

型材押し出しの汎用解析法・Ⅱ ——薄肉型材への適用——

Numerical Simulation of Profile Forward Extrusion · 2

星 野 倫 彦*・木 内 学*
Michihiko HOSHINO and Manabu KIUCHI

1. 諸 言

近年、押し出し加工製品に対して、断面形状の複雑化、寸法精度の高度化、難加工材の製品化、などの要求が高まりつつあり、これに応える押し出し加工技術の一層の向上が望まれている。筆者らは、押し出し加工中の被加工材の流動を理論的に推定することにより、工具形状・寸法を最適化する手法の開発を進めている。前報¹⁾では、すでに提案した汎用解析法によりアルミニウム型材の押し出し加工を対象とした一連の数値シミュレーションを試みたが、それらの結果を通して、上記解析法のこれまでの適用の仕方では、薄肉型材の場合に、押し出し加圧力などについて実測値との十分な対応が得られないことが判明した。

そこで、本報では、薄肉型材のガラス潤滑押し出し加工を対象として、この汎用解析法の適用技術の拡張を図り、その妥当性について検討を行ったのでその結果を報告する。

2. 解 析 方 法

従来進めてきた汎用解析法の型材押し出し加工への適用では、図1に示すように、(1)設定した押し出し(長手)方向座標軸に対して等角度の位置にあるコンテナ面上の点Pと対応するダイス孔上の点Qを正弦曲線(群)あるいは直線(群)で結ぶことによって形成される曲面を、ダイス前面にできるデッドゾーンと塑性域との境界面(流動する被加工材の実質表面形状)として考え、(2)さらに、T型材角部のように製品断面形状が特異点を有する場合には、特異点に対応して被加工材の塑性変形域を分割するための内部せん断面として、その特異点と押し出し方向座標軸を含む複数の平面として考えてきた(図1参照)。このような計算モデルは、製品断面が厚肉であり、かつ押し出し方向座標軸が製品断面の図心の近傍を通ることができる場合には特に問題とならないが、製品断面の

*東京大学生産技術研究所 第2部

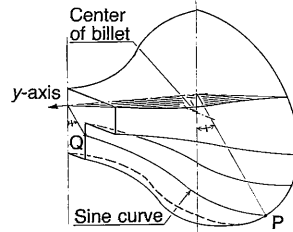


図-1 従来の異型材押し出し加工の計算モデル

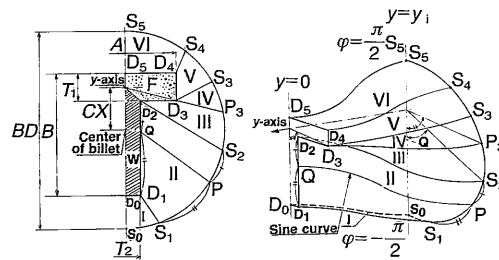


図-2 薄肉型材押し出し加工に適用した計算モデル

各部へ流入する被加工材の流線が押し出し方向すなわち座標軸方向から大きくそれてくるような場合(たとえば、筆者らが数値解析を行ったフィン付き棒を押し出す場合²⁾)には適さないことが明らかになってきた。

これらの結果より、開発した汎用解析法を薄肉部を有する形の押し出し加工へ適用する際には、内部せん断面の位置・形状をパラメータ化した計算モデル・方法を採用する必要があると考えられる。T型材の押し出し加工の場合、製品断面の特異点すなわちダイス孔の各頂点D₁~D₄(図2参照)を通る内部せん断面を導入する必要があるが、上述の理由により、図2に示すように、D₁~D₄を通る各内部せん断面と被加工材の塑性域表面との交線が塑性変形開始位置(y=y_i)において、被加工材の横断面外周(ピレット横断面外周に等しい)と交わる位置S₁~S₄(図2参照)を最適化パラメータとして

研 究 速 報

以下の解析を進めることとする。なお、点 P_3 は、点 D_3 と押し出し（長手）方向座標軸を含む平面が上記塑性変形開始位置における横断面外と交わり、円弧 $\widehat{S_2S_3}$ を二分する点とする。

対称面と内部せん断面とによって分割された塑性域Ⅰ～Ⅵの表面（流動する被加工材とデッドメタルまたは後に示す潤滑剤の滞留域との界面）は、正弦曲線を構成線素とする曲面とし、その正弦曲線は以下の手順で定義するものとする。

(a)塑性域Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅴ, Ⅵの表面

ダイス孔入り口（ダイスペアリング部入口）($y=0$) 外周上にある線分 $\overline{D_iD_{i+1}}$ 上の任意の点 Q に対して、塑性変形開始位置 ($y=y_1$) にある被加工材（ビレット）横断面外周上の円弧 $\widehat{S_iS_{i+1}}$ （塑性域Ⅲの場合、点 S_i は点 S_2 であり、点 S_{i+1} は点 P_3 である）上の点 P の位置を以下の式で定め、おのおの相対する点 P と点 Q を両端とする正弦曲線とする。

$$\frac{\text{線分 } \overline{D_iQ} \text{ の長さ}}{\text{線分 } \overline{QD_{i+1}} \text{ の長さ}} = \frac{\text{円弧 } \widehat{S_iP} \text{ の長さ}}{\text{円弧 } \widehat{PS_{i+1}} \text{ の長さ}}$$

(b)塑性域Ⅳの表面

ダイス孔入り口外周上にある特異点 D_3 と塑性変形開始横断面上の円弧 $\widehat{P_3S_3}$ 上の各点 P を両端とする正弦曲線とする。

以上より、被加工材のダイス前面の塑性域表面形状を表す関数 $r_s(\varphi, y)$ を定義することができ、押し出し方向軸に垂直な断面内での押し出し軸方向偏差速度成分を表示する関数 $P(r, \varphi, y)$ に具体的な形を設定すると、これらの関数を用いて三次元動的相容速度場を構成することができる。この速度場を構成する過程および全仕事率の算出と関数 $P(r, \varphi, y)$ および最適化パラメータの値の決定方法については、既報³⁾を参照されたい。

3. 解析結果の比較検討

図3に示すような薄肉のステンレス鋼T形材を約1200℃でガラス潤滑押し出し加工する場合を検討事例として、上述の被加工材の表面形状がダイス前面に滞留するガラス潤滑剤の形状と対応するとして本解析手法による計算結果、および森らによる三次元FEMによる計算結果⁴⁾、を実測値と比較した結果を表1に示す。本解析手法では、押し出し加工中の被加工材の平均変形抵抗 Y_m を122.5MPaとして計算しており、押し出し荷重を平均変形抵抗で無次元化して示した。三次元FEMと本解析手法とでは、変形抵抗式、ガラスディスクの取り扱いなどに若干の相違があるが、両解析手法とも妥当な結果を得ている。なお、本解析手法による計算時間は、日立

表1 無次元化押し出し加圧力 $p \cdot Y_m^{-1}$ の計算結果と実測値との比較

| 実測値 | 本解析手法 | 三次元FEM |
|------|-----------------------|--------|
| 4.38 | 6.28 (ガラスディスク厚さ60 mm) | 5.65 |
| 5.33 | 5.78 (" 60 mm) | |
| | 5.51 (" 120 mm) | |

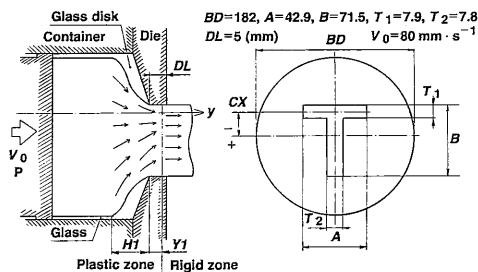


図-3 T形材のガラス潤滑押し出し加工への適用例

M880Hを用いて12～17分程度であり、SUN SPARC1を用いて5～8時間であった。現在市販されているSUN SPARC2は、SPARC1よりも演算速度が倍近くあるので、EWSでも計算は比較的容易に行いうる。

4. 工具形状・潤滑剤の影響

以上により本解析手法の妥当性が確認できたと考えられるので、これを用いて、この薄肉T形材の押し出し加工についてより広く検討した結果を以下に示す。ガラス潤滑押し出し加工の場合、被加工材の流動状況に影響を与える形状因子としては、ダイス孔位置を含む工具形状・寸法のほかに、ダイス前面に設置されるガラスディスクの厚さおよび形状がある。ガラスディスクは、押し出しとともに表面が融解し被加工材とダイスとの間に流入して潤滑剤の役割を果たすが、通常ビレットの外周にもガラス潤滑が施されるので、これらのガラスが押し出しとともにダイス前面に滞留あるいは堆積して、実質的なダイスアプローチ面（被加工材と潤滑剤との界面）を構成する。そのため、押し出し中の被加工材の実質表面形状・寸法は、一意に決定することができない。そこで、ガラスディスクの形状すなわち加工中の被加工材の実質表面形状・寸法は、加工条件に従って変化するものとして扱い、その形状・寸法は押し出し加圧力を最小とするものとして決定されたと考え解析を進めた。表1においても、被加工材の塑性域長さ（ガラスディスクの厚さに対応する）を変化させた3つの種類の条件下での結果を表記してある。

以下、被加工材の実質塑性域長さ（ガラスディスク厚さ）およびダイス孔位置が、被加工材の流動状況に与え

表 2 解析条件一覧

ピレット直径 $BD=182$, ピレット長さ $BL=300$, フランジ部長さ $A=42.9$, ウェブ部長さ $B=71.5$, フランジ部肉厚 $T_1=7.9$, ウェブ部肉厚 $T_2=7.8$, ダイスペアリング長さ $DL=5$, (以上単位 mm), 押出し比 31.2, ステム速度 $V_0=80\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均変形抵抗 $Y_m=122.5\text{MPa}$, 摩擦定数 (コンテナ面, ガラスディスク面) $m=0.03$, (ガラス面) $m=0.3$

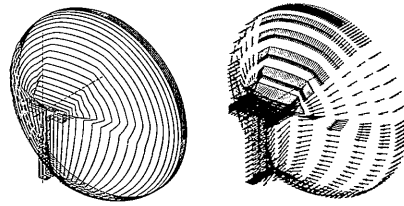
| Case | ガラスディスク厚さ Hl/mm | ダイス孔位置 CX/mm |
|------|-----------------------------|--------------------------|
| I | 60 | -24.95 |
| | 90 | -24.95 |
| | 120 | -24.95 |
| II | 60 | -11.23 |
| | 60 | -21.23 |
| | 60 | -24.93 |
| | 60 | -31.23 |

る影響を調べた解析結果について示す。なお、解析条件はまとめて表 2 に示す。以下に示す解析結果は、ガラスディスク厚さの影響を調査した Case I の結果のみを示したので、Case II の結果については参考文献⁵⁾を参照されたい。

5. ガラスディスク厚さの影響

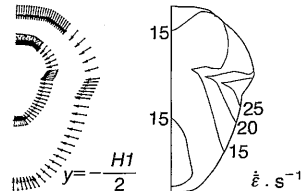
図 4 には、ガラスディスク厚さ (塑性域長さ) $Hl=60\text{mm}$ の場合の被加工材の(a)塑性域形状および(b)速度分布を示す。図より、ダイス孔に流入する直前の速度が下向き、つまり被加工材の一部がウェブ部先端方向に流動していることがわかる。また、図 5 には、被加工材の塑性域長さの中間位置にある横断面上での(a)速度分布および(b)相当ひずみ速度分布を示す。速度ベクトルは全体的に製品断面図心方向に向いており、ダイス孔直前で見られ製品フランジ部に対応する領域 F (図 2 の塑性域 III ~ VI) から製品ウェブ部に対応する領域 W (図 2 の塑性域 I + II) への流れ込みが見られない。相当ひずみ速度分布を見ると、ウェブ部の付け根に向かう部分に高い値を示す領域があり、ウェブ部付け根隅部を成形するのに必要な仕事率が大きいことがわかる。

図 6 には、内部せん断面 D_2S_2 で分割された製品ウェブ部に対応する領域 W と同フランジ部に対応する領域 F について、塑性変形開始位置からダイス孔に流入するまでの各段階での両領域における減面率の推移を示す。図に示す減面率は、被加工材の全減面率で無次元化した値であり、値が 1.0 以上の場合、その領域の減面率が他の領域の減面率より大きく、被加工材が内部せん断面 D_2S_2 を通過して一方の領域から他方の領域に流入してい



(a) Geometry of plastic zone (b) Velocity

図-4 塑性域形状と速度分布



(a) Velocity (b) Equivalent strain rate

図-5 横断面 ($y=-Hl/2$) での速度と相当ひずみの分布

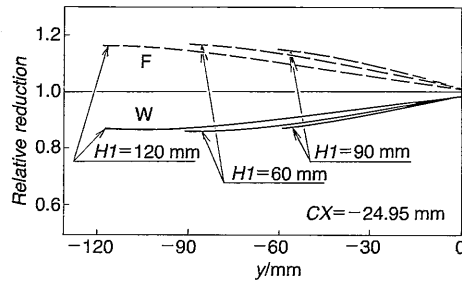


図-6 領域 W と F の減面率の推移

ることを意味する。図では、領域 F の方が、領域 W よりも減面率が大きく、領域 F から領域 W に被加工材が流入していることがわかる。

図 7 には、ガラスディスク厚さすなわち塑性域長さ Hl を変化させた場合の、無次元化押し加圧力 $p \cdot Y_m^{-1}$, 製品ウェブ部に対応する被加工材の領域 W と製品フランジ部に対応する被加工材の領域 F とを分ける内部せん断面の位置を規定する点 S_2 の角度 θ , ダイスペアリング部内における塑性域の広がり示す YI の変化を示す。点 S_2 の位置に関する情報は、望ましいガラスディスクの形状を決定する際に有用であり、ガラスディスクを保持するダイスアプローチ面形状の設計にも活用できる。また、 YI の値は、製品の曲がり、ねじれを防止するためのベアリング長さの必要最小長さを知る上で重要である。

図 8 の(a)には、全仕事率の最小化を評価基準として決

研究速報

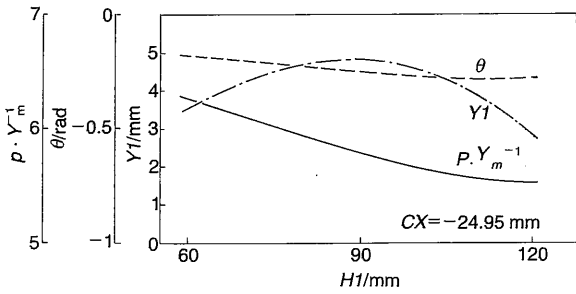


図-7 ガラスディスク厚さを変化させた場合の影響

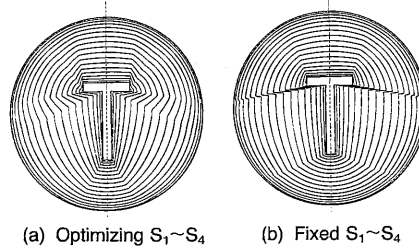


図-8 押し加圧力を最小とするガラスディスク面形状

定されたガラスディスク面形状を押し軸方向から見た場合の等高線図を示し、(b)には、図2に示した各塑性域 I, II, III+IV, V, VIごとの、ガラスディスク上端位置すなわち実質塑性変形開始位置 ($y=y_1$) からダイスベアリング部入口(ダイス孔) ($y=0$) へ至る減面率が相互に等しくなるように点 $S_1 \sim S_4$ を設定した場合の、(a)と同様な等高線図を示す。(b)の場合に比較して、(a)の場合の方がウェブ側のフランジ部下面(図2の線分 D_2D_3 を含む面) へ向かって流れる被加工材の流動を制御するガラスディスクの表面形状に無理がないように見える。

6. 結 言

薄肉形材の押し加工を対象とする汎用解析法の適用

技術について検討し、これを薄肉T形材のガラス潤滑押し加工に適用して、実測値や三次元FEMによる解析結果との比較検討を行い、妥当な計算結果が得られることがわかった。本解析手法は、計算に必要なコスト・時間が少なく、EWSでの使用も可能であり、工具設計に有用な情報を簡便に与え得るものであると考えられる。

(1992年4月17日受理)

参 考 文 献

- 1) 星野・木内：41回塑加連講論(1990),459.
- 2) 木内・飯島ほか：塑性と加工, 29-327(1988),356.
- 3) 木内・星野：塑性と加工, 32-361(1991),174.
- 4) 森ほか：平3春塑加講論(1991),443.
- 5) 星野・木内ほか：42回塑加連講論(1991),193.