

アルミニウム押出し型材の曲げ加工データベースの構築

軽金属学会（東京都立科学技術大学 機械システム工学科）

教授 坂本修次

（平成4年度研究開発助成 AF-92024）

1. 研究の背景

アルミニウム押出し型材は軽量構造部材として多くの利点を持っている。このような部材を省エネルギーを目的として自動車部品に用い、また、曲線に富む現代的な建築構造物等に用いることが積極的に進められている¹⁾。

押出し型材を構造部材として利用する場合には、一般に、曲げ加工等の二次成形加工が必要になる。しかし、型材のように、断面に空間の部分がある部材の曲げ加工では、引張りあるいは圧縮フランジが断面の内部へ落ち込む形状変形が生じる。さらに、軽量構造部材として用いられるアルミニウム押出し型材の肉厚は薄いものが多く、成形加工において圧縮荷重を受ける部分にしわ等の座屈変形が発生しやすい。

このような型材の曲げ変形特性に対して、実際の曲げ加工では、加工材の形状寸法及び必要な加工度に応じて、プレス曲げ、回転引曲げ、押し通し曲げ、ロール曲げ等の加工法が選択されている。しかし、アルミニウム押出し型材の最適曲げ加工条件は未だ明らかにされていない。

本研究では、アルミニウム押出し型材の曲げ変形特性を明らかにするとともに、加工限度の向上法について検討している。曲げ加工用供試材の断面形状は正方形角管を基本とし、正方形角管の中央に1本のリブを加えた形状及び角管の一面を取り除いた開断面形とした。試料はアルミニウム押出し型材のなかで最も使用量の多い Al-Mg-Si系合金の A6063S-T5, O 材及び A6061S-T6, O 材とした。

はじめに、引張試験を行い、押出し型材の力学的特徴を確認した。曲げ実験は、曲げ変形の基本的特性を明らかにするために、均等曲げを試み、実際の加工法としては、プレス曲げ、圧縮曲げ、回転引曲げ、引張り曲げ加工を試みた。さらに、それぞれの曲げ加工において生じる形状変形及びしわ変形等の不整形変形を抑制し、加工限度を高めるため、小粒心材、ピアノ線心材、剛体心金、積層弾性心材等の使用を試み、心材が各種の不整形変形の発生を抑制する効果について検討した。

その結果、中空断面形状をもつ型材の曲げ加工では、心材の使用が不可欠であること^{2,3)}、また、曲げ加工において生ずる各種の不整形変形を抑制する効果は、心材によって異なり、積層弾性心材は、横断面の形状変形及びしわの発生

を効果的に抑えることが明らかにされた。

積層弾性心材を用いることによって、A6063S-O 材では肉厚 t_0 と高さ H_0 で表される肉厚比 $t_0/H_0=0.075$ 及び 0.05 の場合は、それぞれ、供試材の中央軸の曲率半径 R_0 と高さ H_0 で示す加工度 $R_0/H_0=1.75$ 及び 2.38 までの加工が可能になっている。

2. アルミニウム押出し型材の機械的性質

押出し加工されたアルミニウム型材の曲げ加工を行う際に、その機械的性質を正確に把握することは、その形状や寸法と同様に重要なことである。そこで、アルミニウム押出し型材の機械的性質を調べるために引張試験を行い、耐力、引張強さ、伸び、塑性係数（F値）及び加工硬化指数（n値）を取上げ比較検討を行った。

さらに、押出し型材においては、型材の断面の部位によって、また、押出しの初期、中期及び後期において、機械的性質に差が生じることが推測されるため、引張試験による実験的検討を行った。試料は、肉厚 t_0 が 1.5mm、高さ H_0 及び幅 W_0 がともに 40mm のアルミニウムの正方形管で、材質は A6061S-O, A6061S-T6, A6063S-O 及び A6063S-T5 の 4種類とした。

ここで用いた引張試験片の形状・寸法を図1に、試験片の採取位置を図2示す。図2に示す a~f の各部の

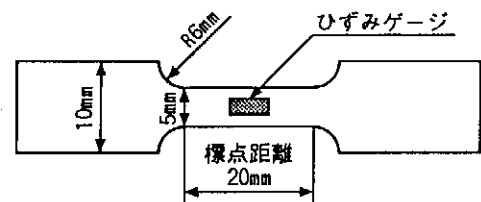


図1 引張試験に用いた試験片の形状・寸法

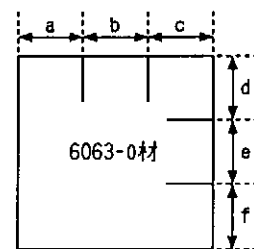


図2 試験片の採取位置

表1 断面の各部における機械的性質

	n 値	F 値	伸び (%)	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	硬さ
6063-0-a	0.255	208.5	24.0	46.75	93.3	151
6063-0-b	0.230	188.7	25.3	44.52	93.3	151
6063-0-c	0.213	196.4	24.3	55.53	101.3	150
6063-0-d	0.250	200.3	22.0	40.84	89.3	151
6063-0-e	0.238	190.6	26.0	41.23	92.0	150
6063-0-f	0.240	184.9	28.0	44.48	86.7	146

表2 供試材の機械的性質

機械的性質		A6063S		A6061S	
		T5	O	T6	O
引張強さ	σ_B (MPa)	206~235	78~108	304~333	118~147
耐力	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	166~196	39~69	274~303	59~88
伸び	δ (%)	13~23	33~43	10~20	33~43
加工硬化指数*	n	0.08	0.23	0.08	0.28
塑性係数*	F	281	189	388	236

*: $\sigma = F\varepsilon^n$, Test piece: JIS14A.

機械的性質を表1に示す。表より、試験片の採取位置による機械的性質の差異はほとんど認められず、実験誤差の範囲にあることが確認された。また同様に、押し出材長手方向位置による差異も認められないことが確認されている。本研究に用いた供試材の機械的性質を表2に示す。

に示す。

しわ等の不整形防止のために、積極的に軸引張りを負荷する引張り曲げ加工法を図4-5に示す。

3. 実験

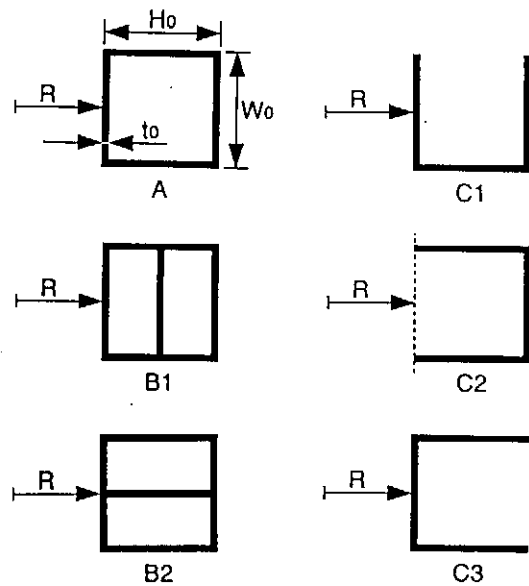
3.1 型材の断面形状と曲げ方向

押し出材の形状・寸法を図3に示す。断面形状が正方形管のものをA型、正方形管の中央に1本のリブを配置したものをB型、正方形管の一辺を取り除いたものをC型とする。図に示すように、B及びC型は曲げ曲率の方向性によって、それぞれ、B1、B2、C1、C2、C3型とする。断面の高さ H_0 及び幅 W_0 はともに40mmとし、肉厚 t_0 は3.0、2.0、1.2、1.0mmの4種類とした。

3.2 曲げ加工法

押し出材の曲げに用いた加工法を図4に示す。曲げ加工における基本的な変形としわ等の不整形発生条件の基礎を明らかにするために用いた均等曲げ装置の概念図を図4-1に示す。量産加工を前提とした場合に、最も現実的な加工法となるプレス曲げ加工法を図4-2に示す。

型材の曲げ加工において、不整形の発生を防止するために各種心材を利用しやすい回転引曲げ加工法を図4-4に、また、回転引曲げ加工と原理的に同等の機能をもち、供試材の取扱いの異なる回転圧縮曲げ加工法を図4-3



材質・熱処理	A6061-T6, O 及び A6063-T5, O
板厚 t_0	1.0, 1.5, 2.0, 3.0mm
高さ H_0 , 幅 W_0	40mm (H_0 , W_0 とも)

図3 型材の断面形状と曲げ方向

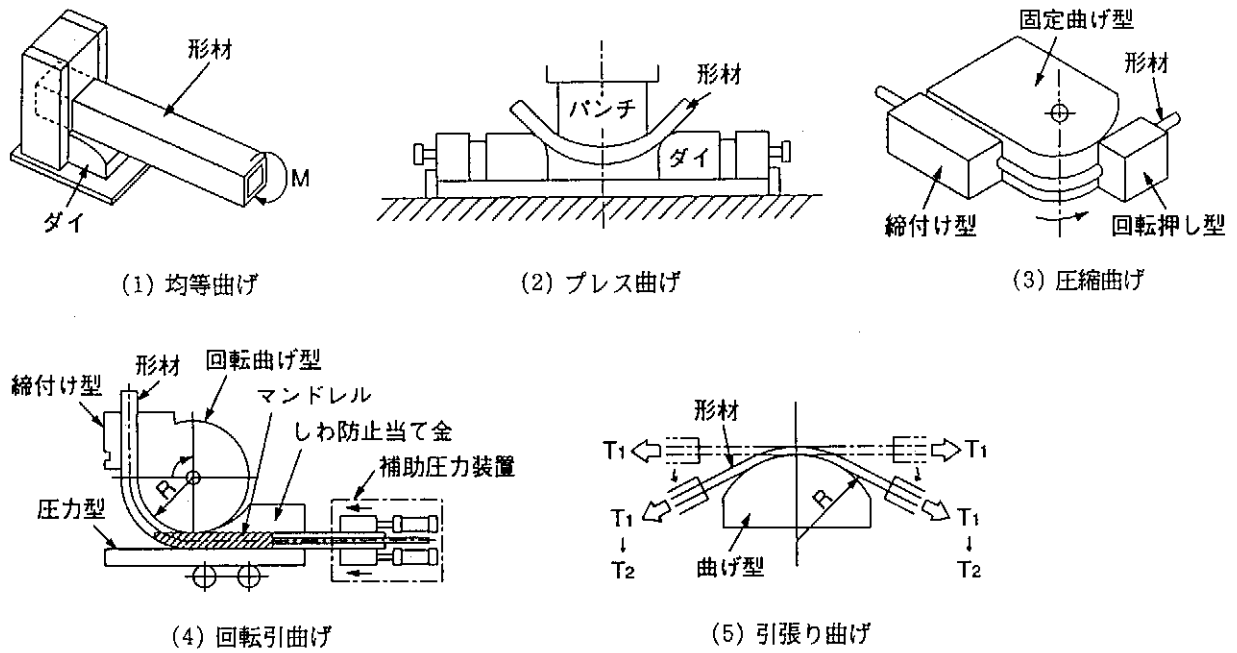


図4 押出形材の曲げ加工法

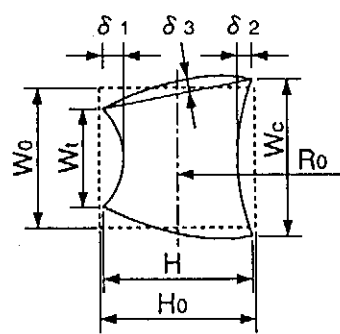
4. 結果

4.1 断面の変形

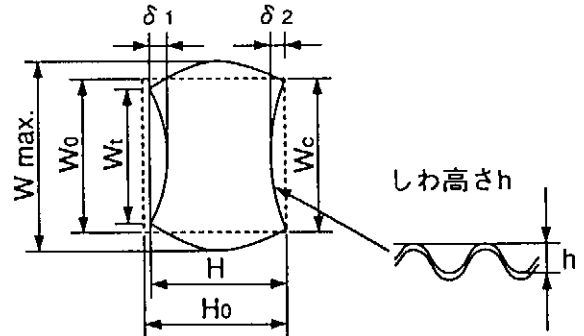
断面の一部に中空部分がある形材に曲げ変形を与えた場合、引張りフランジ及び圧縮フランジが断面の内部へ落ち込む変形を生じる。この落ち込み変形によって、ウェブは形材の外部方向への曲げモーメントを受け、膨らみ変形を示す

ことになる。したがって、断面形状は図5のようになる。

この形状変形は一次安定変形であり、その変形の度合は製品精度として評価の対象になる。形材の肉厚が薄い場合は、形状変形に重畳して、圧縮応力を受ける部分にしわ等の座屈変形を発生する。



(1) ウェブの面外変形 [拘束治具使用]



(2) ウェブの面外変形 [拘束治具なし]

図5 断面形状変化のモデル化

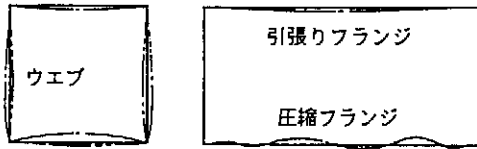
4.2 均等曲げ

形材の曲げ加工において発生する各種の不良現象の基礎的特性を明らかにするために均等曲げを試みた。

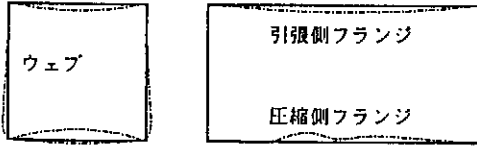
断面形状がA型で、A6061S-0、 $t_0 = 1.0\text{mm}$ 、加工度 $R_0/H_0 = 40.5$ (曲げ半径 $R = 1600\text{mm}$) 及び A6063S-0、 $t_0 = 1.5\text{mm}$ 、 $R_0/H_0 = 14.5$ (曲げ半径 $R = 580\text{mm}$) の場

合の変形を 図6 に示す。図より、肉厚が薄い供試材では加工度が小さく、したがって、 R_0/H_0 の値が大きい場合でも圧縮フランジ及びウェブの圧縮側に座屈によるしわを発生していることがわかる。

形材の曲げにおける横断面の形状変形は加工度に応じて発生する変形で、肉厚が薄いものほど顕著になる⁴⁾。



(1) A型(□・), A6061S-O
 $t_0 = 1.0, R_0/H_0 = 40.5$



(2) A型(□・), A6063S-O
 $t_0 = 1.5, R_0/H_0 = 14.5$

図6 均等曲げにおける型材の変形

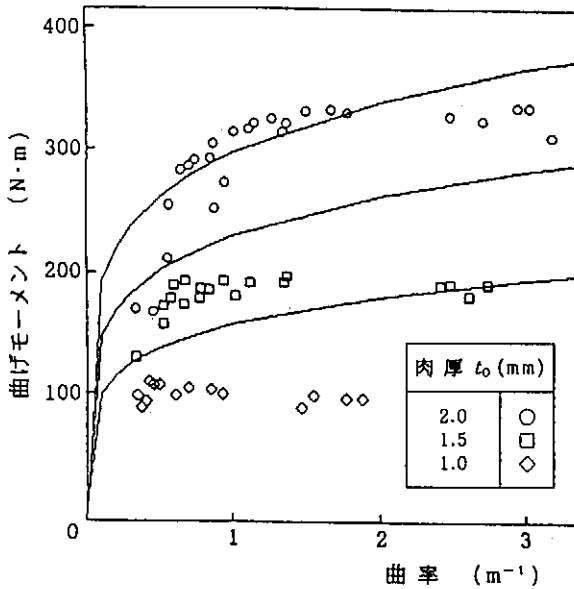


図7 均等曲げにおける曲率と曲げモーメント

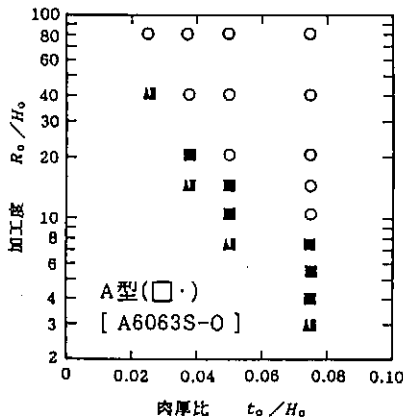


図8 均等曲げモーメント負荷による変形モード図の一例 [A型、A6063S-O]

均等曲げ加工における曲げモーメントは応力-ひずみ関係を $\sigma = F\varepsilon^n$ で表すと、曲げモーメント M は次式で表される⁵⁾。

$$M = 2F/(n+2) \cdot \{H_0 (H_0/2)^{n+2} - (H_0 - 2t_0) \cdot (H_0/2 - t_0)^{n+2}\} (1/R)^n \dots \dots \dots (1)$$

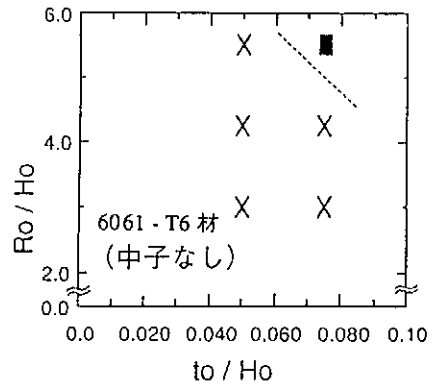
理論値と実験結果との対応を図7に示す。図によれば、肉厚が厚い場合には良い一致が見られるが、肉厚が薄い場合はしわが発生するため、実験値は低くなっていることがわかる。

均等曲げにおける、変形モード図の一例を図8に示す。図中では形状変形を[○]、圧縮フランジしわを[■]、ウェブしわを[▲]、圧縮フランジ・ウェブしわを[▲■]、屈服を[△]、割れを[×]で示す。

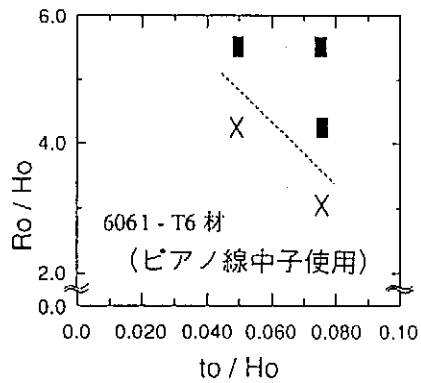
図より、肉厚が2倍だけ大きくなると、加工限度はおよそ4倍に増大することがわかる。

4.3 プレス曲げ

型材の曲げにおいて、最も能率の高い方法がプレス曲げである。加工機にはクランクプレスを用い、曲げ型は、形状変形のうちウェブの膨らみ変形を防止するための拘束板



(1) 中子の使用なし



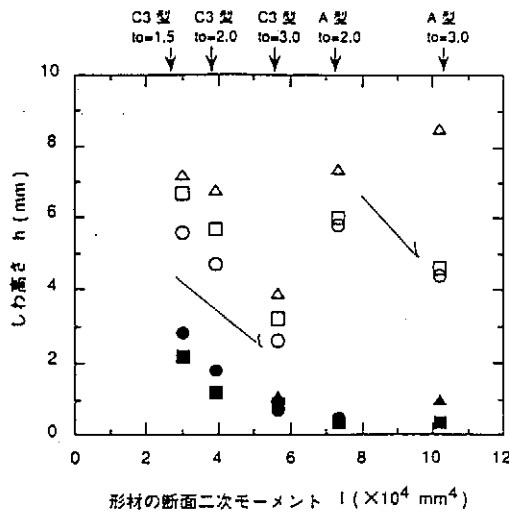
(2) ピアノ線中子使用

図9 プレス曲げ変形モード図 [A型]

を備えるものとした。パンチの曲げ半径は $R=200, 150,$ 及び 100mm の 3種類とし、ダイはダイ間ピッチが調整可能なものとした。

A型断面 A6061S-T6材の変形モード図を、中子を用いない場合及びピアノ線中子を用いた場合について 図9 に示す。図より、ピアノ線中子を用いることにより、曲げひずみが分散し、したがって引張りひずみが低減されることにより、引張りフランジに発生する割れが抑えられていることがわかる²⁾。

図10 にC3型A6061S-Oの圧縮フランジしわ高さに及ぼすピアノ線中子の効果を示す。図よりピアノ線中子によってしわ高さは十分に抑えられ、また、断面二次モーメントが大きいものほどしわ高さが小さくなっている。



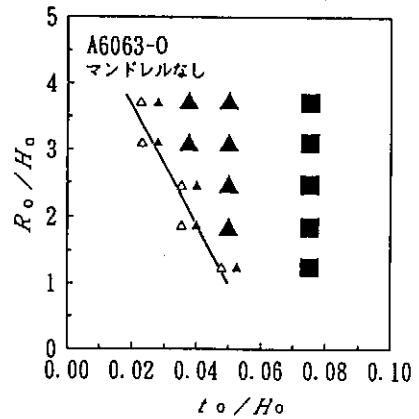
	R mm	100	150	200
中子なし		△	□	○
ピアノ線中子使用		▲	■	●

図10 しわ高さに及ぼすピアノ線中子の効果

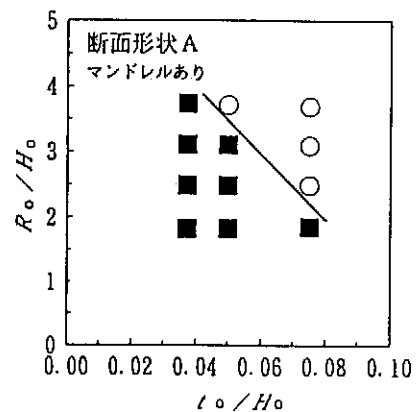
4.4 圧縮曲げ

圧縮曲げでは、拘束治具によってウェブの面外変形を拘束し、加工機の特性を考慮して、直径 2mm のアルミナ小球をマンドレルとして用いた。各材質ごとの変形モード図によれば、T5及びT6においても良好な成形を行える領域があることが確認された。O材ではマンドレルを使用することで、成功領域が著しく拡大する。変形モード図の一例を A6063S-O について、マンドレルを使用しない場合及び使用した場合を 図11 に示す。

小球マンドレルによって、フランジの落込み、断面の形状変形の抑制が可能になり、また、フランジしわ高さが約 $1/2$ に低減できることが明らかにされた²⁾。



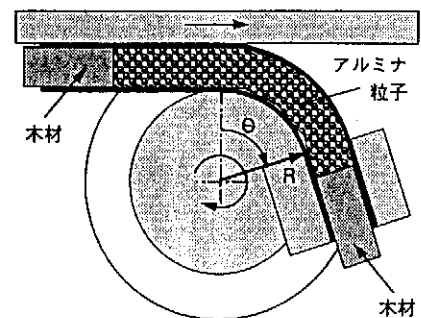
(1) マンドレルの使用なし



(2) アルミナ小粒マンドレル使用
図11 圧縮曲げの変形モード図の一例

4.5 回転引曲げ(1)

通常の回転引曲げ加工機を使用し、マンドレル無しの条件下及びアルミナ小球をマンドレルとして用いた条件下での曲げ加工を試みた²⁾。加工実験の概要を 図12 に示す。この加工法では、C1型の場合は全ての条件でフランジの倒込みとねじり変形が発生し、型材が金型からはみ出し、加工が不可能であった。



アルミナ粒子マンドレル

図12 回転引曲げ加工実験の概要

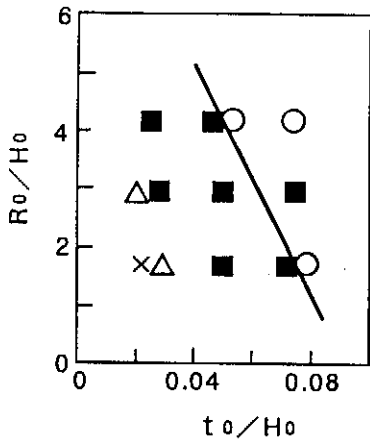


図13 A型断面材の変形モード [A6063S-O] (アルミナ粒子マンドレル使用)

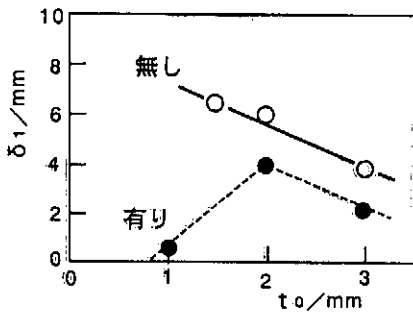


図14 引張りフランジの落込みに対するマンドレルの効果 [A型、A6063S-O、R=100mm]

変形モード境界線図の一例をA6063S-Oについて図13に示す。アルミナ小粒マンドレルを使用することによって、マンドレル無しの場合よりも成功領域が広がることが確認された。引張りフランジの落込み δ_1 に対するマンドレルの影響を図14に示す。

4.6 回転引曲げ加工(2)

断面の一部に中空部分をもつ材を曲げ加工した場合、加工度に応じて発生する形状変形は一次安定的な変形である。したがって、この形状変形は心材等を用いることによってのみ防止できるものである。ここでは、積層弾性心材

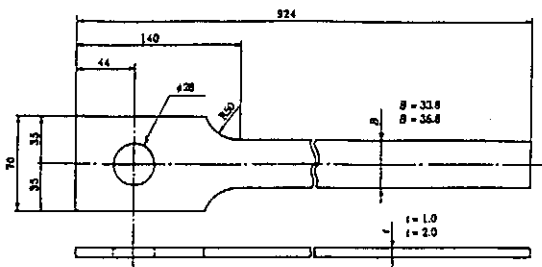
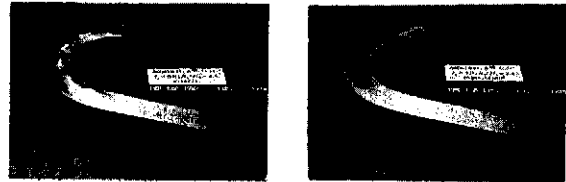


図15 積層弾性心材の形状・寸法



(1) 心材なし [形状変形, しわ] (2) 積層弾性心材使用 [成功]

図16 加工品の典型例 [A型、A6061S-O] [$t_0=3.0$ 、 $R=100$ 、 $R_0/H_0=2.4$]

の適用を試みた²⁾。心材の形状・寸法を図15に、加工品の典型例を図16に示す。

4.7 引張り曲げ

引張り曲げ加工における断面形状の変化、不良現象及び加工限界について検討した¹⁾。引張り力は油圧シリンダによって所定の張力Tを加え、その引張り応力を維持した状態で、所定の曲げ半径をもつ押し型に当て曲げ加工を行った。ウェブの両側にウェブの外方向変位を拘束するための拘束板を配置し、中子にはジュラコンの小粒を用いた。

断面形状がA型で、A6061S-T6、 $t_0=3.0$ の各加工条件における変形モードを表3に示す。表より、曲げ半径 $R=200$ mm以上の場合は、曲げ半径が小さくなるほど高い引張り応力が必要になることがわかる。

材材は一般に断面二次モーメントが大きいいため、曲げ加

表3 引張り曲げにおける変形モード [A6061S-T6]

		$t=3$	R300	R250	R200	R150
引張 応力 MPa	19.6	▲	▲	▲	×	
	39.2	▲	▲	▲	×	
	58.8	○	▲	▲	×	
	78.4	○	○	▲	×	
	98.0	○	○	○	×	

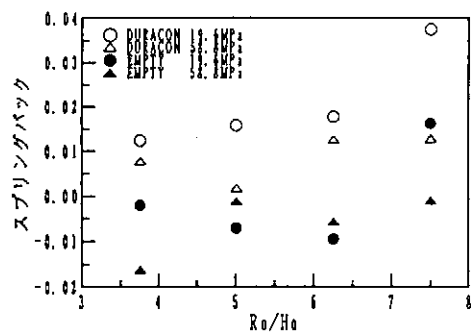


図17 スプリングバック量 [A6063S-O、 $t_0=3.0$]

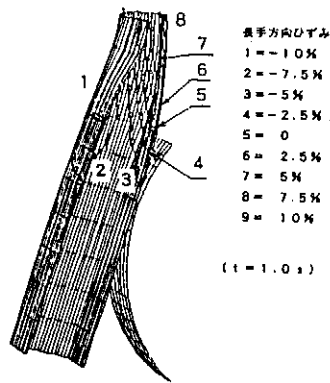


図18 単純3点曲げ
解析結果(製品内側)

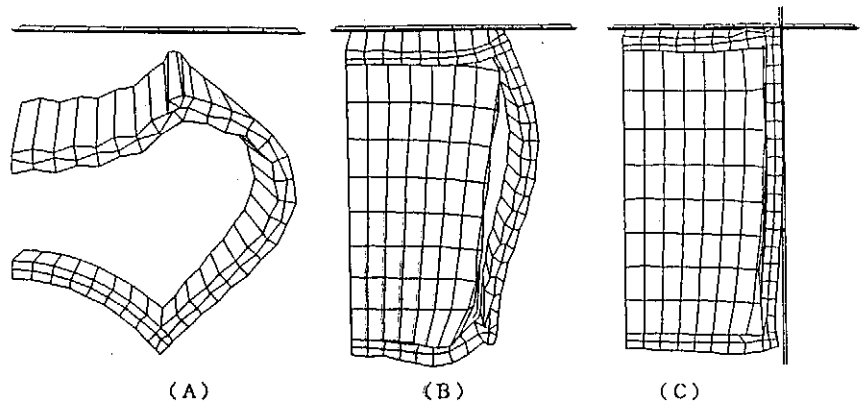


図19 パンチ直下の横断面形状の比較

工におけるスプリングバックが小さくなる傾向にある。断面形状がA型で、A6063S-O、 $t_0=3.0$ の場合のスプリングバック量を図17に示す。図によれば、加工度が大きいものほど、また、軸引張りを高めたものほどスプリングバック量が小さくなっていることがわかる。

4.8 形材の曲げにおける数値シミュレーション

押出形材の曲げ変形挙動を推定し、適正な曲げ条件を求めるために数値シミュレーションを試みた。解析には汎用FEMソフトJOH/DYNA3D(陽解法)によって、中子を用いて中空材を曲げ加工する際の変形形状等から、被加工材の座屈を抑えることが可能な工具形状や中子を予測した¹¹⁾。

はじめに、中子や側面ブロックを用いない単純3点曲げの解析結果を図18に示す。パンチ先端直下の断面の変形について、(A)中子等を使用しない場合、(B)中子のみを使用、(C)中子及びウェブ拘束板を使用、の解析結果を図19に示す。

これらの図より、断面のゆがみ変形及びひずみ分布ともに実験結果と良い対応を示していることが確認された。

5. まとめ

アルミニウム押出形材の曲げ加工における加工特性の体系を明らかにするとともに、加工限度の向上法について実験及び解析によって検討した。

主な結果は以下のとおりである。

- 1) 各種曲げ加工法及び加工条件について、形材の材質及び形状・寸法に係わる変形モード限界及び加工限度が明らかにされた。
- 2) マンドレル等を使用しない場合は、全ての曲げ加工法に共通して、横断面に形状変形を発生する。
- 3) 各種のマンドレルを用いることによって、形状変形及び座屈変形が防止可能な範囲がある。

- 4) 汎用FEMソフト(陽解法)によって、不整形の開始限度のシミュレーションが可能なが明らかになった。

なお、本研究は軽金属学会押出形材成形法分科会の共同研究として行われたもので、研究者一覧を以下に示す。また、実験用試料等を提供して戴いた共同研究企業各位に対して深く感謝致します。

本研究の共同研究者の一覧

西村 尚 東京都立大学 工学部 機械工学科
 遠藤順一 神奈川工科大学 機械システム工学科
 北沢君義 信州大学 工学部 生産システム工学科
 坂木修次 東京都立科学技術大学 機械システム工学科
 星野倫彦 東京理科大学 基礎工学部 材料工学科
 村田 眞 電気通信大学 機械制御工学科
 森 茂樹 職業能力開発大学校 生産機械工学科

終わりに、本研究は、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。

参考文献

- 1) 軽金属学会：第10回 金属成形セミナー，(1992)。
- 2) F. J. Fuchs, Jr：The Bell System Technical Journal, 38-6(1956), 1457. 宮川松男(訳)：塑性と加工, 2-7(1961), 189.
- 3) 坂木修次・藤院琢磨・原島寿和：塑性と加工, 36-414 (1995), 719.
- 4) 末本芳幸・坂木修次：84回 軽金属講概, (1993), 263.
- 5) 遠藤順一・加藤俊二・堀内秀文：87回 軽金属講概, (1994), 5.
- 6) 長谷川 収・西村 尚・安藤孝司：84回 軽金属講概, (1993), 253.
- 7) 森 茂樹・山田貴士：平7 春塑加講論, (1993), 277.
- 8) 北澤君義：87回 軽金属講概, (1994), 9.
- 9) 坂木修次・原島寿和：45回 塑加連講論, (1994), 501.
- 10) 村田 眞・鈴木秀雄：84回 軽金属講概, (1993), 259.
- 11) 星野倫彦：85回 軽金属講概, (1993), 151.