

## 異形前方押出しの非定常変形の解析

Simulation of Unsteady Flow in Non-Axisymmetric Forward Extrusion

木内 学\*・星野 倫彦\*・飯島 茂男\*

Manabu KIUCHI, Michihiko HOSHINO and Shigeo IJIMA

## 1. はじめに

近年、押出し加工の分野では、製品寸法精度に対する要求が激しくなり、複雑な断面形状の異形材を精度よく製造することを要求される場合が多い。しかし、製品断面形状が複雑化すると、加工の良否に係る因子が増し、その因子一つ一つに対し、最適条件を見いだすことは容易ではない。従来の研究では、実験的検討<sup>1),2)</sup>、FEM による数値解析<sup>3)</sup>、上界法を応用した解析<sup>4)</sup>等があるが、いずれも個別的な研究にとどまっている。

筆者らは、押出し加工のすべての範囲をカバーし、最適な加工条件や工具形状を決定しうる、汎用シミュレータの開発を目指している。既報<sup>5)</sup>では、異形後方押出しに対する解析を行い、汎用シミュレータの基礎となる一般化三次元的可容速度場の妥当性を検討した。本報では、さらに複雑な断面形状の前方押出し加工を解析し、ダイス内の被加工材のメタルフローおよびダイス手前のデッドゾーンの形成に関して検討した結果について報告する。

## 2. 一般化解析モデル

解析モデルの基本的構成については、既報<sup>5)</sup>で示したので、ここでは得られた一般化三次元的可容速度場の式(1)~(3)のみを示す。(1)式中、第一項が平均速度成分であり、 $P(r, \varphi, y)$ に関する項が偏差速度成分である。

軸方向速度

$$V_y(r, \varphi, y) = \frac{V_0 \int_{\varphi_s}^{\varphi_f} \{r_{so}^2(\varphi, 0) - r_{si}^2(\varphi, 0)\} d\varphi}{\int_{\varphi_s}^{\varphi_f} \{r_{so}^2(\varphi, y) - r_{si}^2(\varphi, y)\} d\varphi} + \frac{2 \int_{\varphi_s}^{\varphi_f} \int_{r_{si}(\varphi, y)}^{r_{so}(\varphi, y)} P(r, \varphi, y) \cdot r dr d\varphi}{\int_{\varphi_s}^{\varphi_f} \{r_{so}^2(\varphi, y) - r_{si}^2(\varphi, y)\} d\varphi} + P(r, \varphi, y) \quad (1)$$

$P(r, \varphi, y)$ : 任意の  $C^2$  級関数

回転方向速度

$$V_\varphi(r, \varphi, y) = f(r) \cdot \omega(\varphi, y) = \frac{-f(r)}{\int_{r_{si}(\varphi, y)}^{r_{so}(\varphi, y)} f(r) dr} \times \int_{\varphi_s}^{\varphi_f} \left\{ \int_{r_{si}(\varphi, y)}^{r_{so}(\varphi, y)} r \cdot \frac{\partial V_y(r, \varphi, y)}{\partial y} dr + \frac{\partial r_{so}(\varphi, y)}{\partial y} \cdot r_{so}(\varphi, y) \cdot V_y(r_{so}(\varphi, y), \varphi, y) - \frac{\partial r_{si}(\varphi, y)}{\partial y} \cdot r_{si}(\varphi, y) \cdot V_y(r_{si}(\varphi, y), \varphi, y) \right\} d\varphi \quad (2)$$

$f(r)$ : 任意の  $C^2$  級関数

半径方向速度

$$V_r(r, \varphi, y) = -\frac{1}{r} \int_{r_{si}(\varphi, y)}^r \left\{ r \cdot \frac{\partial V_y(r, \varphi, y)}{\partial y} + f(r) \cdot \frac{\partial \omega(\varphi, y)}{\partial \varphi} \right\} dr + \frac{r_{si}(\varphi, y)}{r} \cdot \left\{ V_y(r_{si}(\varphi, y), \varphi, y) \cdot \frac{\partial r_{si}(\varphi, y)}{\partial y} + \frac{V_\varphi(r_{si}(\varphi, y), \varphi, y) \cdot \partial r_{si}(\varphi, y)}{r_{si}(\varphi, y)} \right\} \quad (3)$$

なお、被加工材が中実材の場合は、 $r_{si}(\varphi, y) = 0$  で  $f(r)$  に対して、以下の条件式(4)が必要である。

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{f(r)}{r} \text{ が収束。} \quad (4)$$

速度場より加工に要する全仕事率が計算されるが、この計算式、手順についても既報を参照されたい。

## 3. 解析および実験条件

異形材の前方押出し加工として、図1に示す場合を対象とした押出し実験を行い、その結果を解析結果と比較検討した。実験用被加工材としては純アルミを用い、グリース潤滑により、冷間で押出した。一方、圧縮試験によって、被加工材の応力-ひずみ線図(図2)を得、その結果を導入し、加工硬化を考慮した解析を行った。

実験に対応して、図3のような解析モデルを想定し、デッドゾーンの境界面形状が異なるモデル I, II を設定した。モデル I は軸を含む断面上で、境界が直線となる

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報 であり、モデル II は正弦曲線となるものである (図 4 参照)。

$$P(r, \varphi, y) = f_1(y) \cdot f_2(\varphi) \cdot f_3(r) \quad (5)$$

ただし、 $y < -H_1$ ,  $Y_2 < y$  の時

$$f_1(y) = \begin{cases} 0 & y < -H_1, Y_2 < y \text{ の時} \\ -H_1 \leq y \leq Y_2 \text{ の時} \\ C \cdot (y + H_1) \cdot (y - Y_1) \cdot (y - Y_2) \end{cases}$$

$$f_2(\varphi) = D \cdot \varphi^3 + E \cdot \varphi^2 + F \cdot \varphi + 1.0$$

$$f_3(r) = G \cdot r^2 + I \cdot r + 1.0$$

(C, D, E, F, G, H<sub>1</sub>, I, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub> は最適化パラメータ)

解析に際し、偏差速度成分  $P(r, \varphi, y)$  として式 (5) のような簡単な変数分離形を用い、 $f(r)$  は  $r$  とした。

最適化パラメータは全部で 9 個であるが、そのうち H<sub>1</sub> はデッドゾーンの高さを表し、Y<sub>2</sub> はダイスベアリング部で偏差速度成分が一様でない範囲、つまり非定常変形域を示す。つまり、 $y \geq Y_2$  では、被加工材の軸方向速度が一様で、回転方向速度や半径方向速度は 0 であり、ねじれ曲がりがない速度分布となることを示す。

解析では、ポンチ面、コンテナ面、ダイス面での摩擦定数を導入する必要があるが、ここでは、ポンチ面、コンテナ面では  $m=0.1$  と固定し、ダイス面では  $m=0.1 \sim 0.5$  の場合を検討した。ダイス面での摩擦定数を大きくした理由は、ダイス面に対してはグリースを加工前に塗布しただけで、加工途中で補充しなかったために、潤滑効果が他の面に比較して低下している場合もありうると考えられるからである。

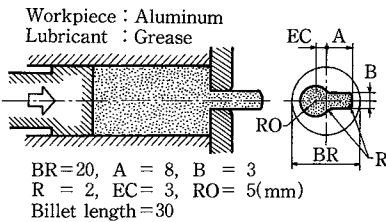


図 1 実験モデル

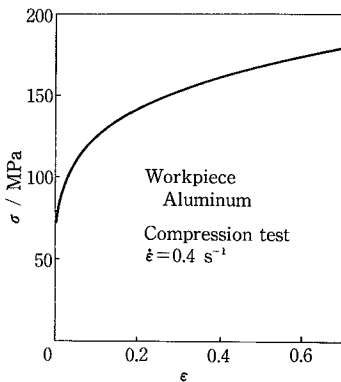


図 2 被加工材の応力-ひずみ曲線

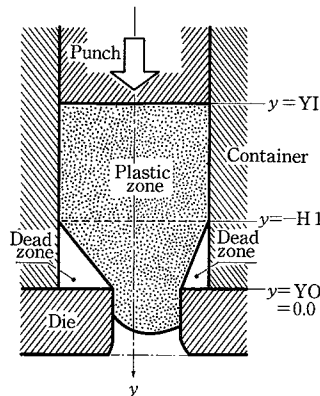


図 3 設定した解析モデル

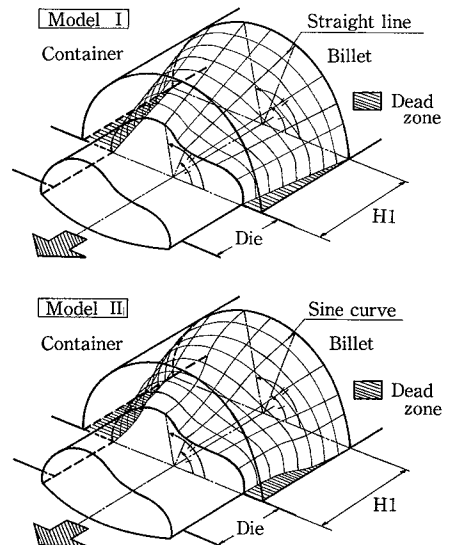


図 4 デッドゾーン境界面のモデル

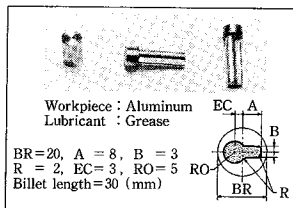


図 5 押し出し加工した製品

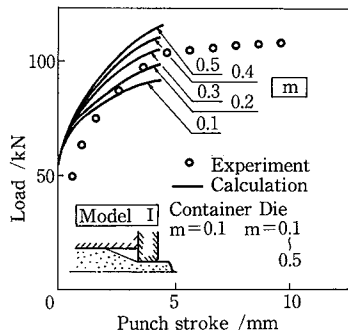


図 6 モデル I の荷重-ストローク線図

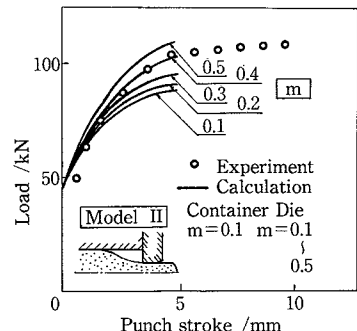


図 7 モデル II の荷重-ストローク線図

#### 4. 解析結果と実験結果の比較検討

図5に示す製品を押出し、図6, 7に示す荷重—ストローク線図を得た。図6は実験値と解析モデルⅠによる計算結果との比較、図7は解析モデルⅡによる結果との比較を示す。適当な摩擦定数を選べば、解析結果と実験結果は良い対応を示すが、モデルⅠとモデルⅡの結果を比較すると、モデルⅡのほうが低い全仕事率を与える。したがって、モデルⅡのほうがモデルとして優位にあると思われる。しかし、加工初期には、被加工材が剛塑性体であるという解析用の仮定と、実験における被加工材と工具との初期クリアランスによる誤差がみられる。このことをも考慮すると、ダイス面での摩擦定数は、 $m=0.5$ が妥当と思われる。以下、 $m=0.5$ での解析結果と実験結果とを比較する。

図8に、実験により得られた製品の概略図を示し、図9にモデルⅠとモデルⅡにより解析した被加工材の先端形状を示す。解析では、被加工材の先端が、ダイスより

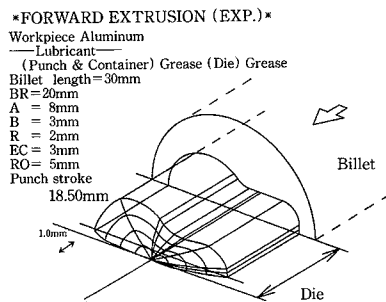


図8 製品の先端形状の概略図

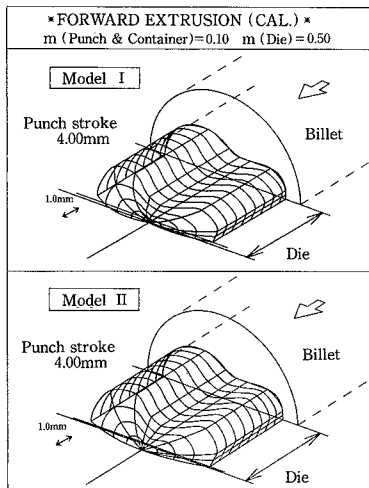


図9 先端形状のシミュレーション結果

出たところまでを計算し、図8の実測値は、図9の解析値と比較しやすいように示してある。モデルⅠ, Ⅱによる解析結果は、ともに実測値に近い先端形状を示しているが、モデルⅠによる解析では中心部分が窪んだ形をしており、実験とは基本的に異なる形状を示している。これに対し、モデルⅡによる結果では全体に良い結果を得ている。しかし、図の製品上の右側部分（以下、矩形部分と呼ぶ）と左側部分（以下、円形部分と呼ぶ）の押出し量を比較すると、実験では、円形部分のほうが若干多く押出されているのに比べ、モデルⅡでは矩形部分のほうが多く押出されている。

図10に、先端形状を、各半径方向に切出した縦断面上で、比較した結果を示す。0°, 45°, 180°方向は、モデルⅠ, Ⅱによる結果とも実測値と良い対応を示すが、90°, 135°方向ではモデルⅠによる結果が実測値と大きく異なっている。特に、90°方向では、中心部分( $r=0$ )より外周部分のほうが押出され、被加工材先端の中心部が窪んでいる結果を示している。一方全体的に実測値と良い

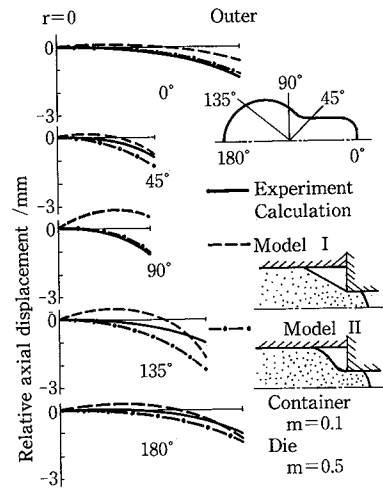


図10 先端形状の各方向の断面図

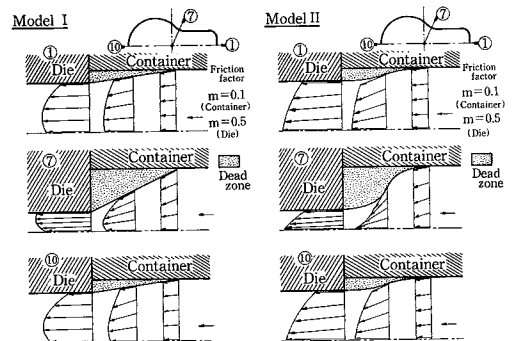


図11 軸を含む縦断面での速度分布

## 研 究 速 報

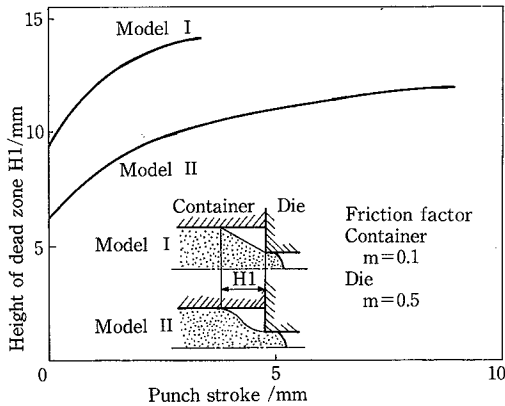


図12 デッドゾーン高さの比較図

対応を示しているモデルIIでも、135°, 180°方向を含む円形部分で、解析による押出し量が実測値よりも小さいという結果を示している。

## 5. 速度場の検討

4節で述べた速度場モデルが、実際の変形を表示するために適切であったか否かを検討するために、図11にモデルI, IIを用いた解析での、最適化された軸方向速度と半径方向速度の分布を示す。モデルIによる解析では、デッドゾーンとの境界面や外周部分での軸方向速度が、モデルIIの場合に比べて小さく、外周部より内側の部分で軸方向速度のピーク値が現れている。これに対し、モデルIIは、境界面を形成する線素が正弦曲線であり、デッドゾーン開始部やダイス入口位置でのメタルフローが滑らかである。ゆえに、これらの断面での内部せん断仕事率がモデルIの場合よりも小さくなり、被加工材全体のメタルフローが滑らかになって、全仕事率も小さくなる。

図12は、押出し過程でのデッドゾーンの高さH1の推移を見た結果であるが、モデルIIによる解析のほうが、モデルIの場合に比べてはるかに小さなものとなっている。これは、モデルIの場合、ダイス入口での被加工材の流入角度変化を小さくして、それによるせん断仕事率を小さくするために、デッドゾーンが高くなったと考えられる。

図13では、モデルIIを用いた解析における、ダイス内での非定常変形域の長さを示す。非定常変形域は、軸方

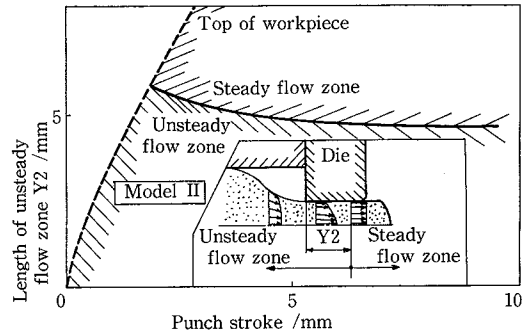


図13 ダイス内の非定常変形域の長さ

向速度の分布が、軸に垂直な断面内で一様でない部分である。ゆえに、この長さより短いダイス長さで加工を行うと、ダイス出口より押出される製品が、曲がったりねじれたりするものと考えられる。ダイス長さを長くすると、曲がりやねじれはなくなるが、加工荷重が増加し、工具、設備等に対して負担となる。したがって、必要十分なダイス長さを知ることは重要であるが、得られた結果は、最適ダイス長さを示すものであり、ダイスの設計に有用な知見となりうる。

## 6. ま と め

異形材の前方押出し加工を解析し、被加工材の先端形状を理論的に予測し、実験結果と比較検討した。解析モデルにおいて設定したデッドゾーンの形状についても検討を加え、最適ダイス長さに対する知見を得た。以上より、本研究で開発した押出し・引抜き加工の汎用シミュレーションモデルの妥当性を確認した。今後さらに解析範囲を広げ、押出し・引抜き加工の種々の問題に対する検討を行う予定である。

(1987年4月28日受理)

## 参 考 文 献

- 1) Nagpal, V., Billhardt, C. F. & Altan, T.: J. Engng. Indust., 101-8 (1979), 319.
- 2) 高辻, 時沢, 室谷, 松木: 塑性と加工, 25-286 (1984), 1000.
- 3) 田中, 佐藤, 内田: 塑性と加工, 26-288 (1985), 87.
- 4) Yang, D. Y., Han, C. H. & Kim, M. U.: Int. J. Mech. Sci., 28-8 (1986), 517.
- 5) 木内, 星野, 飯島: 37回塑加連講論, (1986), 135.