

アルミニウム・スペースフレームのオフセット曲げ加工に関する研究

神奈川工科大学 システムデザイン工学科

助手 加藤俊二

(平成 12 年度研究開発助成AF-2000008)

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

1. まえがき

自動車の軽量化に対して様々な試みがなされているが、アルミニウム・スペースフレームの使用は最も重要なアイテムである。アルミニウム・スペースフレームの実用化の上で、問題となるのは曲げ加工である。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。

スペースフレームの曲げに適した新しい曲げ加工法として村田らによる MOS 曲げ¹⁾がある。この加工法は押通し曲げの一種であり、3次元の曲げが可能で、かつ、軸方向に曲率を変えることができ、スペースフレームの曲げに適している。しかしながら、この曲げ加工法には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出し型材では、押し出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。

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 曲げと呼ぶ）を提案する。この曲げは2次元の曲げに限られるが曲率のインプロセスでの補正を容易に行うことができる筈である。本研究では四角管の OR 曲げのフィージビリティスタディを行い曲げ可能であることを確かめ、さらに OR 曲げ加工の加工特性、加工限界を明らかにし、実用化のための知見を得ることを目的とした。

2. フィージビリティスタディの結果

2・1 OR 曲げ装置の概略

図1に OR 曲げ装置の概略を示す。被加工材である角管は油圧シリンダーにより、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。生じるスプリングバックは補正ローラーにより所要の曲率に補正される。オフセットローラーと補正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。

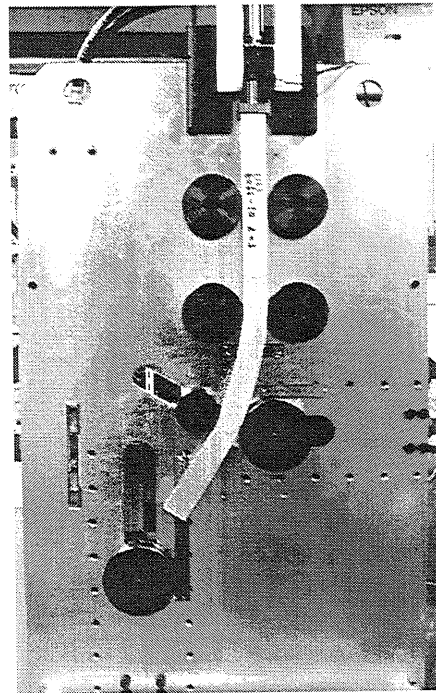


図1 OR 曲げ装置（試作 2 号機）

この曲げでは、曲げが面内に限られるが、この曲げ平面に直交する面に新たなローラーを配置すれば、3次元的な曲げが不十分ではあるが可能と考えられる。15mm x 15mm の角管用（試作 1 号機）と 40mm x 40mm の角管用（試作 2 号機）の 2 台の OR 曲げ機を作製し、フィージビリティスタディを行った。試作 1 号機はオフセットローラーをフリーとしているが、試作 2 号機ではオフセットローラー及び補正ローラーはギヤ・モーターで駆動し、インバーターにより回転数を制御している。いずれの装置も油圧シリンダーの先に荷重計をセットし、また、シリンダー先端の位置を変位計で測定できるようにしている。

2・2 実験結果

図2に試作 2 号機で曲げた角管の例を示す。図において、上から順に、A6 0 6 1-O、肉厚 $t=2$ mm、A6 0 6 3-O、 $t=3$ 、A6 0 6 3-T 5、 $t=3$ の例である。A6 0 6 3-T 5、 $t=3$ の場合は、この装置で加えることができる負荷ではこれ以上曲げることができなかった。A6 0 6 1-O、 $t=2$ 、A6 0 6 3-T 5、 $t=3$ の試験片に

は、試験片がオフセットローラーに接して曲げを受ける際に、曲げ内側（圧縮側）に凹みが生じる。曲げが進むと凹みが消える場合（図示の例）と周期的な凹凸が生じる場合がある。この凹みは圧縮による座屈と考えられる。

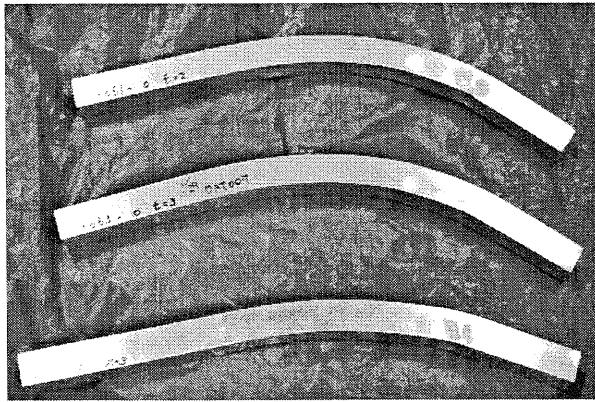


図2 曲げ後の角管

3. 補助ローラーの設置による最大加工荷重の低減

3・1 補助ローラーの設置と実験方法

前項で O R 曲げ加工のフィージビリティースタディーを行い、曲げが可能であることを示した。このとき押し込み荷重—ストロークの関係において曲げ初期に荷重のピークが観測された。図2に示された曲げ内側に生じる凹みはこの荷重によるものだと考えられる。そこで曲げの初期に局所的な変形を抑えて滑らかに曲げを行わせることができれば荷重のピークを低減させることができると考えられる。本項では曲率が零から徐々に増加するクロソイド曲線を用いてローラーを配置する手法を用い、ガイドローラーとオフセットローラーの間に補助ローラーを設置して最大加工荷重の低減を試みる。

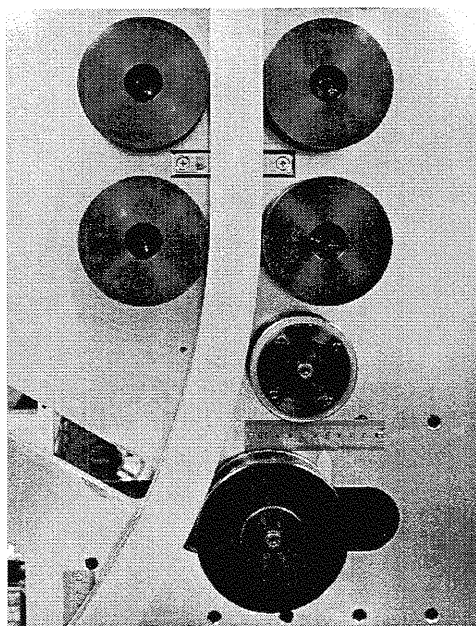


図3 O R 曲げ装置（補助ローラー設置後）

図3に補助ローラー設置後の O R 曲げ装置の概略を示す。上から順に2対のガイドローラー、補助ローラー、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油圧シリンダーにより押し込まれ、2対のガイドローラーを通過し、補助ローラーに当り、最初の曲げが行われる。さらにオフセットローラーに当り、所要の曲率に曲げられる。補助ローラーはガイドローラーとオフセットローラーを結ぶクロソイド曲線上に設置してある。このように補助ローラーを設置することで曲率が零から徐々に変化し、角管を滑らかに曲げることができると考えられるからである。曲げの実験には40mm角のアルミニウム合金（A6061、A6063）を用い、補助ローラー設置前後で押し込み荷重—ストロークの関係および試験片長手方向のひずみ分布を求めた。ひずみ分布は角管の側面に5mm間隔で正方格子をけがき、曲げの前後で格子間隔を測定することにより求めた。

3・2 実験結果

図4、5に曲げ加工後の角管を示す。図4はA6063-O、肉厚 $t=2$ 、図5はA6061-O、 $t=3$ で上は補助ローラー設置前、下は補助ローラー設置後を示す。補助ローラー設置前の試験片には曲げ内側（圧縮側）に凹みが生じる。この凹みは圧縮による座屈と考えられ、特に肉厚の薄い場合凹みが大きくなる。補助ローラー設置後曲げを行った場合、どちらの場合も凹みが生じなくなることがわかる。

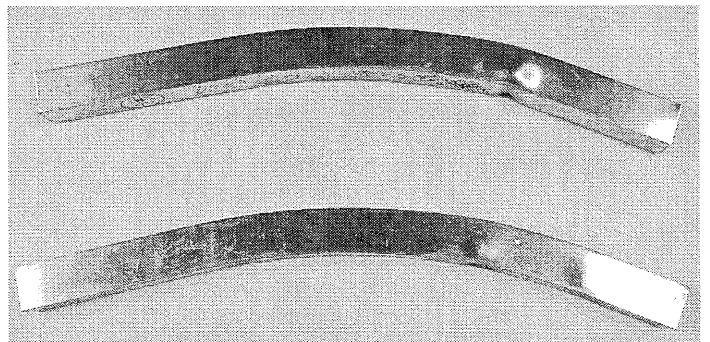


図4 曲げ後の角管（A6063-O、 $t=2$ ）

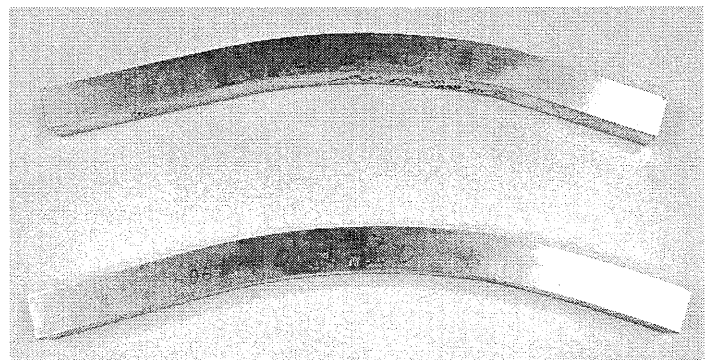


図5 曲げ後の角管（A6061-O、 $t=3$ ）

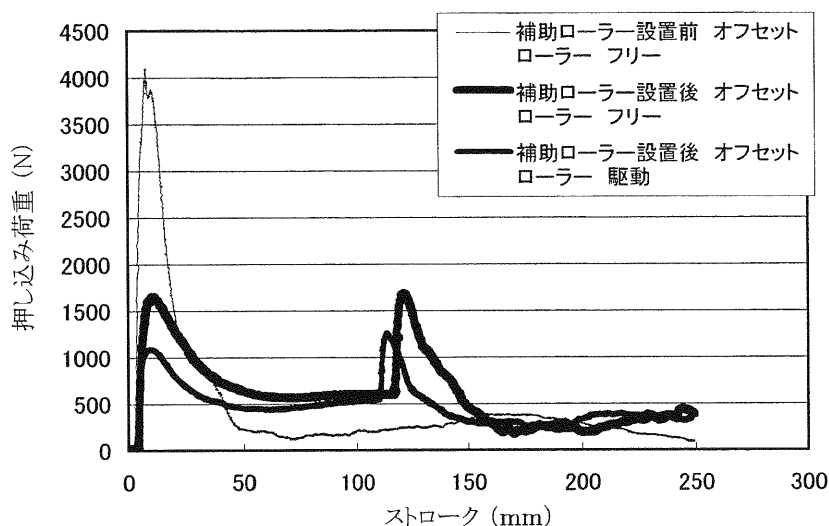


図6 押し込み荷重—ストロークの関係

図6にA6061-O, $t=2$ の場合の押し込み荷重—ストロークの関係を示す。この図は補助ローラー設置前後でオフセットローラーをフリーとした場合及び補助ローラー設置後オフセットローラーを駆動した場合について比較したものである。補助ローラー設置前では曲げ開始直後に荷重のピークが現れる。図4, 5に示す試験片の凹はこの荷重によるものだと考えられる。補助ローラー設置後では曲げ開始直後と押し込み量が約120 mmの2回、荷重のピークが現れる。最初のピークは角管の先端が補助ローラーに接して生じるもの、2番目のピークは曲げローラーに接して生じるものと考えられる。これらのピークは補助ローラーがない場合に比較して非常に小さい。すなわち補助ローラーを設置することにより曲げ初期における押し込み荷重を小さくすることができ、曲げ始めの内側の凹を抑制することができる。また、図からオフセットローラーを駆動することにより押し込み荷重を小さくすることができ、軸力を制御できると考えられる。

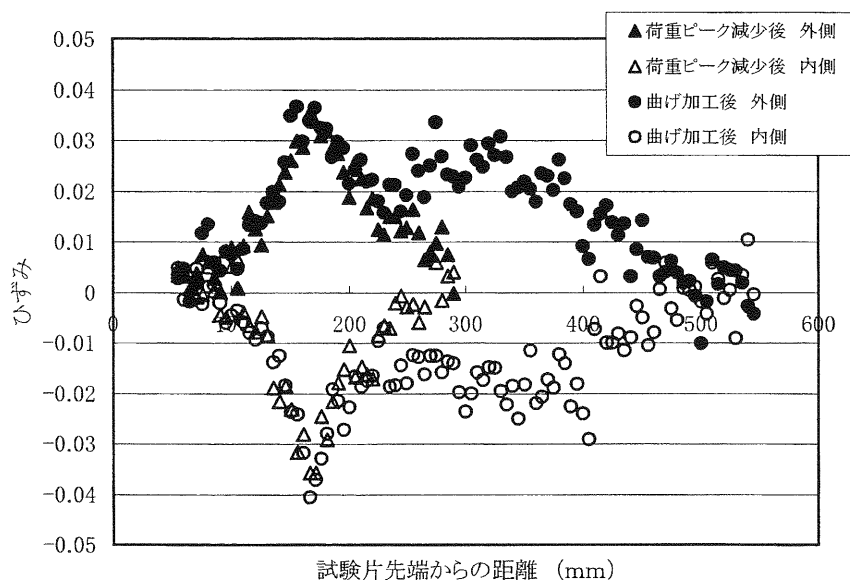


図7 ひずみ分布(補助ローラー設置前)

図7, 8にA6061-O, $t=3$ でオフセットローラーをフリーとした場合の補助ローラー設置前後のひずみ分布を示す。横軸は試験片先端からの距離、縦軸はひずみを表す。三角形のマーカは荷重がピークから最も下がった位置で曲げを一旦中止し、ひずみを測定したものである(塗りつぶしは曲げ外側、中抜きは曲げ内側を表す)。円のマーカは曲げ加工後のひずみ分布を表す。荷重ピーク減少直後のひずみ分布と曲げ加工後のひずみ分布を比較すると、補助ローラー設置前では角管の曲がり始めの部分の変形がピーク減少直後に完了しており、この部分で急激な変形が起こっていることがわかる。一方、補助ローラー設置後は荷重ピーク減少後も変形がすすんでおり曲げが徐々に行われていることがわかる。曲げ加工後のひずみ分布を比較すると、補助ローラーを設置して曲げを行った場合、局部

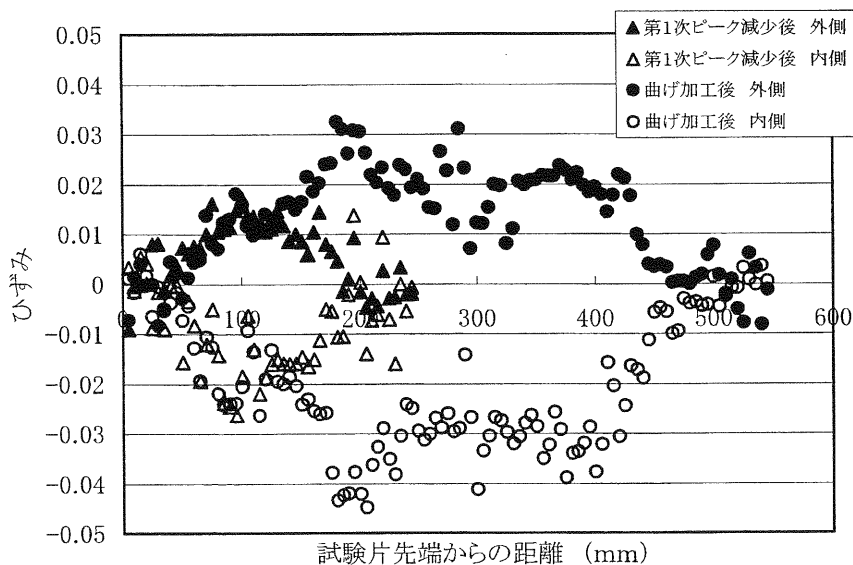


図8 ひずみ分布(補助ローラー設置後)

的な変形が抑えられており、ひずみのばらつきは小さく一般的な曲げが行われおり、また曲げが行われている範囲が広いことがわかる。この結果から加工荷重の低減と曲げ精度を向上させるためにローラーのオフセット量を徐々に増やしていくことが有効であると考えられる。

4. 曲げ加工限界と成形特性

4・1 試作3号機と実験方法

十分な押し込み推力と押し込み量を確保し、実用的な長さの角管を曲げ加工できるようにするためにOR曲げ装置の押し込み部を油圧シリンダーからサーボモーターとボールねじを用いた試作3号機を製作した。本項ではこのOR曲げ装置を用いて角管の成形特性および加工限界について実験を行った結果について述べる。

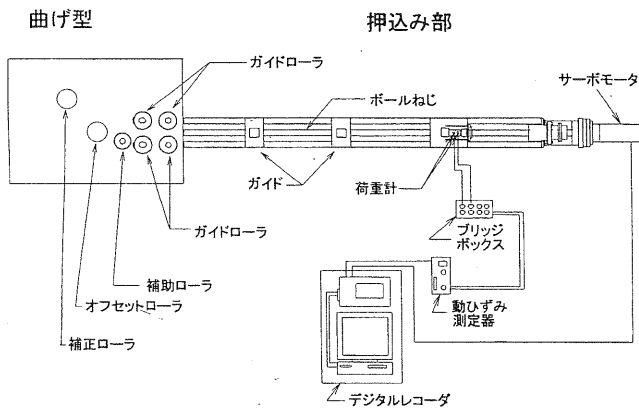


図9 OR曲げ装置(試作3号機)

図9に試作3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2対のガイドローラー、補助ローラー、オフセットローラー、補正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、補助ローラーに当たり、最初の曲げが行われる。さらにオフセットローラーに当たり、所要の曲率に曲げられる。このとき生じるスプリングバックは補正ローラーにより所要の曲率に補正される。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。この装置は試作2号機では推力不足のために曲げが行えなかったT6材の曲げを行うことが可能であり、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。

曲げの実験には40mm角のアルミニウム合金(A6061、A6063)を用い、押し込み荷重—ストロークの関係を求めた。曲げ加工後に3次元座標測定器により試験片曲げ外側

の曲率半径および横断面の変形量を求めた。また、成形限界の実験では試験片の長さを1000mmとし設定曲率、肉厚を変えて実験を行った。

4・2 実験結果

図10に長さ2000mm、肉厚 $t=3\text{mm}$ の曲げ加工後の角管の例を示す。写真左側が試験片先端で上から順に、A6063-O、A6063-T1、A6061-T6である。A6063-T6の試験片には曲げ内側(圧縮側)に凹が生じている。この凹みは圧縮による座屈と考えられる。

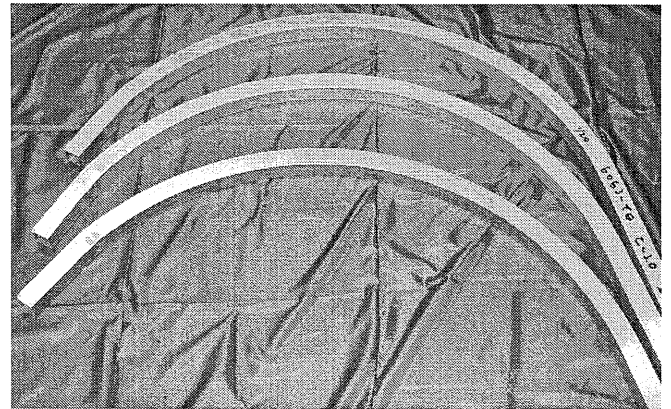


図10 曲げ後の角管(1=2000mm)

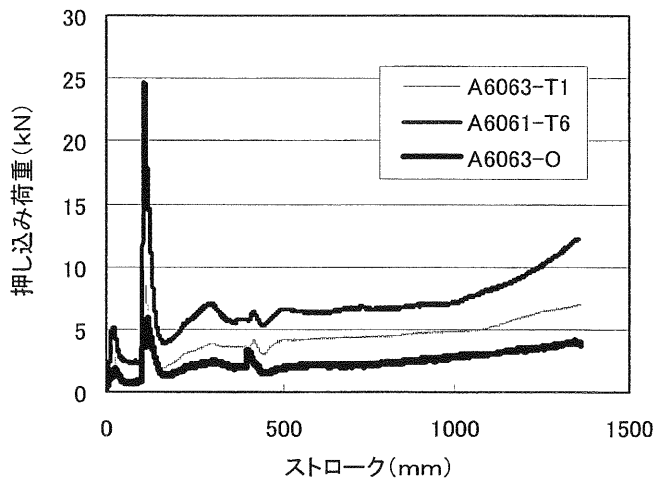


図11 押し込み荷重—ストロークの関係

図11に押し込み荷重—ストロークの関係を示す。この図は材質の違いについて比較したものである。最初のピークは角管の先端が補助ローラーに接して生じるもの、2番目のピークはオフセットローラーに接して生じるものと考えられる。第2のピーク後ほぼ一定の荷重となりその後、徐々に荷重が増加する。この荷重の増加は装置の特性上、押し込み量の増加にともない押し込み部における摩擦が増加するためであり、被加工材の曲げに必要な加工力が増加するためではないと考えられる。A6061-T6材で第2のピークが非常に大きいのは補助ローラーによ

る曲げでは角管がほとんど降伏せずオフセットローラーによってのみ塑性変形が行われるためだと考えられ、図2の凹みはこのピーク荷重による座屈である。

図12にスプリングバック比の長手方向の分布を示す。ここでスプリングバック比とは曲げ後の曲率半径を設定曲率半径で除した値である。この図から曲げ始めの部分のぞいてはほぼ一定の曲率で曲げが可能であることが分かる。A6063-O、A6063-T1はスプリングバック比の大きさがほぼ同じ値になったが、A6061-T6はやや大きな値になった。これはA6061-T6の耐力が他の材質に対して大きいためであると考えられる。

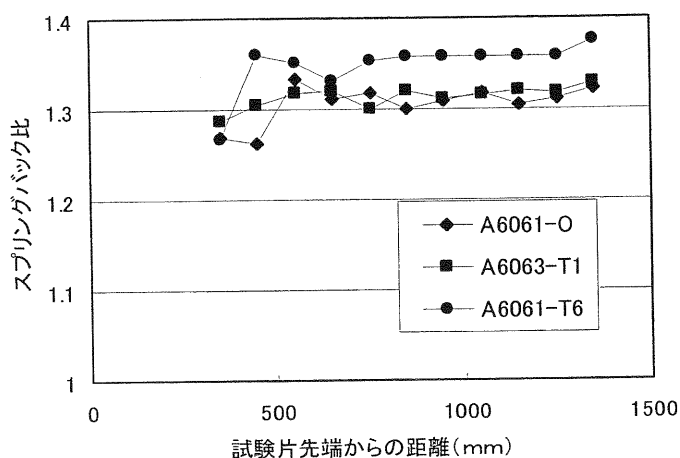


図12 スプリングバック比の長手方向の分布

図13は曲げ外側の横断面変形を示したものであり、横軸は試験片側面からの距離、縦軸は曲げ外側の変形量である。横断面の変形量(だれ量)を比較するとA6063-O、A6063-T1はほぼ同じ値になったが、A6061-T6はやや小さな値になった。A6061-T6はスプリングバックが大きく曲げ後の曲率半径が大きいため断面変形が小さいと考えられる。

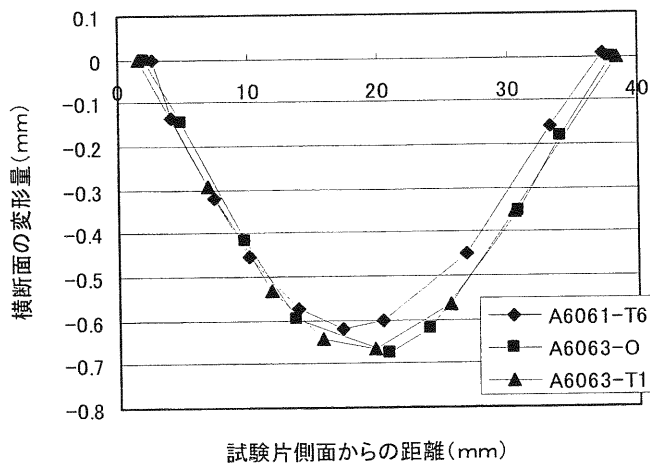


図13 角管の曲げ外側の横断面変形

図14は被加工材をA6063-T5、長さ1000mmとし、設定曲率、肉厚を変えて成形限界の実験を行った結果である。ここで曲げ可能とは屈服、しわ等が生じないで曲げが行えたものである。図15に曲げ不可能になった試験片の例を示す。(a)はしわが生じた例、(b)はさらに曲げがきびしい場合に屈服が生じた例である。図14の結果から曲げ可能な肉厚と設定曲率の関係は実験の範囲では直線的になることが分かる。

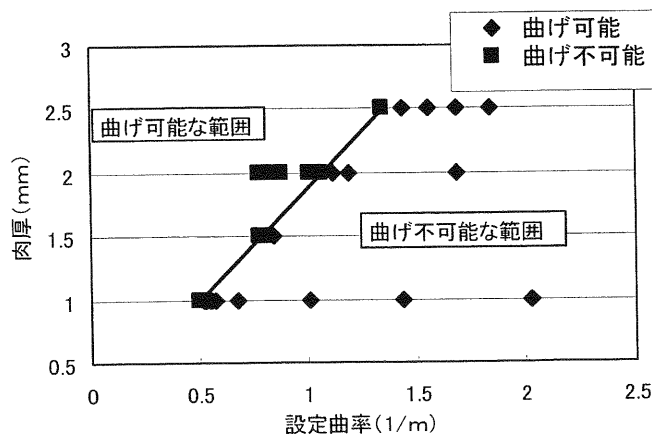
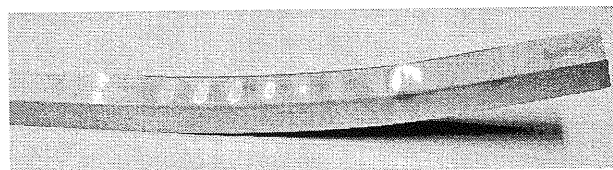
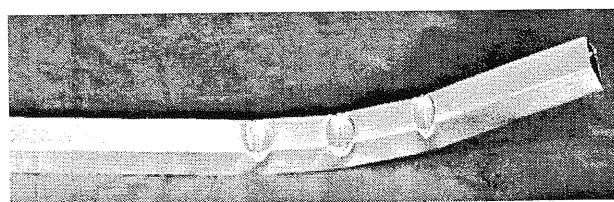


図14 曲げ加工の成形限界



(a) しわ



(b) 屈服

図15 曲げ不可能になった試験片の例

5. オフセット量制御による加工特性

5.1 実験装置と実験方法

前項で試作した3号機のオフセットローラーのオフセット量を制御ができるようOR曲げ装置を改造し、加工荷重の低減と曲げ精度の向上を試み、軸方向に任意に曲率を変化させられるようにした。なお、オフセットローラーの位置制御で曲率を設定できるようにするため、補助ローラーは取り外してある。オフセットローラーはサーボモーターで駆動されサーボバックを介してPCで制御されている。それ以外の構成は前項で示したものと同一である。

実験は試験片を一定速度で押し込みながら、オフセットローラーをオフセット量が0から52mm(前項の実験と

同じ値)まで一定速度で増加するよう制御した。曲げ加工中の押し込み荷重—ストロークの関係を求め、曲げ後に三次元測定機で角管の外周を測定し、最小二乗法を用いて曲率半径を求めた。

5・2 実験結果

図 16 に曲げ加工後角管の例を示す (A6063-T1、肉厚 3 mm、長さ 2000mm)。写真は右側が試験片先端である。この写真から試験片先端から徐々に曲率が大きくなっていくことが分かる。また、曲げ内側に凹みが生じていないことが分かる。

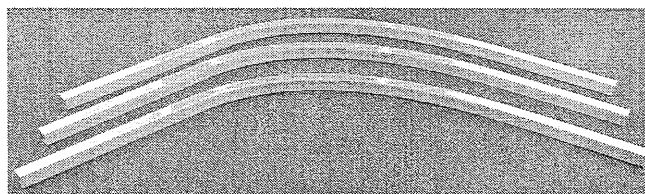


図 16 オフセット量を一定速度で増加させながら曲げを行った角管

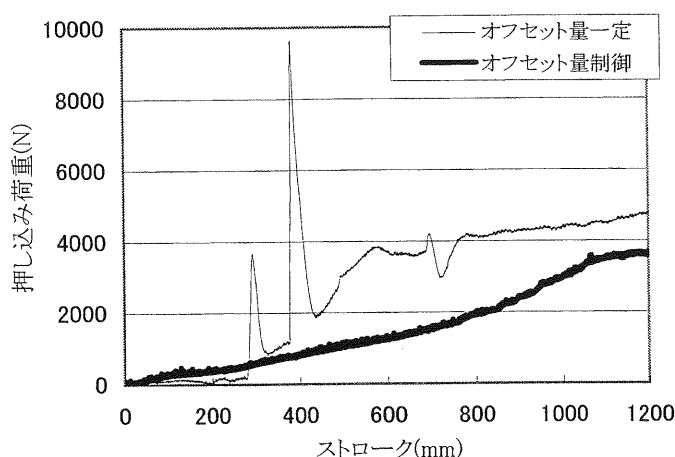


図17 オフセット量制御による押し込み荷重の低減

図 17 はオフセットローラーをオフセット量が 0 から 52 mm まで一定速度で増加するよう制御した場合とオフセット量一定で曲げた場合の押し込み荷重—ストロークの関係を示したものである。この図からオフセット量を徐々に変化させた場合、ピーク荷重があらわれずに曲げ行われていることがわかる。押し込み荷重は、設定曲率が大きくなると共に増加し、設定曲率を一定にすると押し込み荷重も一定になる傾向を確認することができた。なお、設定曲率は押し込み量 1098mm で一定になっている。

6. まとめ

(1) スペースフレームの曲げに適した加工法としてオフセットローラー曲げ加工を提案し、その有効性を確認した。

(2) ガイドローラーとオフセットローラーの間に補助ローラーを設置して曲げ加工を行うと最大加工荷重を低減することができ、曲げ内側に生じる凹みを抑制することができた。また、ひずみの測定結果から局所的な大変形が抑制され、曲げが広い範囲でおこなわれていることが確認された。

(3) 実用的な長さのスペースフレームの曲げが行える試作 3 号機を製作し、軸方向にほぼ一樣な曲率半径で曲げがおこなえることが確認された。また、成形限界の実験結果から曲げ可能な肉厚-設定曲率の関係は直線的になることがわかった。

(4) (2) の結果から加工荷重の低減と曲げ精度を向上させるためにローラーのオフセット量を徐々に増やしていくことが有効であると考えられる。

(5) 試作 3 号機のオフセットローラーの位置制御ができるように改造し、オフセット量を変化させながら曲げ加工を行った。その結果、曲率を変化させながら曲げが行えることおよびピーク荷重を生じさせずに曲げが行えることを確認した。

7. 今後の課題

(1) O R 曲げ加工の実用化のためにオフセットローラーと押し込みヘッドの位置および速度制御を行い、任意の位置で任意の曲率になるように曲げ加工を行い、その加工特性を明らかにする必要がある。

(2) インプロセスで曲率を測定し、材料特性や寸法精度に起因する軸方向の曲率のばらつきを補正ローラーで補正をする必要がある。

8. 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。また、実験に協力された本学学生、富田俊介、中村雅哉、関野雄二、薄井健太郎、青島信輔ならびに星野清輝君に謝意を表します。

参考文献

1) 村田ほか: 塑性と加工、31-357、(1990)、1202。