

オフセットローラー曲げ加工法の実用化研究

神奈川県立大学 自動車システム開発工学科

助教 加藤俊二

(平成 21 年度一般研究開発助成AF-2009007)

キーワード: 曲げ加工、アルミニウム・スペースフレーム、オフセットローラー、低周波振動

1. まえがき

地球環境を守るという観点から炭酸ガスの削減と省エネルギーは極めて重要な問題であり、自動車の軽量化が求められている。自動車の軽量化に対し、アルミニウム・スペースフレームの採用が注目されているが、自動車への適用に際し、最大の技術的課題はその曲げ加工である。アルミニウム・スペースフレームに用いられている型材の曲げに対し、従来の曲げ加工では十分には対処できない。即ち、従来の加工法は、型材を一定の曲率に、比較的精度よくかつ効率的に曲げることができるが、スペースフレームの曲げ加工では、自動車の設計に合わせて、軸方向に曲率を変えて曲げる必要がある。

軸方向に曲率可変の曲げ加工法として押し曲げの一種である村田らによるMOS曲げ¹⁾がある。この曲げ加工法は3次元の曲げが可能であるが加工精度の再現性に問題がある。スペースフレームとして使用されるアルミニウム押し型材では、押し時の熱等に起因する、軸方向の材料特性や寸法精度にバラツキが生じ、これらのバラツキは曲げ後の曲率のバラツキをもたらす。これは自動車用のフレームとしては致命的な欠陥であり、何らかの寸法の補正をする必要があるが、MOS曲げでは、インプロセスでの補正が難しいと思われる。

そこで著者らはMOS曲げを少し変えたオフセットローラー曲げ（以下OR曲げという）加工を提案した。この加工法は、スペースフレームをガイドローラーに通し、オフセットされたローラー（曲げローラー）に当て、曲げを行う。曲げローラーの位置を変えることにより、曲率を変えることができる。

これまでに試作機を3台製作し、実用的な寸法形状の角管を加工できるが^{2)・6)}、実用化のためには加工限界の向上および加工精度の向上を図る必要がある。

そのため低周波振動を付与することによって加工限界の向上を試みる。また、アルミニウム押し型材の押し時の熱等に起因する軸方向の材料特性や寸法精度のバラツキを補正して所定の曲率に曲げるために、インプロセスで加工後の曲率計測を行い、補正ローラーによる加工精度の保証を図る手法の開発を行い、実用化のための基礎的な知見を得ることを目的とした。

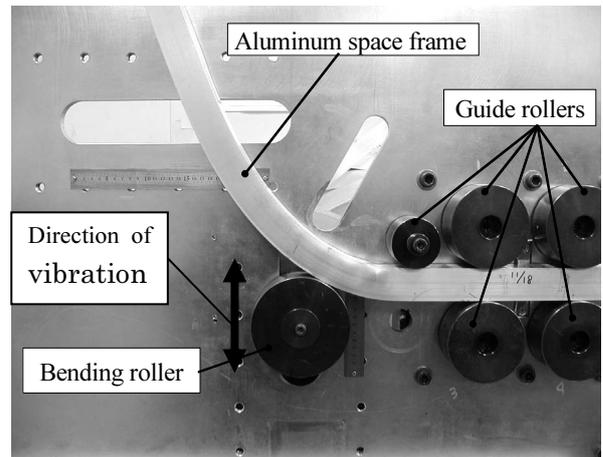


図1 OR曲げ装置（試作4号機、曲げ型）

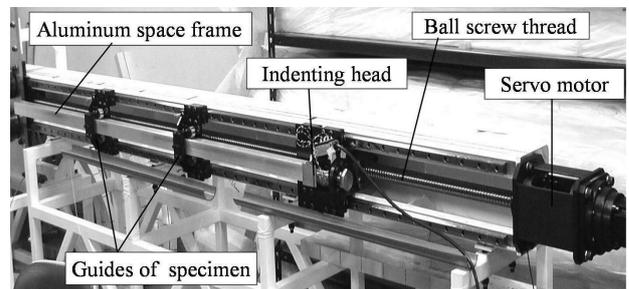


図2 OR曲げ装置（試作4号機、押し込み装置）

2. 試作4号OR曲げ装置の概要

図1および図2に試作4号機の概略を示す。OR曲げ装置は被加工材を押し込む部分と曲げ型からなる。曲げ型には右から順にガイドローラー、オフセットローラーが取り付けられている。被加工材である角管はボールねじに取り付けられた押し込みヘッドにより押し込まれ、2対のガイドローラーを通過し、オフセットローラーに当たり、曲げが行われる。押し込み荷重はヘッドに取り付けられた荷重計によって測定され、ストロークはサーボモーターのエンコーダーから測定できるようになっている。また、押し込みヘッドと曲げ型の間には押し込み荷重による被加工材の座屈を防ぐためにレール上を移動可能なガイドが取り付けられている。実用的な長さ（2500mm）の被加工材を曲げ加工できるようになっている。

オフセットローラーを曲げ加工中にその位置を移動させると、軸方向に曲率を変化させることができる。

試作3号機のオフセットローラー位置決め用として取り付けられていたサーボモーターを位置決め制御しながら振動を加えられる高出力、高応答のものに交換した。パルス列を出力するインターフェイスボードをパソコンに組み込み、任意のパルス列を出力できるユーザーインターフェイスを備えたプログラムを開発した。このパルス列をサーボモーターに入力することによりオフセットローラーを位置決め制御をしながらオフセット方向に振動させることができるようにした。

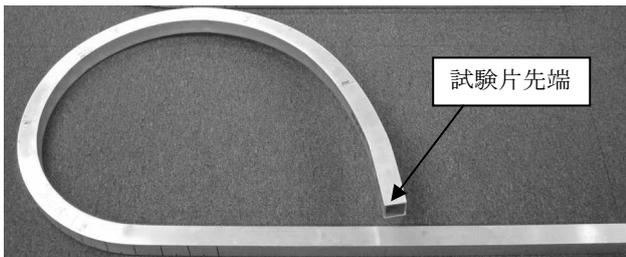
3. 低周波振動を付与した曲げ加工実験

3・1 実験方法

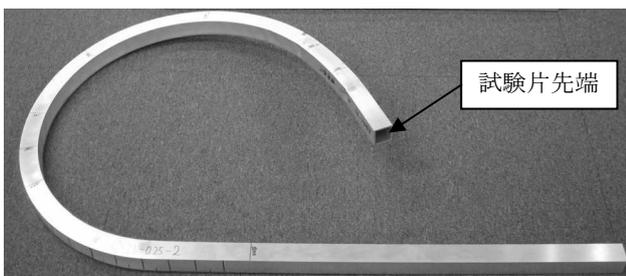
オフセットローラーを位置決め制御しながら振動を加え、振動振幅、振動数、軸方向曲率を変化させながら曲げ加工を行った。曲げの実験には40mm角のアルミニウム合金(A6063-O、A6063-T5、肉厚 $t=3\text{mm}$)を用い、試験片を押込みながらオフセット量を増させ設定値に達したあと一定とし、一定曲率に曲げる加工を行った。曲げ加工後に3次元座標測定器により曲げ加工後の試験片長手方向の曲率分布、スプリングバック量、曲げ内側に生じるしわおよび横断面形状を測定し、振動を付与しない場合と比較して振動の効果について検討した。

振動条件は振動数を1、2、2.5、3および4Hzとし、振幅を0.25、0.5、1.0、2.0および4.0mmとした。

3・2 実験結果



(a) A6063-O



(b) A6063-T5

図3 曲げ後の角管 (振動数1 Hz、振幅0.25 mm)

図3にオフセット量が設定値に達したのち、途中から振動(振動数1 Hz、振幅0.25 mm)を加えて曲げ加工実験を行った試験片の例を示す。(a)と(b)は同一の設定曲率で曲げ加工を行っているが、曲げ後の曲率の違いはプリングバック量の違いによる。図4はこのときのストローク(横軸)と設定曲率および測定曲率(縦軸)の関係を表したものである。この図から振動の有無に関らず一定の曲率に曲げ可能であり、振動の有無はスプリングバック量に影響しないことがわかる。

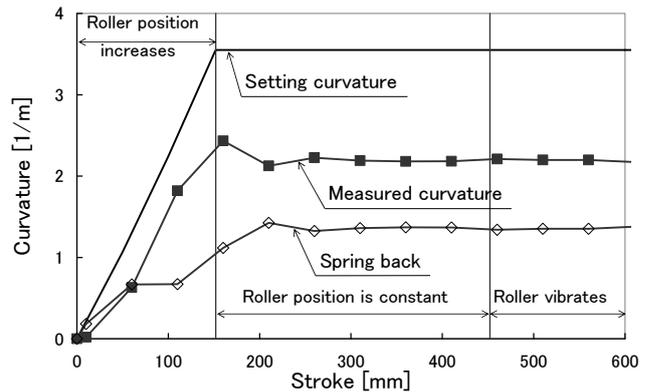


図4 振動付与による曲率への影響

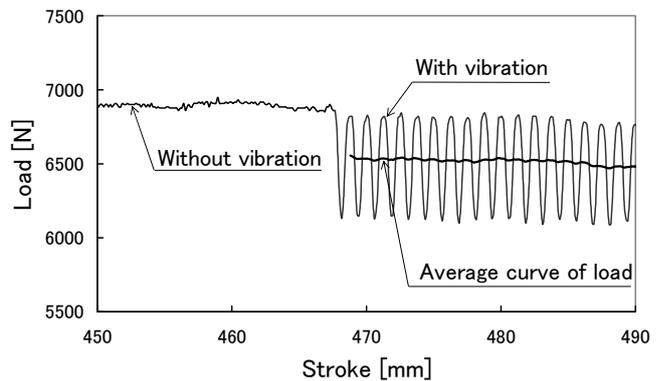


図5 振動付与による押込み荷重の低減
(A6063-T5、振動数1 Hz、振幅0.5 mm)

図5は上記の実験においてオフセットローラーに上下振動を付加する前後におけるストロークと押込み荷重の関係について示したものである。この図から振動を加えると平均押込み荷重が減少することがわかる。この結果より、振動を加えながら曲げを行うと押込み荷重が減少し、加工限界の向上が期待できる。

図6は曲げ加工後の角管(A6063-T5、振動なし、設定曲率 5.5 [1/m])の断面の写真である。曲げ外側におけるそりを定量的に評価するために図に示すように座標系を定義した。図7は振動を加えない場合(Case1)と振動を加えた場合(Case2、振幅0.25mm、振動数2.0Hz)の断面形状を比較した図である(設定曲率 5.5 [1/m])。この図から振動を加えるとそりが著しく減少するのがわかる。

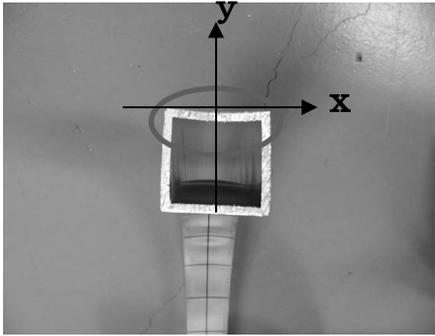


図6 試験片のそりと座標の定義
(A6063-T5、振動なし)

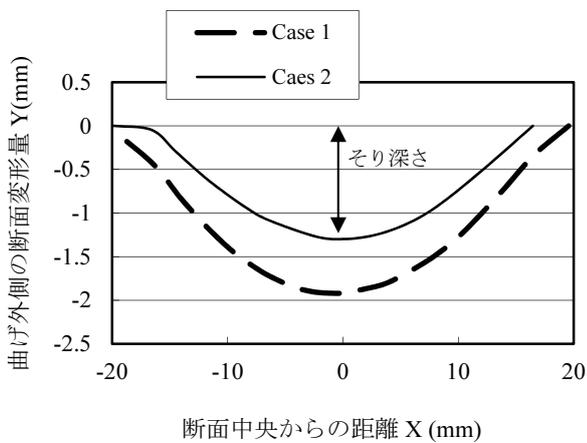


図7 試験片外側のそり深さの比較

図8はA6063-T5に振幅0.25mmの振動を与えて曲げた場合の振動数とそり深さの関係である。この図から振動数の増加とともにそりが減少すると考えられるが、4 Hz のとき増加する理由については現時点では不明である。

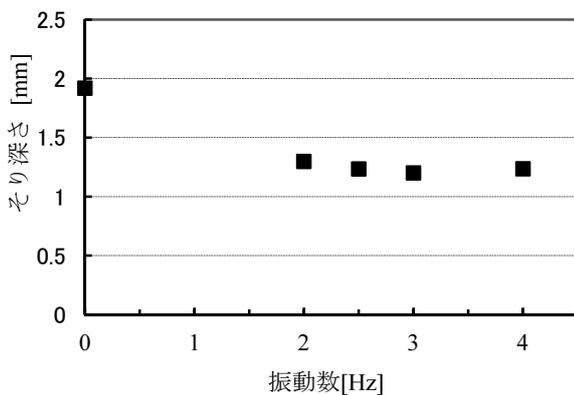


図8 振動数とそり深さの関係
(A6063-T5、振幅0.25mm)

図9は振動数を1Hzとし、振幅とそり深さを表した図である。振動を付与する効果はみられるが振幅が大きくなるにしたがってそりが大きくなっていることがわかる。上記

の結果より振動数を増加させることは効果的であるが、振幅には有効な範囲があると考えられる。

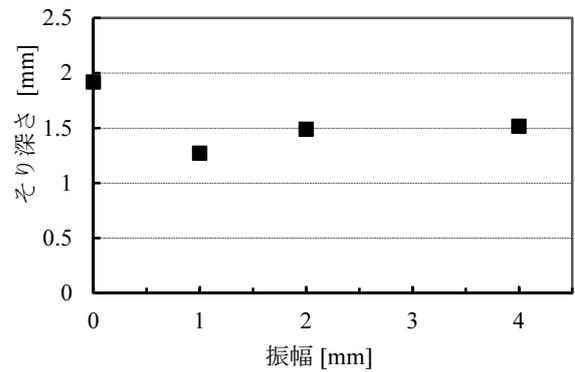


図9 振幅とそり深さの関係
(A6063-T5、振動数1 Hz)

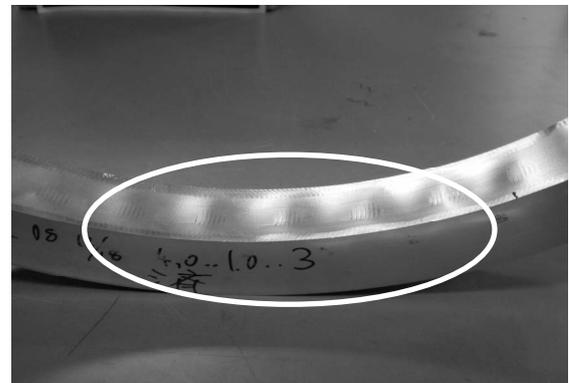


図10 試験片内側に生じるしわ

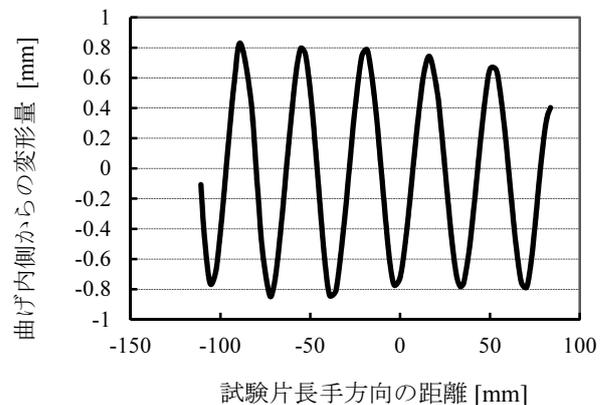


図11 試験片内側長手方向の表面形状

図10は曲げ内側に生じた試験片のしわの写真である。試験片内側の長手方向に断面中央部を測定し、曲率半径を考慮して表面上の凹凸のみを抽出した。

図11にA6063-T5振動なしの場合の長手方向の測定結果を示す。この図における山の高さの平均値と谷の深さの平均値の差をしわ深さとした。

図12はしわの深さと振動数の関係を表した図である。この図から振動数の増加とともにしわ深さが減少すると

考えられる。

図 13 は振動数を 1Hz とし、しわの深さと振動振幅の関係を表した図である。振動を付与する効果はみられるが、振幅が大きくなるにしたがってしわが深くなっていることがわかる。上記の結果より、しわ深さについてもそりと同様の傾向があり、振動数を増加させることは効果的であるが振幅には有効な範囲があると考えられる。

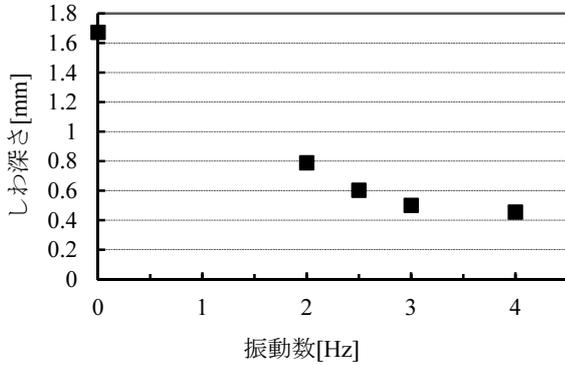


図 12 振動数としわ深さの関係 (A6063-T5、振幅 0.2 5 mm)

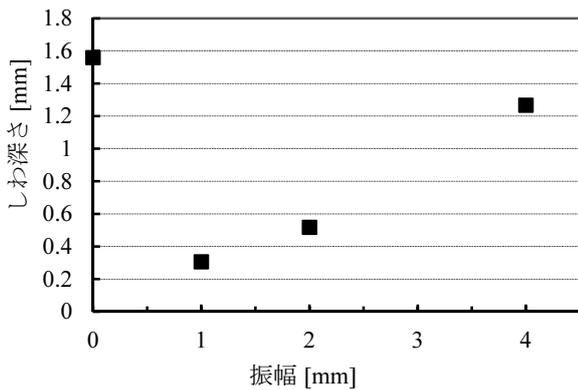


図 13 振幅としわ深さの関係 (A6063-T5、振動数 1 Hz)

4. 試作 5 号機の概要

図 14 に試作 5 号 OR 曲げ装置の概略図を示す。オフセットローラー（以下 OR 1 と略す）によって曲げられたスペースフレームに生じるスプリングバックを補正するためにオフセットローラー前方に補正ローラー（以下 OR 2 と略す）を取り付けた。

OR 2 はガイドレール上に取り付けられ、サーボモーターとボールねじによって位置決め制御できるように取り付けられている。レーザー変位計をオフセットローラーによって曲げが行われた被加工材の出口側下部（曲げ外側）に取り付けた。レーザー変位計は速度・位置決め可能な自動テーブルに取り付けられており、被加工材の長手方向に高速に移動できる。被加工材がオフセットローラーを通過後、レーザー変位計により被加工材の長手方向外周の座標値を計測し、出力信号を A/D 変換ボードを介してパソコンに取り込む。計測したデータから最小二乗法により曲率の実測値を求めることができる。

試作 4 号機は一定速度での押し込みしかできなかったが、試作 5 号機では押し込み用モーターを位置および速度制御可能なサーボモーターに交換し、パソコンから直接パルス列で制御できるように改造した。

5. 補正ローラーによる曲率補正の実験

5. 1 実験方法

実験には 40mm 角のアルミ合金 A6063-O、肉厚 3.0mm、長さ 2500mm の試験片を使用した。実験条件は以下の通りである。

実験条件 1：OR 2 による補正を行わない。

実験条件 2：試験片が OR 2 に接触した後、OR 2 を移動させ、移動量が 100mm に達した後、停止する。

実験条件 3：試験片が OR 2 に接触した後、OR 2 を移動させ、移動量が 120mm に達した後、停止する。

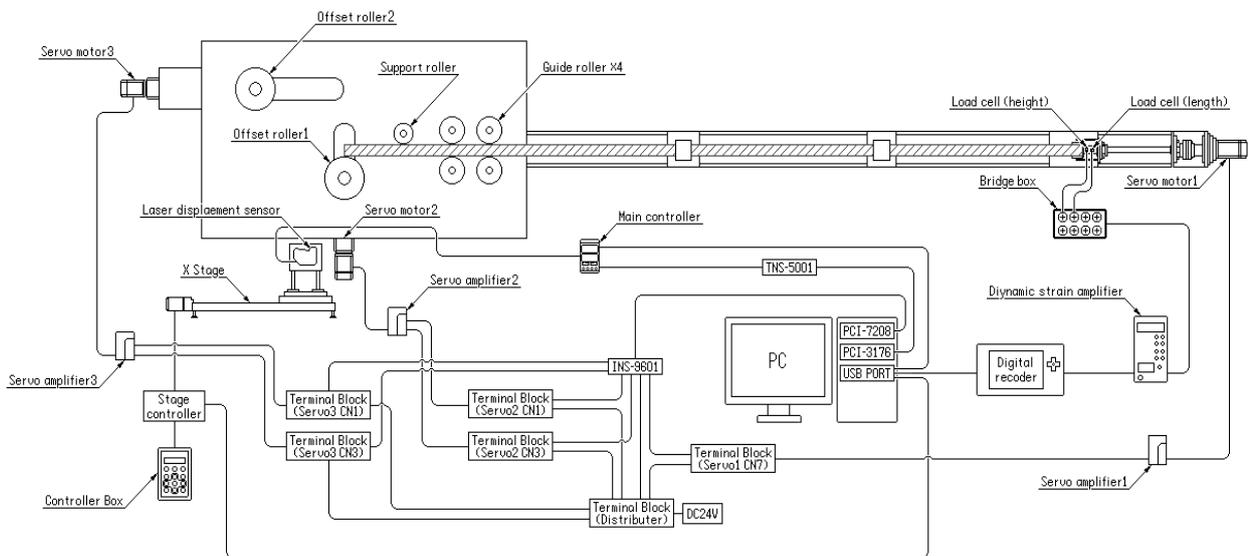
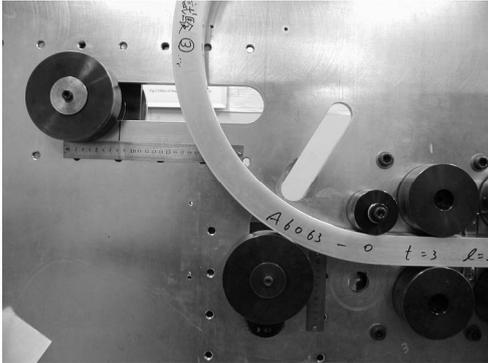


図 14 試作 5 号 OR 曲げ装置概略図

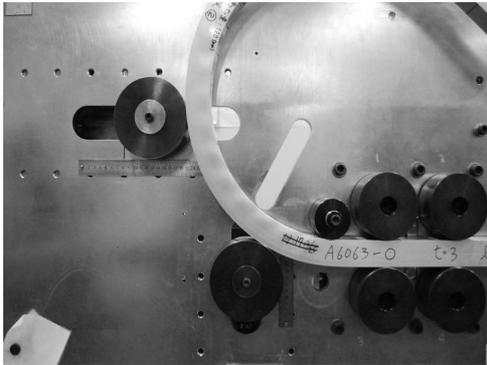
なお、OR 1 のオフセット量は 0~40mm の値まで増加させ、試験片の押し込み速度は一定とした。加工後の試験片は O R 曲げ装置に取り付けられているレーザー変位計を用いて試験片の外周を計測し、最小二乗法を用いて曲率を求めた。

5. 2 実験結果

図 15 (a) に OR 2 による補正を行わない場合の実験、(b) に OR 2 による補正を行った場合の実験の写真を示す。



(a) OR 2 による補正を行わない場合



(b) OR 2 による補正を行った場合
図 15 補正ローラーの効果

図 16 に押し込み荷重—ストロークの関係を示す。図中の 210mm の縦線は OR1 の停止位置を示し、450mm の縦線は OR2 が試験片に接触した位置を示す。図 17 は実験条件の違いによる測定曲率を比較したグラフである。なお、横軸の距離はレーザー変位計が取り付けられた自動テーブルの移動距離で図 16 のストロークとは異なる。

実験条件 1 では押し込み荷重は OR1 が停止した後、約 4000N でほぼ一定となった。加工後の試験片の曲率は、比較のための基準データとした。実験条件 2 では押し込み荷重は OR2 が停止した後、約 4300N でほぼ一定となった。加工後の試験片の曲率は OR2 による補正を行わない場合と比較して、約 9% 設定曲率に近づいた。

実験条件 3 では押し込み荷重は OR2 が停止した後、5000N

でほぼ一定とった。加工後の試験片の曲率は OR2 による補正を行わない場合と比較して、約 14% 設定曲率に近づいた。

図 16 において実験条件 2 の荷重が 450mm の縦線の位置から上昇している原因は、OR 2 により試験片がさらに曲げられるために大きな押し込み荷重が必要となるためである。上記の結果から、OR 2 を駆動させ、その移動量を増加させると押し込み荷重は増えるが、曲率は設定曲率に近づくことがわかる。

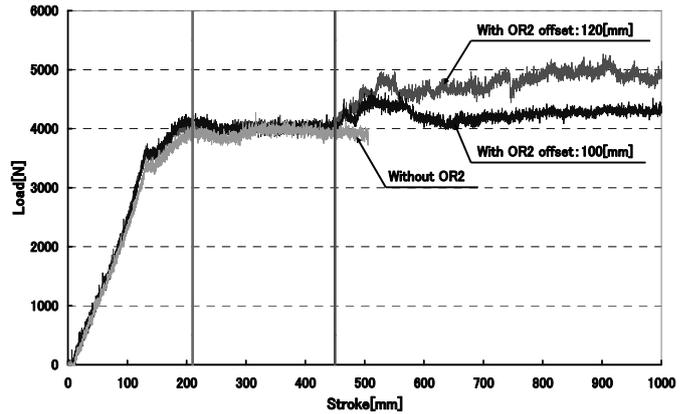


図 16 押し込み荷重—ストロークの関係

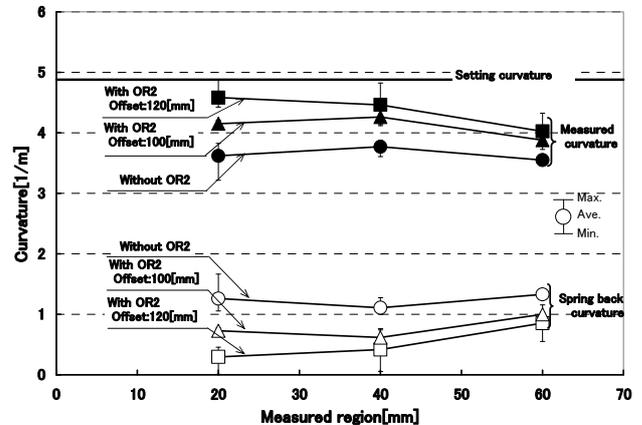


図 17 測定曲率の比較

6. ステップ状に設定曲率を変化させた場合の加工特性

設定曲率を急激に変化させた場合の特性を調べるために、軸方向に数段階にステップ状に曲率を増加させて実験を行った。オフセット量を変更する部分で押し込みを停止し、オフセットローラー (OR 1) の移動のみで曲げを行った。

曲げ後の試験を図 18、設定曲率と加工後の測定曲率の関係を図 19 に示す。押し込みを停止して OR 1 の移動のみで曲げを行った部分では局所的に曲率の変化率が極めて大きくなるが、座屈を起こさず曲げられていることが分

かる。この理由は試験片に曲げモーメントのみが作用し、軸方向の圧縮力が働かないため曲げ外側に働く引張り応力が大きくなり塑性変形が進みやすくなるためだと考えられる。

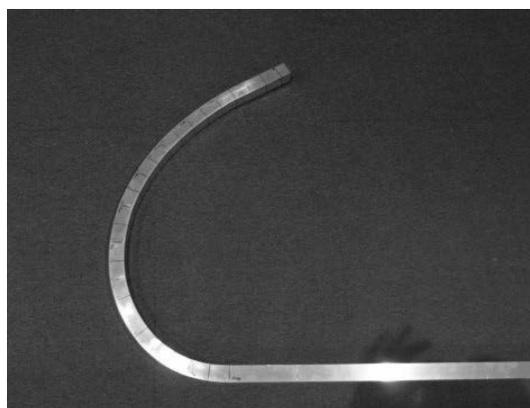


図 18 曲げ後の試験片

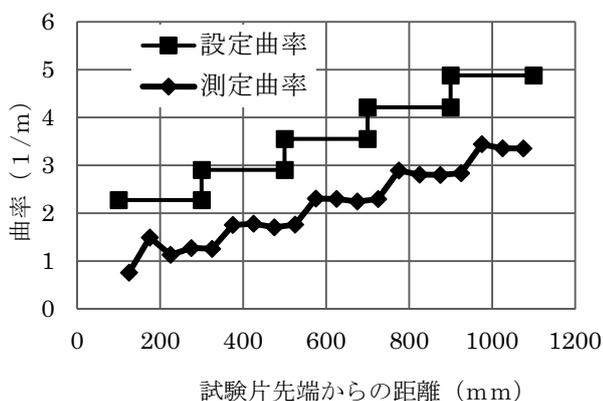


図 19 設定曲率と測定曲率の関係

7. まとめ

(1) オフセットローラーをオフセット方向に振動させながら曲げ加工を行うことで下記の結果が得られた。

1) 振動を加えることによって加工力（押し込み力）が減少した。

2) 曲げ内側に生じるしわ深さは振動を加えることによって減少させることができた。この理由は押し込み力が減少することによって、座屈の発生する加工曲率半径が小さくなったためであると考えられる。同様にそりもり減少した。

(2) 曲げ加工中に被加工材の局所的な曲率の測定が高速で可能になった。

(3) 補正ローラーを設置し、ローラーの位置を制御することでオフセットローラーによる曲げ加工後のスプリングバック量を減少させることができることを確認した。また、補正ローラーの移動量を増加させることでスプリングバック量を減少させることが可能である。

(4) 軸方向に数段階にステップ状に曲率を増加させた実

験では、オフセット量を変更する部分で押し込みを停止し、オフセットローラーの移動のみで曲げを行った結果、曲率の変化を大きくすることができる。

8. 今後の課題

(1) 加工力（押し込み力）の低減および加工限界の向上のために最適な振動条件について検討する必要がある。

(2) 曲げ曲率を変化させる場合、押し込み速度を下げると荷重は減少し、曲げ内側に生じるしわの発生抑止に効果があると考えられる。そこで、オフセットローラー位置変更時の押し込み速度を数段に変化させて、しわの深さ、発生ピッチおよび横断面形状の測定を行い、押し込み荷重の減少による加工限界の向上について検討する必要がある。

(3) 計測した曲率からスプリングバック補正を行うための補正ローラーの位置・速度制御に関してして検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成によって実施されたことを付記するとともに、同財団に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 村田真、植村幸生、鈴木秀雄：塑性と加工、31-357、(1990)、1202-1207。
- 2) 遠藤順一、加藤俊二、安西哲也：平成 12 年度塑性加工春期講演会、(2000)、249-250。
- 3) 遠藤順一、加藤俊二、安西哲也：第 51 回塑性加工連合講演会、(2000)、103-104。
- 4) 加藤俊二、遠藤順一、安西哲也：第 52 回塑性加工連合講演会、(2001)、375-376。
- 5) 加藤俊二、遠藤順一、安西哲也：第 53 回塑性加工連合講演会、(2002)、401-402。
- 6) 星野清輝、加藤俊二、遠藤順一：第 54 回塑性加工連合講演会、(2003)、445-446。