

## アルミニウム合金押出型材の曲げ加工に関する研究 —均等曲げによるスプリングバックについて—

内海 能亜 埼玉大学教育学部技術教育講座  
吉田 昌史 静岡理工科大学理工学部  
坂木 修次 東京都立科学技術大学名誉教授

キーワード: 均等曲げ、押出型材、スプリングバック、FEM、変形特性

### 1. 論 言

AlMg-Si系のアルミニウム押出型材は住宅用建築部材として多く使われ、輸送機である鉄道車両の部材や自動車のスペースフレームなどにも多く適用されている。近年では、電気自動車のバッテリーを支えるフレームの一部として適用<sup>1)</sup>され始め、アルミニウム押出型材の適用範囲はますます拡大されつつある。

一方、アルミニウム合金を使った導波管の需要は、軽量化に伴って航空宇宙産業界にもある。ここでは、電磁波を矩形管内に流し伝送効率を上げる取り組みがなされ、管断面の高精度化が要求されている。導波管は複雑な経路をたどるため、直線的ではなく、曲率をともなった3次元的な経路となる。したがって、導波管の2次加工としての曲げ加工は、加工後の断面変形の抑制が要求され、断面を許容寸法公差内に抑えなければならなくなってきた<sup>2)</sup>。

押出型材の曲げ加工で発生する不良現象には、断面のへん平化、肉厚の変化、くびれ・割れ、しわ、屈服、スプリングバックなどがある。これらをすべて抑制することのできる曲げ加工法はなく、それぞれの現象に対応した曲げ加工法や素材の選択、技術者のカンどころが求められる。型材の断面変形を抑制するためには、管内に充填物をつめて加工するのが一般的である。吹奏楽器などの加工では砂や低溶融合金など充填し、曲げ加工が施される。また、数珠のようなリンク式のマンドレルや積層材を挿入し曲げ加工が施される場合もある。くびれ・割れは延性の富む材質に変更することや曲げ半径を大きくすることで抑制することができるが、強度や小さな曲げ半径が要求される設計ではこれ

を抑制することは難しくなる。しわや屈服は、加工硬化指数の高い材質を選択することや曲げ加工時に引張りを負荷して、圧縮応力の発生を少なくすることで抑制される。スプリングバック量は、ヤング率の低い材質や引張強さの高い材質を適用すれば高くなる。曲げ加工を施す型材に予ひずみを与えることで、スプリングバック量を少なくすることもできるが、製造工程が増え、コストに大きく影響することとなる。近年では、PCIによるFEM解析が普及しているので、成形シミュレーションによって、スプリングバック量をあらかじめ予測し<sup>3)</sup>、試作回数を減らすことができるようになってきた。しかしながら、押出型材の構成式にはまだ課題が残されている。

押出型材を曲げる加工法には、プレス機を用いて生産的に加工するプレス曲げがあり、パンチとダイにより所望の曲率を得ることができる。圧縮曲げは、古くから円管などを曲げる加工法として適用され、押付け曲げとも言われている。固定されている曲げ型のまわりに管を押しつけて曲げる方法である。曲げ条件の厳しい、例えば、小さな曲げ半径を得る曲げ加工としては、回転引き曲げが有効であり、型材長手方向に引張・圧縮力を加えることも可能で、しわや割れを抑制する効果が期待できる。回転する曲げ型に型材を固定し、曲げ型を回転させ曲げ加工を行う。他に、押通し曲げは、曲げダイスを用いることによって、3次元的な曲げ加工が可能な加工法である。さらに、曲げの基本的な方法として均等曲げがあり、型材に均等な曲げモーメントを負荷させる加工法で、基礎的な実験に適用されている<sup>4)</sup>。

これまでに、筆者らは均等曲げ加工による押出形材の加工限度や変形特性を調査してきた<sup>5)</sup>。また、回転引き曲げ加工における積層心材や軸引張り力の効果について報告してきた<sup>6)</sup>。本報では、Al-Mg-Si系の押出形材を適用し、均等曲げ実験を行った。そこで、形材断面形状がスプリングバックに与える影響を調査し、さらに、均等曲げシミュレーションによって、形材の機械的性質がスプリングバックに与える影響について調査したので、ここに報告する<sup>7)</sup>。

## 2. 実験条件

### 2. 1 実験装置

図1に均等曲げ実験装置の概略を示す。供試材である形材の長さ比べ、十分長いアームにより供試材を片持ちはりの原理で曲げ、均等曲げモーメントを近似的に荷重させる加工法である。曲げダイの半径は3200、1600、800、570、400、280mmの計6型から選択でき、ダイのR面に供試材の圧縮フランジ面が接触した状態が曲げ半径(=ダイ半径 $R_0$ )となる。また、これら曲げダイ間の曲率(例えば $R_0=2400$ mmなど)は、供試材背面に張り付けた曲線群を目視で確認することにより任意の曲げ半径を選択することもできる。供試材に荷重される曲げモーメントの分布は図2のようにになっている。曲げモーメントの偏差は最大で5.2%となっている。

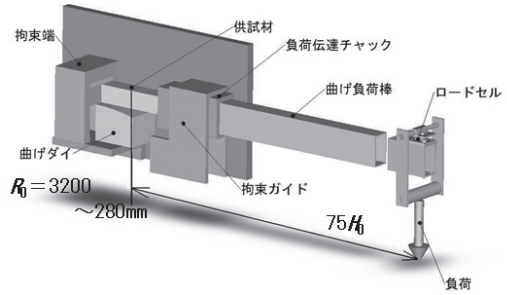


図1 均等曲げ実験装置の概略

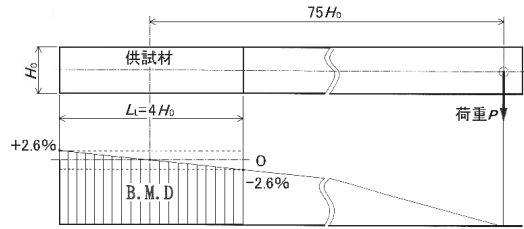


図2 曲げモーメントの分布

表1 機械的性質

Mechanical Properties	A6063S-T5	A6063S-O <sup>9)</sup>
Tensile strength $\sigma_B$ /MPa	209~233	91~99
Proof stress $\sigma_{0.2}$ /MPa	147	31~33
Elongation $\delta$ /%	102~129	29~37
Work-hardening exponent $n$	0.05~0.13*	0.20~0.21*
Plastic modulus $C$ /MPa	240~310*	160~167*
Young's modulus $E$ /GPa	68.6	—

\* $\sigma = C\epsilon^n$  (test piece JIS Z 2201 13B)

### 2. 2 供試材

供試材はA6063S-T5、O材を適用し表1に機械的性質を示す。形材断面は高さ $H_0$ 、幅 $W_0$ ともに40mmとし、肉厚 $t_0$ は1、1.5、2および3mmを適用した。断面形状は図3のように正方形の角管とチャンネル形を適用した。

### 2. 3 積層心材

中空管の曲げ加工の初期不整として図4のようなへん平変形が起こる。このようなへん平変形を抑制するために、塩化ビニールなどのプラスチック板を積層に束ねた積層心材を適用する。積層心材が角管に外乱として作用しないように、角管の曲げ剛性のおよそ5800

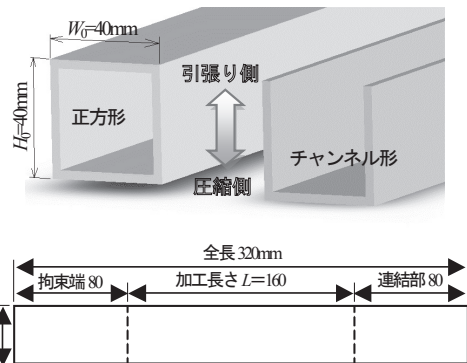
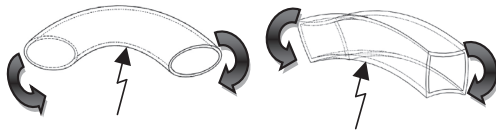


図3 供試材の形状寸法



(a) 円管モデル (b) 角管モデル

図4 曲げによる中空材のへん平変形

分の1以下に設定している。図5に積層心材の概略を示す。クリアランスは高さ幅方向ともに0.1mmとしている。図6は均等曲げによって発生した実際のへん平変形である。積層心材を適用していない角管断面に比べ、適用した断面の変形は抑えられ、心材の効果が確認できる。図7(a)にしわが発生した曲げ加工例を示す。角管の肉厚が薄いためにしわが発生している。図7(b)の積層心材を適用して発生したしわは、心材による拘束でしわの長さ(半波長)が、図7(a)より短くなり、圧縮フランジが凸形状になることが特徴である。

### 2. 4 スプリングバック量

図8に示すように、曲げ加工後の製品の内R部3点を測定し、この3点の座標点からスプリングバック後の曲げ半径 $R$ を求めた。スプリングバック量 $S$ を次式に示す。

$$S = \angle R / R \quad (1)$$

ただし、 $\angle R = R - R_0$ 、曲げ半径(=ダイ半径) $R_0$ 、曲げ加工後の製品半径 $R$ とする。

### 3. 解析条件

均等曲げの成形シミュレーションには、市販の汎用コードLS-DYNA3D Ver.960を適用した。曲げ工程は陽解法、スプリングバック解析は陰解法で行った。形材モデルについて、材料構成式はべき乗硬化則の弾塑性体  $\sigma = C(\epsilon_s + \epsilon_p)^n$  を用い、代入値は表1を参考とし、4節点シェル要素とした。また、形状寸法は実験で用いた供試材と同値とした。ただし、形材の肉厚は実測値を適用した。例えば形材の肉厚 $t_0$ の3mmは、実測値 $t$ は2.8mm

となっている。図9にシミュレーションモデルを示す。形材の片端部は全拘束し、他方の端部には、局所変形

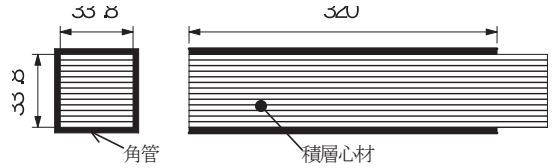
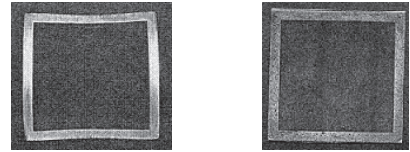
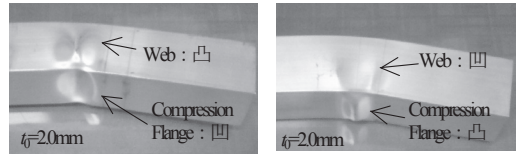


図5 積層心材の概略(角管肉厚3mm用)



(a) 積層心材無し (b) 積層心材適用

図6 積層心材の効果(A6063S-T5、 $t_f=3\text{mm}$ 、 $R_f=570\text{mm}$ )



(a) 積層心材無し (b) 積層心材適用

図7 均等曲げによるしわの典型例

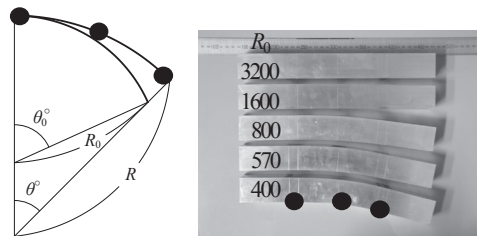
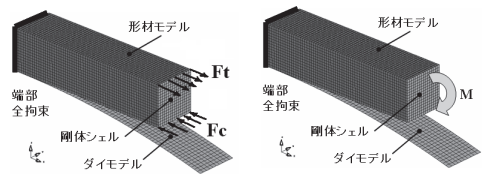


図8 スプリングバック



(a) 偶力負荷方式 (b) モーメント負荷方式

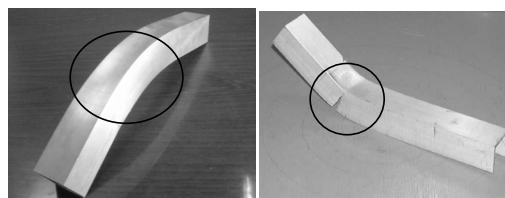
図9 均等曲げモデル

を避けるために剛体シェルを共有させ、この剛体シェルに負荷をかける方式とした。また、ダイモデルは剛体シェル要素とした。負荷方法は偶力を剛体シェル垂直方向に負荷する方法と剛体シェルに直接モーメントを負荷させる方法を試みた。ここでは、曲げダイと供試材、心材と供試材の間には摩擦の影響はないものとし動摩擦・静摩擦係数を $\mu=0.01$ とした。

#### 4. 結果および考察

形材肉厚が薄いあるいは曲げ半径の小さい曲げ加工は、しわが発生しやすい。しわが発生する条件でスプリングバック量を測定することは難しく、製品として成立しない不良品であるので、そのスプリングバックを測定することは意味を持たない。したがって、本研究では、しわが発生しない条件のスプリングバックを主として検討を行うものとした。均等曲げによって発生する不良現象において、しわ以外のへん平変形、割れの典型例を図10に示す。

からしわが発生するため、スプリングバック量を予測



(a)へん平変形 (b)割れ

図10 曲げ加工による押出形材の不良現象

##### 4.1 均等曲げ実験

曲げ加工実験において、押出形材に積層心材を適用した場合のスプリングバック量を図11に示す。A6063S-T5はO材に比べ、スプリングバック量が大きいることがわかる。また、スプリングバック量は心材の有無に影響していないこともわかる。肉厚 $t_0=3\text{mm}$ の押出形材の曲げ剛性は、心材の曲げ剛性に比べ数千倍としているので、心材が形材に対して外乱を与えていないことがわかる。一方で、心材を適用していない形材の曲げは、へん平変形こともない断面二次モーメントが減少する。しかしながら、その減少値もわずかなので、心材を適用したスプリングバック量と心材を適用していない条件と、ほとんど変わらないものと考えられる。

他に、曲げによるスプリングバック量のバラツキ(上下限値幅)は、曲げ半径が大きいほど大きく、例えば、A6063S-T5、角管の心材有、 $H_0/R_0=0.025$ では、平均 $S=LR/R=0.615$ の上限0.663、下限0.524になることがわかった。 $H_0/R_0=0.07$ 以上ではバラツキが、例えば、角管の心材有 $H_0/R_0=0.1$ では、平均 $S=0.194$ の上限0.199、下限0.189と少なくなる。 $H_0/R_0=0.1$ ( $R_0=400\text{mm}$ )を超えて

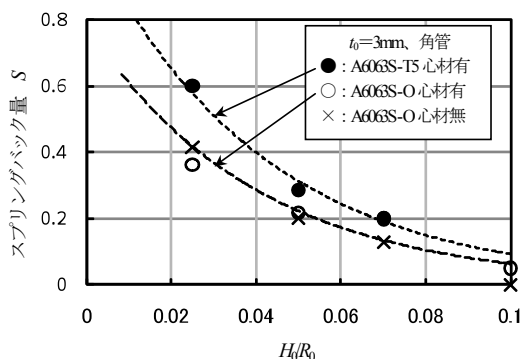


図11 スプリングバックに及ぼす熱処理の影響

することができない。しかしながら、均等曲げシミュレーションで、形材長手方向に軸引張り力の負荷モデルを構築すれば、しわのない曲げ解析は可能である。したがって、曲げ半径の小さな条件においても、形材のスプリングバック量を予測することができる。

一般的に、形材の断面形状や肉厚がスプリングバックに与える影響について、スプリングバック量は形材の曲げモーメントや曲げ半径に比例し、断面二次モーメントやヤング率が反比例することがわかっている。肉厚 $t_0=1\sim 2\text{mm}$ の比較的肉厚の薄い角管では、スプリングバック量が図12のようになった。肉厚の厚いものほど、スプリングバック量は小さくなっていることがわかる。結果的に肉厚(断面二次モーメント)の影響が曲げモーメントより大きくなったことになる。ところで、肉厚1、1.5、2mmの角管では、それぞれ $R_0=1600、800、570\text{mm}$ で、しわが発生した。また、図13には角管とチャンネル形断面のスプリングバック量の比較を示す。図より若干ではあるが、チャンネル形断面のスプ

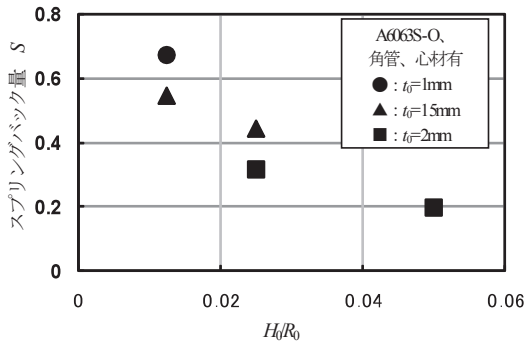


図12 スプリングバックに及ぼす角管の肉厚の影響

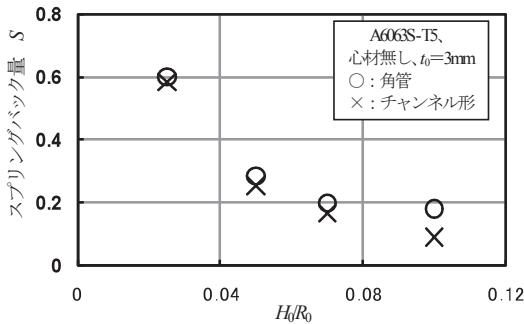


図13 スプリングバックに及ぼす断面形状の影響

リングバック量が少なくなっていることがわかる。肉厚と同様、結果的に断面二次モーメントの影響が大きくなったことによると考える。

#### 4. 2 均等曲げシミュレーション

均等曲げシミュレーションの荷重方式の違いによるスプリングバック量を計算した。図14に結果を示す。偶力荷重とモーメント荷重は大きな差はなく、ほぼ同じ値となった。したがって、荷重方式の相違によってスプリングバック量は影響しないものと判断した。そこで以降、局所変形が比較的発生しにくい、偶力荷重方式を本モデルとした。

次にスプリングバックに及ぼす材の機械的性質の影響を調査した。実際の押出型材 A6063S-T5 を想定し、ヤング率  $E$  は 68 と 72GPa、塑性係数  $C$  は 240 と 310MPa を比較した。解析結果を図15に示す。ヤング率が大き

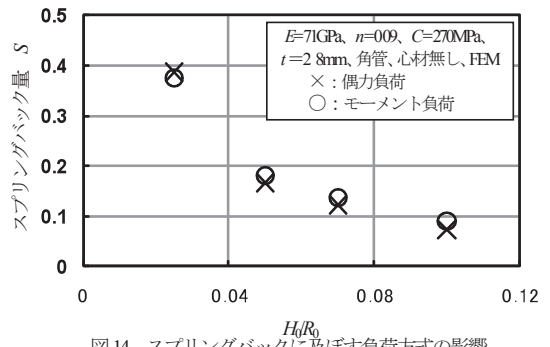


図14 スプリングバックに及ぼす荷重方式の影響

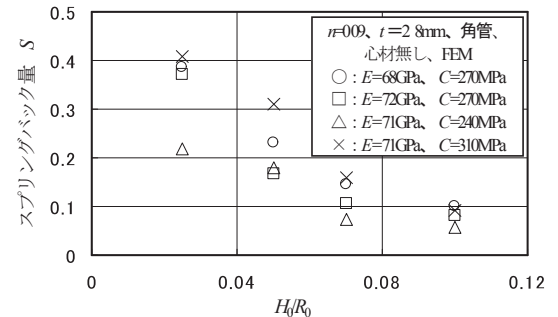


図15 スプリングバックに及ぼす材料定数の影響

くなるとわずかではあるが、スプリングバックは少なくなっていることがわかる。塑性係数の影響はヤング率より大きく、塑性係数が大きくなるとスプリングバックが大きくなっていることがわかる。ここで、押出型材を製造する際に同ロット材のヤング率のバラツキはあまりないと考えられるが、塑性係数  $C$  は表1からわかるように、引張試験による測定結果のふれ幅は大きい。これまでの筆者らの研究によれば<sup>7)</sup>、実験結果より解析結果のスプリングバックの方が小さくなる傾向にある。したがって、シミュレーションによるスプリングバックの予測を行う場合、塑性係数は引張試験によって得られる数値幅の上限値を、 $n$  値やヤング率は下限値を構成式に代入することで、より実験結果と近い結果を得ることができる。と考える。

また、スプリングバック量は押出型材断面の肉厚の影響もあり、型材の設計寸法値が  $t_0=3\text{mm}$  となっても、その型材のほとんどが、寸法公差中央値以下となっており、例えば本実験で用いた型材の肉厚は  $t=2.8\text{mm}$  と

なっている。 $t_p=3\text{mm}$ などの比較的厚い形材は中央値からの差も大きい。したがって、形材をモデル化する場合は、実測値を採用することで、解析結果をより実験値に近づけることができると考える。

## 5. 結 言

Al-Mg-Si系アルミニウム押出形材の均等曲げによるスプリングバック量を実験およびFEM解析によって調査した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 積層心材を適用した均等曲げ実験によるスプリングバック量を明らかにした。心材を適用したものと適用しない形材のスプリングバック量には、ほとんど差異がないことを明らかにした。また、O材のスプリングバック量に比べT5材の方が高くなることがわかった。
- (2) シミュレーションによる積層心材を適用した均等曲げモデルを開発した。均等曲げは偶力負荷方式とした。本モデルによって、スプリングバックに及ぼすヤング率と塑性係数の影響について明らかにした。

なお、本研究経費の一部は2002～2003年度および2005年度広島国際学院大学特別研究費によって支弁されたものである。また、曲げ加工用の供試材を提供戴いた平成7～12年度実施の軽金属学会押出形材の成形法部会構成各社に対して深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 小林努・佐山満・矢羽々隆憲・加藤高士：燃料電池システム搭載用サブフレームにおける摩擦攪拌接合技術の開発、自動車技術、21-1、pp.46-54(2009)
- 2) F.J. Fuch, Jr.: Wave bending Design Analysis—Theory of Bending and Formulae for Determination of Wall Thicknesses—, The Bell System Technical Journal, 38-6, pp.1457-1484(1959)
- 3) 内海能重：押出形材の曲げ加工におけるスプリングバック解析、日本機械学会2005年度年次大会講演論文集(1)、pp.621-622(2005)
- 4) 軽金属学会研究委員会：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(1999)
- 5) Shuji SAKAKI・Noah UTSUMI：Factors Causing Undesirable Deformations during the Bending of Extruded Sections, Material Transaction, 47-5, pp.1354-1359(2006)
- 6) 内海能重・坂木修次：アルミニウム押出角管の不整変形を抑制した回転引曲げ加工法、アルトピア、29-2、pp.18-26(1999)
- 7) 内海能重・坂木修次：アルミニウム合金押出形材の均等曲げにおけるスプリングバック、第58回塑性加工連合講演会講演論文集、pp.395-396(2007)

(2010年9月28日提出)

(2010年10月15日受理)