計算結果から得られた知見をもとに、新たに曲線曲げ機を製作した。曲げツールは、直線曲げ機と同型ツール（図4参照）とし、曲線曲げ機中央に固定して使用する。

曲線曲げ機におけるワークの経路生成方法を次に示す。まず、曲げ経路をCAD上に自由曲線で定義する。その曲線上に点群を配置して、各点群の位置座標を加工開始点から終了点まで順番に出力する。次にワーク上の加工開始点に曲げツールがくるように各電動スライダの位置を逆算する。この逆算を加工終了点に至るまで順番に行い、曲線曲げ機の制御用PLCに取り込む。後は、取り込んだデータを順番に実行処理させる。

試作した曲線曲げ機を用いて、トライアルを実施した。加工条件は前節の計算と同様で、曲線経路は図9の経路、ワーク初期形状は250×250mm、材料は板厚0.6mmの軟鋼板（SPCC）とする。押込みピッチを1mmで固定し、最大押込み深さを3mm、6mm、9mm、12mmの4条件の加工をした。

各条件の加工品を図13に示す。このように、計算と同様に曲線に沿った薄板鋼板の曲げ加工ができた。

また、C字形経路を生成し、この経路に沿って同様の加工を施した加工品を図14に示す。C字形経路では、深く曲げるとワーク固定部でゆがみが生じたが、経路を変更するだけで多様な曲げができた。

今回のトライアルから、曲げツールの押込みを深くすると肩ローラでの折れが顕著になる、ワーク固定部付近でゆがむ、曲げ加工の繰り返しの途中で曲げ経路がずれるなどの課題を確認できた。

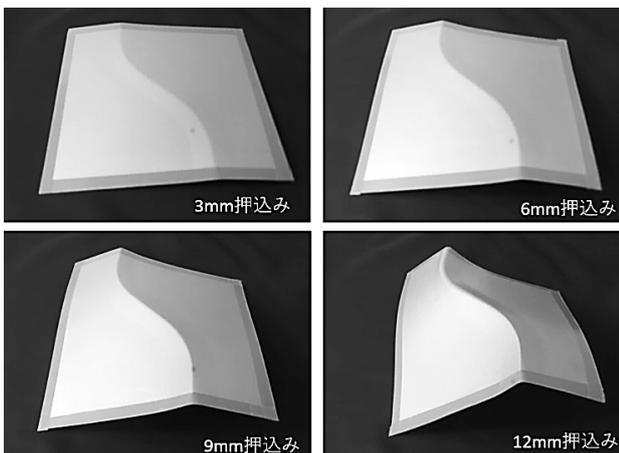


図13 S字経路に沿って曲げた加工品

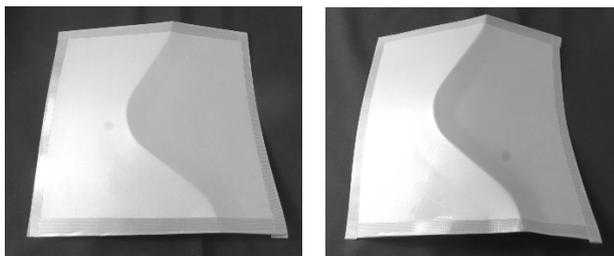


図14 C字経路に沿って曲げた加工品

## 2・7 複数の曲げを付与した加工

最後に、1つの薄板鋼板に浅い曲げ加工を等ピッチで複数回入れた加工トライアルを行った。なお、浅い曲げとはいえ、繰り返すとワーク全体に反りが生じるため、後行程にて周囲のたて壁をたてて、加工面を平面状に補正した。加工品を図15に示す。

このように曲げを繰り返すことで、立体的な凹凸模様を浮かす意匠的な製品への展開もはかれる。

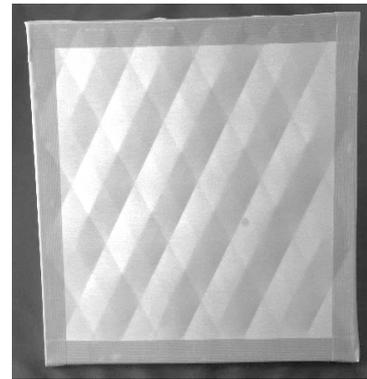


図15 複数回浅い曲げを入れた加工品

## 3. 結論

薄板鋼板を対象に、自由度の高い曲げ加工を実現する逐次曲げ加工方法を提案するとともに、当該加工方法を実現する試作加工機を制作して、加工トライアルを行った。

その結果、汎用ツールの加工経路を変えるだけで、自由度の高い複雑な曲げ加工を実現することができ、本提案方法が有効であることが分かった。

今回得られた知見は次のとおりである。

- 1) 逐次曲げ加工に特化した曲げツールを用いることで、曲げ深さを徐々に変更する加工や、曲線経路に沿った曲げ加工が可能である。
- 2) 曲げ経路のパス情報を変更することで、1つの汎用曲げツールで、多様な曲げ加工ができる。
- 3) 逐次曲げ加工を模した計算予測ができる。これにより、机上での加工の可否の事前検討ができる。

今後の課題として、さらなる曲げ品質の向上、曲げ加工に要する時間の短縮、強度の高い材料への対応などがあり、解決を目指す。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の研究助成（AF-2017033）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。