

非対称断面を持つ軽量形材の実用回転引曲げ加工法の開発

坂本修次*

1. はじめに

省エネルギーを目的とした各種部材の軽量化のために、また、福祉機器のように軽量化が求められる構造物に、アルミニウム押出形材はじめ鋼角管等の軽量構造部材の利用が進められている。角管を含む各種の形材を構造物に適用するためには、曲げ加工等の二次成形加工が不可欠となる。しかし、形材の曲げ変形は複雑で、未だ十分に合理的な加工法が明かにされていない。アルミニウム押出形材の曲げ加工は、軽金属学会押出形材の成形法部会にて共同研究が実施され、角管はじめ、対称断面を持つ開断面形材の曲げ変形特性が検討されている^{1,2)}。筆者は、当研究部会の一員として、各種断面を持つ形材の曲げ加工を試み、形材の基本的曲げ加工特性を明かにし、また、従来より困難とされてきた肉厚の薄い角管の曲げ加工を可能にして来た³⁻⁵⁾。

ここでは、非対称断面形材の曲げ加工法の開発を試みている。はじめに、基本的に発生するへん平変形について検討した⁶⁾。へん平変形を抑制するために、曲げ剛性の小さい積層弾性心材を用いた。非対称断面形材の曲げ加工では、対称断面材で発生する不整形変形に加えて、ねじり変形が発生する。ねじり変形を抑制するために曲げ点付近の面外変形の拘束を試みた。さらに、圧縮側のしわ変形を抑制するために軸引張りを負荷することによって、ゆがみのない曲げ加工を可能にした^{7,8)}。非対称形材の曲げ加工は、福祉関連施設はじめ流通部門の搬送設備装置の部品加工として需要が多い。この加工法は産業界からの要望も多く、今後の発展が期待されている。

2. 回転引曲げ加工実験

2.1 供試材

曲げ実験用の供試材は、アルミニウム押出形材 A6061S とした。供試材の断面形状は、正方形の A 型 [□] 及び正方形の 1 辺を取除いた開断面の C 型 [コ] (コの字) の 2 種類とした。C 型断面供試材の形状・寸法を 図 1 に示す。断面の高さ H_0 及び幅 W_0 はともに 40mm としている。供試材の全長 L は曲げ半径によって異なり、 $L=625 \sim 1221$ mm、肉厚 t_0 は 1.0, 1.5, 2.0 及び 3.0mm の 4 種類としている。ここで図中の [・] は、各断面形状の曲げの中心方向を示し、例えば、C1 型 [□・] は片方のウェブを持たない形状を示している。

2.2 回転引曲げ加工装置

回転引曲げ加工装置の概略を 図 2 に示す。供試材を巻付けるドラム半径 R は 200, 150, 100, 75 及び 50mm

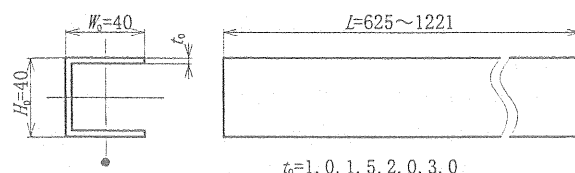


図 1 C 型断面供試材の形状・寸法

と交換作業にて選択可能とする。巻付けドラムの後方には最適な曲げモーメント分布を設定可能な曲げ荷重負荷部、供試材の及び曲げの圧縮側のしわ変形を抑制するための軸引張り負荷部がある。さらに必要に応じてワイパーダイスを使用することも可能な構造になっている。

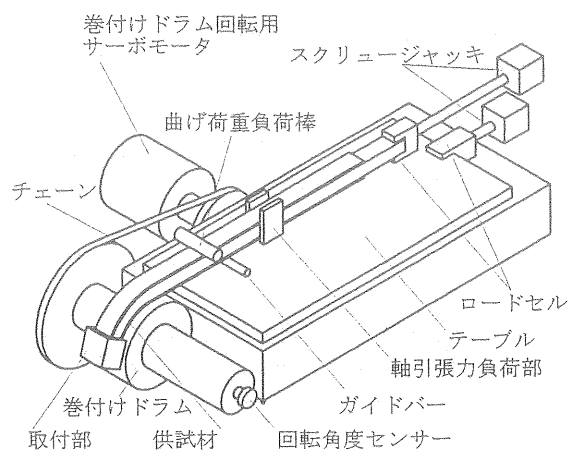


図 2 回転引曲げ加工装置概略図

3. 非対称形材の曲げにおける不整形変形

断面の一部に中空部分がある形材を曲げ加工すると、引張り及び圧縮フランジが断面の内部へ向かって落ち込む変形が発生する。肉厚が薄い場合は圧縮側にしわ変形を発生する。また、断面形状が非対称の場合は中心軸回りのねじり変形が発生する。これらの不整形変形が同時に発生すると、一般に、かなり複雑な変形に見えることになるが、これらの不整形変形はそれぞれ単独で発生するため、その対策は個々の不整形変形に対応したものとすればよい。なお、ねじり変形は供試材の曲げ変形増加領域を外部から拘束することによって、弾性変形の大きさ程度に押さえることにした。

3.1 へん平変形

断面の一部に空間を持つ形材に曲げ変形を与えると、加工素材の形状・寸法及び加工度に応じてへん平変形が

発生する。角管を曲げた場合のへん平変形の典型例を図3に示す³⁾。へん平変形は、断面に中空部分がある場合、曲げ過程で引張りフランジ及び圧縮フランジが曲げ応力による半径方向分力を受けて断面の中立面へ向かって変位する変形である。このとき、引張・圧縮フランジがウェブに接続している場合は、引張り・圧縮フランジから曲げモーメントが伝えられ、ウェブは断面の外側へ向かって曲げられるため膨らみ変形を発生することになる。総合すると、へん平変形は断面二次モーメントが減少する変形と言える。

へん平変形分力の大きさは図4のように表すことができる⁶⁾。角管の中立面の曲率半径を ρ とし、中立軸位置が断面の中央軸位置に一致するものと仮定すると、引張り・圧縮フランジ最外層の曲げひずみ $\varepsilon_T, \varepsilon_C$ は、それぞれ、

$$\varepsilon_T = (H_0/2)/\rho, \varepsilon_C = -(H_0/2)/\rho \quad (1)$$

と表される。

引張りフランジを代表として、引張りフランジ最外層の曲げ応力 σ_T を求めると、弾性変形域では、縦弾性係数を E として、

$$\sigma_{TE} = E\varepsilon_T = E(H_0/2)/\rho \quad (2)$$

塑性変形域では、応力-ひずみ構成式を $\sigma = C\varepsilon^n$ とすると、塑性域の最大曲げ応力 σ_{TP} は次のようになる。

$$\sigma_{TP} = C \left\{ (H_0/2)/\rho \right\}^n \quad (3)$$

図4-1に示すように、曲率半径 ρ の角管を曲げ曲率の中心から微小な挟み角 $d\theta$ を持つ二つの面AB及びCDによって切り取るものとし、これら2面間の微小距離を、中立軸位置で dx 、引張りフランジ位置で dx_T 、圧縮フランジ位置で dx_C とする。このとき、引張りフランジの点A及びCに作用する円周方向力 P_T は角度 $d\theta$ を持つため、図4-2に示すように、中立軸方向の分力 P_{TN} を持つことになる。分力の大きさは、角度をラジアン表示とすると、 $\sin(d\theta/2) \approx d\theta/2$ となり、

$$P_{TN} = 2P_T \sin(d\theta/2) \approx P_T d\theta \quad (4)$$

となり、圧縮フランジ分力 P_{CN} も同様に、

$$P_{CN} \approx P_C d\theta \quad (5)$$

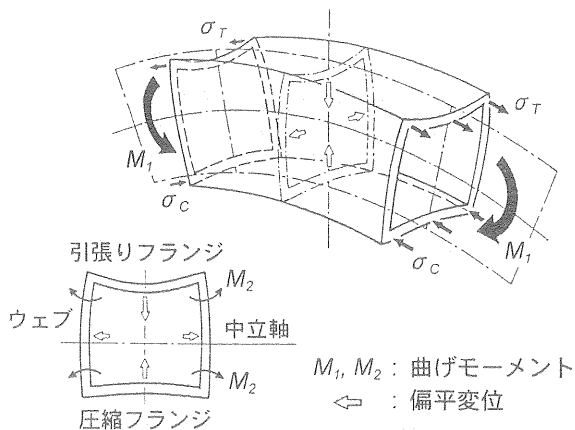
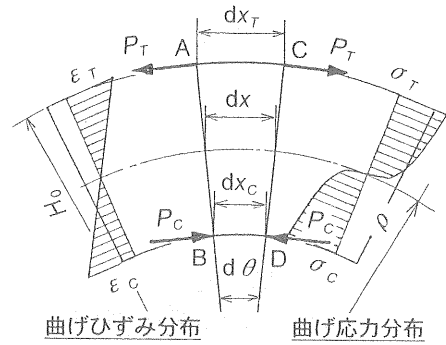
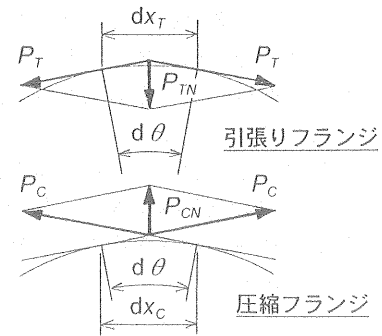


図3 正方形角管のへん平変形³⁾



(1) 曲げ変形と曲げ応力



(2) へん平変形分力

図4 へん平変形分力の発生機構⁶⁾

となる。

いま、変形が弾性域にあるものと仮定すると、引張りフランジの肉厚を t 、幅を W とすると、引張りフランジの微小長さ dx_T に作用するへん平変形分力 P_{TN} は、曲げ応力 σ_{TE} を用いて表現すると、次のように表される。

$$\begin{aligned} P_{TN} &= 2\sigma_{TE} t W \cdot \sin(d\theta/2) \\ &\approx \sigma_{TE} t W \cdot d\theta \\ &= t W E H_0 \cdot d\theta / (2\rho) \end{aligned} \quad (6)$$

引張りフランジの単位面積に作用するへん平変形分布荷重は $w_{TN} = P_{TN} / (dx_T \cdot W)$ となり、曲率半径 ρ が角管の高さ H_0 に対して十分に大きいものとする、 dx_T は次のように表される。

$$dx_T = (\rho + H_0/2) \cdot d\theta \approx \rho \cdot d\theta \quad (7)$$

弾性域におけるへん平変形分布荷重は次のようになる。

$$w_{TNE} = E H_0 t / (2\rho^2) \quad (8)$$

へん平変形分布荷重は肉厚 t に比例し、曲げ曲率半径 ρ の自乗に反比例することがわかる。

同様の方法で、変形が小さいものと仮定すると、塑性変形域の場合のへん平変形分布荷重 w_{TNP} は

$$w_{TNP} = C t (H_0/2)^n / \rho^{n+1} \quad (9)$$

のように表される。

へん平変形分布荷重の作動状況を図5に示す。これは心材を用いないため、へん平変形が大きく、また、軸引張りの負荷等によって、中立軸が断面の中央軸から圧縮側へ移動した場合の状況を示している。

弾性域のへん平変形分布荷重比を図6に示す。横軸に

は変形度 ρ/H_0 をとっている。変形度の増加に従ってへん平変形分布荷重が著しく大きくなっていることがわかる。実際のへん平変位はフランジの曲げ剛性によって決定されるので、肉厚の薄いものほど顕著になることが推定される。

各種断面形状のへん平変形を図7に示す。断面の形状によって、へん平変形の状態は大きく異なるようにみえるが、変形の原理はすべての断面に共通しており、図4

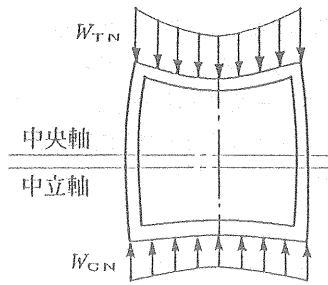


図5 へん平変形分布荷重の作用

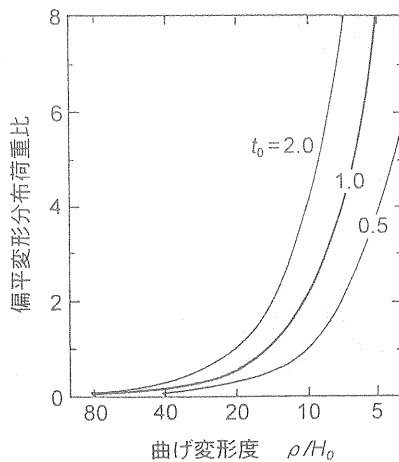


図6 へん平変形分布荷重比と曲げ変形度

Cross section	Flattening
	*
	**
	**

* Result of FEM, ** Result of experiment

図7 各種断面形状のへん平変形の例

に示したへん平変形分力によって断面の構成要素が中立軸に向う力を受けて変形することになる。非対称断面材のうち、片側のウェブを持たない形式の場合は図7に示すように引張り・圧縮フランジともにほぼ直線を保ったまま開口部が閉じる変形を示すことが FEM 解析及び準均等曲げ実験によって確認されている。へん平変形を防止するためには、図11に示すような複合弾性心材の適用が有効である。

3.2 しわ変形

圧縮フランジ及びウェブの圧縮側に生じるしわ変形を抑制するための有力な手段は、軸引張り力の負荷とこれらの部材の面外曲げ変形の拘束である。圧縮側に比較的複雑な形状の構成部材がある場合は軸引張り力の負荷が合理的である。しわ変形の抑制は、軸引張り力の負荷によって、圧縮部材の圧縮ひずみを面外座屈変形を発生するひずみ限度以内に低減させることによって可能になる。

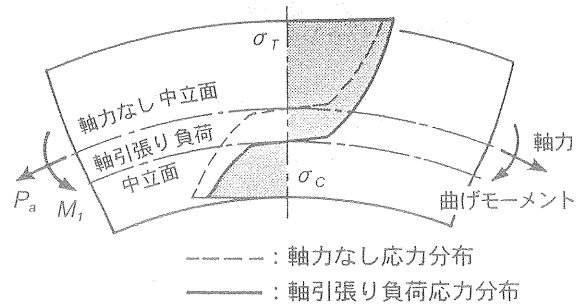
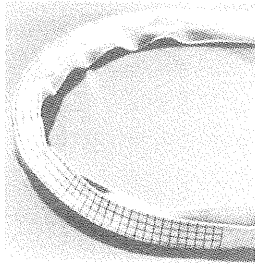


図8 軸引張りを負荷した場合の曲げ応力分布

4. 回転引曲げ加工の変形モード図

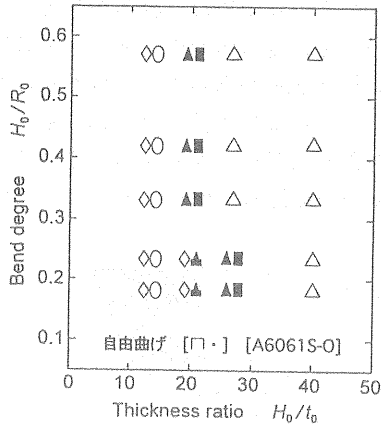
非対称断面形状の一つであるコの字型断面(C1)形材を回転引曲げ加工すると、へん平変形のほかに、圧縮側のひずみが限界を超える場合はしわ変形が発生し、さらに非対称断面特有の不良現象としてねじれ変形が発生する。

一例として、A6061S-O、肉厚 $t_0=3.0$ を $R=200\text{mm}$ で心材及び軸引張り力負荷を適用することなく、自由曲げ加工を行なった結果を図9に示す。図によれば、図7に示したとおり、へん平変形によって、引張り及び圧縮フランジが接近していることがわかる。また、加工の初期からねじれ変形が発生し、巻付け角が 60° ほど進行したところではほぼ 90° ねじれ、ウェブの解放面が圧縮側に移動している。その後は、断面形状が対称になるため、ねじれた状態で安定していることがわかる。A6061S-Oについて、各肉厚の供試材を5種類の半径を持つ巻付けドラムによって自由曲げ加工した結果を変形モード図として図10に示す。図10-1によれば、自由曲げの場合、すべての加工条件で成功例はない。肉厚が厚い場合はねじれを伴うへん平変形が発生し、肉厚が薄くなるにつれてしわ変形が目立ち、さらに薄くなると全ての曲げ加工度で屈服変形が発生する。したがって、コ

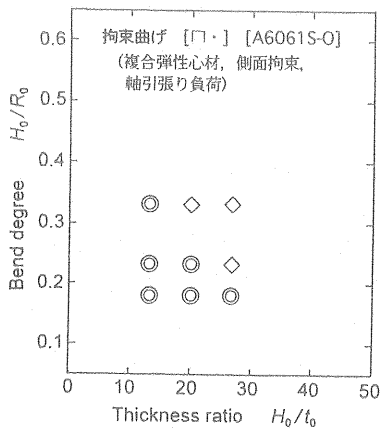


断面形状：□・
材質：A6061S-O
肉厚 t_0 : 3.0
曲げ半径 R : 200

図9 非対称断面形材の自由曲げの例



(1) 自由曲げ



(2) 拘束曲げ

◎ : 成功, ○ : へん平変形, ◇ : ねじれ変形
■ : フランジしわ, ▲ : ウェブしわ, △ : 屈服

図10 非対称断面形材の曲げ変形モード図

の字断面形材を自由曲げしたとき成功例は期待できないことがわかる。非対称形材の曲げ加工では、へん平変形、しわ変形及びねじれ変形を抑制するためには、それぞれ個別の対策が必要である。ただし、へん平変形及びしわ変形を抑制した場合には屈服変形が発生することはない。

5 不整形変形の抑制法

5.1 複合弾性心材

形材の曲げ加工では、全ての加工条件で、へん平変形の発生を抑制することが必須となる。へん平変形の抑制

にはへん平変形の成因を直接的に打ち消す方法として、積層板で構成する弾性心材の適用が合理的である。心材に求められる特性は、①素材の変形に抵抗とならないような柔軟性を持つこと、すなわち、曲げ剛性が低いこと、②心材自体に潰れを生じることなく、③脱着に要する時間が少なく、しかも、④心材自体のコストが低いことが重要である。ここでは図11に示すような複合弾性心材を使用した。この心材はプラスチック板を重ねた積層弾性部と剛体部から構成され、それらを2本のピンで結合した構造になっている。

積層弾性心材を曲げ加工部のみに作用させた部分作動型の場合の心材作動状況を図12に示す。図中には、曲げモーメント負荷のための主及び副曲げ負荷点位置を示している。副曲げ負荷点は曲げモーメントの分布調整の機能を持っている。この字断面(C1)の特性として、引張りフランジの剛性が低いため、

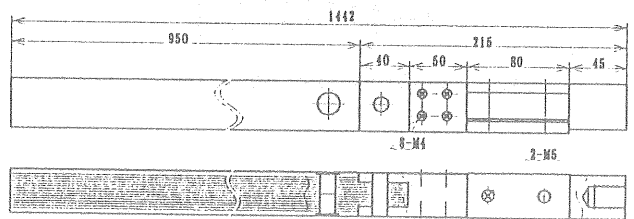


図11 複合弾性心材の形状・寸法

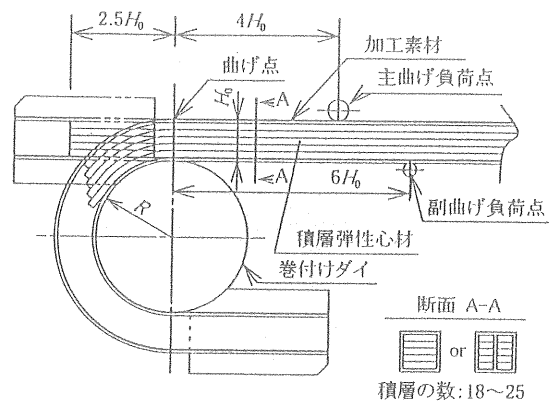


図12 部分作動型積層弾性心材の作動状況

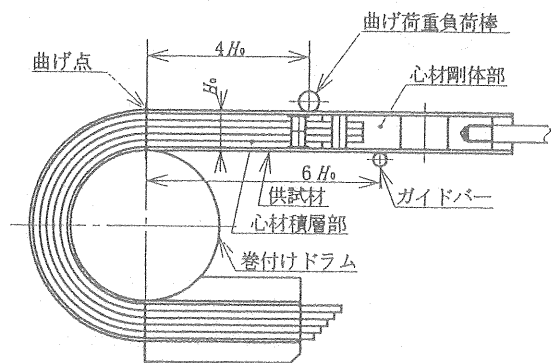
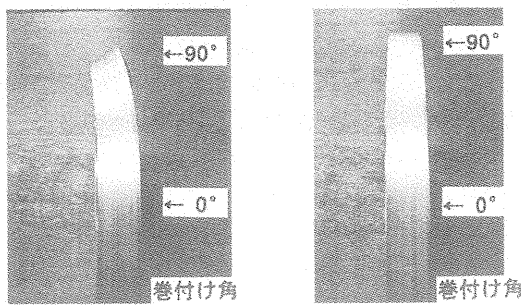


図13 全面作動型複合弾性心材の作動状況

心材反力の影響が無視できない場合は、図 13 に示すような全面作動型の積層弾性心材が有効である。積層弾性心材の曲げ剛性は供試材の弾性曲げ剛性の 1/7000 程度に調整している。

図 12 に示すように、部分作動する積層弾性心材の曲げ点後方の長さを $2.5H_0$ とすると、圧縮側のしわを抑制するために軸引張りを負荷した場合、心材の先端で、引張りフランジの落込みが発生する。このような加工例を図 14-1 に示す。コの字形断面の場合は、ウェブの片側を持たないため引張りフランジの変形度が大きく、心材反力の影響を受けやすいことがわかる。したがって、コの字形断面の場合は、図 13 に示すような、曲げ加工部の全面にわたって積層部が作用する全面作動型の心材が有効である。全面型心材を用い、さらに軸引張り力を負荷した場合の加工結果を図 14-2 に示す。この条件で、心材反力を避けることができるものの、供試材の非対称性によって



(1) 心材位置 $2.5H_0$ (2) 全面作動型心材
[A6061S-O, $t_0=2.0\text{mm}$, $R=200\text{mm}$]
図 14 複合弾性心材の効果

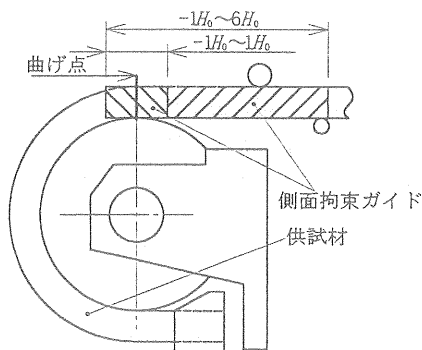


図 15 側面拘束ガイド

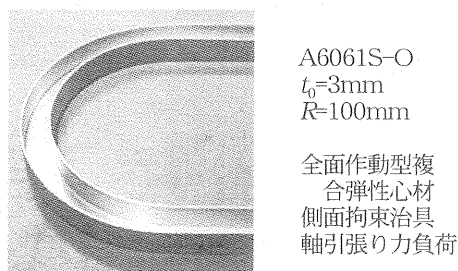


図 16 不整形抑制曲げ加工例

心材排出の力を受けることになる。したがって、積層弾性心材の排出を防ぐために、以下に述べるような治具が必要になる。

5.2 側面拘束ガイド

図 15 に側面拘束ガイドの取付け位置を示す。側面拘束ガイドは 2 つの効果をもっている。一つは、曲げ半径が小さい場合、心材が側方へ押出されることを防ぐ効果であり、他は、非対称断面材の曲げ加工において、曲げ負荷棒によって曲げ荷重を負荷するとき、断面のせん断中心から外れて負荷されることによって生じるねじれ変形を防ぐことである。拘束の位置は曲げ点後方 $1H_0$ から副曲げ負荷点 ($6H_0$) まで必要になる。これは、曲げモーメントが増加する位置に対応する。すなわち、曲げ加工が進む範囲のすべてのねじれ変形を拘束する必要がある。結果としてねじれ変形は弾性域内のみで許容することになる。

5.3 軸引張り力負荷

薄肉形材の曲げ加工では圧縮側のしわ変形防止のためには軸引張り力負荷が効果的である。軸引張り力は、曲げ部分近傍で負荷する必要はなく、図 2 に示したとおり、供試材の適当な部分に軸引張り力を負荷することで、曲げ変形部の圧縮側のひずみを軽減し、しわを防ぐことができる。これらの拘束治具を用いた拘束曲げの結果を図 10-2 に示す。多くの条件で成功例となっている。これらの拘束治具によって、図 16 に示すように、非対称断面形材の曲げ加工が可能になる。

6. まとめ

非対称断面形材の曲げ加工では、へん平変形を防ぐための心材、ねじれ拘束治具及びしわ抑制のための軸引張り力負荷によって、ほぼゆがみのない加工が可能になる。

終わりに、本研究の一部は 天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によってなされたものであることを記し、深く謝意を表します。また、本研究は軽金属学会押出形材成形法部会の共同研究の一部として行なわれたもので、曲げ加工用試料を御提供戴いた研究会構成各社に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 6061, 6063 アルミニウム合金押出形材の曲げ加工(研究部会報告書 No.32), 軽金属学会, 1996.
- 2) 6061, 6063 アルミニウム合金押出形材の曲げ加工における精度と限界(研究部会報告書 No.36), 軽金属学会, 1999.
- 3) 坂木ほか: 塑性と加工, 36-414 (1995), 719-724.
- 4) 坂木ほか: 軽金属, 46-10 (1996), 486-493.
- 5) 坂木ほか: 軽金属, 49-9 (1999), 426-431.
- 6) 坂木: 都立科技大学紀要, No.15 (2001), 67-72.
- 7) 新井ほか: 平成 11 年度塑性加工春季講演会 (1999.5), 27-28.
- 8) 侯ほか: 平成 14 年度塑性加工春季講演会 (2002.5), 363-364.