

アルミニウム合金チャンネル材に曲率と断面形状を同時に与える 曲げ加工法の開発

埼玉大学 教育学部 生活創造講座 ものづくりと情報・技術分野
准教授 内海能重

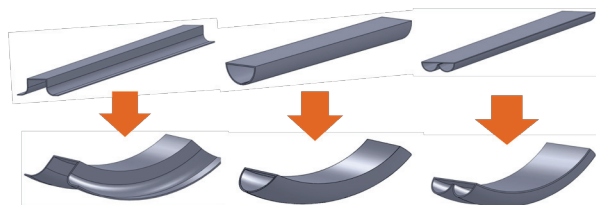
(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012016)

キーワード：回転引き曲げ，押出型材，断面変形

1. 研究の目的と背景

押出型材は一般的に二次加工として曲げ加工などが施され、建築部材、自動車や航空宇宙関連の構造部材、レーダ・通信機器部品の導波管など幅広い産業界で適用されている。これらのような工業製品を製造する分野では、環境保全・省エネルギーを目的に軽量化を図り、軽金属や薄肉な押出型材の曲げ技術の開発が行われている。薄肉な型材などの曲げ加工では、断面変形（へん平化および肉厚変化）、座屈変形としてのしわや屈服、伸びの限界を超えて発生するくびれや割れなどの不良現象が発生しやすい。これまではこれら不良現象を抑制し、加工限度を向上させる加工技術の研究が行われてきた。また、曲げによる型材断面の変形を抑制するために、マンドレルや拘束治具を適用した開発が行われてきた^{1),2)}。筆者は型材の曲げに関する研究に取り組んできた経験から、不良現象の発生形態・発生条件・発生メカニズムとその抑制法について明らかにしてきた。不良現象は再現性があり、曲率（円周方向）に一定の断面形状が形成され、断面形状は加工条件によって様々に変化する。例えば、曲率 ρ を小さくすると、断面を押しつぶすへん平変形分力が大きくなり、へん平化が大きくなって、しわや屈服などの座屈現象を引き起こすことがわかっている³⁾。

筆者はこれら不良現象の断面変形に着目し、へん平変形と座屈変形を積極的に発生させ、図1に示すように押



多種の異型材から、二次加工の曲げで一種大量生産

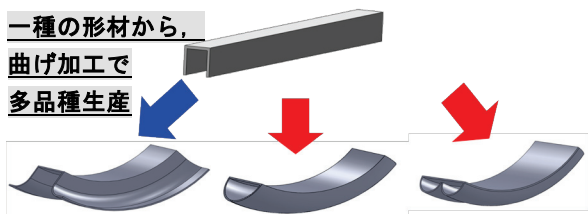


図1 新しい曲げ加工法の提案

出型材の断面形状を任意に変形させ、同時に曲率を得る新しい加工法の開発に着手した。まず基礎的研究として、チャンネル材のプレス曲げ加工における断面の変形の発生条件を成形シミュレーションによって明らかにし、実験ではプレス曲げでチャンネル材断面をドーム及びハット型形状に成形した⁴⁾。しかしながら、プレス曲げでは曲率部（円周方向）に対して得られる断面形状の領域が少ない（曲げ角度が小さい）という課題があった。そこで、本研究では本曲げ加工法を適用した専用の回転引き曲げ加工機を開発を行い、市販されている単純な断面形状の押出型材から、成形可能な断面形状を明らかにするために成形シミュレーションと曲げ実験により研究を進めた^{5),6)}。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材にはアルミニウム合金 A6063-O 材のチャンネル材を適用した。供試材の形状および寸法を図2に示す。供試材の高さおよび幅は $H_0=W_0=40\text{mm}$ 、肉厚を $t_0=1.0\sim 3.0\text{mm}$ 、長さは $L_B=700\sim 1200\text{mm}$ とした。また、供試材の機械的性質の引張強さ σ_B は 99 MPa、耐力 $\sigma_{0.2}$ は 31~33MPa、加工硬化指数 n は 0.2、塑性係数 C は 160~167MPa、伸び δ は 27~35% となっている。

2.2 回転引き曲げ装置

図3(a)に軸引張り力の負荷が可能な回転引き曲げ加工装置を示す。曲げ半径を決める巻付けドラム $R_d(=R_0)$ は 50, 75, 100, 150, 200mm の 5 種類を選択できる。曲げモーメントはチャック部とドラムと曲げ負荷棒により負荷される。軸引張り力の負荷は曲げによる断面変形、特に断面の変形量を助長させるために適用した。図3(b)に示すように軸引張り力は自動車用のブレーキパッドで

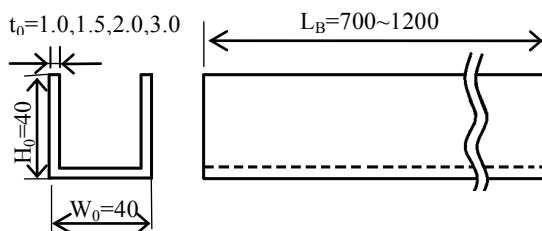
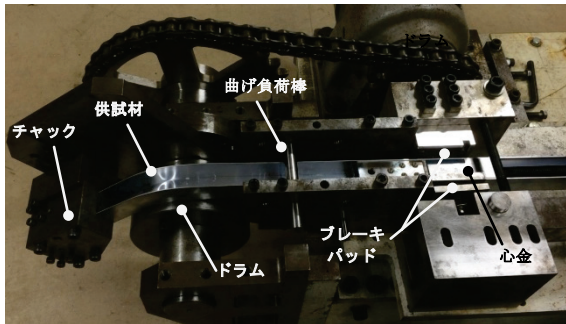


図2 供試材の形状及び寸法

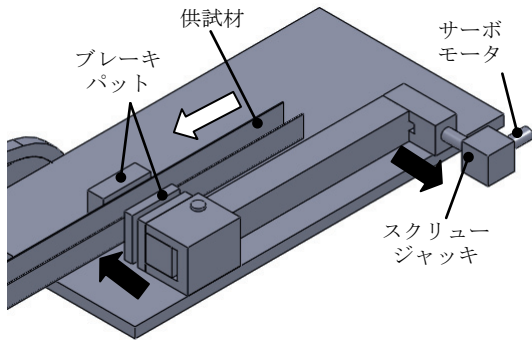
てこの原理を利用し、供試材の側面から挟み込み負荷することができる。また、ブレーキパットの挟み込み力により供試材が潰れないよう型材内部に心金（マンドレルとしても機能することができる）を挿入することができる。軸引張り力の値はサーボモータにより自由に設定ができる。

2.3 回転引き曲げのシミュレーションモデル

曲げシミュレーションには市販の動的陽解法有限要素解析ソフトウェア ADA Stampack-Z Ver6.2.4 を適用した。治工具類は剛体モデル、材料モデルはソリッド要素で $\sigma=C(\epsilon_e+\epsilon_p)^n$ 、異方性は考慮していない。また、静・動摩擦係数はすべて 0.1 とした。回転引き曲げ用の解析モデルを図 4 に示す。供試材端部をチャックに固定し、他方の端部から曲げ方向とは逆に、巻き付けドラムが回転すると同時に軸引張り力を負荷するモデルとした。



(a) 曲げ加工部



(b) 軸引張り力の負荷部

図 3 回転引き曲げ加工装置

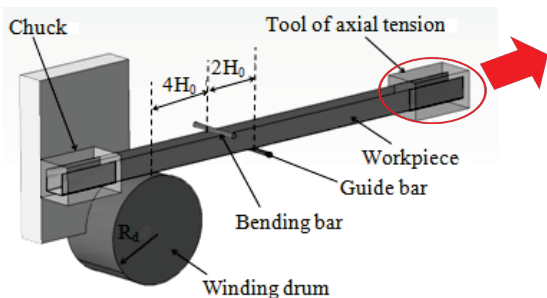


図 4 回転引き曲げモデル

3. 結果および考察

3.1 評価方法

チャンネル材の断面変形のタイプを図 5 に示す。引張りフランジのないチャンネル材を曲げ加工するとウェブが外側に倒れる外倒れ変形と内側に折れ込む内倒れ変形が発生する。そこで図のようにウェブ最大幅 W_{max} がウェブ端部間距離 W_e を超える場合を外倒れとし、 $W_e = W_{max}$ の場合を内倒れと判定し、曲げ開始からの曲げ角度が 90 度の時のウェブ端部間距離を測定した。

3.2 各種加工条件による断面変形

図 6 にチャンネル材の肉厚と曲げ加工度（曲げ半径）による断面変形の形態を示す。図は解析結果で、肉厚が薄く加工度が高い（曲げ半径が小さい）場合は内倒れ変形が発生していることが分かる。加工条件が比較的厳しい場合はしわや屈服などの変形が発生し、これが起点となりウェブが折れ内側に倒れ込み、内倒れ変形が発生すると考えられる。一方、肉厚が厚く加工度が小さい場合は、外倒れ変形となることが分かるが、これはしわや屈服が発生しない条件で、曲げ加工の初期段階で発生するへん平変形による圧縮フランジのたわみにより、ウェブが外側に倒れるものと考えられる。

図 7 は曲げ加工実験の結果と解析結果の断面の変形量 $\delta_w = (W_{max} - W_0)/2$ を比較している。横軸には曲げ角度をとり、 180° まで曲げている。曲げはじめの 0° から曲げ角度が大きくなると供試材の断面変形は大きくなり、比

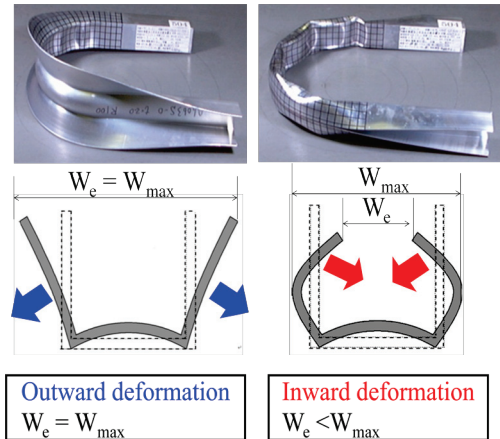


図 5 断面変形の評価方法

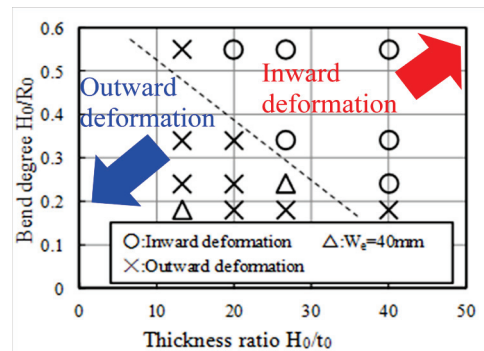


図 6 チャンネル材の変形モード図 (FEM)

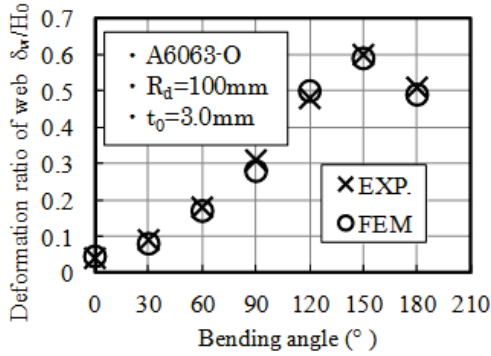


図7 実験と解析結果の断面変形の比較

較的肉厚が厚い型材のために 150° から 180° にかけて変形量が減少することになる。また、解析結果は曲げ実験とほぼ同様の傾向となっていることがわかる。

図 8 は曲げ加工度と断面変形量について肉厚 1.0~3.0mm をパラメータとして示した結果である。断面変形が 40mm の場合は加工前のチャンネル材を保った形状で、40mm 以上が外倒れ変形、40mm 以下が内倒れ変形を示している。肉厚の薄い条件で曲げ加工度が小さい場合は外倒れ変形となり、加工度が進行すると内倒れ変形に移行することが特徴的である。

3.3 曲げ加工における軸引張り力の影響

曲げ加工において被加工材の圧縮領域が、ある限界を超えた場合、座屈変形いわゆるしわが発生する。曲げ加工中、被加工材に軸引張り力を負荷すれば圧縮領域が減少し、しわを抑制することができる。

図 9 では、チャンネル材の回転引き曲げ加工において発生する内倒れ変形に及ぼす軸引張り力の影響をシミュレーションによって検討した。図中の軸力負荷無しと有りの場合の解析結果を比較すると、軸力負荷ありの場合は、ウェブ両端部が徐々に近づき、断面は楕円形がつぶれたような形状になる。軸力負荷率 $K=T/(\sigma_B \cdot A_0)$ とした場合（ただし、 T は軸引張り力）、 $K=0.15$ 以上で屈服やしわが消え、内倒れ変形のための断面変形となり、 $K=0.17$ 以上ではウェブ先端部の開きがほぼゼロになっていることがわかる。また、図 7 の軸力負荷無しの条件では 0~180° の曲げ角度で断面変形の度合い δ_w (150° がピークの変形) が一定でないのに比べ、軸力を負荷することで曲げ角度 0~180° のほぼ全域で一定の断面変形が得られていることがわかる。また、供試材の側面を拘束する金型を用いた曲げ加工実験を行った。図 10 にその金型の概略と実験によって得られた各曲げ角度の内倒れ変形量を示す。軸引張り力によりへん平化を助長させ、拘束金型によりウェブ幅 $We=40mm$ の一定値に安定させる変形が得られていることがわかる。

次に、外倒れ変形を利用した曲げ加工から得られる断面形状を検討するために、図 11 のような解析モデルを作成した。ここでは、外倒れ変形用金型の供試材のクリアランス C_L および金型側面部半径 r_0 の影響について調

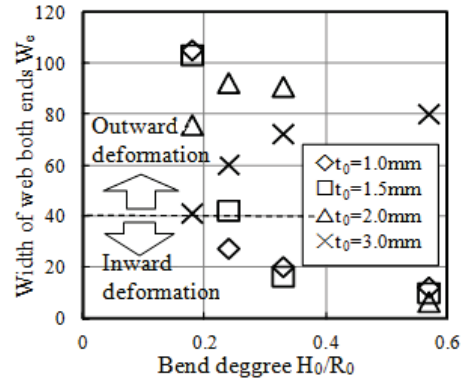


図8 曲げ加工度における断面変形 (FEM)

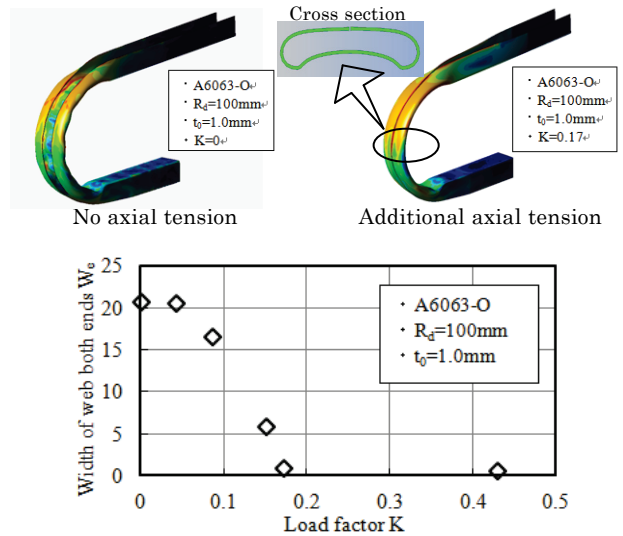


図9 軸引張り力の負荷の影響 (FEM)

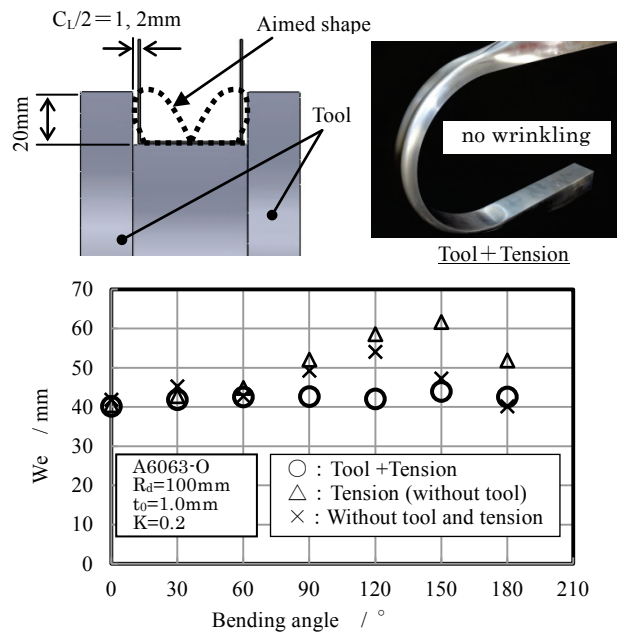


図10 曲げ角度と内倒れ変形の断面

査した。その結果、 C_L と r_0 を大きくすればウェブは大きく外側に倒れる変形が大きくなることが確認できた。

また、軸力を負荷すれば、圧縮側のフランジのたわみが軽減することも確認できた。これら結果をもとに曲げ実験用の金型を設計製作した。

図 12 は A6063-O のチャンネル材、 $H_0=W_0=40\text{mm}$ 、 $t_0=2.0\text{mm}$ 、 $R_d=100\text{mm}$ 、 $C_L=2.0\text{mm}$ 、 $H_F=18\text{mm}$ 、 $r_0=18\text{mm}$ を曲げ加工条件とした場合の曲げ製品の外観を示したものである。軸力を負荷すれば、より外倒れ変形が大きくなることからわかる。図 13 は軸力負荷率 $K=0.2$ 、 0.3 を比較した結果である。縦軸に変形量、横軸に曲げ角度を示した。外倒れ変形は内倒れ変形に比べ、比較的肉厚の厚いチャンネル材の変形であり、さらに、チャック部の拘束とで、曲げ加工初期 ($0\sim 60^\circ$) では外倒れの断面変形が抑制されているものと考えられる。曲げ角度が 90° を越えると、ほぼ一定 ($d_w=1.2\sim 1.4$) の外倒れの断面変形が得られており、図 7 の軸力を負荷していない外倒れ変形 (曲げ角度 150° 付近のみで変形が最大) と比べると、変形している曲げ角度の範囲が広くなり、軸力負荷の効果があることも確認できる。そして、軸力

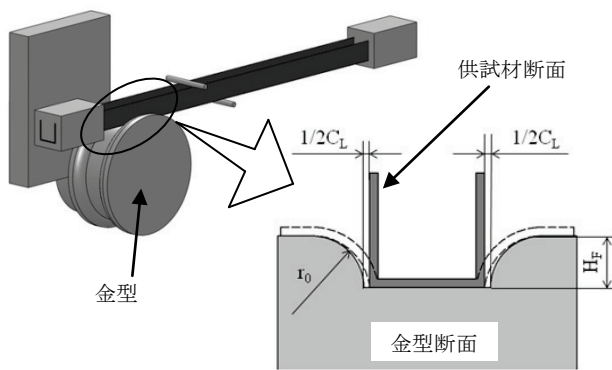
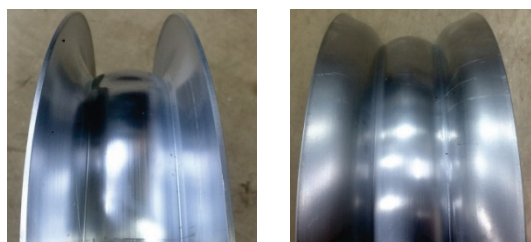


図 11 外倒れ変形を利用した曲げの金型のモデル



(a)軸力なし $K=0$ (b)軸力あり $K=0.2$

図 12 外倒れ変形の曲げ製品の外観

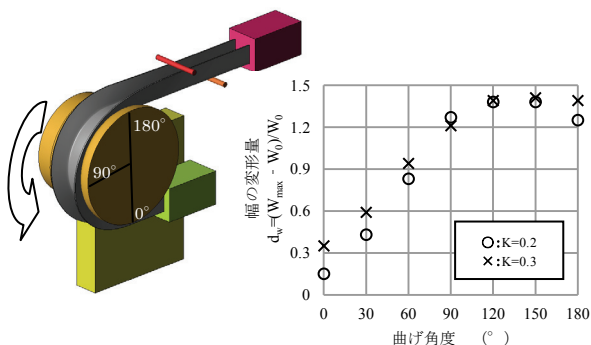


図 13 曲げ角度と外倒れ変形

負荷が大きい条件は ($K=0.3$)、外倒れ変形がわずかに大きくなっていることも確認できる。

図 11 に示した金型では、チャンネル材を曲率 100mm にし、破線部のようにハット型の断面にする成形をねらった。図 14 は軸力負荷率 $K=0.3$ の場合に得られた製品において、金型のプロフィールと曲げ角度が 60° 、 90° 、 150° の外倒れ変形の断面形状を比較したものである。 150° では、圧縮フランジのたわみが若干発生しているものの、ウェブはほぼ金型形状に成形されていることがわかる。 60° では先でも述べたように、肉厚やチャック部の拘束の影響からウェブの先端部が金型になじんでないことがわかる。

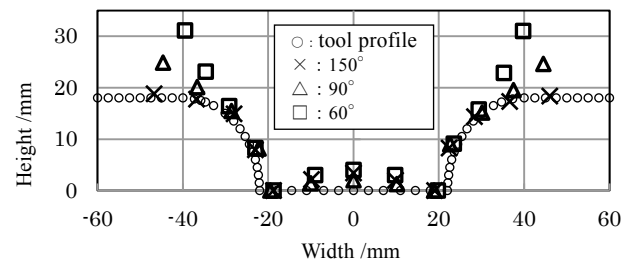


図 14 外倒れ変形の断面形状と金型断面の比較

4. まとめ

内・外倒れ変形を助長させるための軸引張り力の負荷が可能な回転引き曲げ加工機を開発した。また、本曲げ加工法を適用したシミュレーションにより、内・外倒れ変形のメカニズムを検討し、それぞれの変形用の金型や曲げ加工条件を検討した。これらより、内倒れ変形を利用したチャンネル材の曲げ加工実験では軸力を負荷すれば曲げ角度 $0\sim 180^\circ$ の範囲で、外倒れ変形では 90° を超え 180° の範囲で、ほぼ安定的な断面変形が得られることが確認できた。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2012016) によって実施されました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K.X.Liu, Y.L.Liu, H.Yang : Int. J. Adv. Manuf Technol, 69 (2013), 627-636.
- 2) K.Nakajima, N.Utsumi, M.Yoshida : Int. J. Precision Engineering and Manufacturing, 14-6 (2013), 965-970.
- 3) S.Sakaki, N. Utsumi : Material Transaction, 47-5(2006), 1354-1359.
- 4) N.Utsumi, M.Yoshida : Key Engineering Materials, 625(2015), 505-510.
- 5) 伊藤光佑, 内海能重: 平成 26 年塑加春講論, (2014), 99-100.
- 6) K.Ito, N.Utsumi, M.Yoshida : Advanced Materials Research, 1110 (2015), 130-135.