曲げ半径と断面形状を同時に制御するフレキシブル曲げ加工法及び適正金型の開発

（地独）神奈川県立産業技術総合研究所　　高橋　和仁

1．はじめに

地球温暖化の影響を軽減するため、脱炭素社会への取組みの一つとして、燃費性能向上につながる輸送機器の軽量化に拍車がかかっている。例えば、重量に対して曲げ剛性とねじり剛性が高い管材の有効利用は車両の軽量化に効果的であり、管材加工の効率化が図れるチューブフォーミングへの期待は大きい。チューブフォーミングで多用されるのが曲げ加工である。管材の曲げ加工において、管材の多様なロッドサイズかつ複雑な曲げ半径と断面の仕様に対応し、さらなる高精度化、生産効率化を図るために、ダイ（曲げ金型）レスであること、さらなるインテリジェント化が必要と考えられる。昨今の I.o.T、AI 技術の潮流と相伴って、曲げ加工の金型レス化に加え、インテリジェント化、インラインでの制御方法や評価技術、これらを組込んだ新しい加工法の開発が期待される。

一方、管材の曲げ加工は、曲り管の用途に応じて多種類存在する。特に回転引曲げ加工[1),2)]は、生産性や操作性が良く、曲げ半径と曲げ断面の加工精度の向上に効果的であるため、製造業で多く使用されている。回転引き曲げ加工のプロセスは、一つの曲げ半径を有する曲げ金型ダイに管材を巻き付けることで、一定の曲げ半径を持つ曲り管が加工される。また、曲り管の断面の真円度はマンドレルの使用により確保される。しかしながら、曲げ管材の曲げ半径は、ダイの曲げ半径で決定され、目標の曲げ半径に応じた曲げダイを選択する必要がある。しかも曲げ半径は曲げ加工中に変更できない。曲げ加工中に曲げ半径が変更可能なフレキシブルな加工法[3)～6)]は幾つか開発されているが、曲げ断面の加工精度は考慮されていない。そこで、曲げ管材の断面の高い真円度を確保しながら、加工中に曲げ半径をフレキシブルに変化させることができる新しい曲げ加工法を提案した。曲げ加工装置の構成は、曲げ押しロール、送りロール、軸押しユニット、マンドレルで構成されている。チューブは、送りロールと軸押しユニットで軸方向に送られ、曲げロールが移動してチューブの軸方向に対し垂直に押すことで曲げ加工される。曲げロールの位置によって曲げ半径が決まり、ロール位置を制御することで曲げ半径が変えられる曲げ加工法である。本加工法のユニークなポイントは、曲げ加工中の曲げロールの位量が曲り管の曲げ半径を決定し、マンドレルの位置が真円度を決定することである。したがって、曲げ半径と真円度に対する曲げロールとマンドレルの位置の組み合わせの影響を明らかにする必要がある。

本報では、本曲げ加工法において、（1）FEM シミュレーションにより、曲げ加工装置の設計指針を得て加工法の特徴を推定した結果について、（2）曲げ加工装置を試作し、曲げロール位置とマンドレル位置などの加工条件が、曲げ半径と断面形状に与える影響を実験と解析により比較し検証した結果について報告する。

2．目　的

本研究は、（1）特定の曲げ半径の金型を用いず金型レスで、曲げ半径と断面形状を同時にインラインでフィードバック制御可能なフレキシブルな曲げ加工法と装置を開発する。（2）実験と FEM 解析により、曲げロール位置とマンドレル位置が曲げ半径とへん平に与える影響を明らかにし、フレキシブルな曲げと高い真円度の両方を達成するための目標曲げ半径に応じた適切な条件を求めることが目的である。

3．実用的な価値、実用化の見込など

本加工法を適用した曲げ加工装置では、曲げロール位置とマンドレル位置を調整することにより、STK400 鋼管（直径 27.2 ㎜、肉厚 1.9 ㎜）を用いて、最小曲げ半径が 4d㎜（d：管直径）、へん平率が 0.8％の加工精度の曲げ加工が可能である。さらに加工中に曲げ半径は 4d㎜以上に変更可能であり、へん平率が 1.3％以下の加工精度の曲げ加工が実現できる。現状でも実用化は可能だが、さらに最小曲げ半径を求める曲げ加工では、曲げロールの管材軸方向の剛性が必要であり、曲げロールと装置の改良が必要である。

ただし、研究コスト上、マンドレル位置を制御するシステム（マンドレルコントローラシリンダ等）は設置していないため、マンドレル位置はマニュアルで設定している。すなわち、曲げロール位置に伴う曲げ半径の変化に対応するマンドレル位置の同時制御ができていないのが現状である。実用化に向けて、目標曲げ半径に応じた曲げロールとマンドレルを同時制御したときの適正な制御方法を求めることが必要となる。

4．研究の詳細

4．1 成形プロセスと曲げ加工装置の概略

図1に曲げ半径と断面変形をインラインで制御可能なフレキシブル曲げ加工の概念図示す。成形プロセスは，ロール曲げと押曲げの形式となり，チューブは、送りロールを通して軸押しユニットで軸方向に荷重 F_a を負荷することで送られ、曲げロールが移動してチューブの軸方向に対し垂直方向に荷重 F_r を負荷し押すことで曲げ加工される。従って曲げロールの位置によって曲げ半径が決まり、ロール位置を制御することで曲げ半径 R が変えることが可能な曲げ加工法である。曲げ時の断面形状はマンドレル位置により制御する。しかし、前述したように曲げロールとマンドレル位置の同時制御はできていない。現状では、マンドレル位置をマニュアルで固定し設定している。

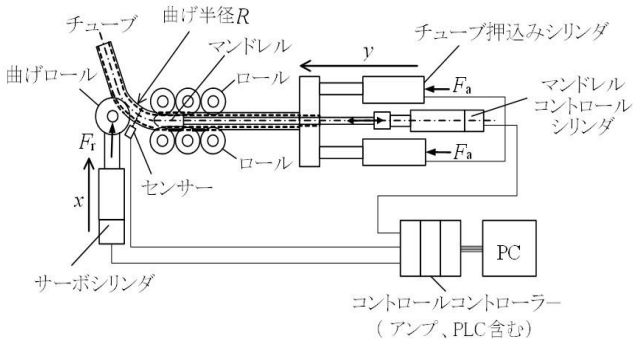


図1 曲げ半径と断面変形をインラインで制御可能なフレキシブル曲げ加工の概念図

また、今後曲げ加工中の曲り部近傍に変位センサーを取付けることで，曲げ半径と断面変形の情報をコントローラと PC を介してプログラム制御することも可能である。

4．2 FEM シミュレーション

4．2．1 解析モデルとパラメータ

曲げ加工装置の設計指針を得ることおよび加工法の特徴を把握することを目的に、図2に示すシミュレーションモデルを構築し、FEM 解析を行った。解析には成形加工シミュレーションソフト Simufact Forming (MSC ソフトウェア社)を用いた。表 1 に解析パラメータを示す。

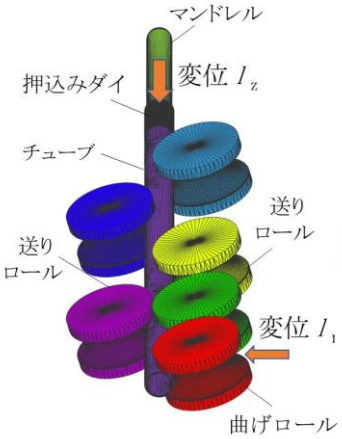


図2 解析モデル

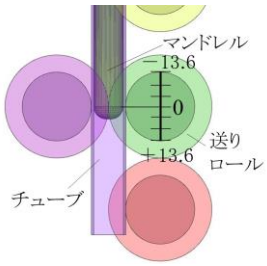


図3マンドレル位置

表1 解析パラメータ

曲げロールダイ半径R_d / ㎜	1.5d(40.8)
曲げロール押込距離l_X / ㎜	0～Rd(40.8)
管材押込距離l_Z / ㎜	0～300
ﾏﾝﾄﾞﾚﾙ位置md / ㎜	− 13.6 ～ + 13.6
曲げ角度θ / °	90～180
曲げロールダイ	剛体
送りロールダイ	剛体
押込みダイ	剛体
マンドレル	剛体
チューブ	肉厚方向 2～4
分割	周方向 60
	長手方向 2mm / 分割

曲げロール半径 R_d は 1.5d(d=27.2) mm とした。曲げロールの押込み距離 l_r は 40.8(R_d)mm まで可変とする。送りロールは自由回転の設定とした。チューブは弾塑性体として扱い、その分割は肉厚方向 2～4 分割、周方向 60 分割，長手方向 2mm 間隔である。管材の直径は 27.2 ㎜、肉厚は 1.9 ㎜であり、材質は STK400 および STK490 である。引張試験より機械的性質を求め、ひずみ－応力線図より、応力構成式を求め、材料データとして解析に用いた。また、図３に示すようにマンドレル位置は、先端のコーナ部おわりの直線部位を基準の０とし、曲げ進行方向を＋、後進方向を－の距離として定義した。-13.6～＋13.6mm と可変である。曲げ半径 R(外側半径 R_{out}、内側半径 R_{in})はソフト上で曲げ沿線の特定部を3点測定し計算で求めた。断面変形(へん平)D_f は、管材断面の曲げ半径方向の直径を d_r、垂直方向の直径を d_s として、へん平率 $D_f = (d_s - d_r) \times 100$ (%)として求めた。

４．２．２ シミュレーション解析結果

図4に示すように、比較的曲げ半径が大きい曲げ角度 90° 近傍の曲げ加工は、押込みダイの軸方向に時間 60sec、距離 300 ㎜を設定し、曲げロールの軸方向に時間 60sec と距離 0→13.6→27.2→13.6→6.8 ㎜と設定することで解析上加工できる。このときの R_{in} は 92.72 ㎜、D_f は 0.26％であった。

本加工法の特徴は以下のようである。図５に示すように、曲げロールの中心軸が管の中心軸を超えると、曲げ内側の送りロール部入口部に顕著にしわが発生した。(屈服ともとれるが、ここではしわとする。)したがって、曲げロールの押込み量は、管材半径以上は成形不良を起こす。また、図6に示すようにマンドレル位置を０㎜に設定し、曲げ角度 90° を超えて曲げた場合に、顕著に屈服が発生した。マンドレル位置は曲げ角度にも影響すると考えられる。

１工程で２つの曲げ半径を変えマンドレル位置を変化させた解析結果を図７に示す。曲げロールの押込み量を，①40.8 ㎜→②27.2 ㎜と変更する

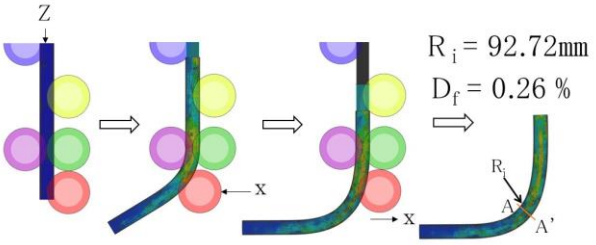


図４　曲げ半径が大きい曲げ加工

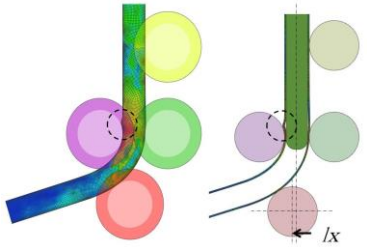


図５　曲げロール位置による成形不良

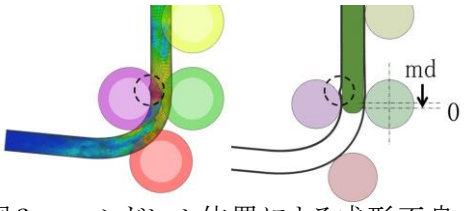
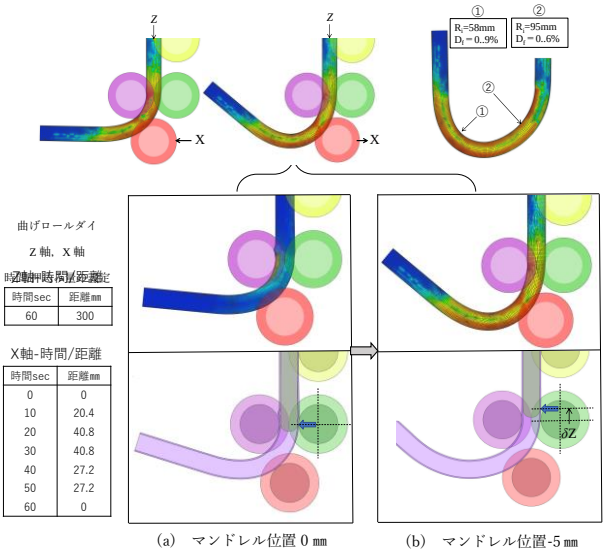


図６　マンドレル位置による成形不良



(a)　マンドレル位置 0 ㎜　　(b)　マンドレル位置-5 ㎜

図７押込み量とマンドレル位置を変化させた解析

ことで、１工程で①曲げ半径 R_i＝58mm、②曲げ半径 R_{in}＝95mm が得られる。へん平を抑えたいとき、マンドレル位置は 0mm に移動させる。しかしながら、マンドレル位置 0mm では曲げ角度 90° 以上曲げると屈服が発生する。このときマンドレル位置を-5mm まで後退させると屈服せずに曲げ角度 180° までの曲り管が加工できる。このときのへん平率は①0.9％，②0.6％であった。1 工程で 2 つの曲げ半径を変えて、へん平率が 1％以内の曲げ加工が解析上可能である。

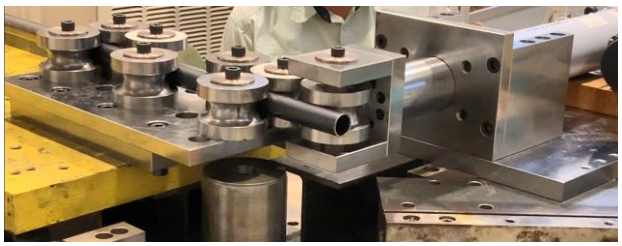
4．3　実機加工実験

4．3．1　加工実験

FEM 解析より得られた知見より加工装置を試作し加工実験を行った。実験は、STK400 鋼管（直径 27.2 ㎜、肉厚 1.9 ㎜）を用いて、曲げロールの押込み量を 13.6 ㎜から 27.2 ㎜まで 13.6 ㎜/sec の速度で移動させ、マンドレル位置を-13.6～＋13.6 ㎜まで変更した組み合わせ条件で実施した。また管材の軸押込み量は 350 ㎜、押込み速度は 34.5 ㎜/sec である。

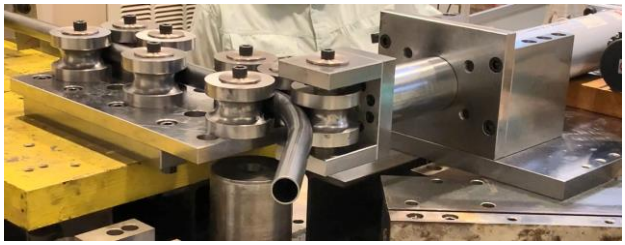
4．3．2　加工実験結果

図8に加工中に曲げロールの押込み量を変えた曲げ加工を示す。図9(a)は、図8の加工中に曲げロールの押込み量を①13.6 ㎜→②27.2 ㎜に変化させた曲り管である。また図9(b)は押込み量



(a) 加工開始

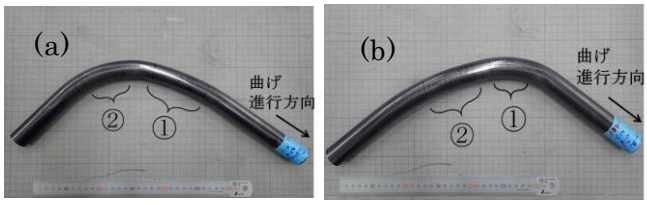
(b) 曲げロール押込み量 13.6 ㎜



(c) 曲げロール押込み量 27.2 ㎜

(d) 加工終了

図8　曲げロールの押込み量を変えた曲げ加工



①　R＝374 ㎜ Df＝0.44%　　①　R＝143 ㎜ Df＝1.32%

②　R＝139 ㎜ Df＝1.10%　　②　R＝339 ㎜ Df＝0.62%

図 9　曲げ加工中に曲げ半径を変えた曲り管

図 10　マンドレル位置を変えた曲り管
（曲げロール押込み量 27.2 ㎜）

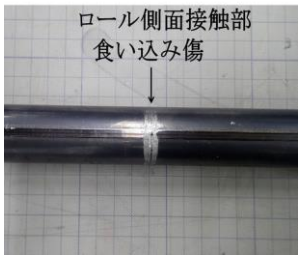


図 11　食い込み傷

図 12 しわによる成形不良

を①27.2 ㎜→②13.6 ㎜に変化させた曲り管である。実機においても１工程で２つの曲げ半径を変えて、へん平率 1.3%の曲げ加工が可能である。

図 10 は曲げロール押込み量 27.2 ㎜とし、マンドレル位置を-13.6 ㎜、-6.8 ㎜、0 と変更して加工した曲り管である。

また、マンドレル位置を 0 より先のプラス側に出すと、図 11 に示すように送りローラと管材の側面接触部に食い込み傷が生じ加工不能となる。曲げロールの押込み量を 40.8 ㎜に押し込むと図 12 に示すように曲げ内側にしわが生じ成形不良となる。よって、現時点で本装置の機構で変更可能な曲げロール位置の最大量は 27.2 ㎜であり、マンドレル位置の最大量は 0 ㎜であった。

図 13 にマンドレル位置が曲げ半径に与える影響を示す。解析結果の検証のため実験結果と比較した。マンドレル位置の前進に従い、曲げ半径

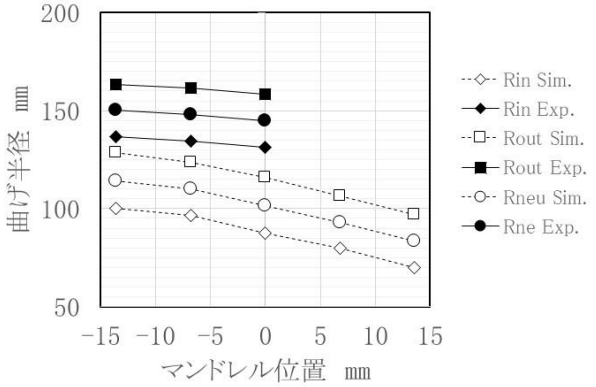


図 13 マンドレル位置が曲げ半径に与える影響

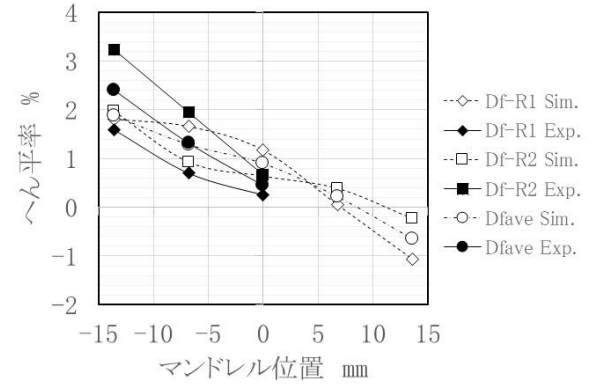


図 14 マンドレル位置がへん平に与える影響

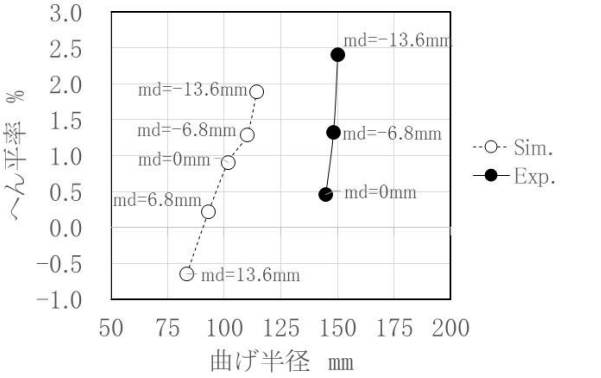


図 15 曲げ半径とへん平およびマンドレルの関係

は小さくなる。これはマンドレル位置が進行するとマンドレルの先端部が曲げの支点位置となり、曲げが進行するためと考えらえる。

図 13 にマンドレル位置がへん平に与える影響を示す。マンドレル位置の前進に従い、へん平は小さくなる。これはマンドレルの前進に伴い、マンドレルの拘束力が増加するためと考えられる。

図 14 に曲げ半径とへん平およびマンドレルの関係を示す。通常曲げ半径が小さくなると、へん平は大きくなるが、適正なマンドレル位置を設定することでへん平が抑制できる。

5. まとめ(結言)

本加工法を適用した曲げ加工では、適正な曲げロール位置とマンドレル位置を設定することにより、STK400 鋼管(直径 27.2 ㎜、肉厚 1.9 ㎜)を用いて、最小曲げ半径が 4ｄ㎜(d:管直径)、へん平率が 0.8%の加工精度の曲げ加工が可能である。さらに加工中に曲げ半径を 4ｄ㎜以上に変更可能であり、へん平率が 1.3%以下の加工精度の曲げ加工を可能とした。今回、曲げロールとマンドレルの同時制御と目標曲げ半径に応じた制御方法の検討、ならびに曲げロールの形状適正化には至らず、これらは今後の課題である。

6. 参考文献等

1) 高橋和仁, 渡邊峻士, 久保木孝, 村田眞, 小野数彦, 矢野巧造:回転引曲げ加工における円管の軸押し力によるへん平抑制, 塑性と加工, 49, 572, 896-900 (2008).

2) Kazuhito Takahashi : “Suppression of Flatness in Circular Tube-Draw Bending by Applying Side Compression”, Material Transactions, 53, 5, 870-874 (2012).

3) 久保木 孝,古堅 宗勝,逢坂 慎一郎,小野敏秀:ダイレス U ベンド法の理論解析 -管材の高精度ダイレスベンド法の開発 Ⅰ-,塑性と加工 41(473), 617-621,(2000).

4) 久保木孝,古堅 宗勝:ダイレス U ベンド法の曲げ条件の最適化 - 管材の高精度ダイレスベンド法の開発 II -,塑性と加工 42(491), 67-71, (2001).

5) S. Chatti, M. Hermes, A.E. Tekkaya, M. Kleiner: The new TSS bending process: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections , Manufacturing Technology 59 (2010) 315-318.

6) A. Ghiotti, E. Simonetto, S. Bruschi, P. F. Bariani, “Springgback measurment in three roll push bending process of hollow structural sections”, CIRP Annals - Manufacturing Technology 66 (2017), 289-292.