

アルミニウム・スペースフレームの オフセットローラー曲げ加工に関する研究

加藤俊二*・遠藤順一**

1.はじめに

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。

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、曲げローラーの後に補正ローラーを配置し、曲率精度を保証できる。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。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. OR曲げ装置の概略

試作1号機(15mm x 15mmの角管用)と試作2号機(40mm x 40mmの角管用)の2台のOR曲げ装置を作製し、フィージビリティスタディを行った。図1に試作2号機の写真を示す。上から順に油圧シリンダー、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、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。試作1号機もほぼ同様に構成されている。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。

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。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。

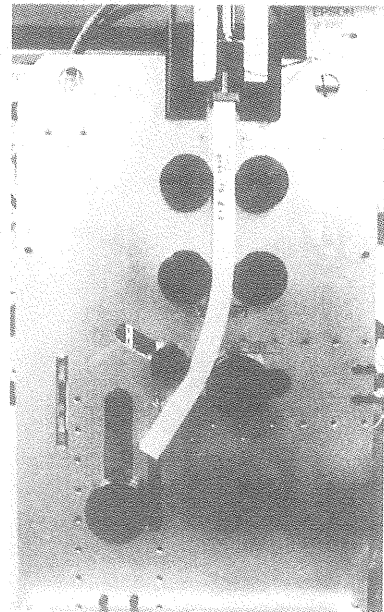


図1 OR曲げ装置(試作2号機)

3. フィージビリティスタディの結果

図2に試作1号機で15mm角のA6063-O、肉厚 $t=1\text{mm}$ の角管を曲げた例を示す。写真右側が試験片先端で上から順に設定曲率半径 $R=150, 125.5, 105\text{mm}$ である。どの角管も先端部分を除いてほぼ一様の曲率半径で曲げられていることがわかる。 $R=105\text{mm}$ の角管において曲げ内側(圧縮側)の曲げははじめの部分に凹みが生じ、その後周期的な凹凸(しわ)が生じていることがわかる。この例の様に設定曲率半径が小さい場合、あるいは肉厚が薄い場合にしわが生じることがある。

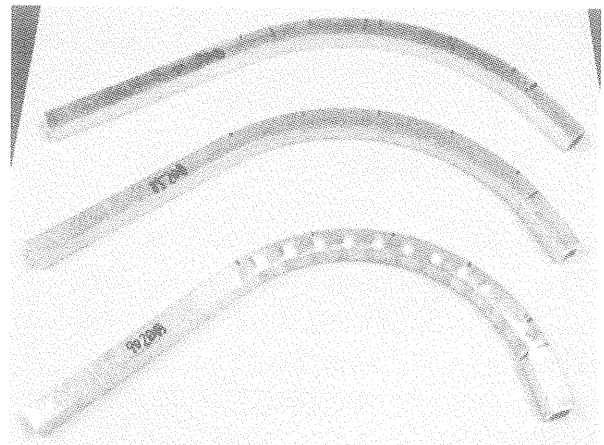


図2 曲げ後の角管

図3, 4に試作1号機で曲げを行った場合の押し込み荷重—ストロークの関係を示す。図3は設定曲率半径を一定($R=125.5\text{mm}$)とし、肉厚を変えた場合の実験結果、図4はA6063-Oを肉厚一定($t=1.0\text{mm}$)で設定曲率半径を変えた場合の実験結果である。これらの図から曲げ初期に非常に大きな荷重のピークが生じることがわかる。このピークは試料角管がオフセットローラーに接して生じるもので、この荷重によって曲げ内側に凹みを生じることがある。荷重はその後減少し、ほぼ一定の値を保つ場合(角管にしわが生じない場合)と周期的な変動を繰り返す場合(しわが生じる場合)がある。図3における $t=1.0\text{mm}$ 、図4における $R=105\text{mm}$ が後者の場合である。O/R曲げは基本的には押し通し曲げであり、軸圧縮力が加わっているため、しわが生じやすいものと考えられる。

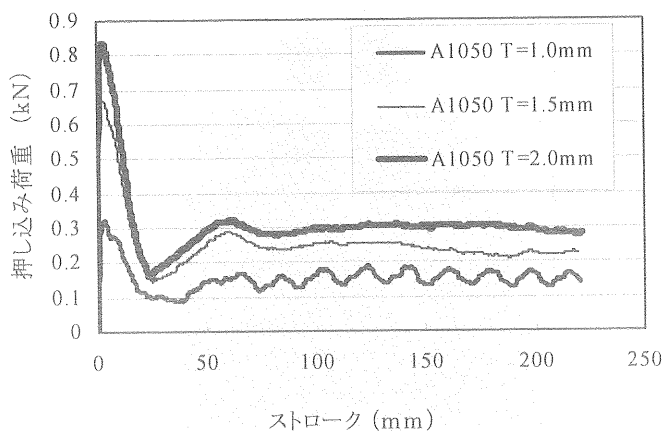


図3 押し込み荷重—ストロークの関係

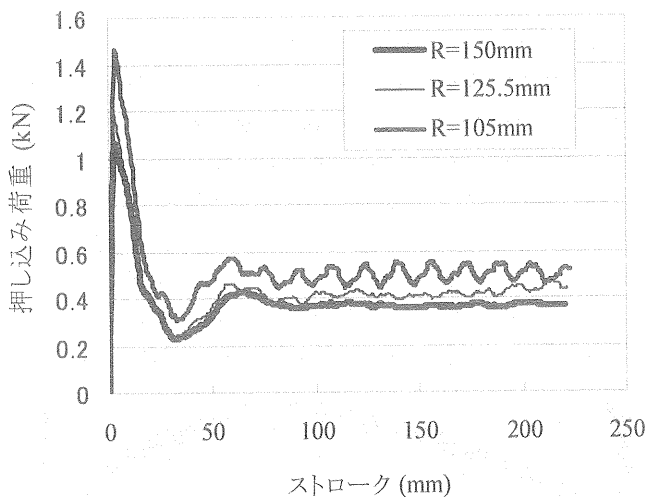


図4 押し込み荷重—ストロークの関係

図5に試作2号機で曲げた角管の例を示す。写真右側が試験片先端で、上から順に、A6061-O 肉厚 $t=2\text{mm}$ 、A6063-O, $t=3$ 、A6063-T5, $t=3$ の例である。A6063-T5, $t=3$ の場合には、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。A6061-O, $t=2$ 、A6063-T5, $t=3$ 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、曲げ内側に凹みが生じていることがわかる。

図6は試作2号機においてオフセットローラーの周速を管の押し込み速度よりも速くして駆動した場合とローラーをフリーとした場合の押し込み荷重—ストローク関係を比較したものである。このときの角管材質はA6061-O、肉厚 $t=2\text{mm}$ である。この図からローラーの周速が押し込み速度よりも速いと、摩擦により角管が引っぱられ、押し込み荷重は小さくなり、オフセットローラーの周速を押し込み速度より早くすることで軸力を制御できる可能性が示されていることがわかる。

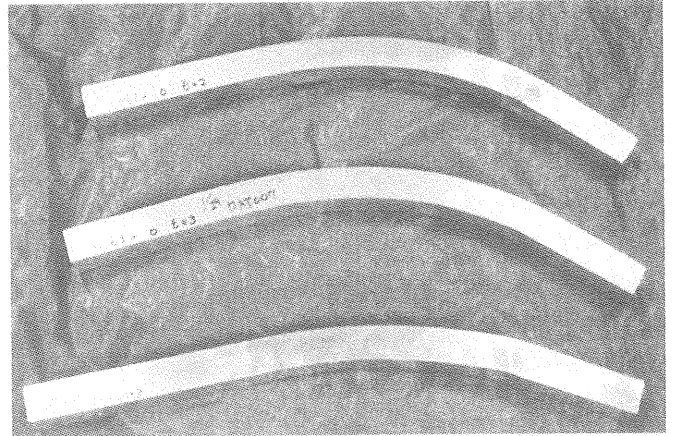


図5 曲げ後の角管

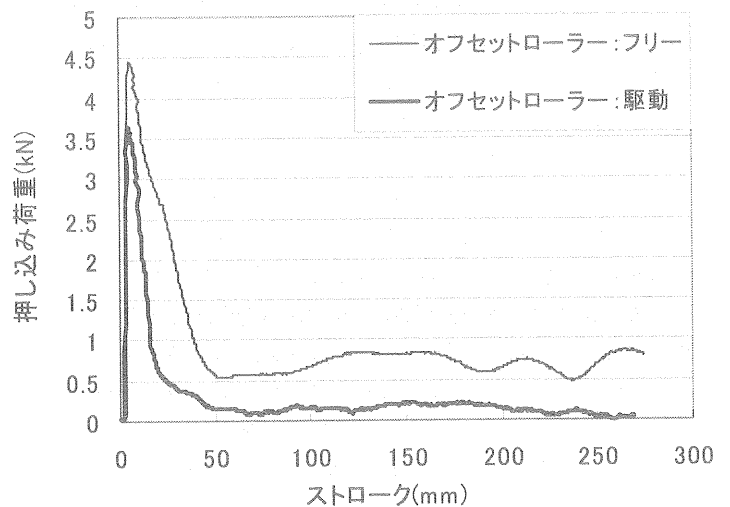


図6 オフセットローラー駆動による荷重の低減

4. 補助ローラーの設置による最大加工荷重の低減

4.1 補助ローラーの設置

図3, 4の押し込み荷重—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。試験片の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、曲げ内側の凹を抑制することができると考えられる。曲率が零から徐々に増加するクロノイド曲線を用いてローラーを配置する手法²⁾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た。

図7は補助ローラー設置後の試作2号機の写真である。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。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)を用いた。

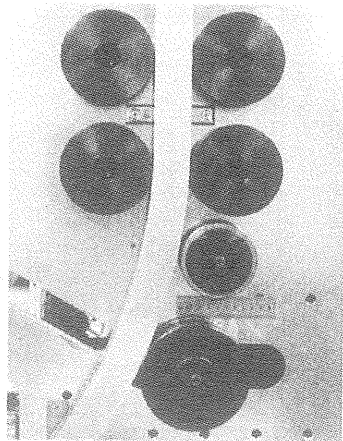


図7 OR曲げ装置 (補助ローラー設置後)

4.2 実験結果

図8、9に曲げ加工後の角管を示す。図8は A6063-O、肉厚 $t=2$ 、図9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8 曲げ後の角管(A6063-O、 $t=2$)

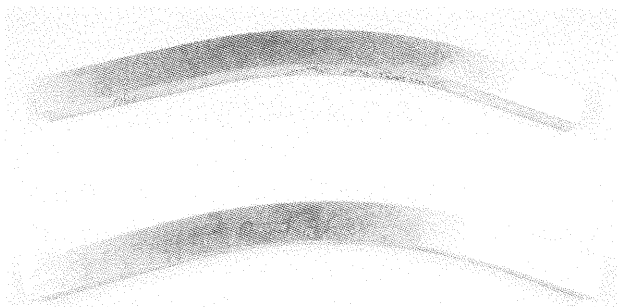


図9 曲げ後の角管(A6061-O、 $t=3$)

図10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非常に大きな荷重のピークが現れる。図8、9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120mm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だと考えられる。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。前項で油圧シリンダーの押し込み速度よりもオフセットローラーの周速を速くすると押し込み荷重を小さくできることを示した。補助ローラー設置後も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。

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。

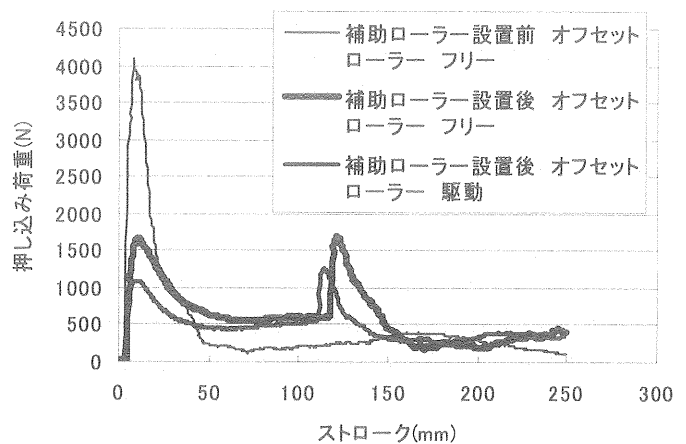


図10 オフセットローラー駆動による荷重の低減

5. 試作3号機の概略

試作2号機では推力不足のために肉厚 $t=3$ mm のA6061、A6063 のT6材の曲げが行えなかった。そこで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(2500mm)の角管を曲げ加工できる試作3号機を製作した。図11に概略を示す。試作3号機は被加工材を押し込む部分と曲げ型からなり、前記の目的を達成するために押し込み部をサーボモーターとボールねじを用いたものに変更してある。なお曲げ型は試作2号機と同一のものである。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と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。

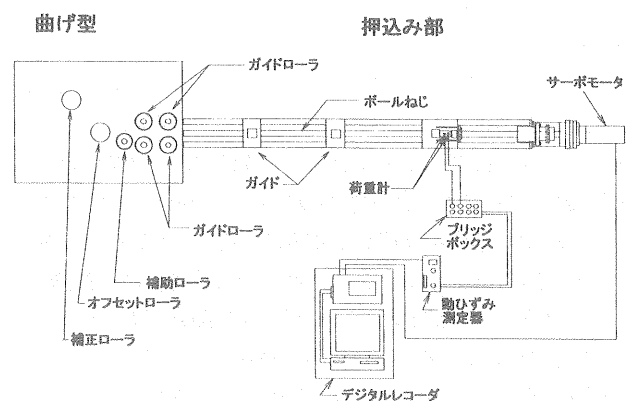


図11 OR曲げ装置(試作3号機)

6. 曲げ加工限界と成形特性の実験

6.1 実験方法

前述の試作3号機を用いて行った角管の成形特性および加工限界についての実験結果について述べる。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—ストロークの関係性を求めた。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。

6.2 実験結果

図12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。試作2号機では曲げられなかったA6061-T6材が曲げ可能となり、またどの角管もほぼ様な曲率で曲げられていることがわかる。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。

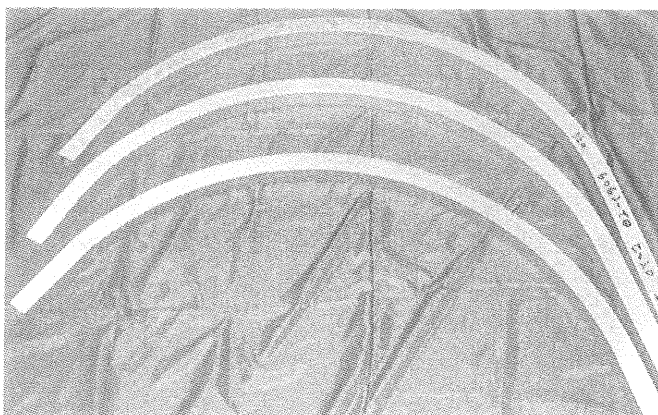


図12 曲げ後の角管($l=2000\text{mm}$)

図13に押し込み荷重—ストロークの関係性を示す。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だと考えられる。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、押し込み量の増加こ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12の凹みはこのピーク荷重による座屈である。

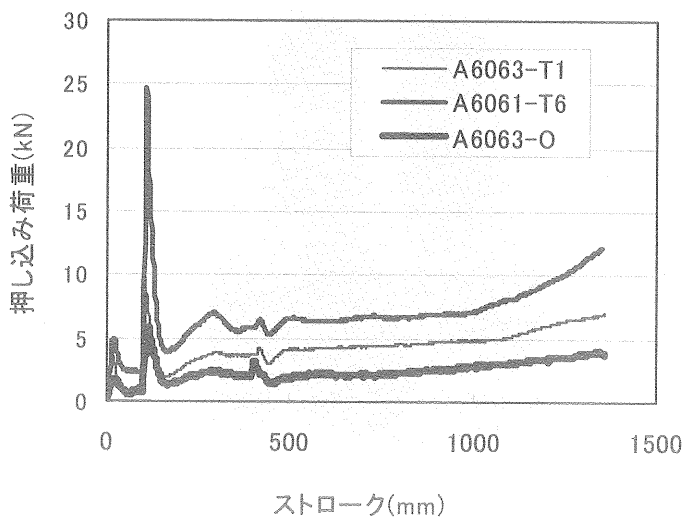


図13 押し込み荷重—ストロークの関係

図14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で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。

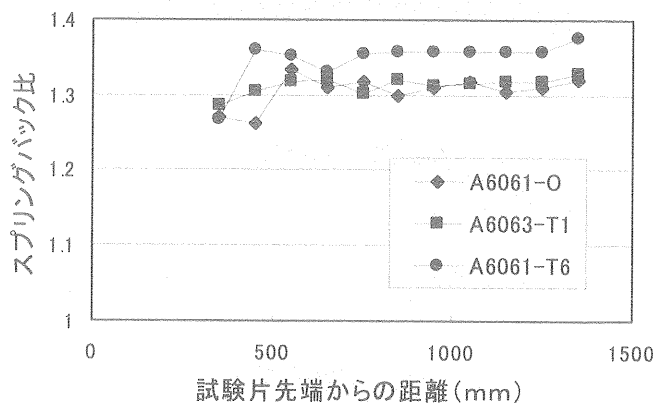


図14 スプリングバック比の長手方向の分布

図15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

径が大きいと断面変形が小さいと考えられる。

図16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を求めた結果である。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17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16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。

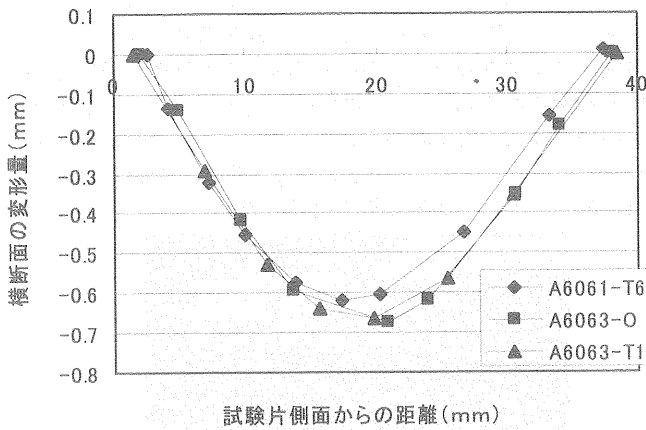


図15 角管の曲げ外側の横断面変形

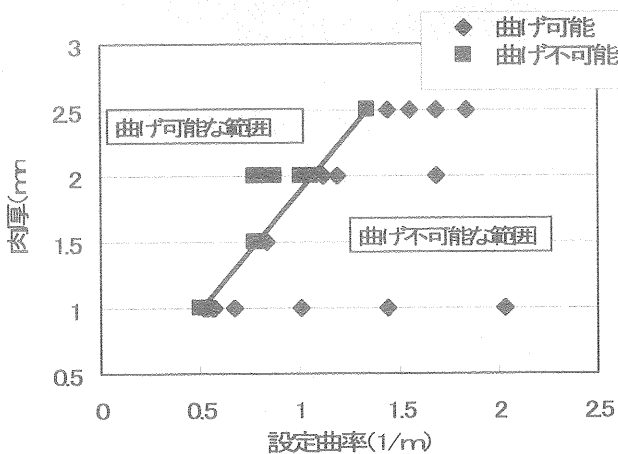


図16 曲げ加工の成形限界

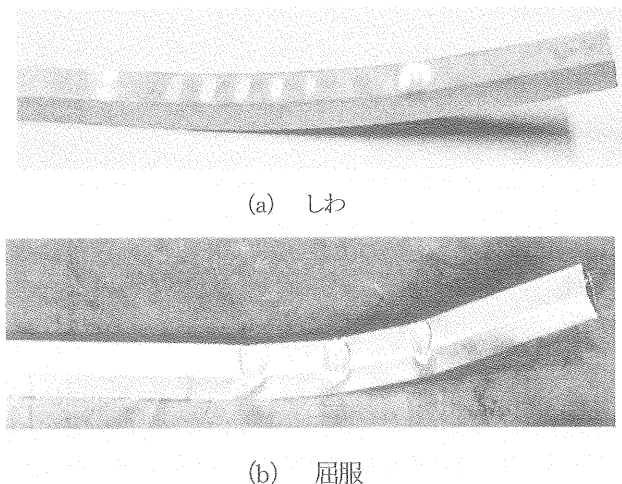


図17 曲げ不可能になった試験片の例

7. 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、フィジビリティスタディを行い曲げ可能であることを確認した。
- (2) オフセットローラーの周速を押込み速度より早くすることで軸力を制御できる可能性を確認した。
- (3) 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。
- (4) 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、軸方向にはほぼ様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。
- (5) (3)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。

8. 謝辞

本研究の一部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) 村田ほか: 塑性と加工、31-357、(1990)、1202.
- 2) 遠藤ほか: 平12塑加秋講論、(2000)、103.