

軸方向断面が変化する押し出し加工

電気通信大学 知能機械工学科
教授 村田 眞

(平成 14 年度研究開発助成 AF-2002014)

キーワード:断面形状, フォーミング, チューブ

1. 研究の目的と背景

二酸化炭素排出などの環境問題に対応するため,自動車の燃費改善を目的とした車体の軽量化が進められている^{1),2)}. また,リサイクル性や衝突安全性の観点からも,自動車車体へのアルミニウムの適用化が進められている³⁾. アルミニウムスペースフレーム構造では,重量に対して曲げ剛性やねじり剛性の高い管材や型材を骨格として用いるため,車体剛性を確保しつつ,計量化を図ることが可能である^{4),5)}.

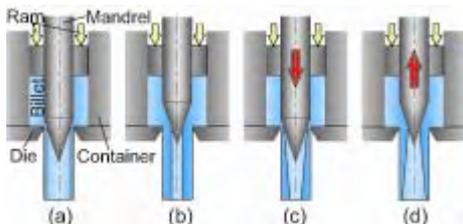
このような構造用部材長手方向に必要な部位の肉厚を変化させることにより,更なる計量化を図ることが可能である. しかし従来では,押し出しにより製造された管をスウェーピングなどの変肉厚加工により二次加工し製造していたため,部材のコストが高くなるという問題点がある⁶⁾. それに対して,押し出し加工の一工程のみで部材長手方向の断面形状を変化させることが可能となれば,より安価に供給できるようになる. そのため,省資源・省エネルギー化に対応するための塑性加工技術として,部材長手方向に断面形状を変化させる新しい押し出し加工法の開発が期待されている³⁾.

本研究の目的は,長手方向に断面形状を変化させる押し出し加工法を提案し,その押し出し加工法について,製作したコンピュータ数値制御(Computer numerical control (CNC))押し出し実験装置を用いた実験と,汎用有限要素解析ソフト ELFEN を用いた数値シミュレーションにより,基礎的な加工特性を調べ,変形メカニズムを明らかにし,有効性を検討することである.

2. 長手方向に断面形状を変化させて押し出し加工法の提案とその加工法の研究手法

2.1 長手方向に断面形状を変化させる押し出し加工法の手案

新しい押し出し加工法の加工原理を Fig.1 に示す. 本押し出し加工法の特徴は,マンドレルがダイス出口付近でテーパ形状になっていることである. 従来の押し出し加工法では,



- (a) Uniform thickness (thin-walled),
- (b) Uniform thickness (thick-walled),
- (c) Variable thickness (decreasing),
- (d) Variable thickness (increasing).

Fig.1 Principle of new extrusion process of changing wall thickness

マンドレルの縦断面形状がダイス孔付近で平行であるため,成形品断面形状は長手方向に一樣である. それに対して,提案する押し出し加工法のマンドレルにはダイス孔付近でテーパが付けられているため,マンドレル軸方向の位置を変化させることにより,マンドレルとダイス間の距離を変化させることが可能である.

また,押し出しと同時にマンドレルを押し出し方向,または逆方向に移動させることにより,押し出し時にダイス出口横断面形状を変化させることが可能である.

これらの条件を満たすように実験装置の機構を考え,強度計算を行い,押し出し実験装置を設計・製作した. その押し出し実験装置の外観を Fig.2 に示す.

3. マンドレルテーパ角が変形・負荷特性に与える影響

3.1 押し出し加工の特徴

提案した押し出し加工法の特徴は,(1)マンドレルがダイス出口付近でテーパ形状となっていることであり,(2)マンドレルが押し出し時に押し出し方向または逆方向に移動することである.

提案した押し出し加工法にて所望の形状・品質の製品を得るためには,変形・負荷特性などの加工特性を定性的・定量的に把握する必要がある.

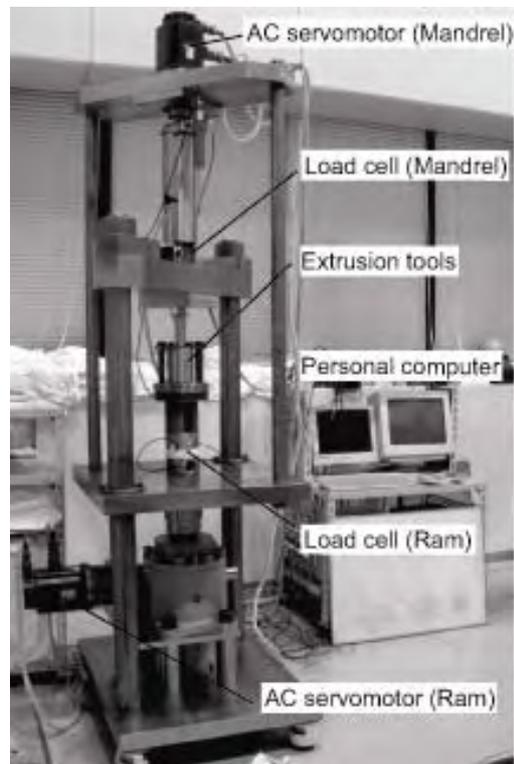


Fig.2 Developed CNC extrusion machine

新しい押し加工法の基礎研究として、本加工法の特徴であるマンドレルのテーパ角が変形・負荷特性に与える影響について、CNC押し実験装置を用いた実験と、汎用有限要素解析ソフト EFLN を用いた数値シミュレーションにより、定量的に示しそのメカニズムを明らかにする。

3.2 実験と数値シミュレーションの条件

押し実験と数値シミュレーションの加工条件を table 1 に、押し工具の寸法を Fig.3 に示す。

テーパ角の異なる5種類のマンドレルに対して、それぞれマンドレル直径 D_M を 10.0, 12.0, 14.0, 16.0mm について検討した。ダイス直径 D_D 20.0, ラム速度 V_R は 0.6 mm/s, マンドレル速度 V_M は 0mm/s である。

また、マンドレルにテーパが付いていることによる影響を比較検討するため、テーパ角のついていないストレートマンドレルについても検討を行った。

ストレートマンドレルを用いた場合の加工条件は、テーパマンドレルと同様に $V_M=0$ mm/s, $D_M=10.0, 12.0, 14.0, 16.0$ mm である。

テーパ角 $\theta = 22.5^\circ$, マンドレル直径 $D_M = 16.0$ mm におけるラムストローク S に対する押し荷重 F_E の実験結果を Fig.3 に示す。ラムストロークに対する押し荷重の曲線は、典型的な直接押し法の押し荷重曲線となっている。押し初期の部分では、コンテナ内にピレットが充填するにしがたい押し荷重が急激に増加し、ピレットが充填し押し荷重が最大となる。その後の、押し加工において一般に定常状態と呼ばれる工程では、ラムストロークの進行にしがたい、コンテナとピレット間の摩擦力が減少するため押し荷重が減少する⁽¹⁾。

Fig.3 に対応するテーパ角 $\theta = 22.5^\circ$, マンドレル直径 $D_M = 16.0$ mm における、ラムストローク S に対するマンドレル荷重 F_M を Fig.4 に示す。ラムストローク S が 0mm から 8mm まで増加する間に、押し荷重は 0kN から -25kN までマンドレル引張荷重が増加し、 $S=8$ mm でピークとなる。

Table 1 Extrusion conditions

Ram velocity V_R (mm/s)	0.6
Mandrel velocity V_M (mm/s)	0
Taper angle ($^\circ$)	(0 $^\circ$), 7.5, 11.25, 15.0, 22.5, 30.0
Mandrel diameter D_M (mm)	10.0, 12.0, 14.0, 16.0
Die diameter D_D (mm)	20.0

*テーパの付いていないストレートマンドレル

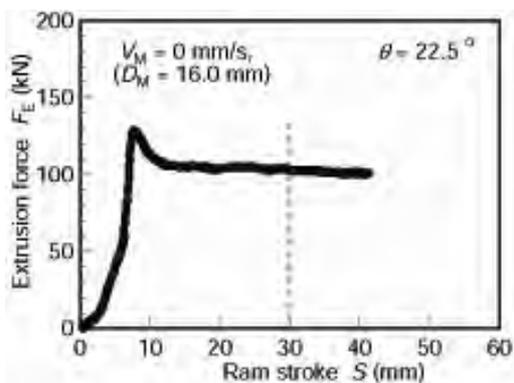


Fig.3 Extrusion force with ram stroke

そして、マンドレル引張荷重は $S = 12$ mm にかけて 5kN 程度まで減少する。その後、マンドレル荷重は $S = 40$ mm にかけて 5kN 程度までゆるやかに増加する。

3.3 変形特性

テーパ角 θ が成形品外径 D_O に与える影響の実験結果を Fig.5 に示す。比較のため、 $D_M = 16.0$ mm のストレートマンドレルを用いた場合の成形品外径を示した。なお、ストレートマンドレルを用いた場合の成形品外径は、マンドレル直径によらずほぼ同じであった。ストレートマンドレルを用いた場合、成形品外径はメタル半径方向外向きの変形を拘束するダイス直径とほぼ等しくなる。しかし、テーパマ

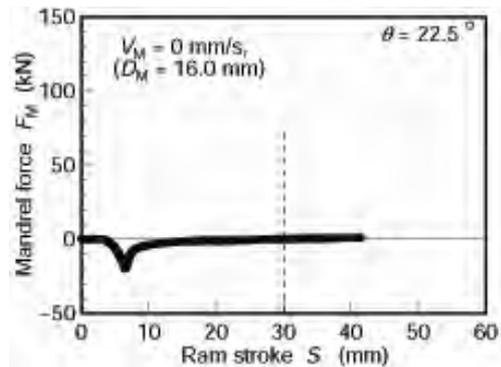


Fig.4 Mandrel force with ram stroke

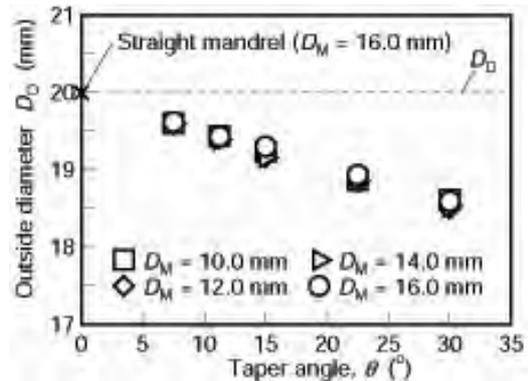


Fig.5 Effect of taper angle on outside diameter(experiment)

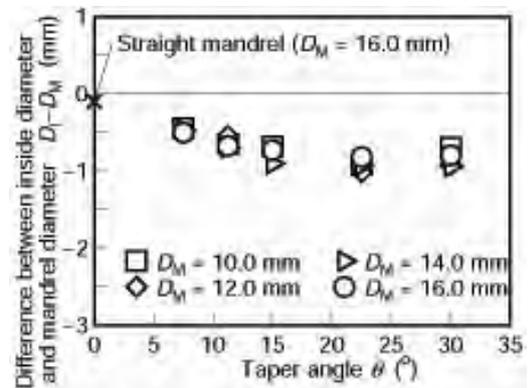


Fig.6 Effect of taper angle on difference between inside diameter and mandrel diameter(experiment)

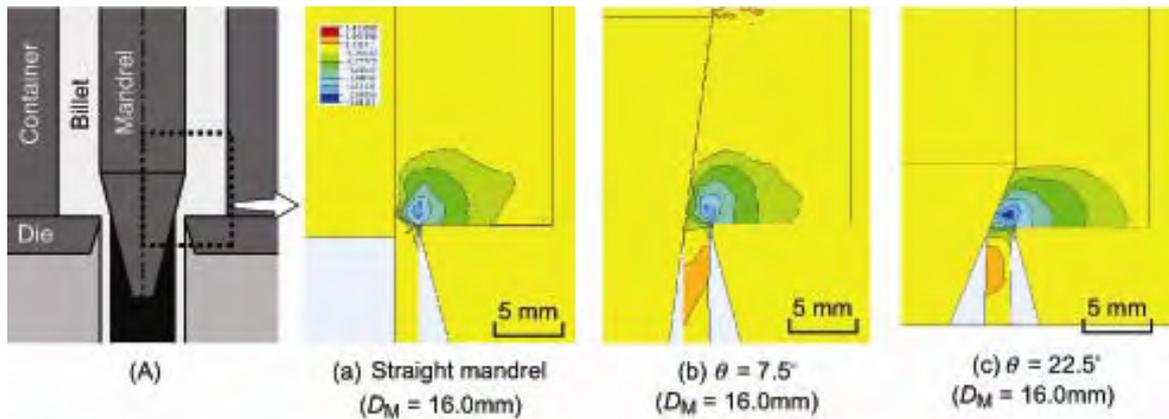


Fig.7 Effect of taper angle on metal flow(experiment)

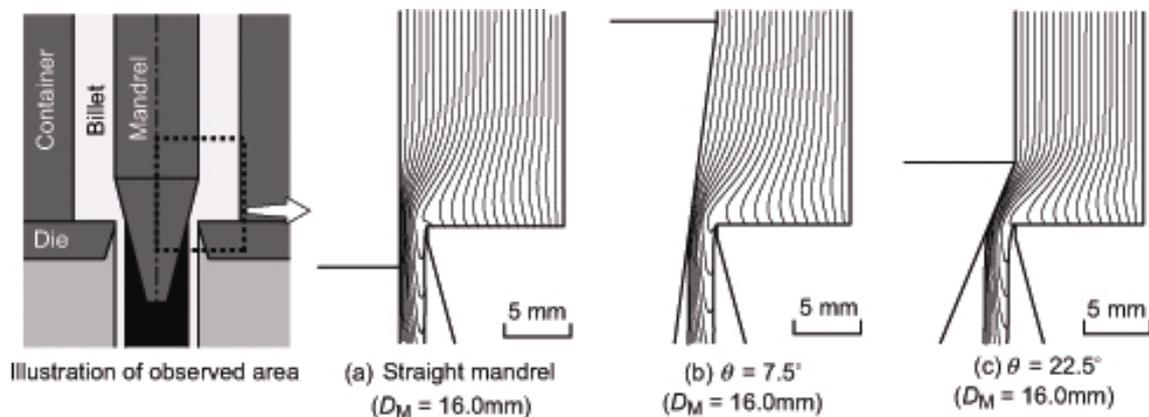


Fig.8 Effect of taper angle on metal flow(numerical simulation)

ンドレルを用いた場合、成形品外径はダイス直径より小さく、テーパ角が大きくなると成形品外径はより小さくなる。また、マンドレル直径による差は見られない。

テーパ角が成形品内径 D_i とマンドレル直径 D_M の差 ($D_i - D_M$) に与える影響の実験結果を Fig.6 に示す。比較のため、 $D_M = 16.0\text{mm}$ のストレートマンドレルを用いた場合の成形品内径とマンドレル直径の差を示した。なお、ストレートマンドレルを用いた場合の成形品内径とマンドレル直径の差は、マンドレル直径によらずほぼ同じであった。ストレートマンドレルの場合では、成形品内径はメタル半径方向中心向きの変形を拘束するマンドレル直径とほぼ等しくなる。しかし、テーパマンドレルを用いた場合では、成形品内径はマンドレル直径より小さく、テーパ角が大きくなるにしたがい成形品内径はより小さくなる。

テーパマンドレルを用いた場合、成形品外径がダイス直径より小さく、成形品内径がマンドレル直径より小さくなる現象を考察するために、ダイス出口付近のメタルフローの様子を観察した。Fig.7 にテーパ角がダイス孔付近のメタルフローに与える影響を示す。

(a)ストレートマンドレル、(b)テーパ角 $= 7.5^\circ$ 、(c) $= 22.5^\circ$ である様子である。このとき、マンドレル直径 $D_M = 16.0\text{mm}$ である。Fig.7 に対応する数値シミュレーション結果を Fig.8 に示す。押し出し前のピレットに、マンドレル軸方向と平行に引いた線の変化を示している。またダイス出口付近での変形の様子は、実験結果と数値シミュレーション

で良い一致を示している。

ストレートマンドレルを用いた場合では、成形品外径・内径がそれぞれダイス直径・マンドレル直径と同じで、マンドレル長手方向にメタルが押出されている。しかしテーパマンドレルを用いた場合では、メタルが円管の半径方向中心向きに流れ込み、成形品外径・内径がそれぞれダイス直径・マンドレル直径より小さくなるのが観察される。そしてテーパ角の大きい $= 22.5^\circ$ では、より半径方向中心向きに流れ込んでいることが確認される。

テーパマンドレルを用いた場合では、メタルの半径方向の変形がマンドレルによって拘束されないため、ダイス面上のマンドレル近傍でもメタルが半径方向中心向きに変形する。また、Fig.8 で見られるように、テーパ角が小さい場合ではメタルがマンドレルのテーパ面に沿って徐々に半径方向に変形しているが、テーパ角の大きい場合ではダイス出口付近で急激に半径方向に変形している。このため、メタルの速度半径方向成分の割合が大きくなり、テーパ角が大きいとメタルがより半径方向中心向きに流れ込む。

そのため、テーパマンドレルを用いた場合、成形品外径がダイス直径より小さく、成形品内径がマンドレル直径より小さくなる。

成形品の長手方向断面写真をマンドレル速度 $V_M < 0$ と $V_M > 0$ に分けて、それぞれ Fig.9 と Fig.10 に示す。成形品は紙面左から右に押出されている。マンドレル速度

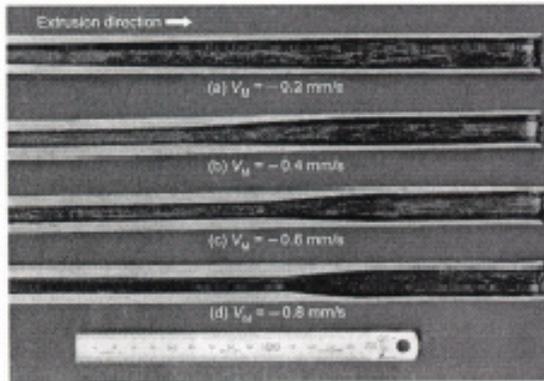


Fig.9 Extruded tubes with variation of mandrel velocity ($V_M < 0$)

$V_M < 0$ の場合では、押し出しと同時にテーパマンドレルを押し出し方向と逆方向に移動させたため、ラムストロークの進行にしたがい内径が小さくなり肉厚が増加している。マンドレル速度 $V_M > 0$ の場合では、押し出しと同時にテーパマンドレルを押し出し方向と同じ方向に移動させたため、ラムストロークの進行にしたがい内径が大きくなり肉厚が減少している。また、マンドレルの移動方向によらず、マンドレル速度の絶対値が大きくなるにしたがい、肉厚の変化の割合が大きくなるということが確認できる。

4. 総括

先端がテーパ形状となったマンドレルを、押し出しと同時に押し出し方向あるいは逆方向に移動させることにより、押し出し加工の一工程で管材長手方向の肉厚を変化させることのできる押し出し加工法を提案した。そして、本研究のために製作した CNC 押し出し実験装置を用いた実験と、汎用有限要素解析ソフト ELFEN を用いた数値シミュレーションにより、基礎的な加工特性を調べ、変形メカニズムを明らかにし、提案した押し出し加工法の有効性を示した。

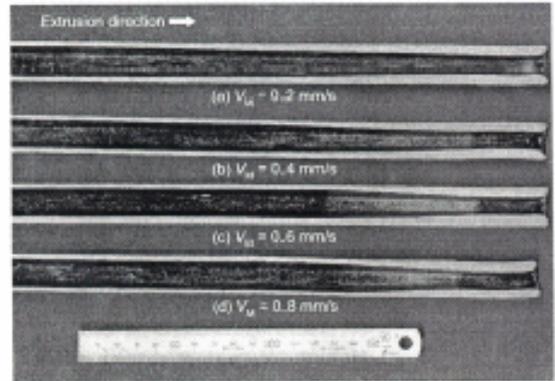


Fig.10 Extruded tubes with variation of mandrel velocity ($V_M > 0$)

謝辞

この研究は天田金属加工機械技術振興財団のご援助により研究開発を行うことができましたことを記し、天田金属加工機械技術振興財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Difiglio, C. & Fulton, I.: Energy, **25**(2000), 657-673.
- 2) Plotkin, S.E.: Energy Policy, **29**(2001), 1072-1084.
- 3) 松田信一・吉田英雄: 軽金属, **53**-11(2003), 483-489.
- 4) 中村正信・久保田昌之・南山秀夫・大木康豊: 塑性と加工, 35-398(1994), 187-195.
- 5) Dick, P., Nagler, M. & von Zengen, K.-H: 塑性と加工, 39-453(1998), 18-22.
- 6) 竹内雅彦・二橋岩雄: 塑性と加工, **14**-154(1973), 912-915.