

押出し・引抜き加工の解析技術

Simulation Technology for Extrusion and Drawing

木内 学*
Manabu KIUCHI

各種の押出し・引抜き加工における被加工材の3次元変形挙動を幅広く解明できる数学的モデルと解析手法について示し、さらに、具体的な適用事例として、異形材の押出し、偏肉管の押出し・引き抜き、多芯クラッド複合線の引き抜き、フィン付き管・棒の押出し・引き抜き、ブリッジダイスによる管の押出し、等に関する計算結果を引用しつつ、この解析手法の有用性を紹介する。

1. ま え が き

筆者らは、任意の横断面形状および寸法を有する棒材・線材・型材・管材（以下これらを異形材と総称する）の押出し・引抜き加工を対象とする解析手法の開発を目指して、一連の研究を進めてきた。異形材の押出し・引抜き加工においては、ダイス内の被加工材の流れが、製品断面の種々の非対称性や特異性に対応して複雑な挙動を示すことから、これを一般化した形で数式表示することが難しく、これまで有効な解析手法が見出されていなかった。筆者らは、種々の検討の結果、いわゆる上界（接近）法を用いて、異形材の押出し・引抜き加工を広範囲に解析できる、きわめて有効な数学的モデルおよび解析手法の開発に成功した。そして各種のプロセスについて解析を進めた結果、従来得られなかった多くの知見が得られることが判明した。そこで本稿では、この解析モデルおよび手法の概要を示し、併せて、それらの解析事例を引用しながら、その機能と適用範囲、得られる成果、さらに将来への発展の可能性について紹介する。

2. 中実材の3次元動的可容速度場の一般形

任意の異形材の押出し・引抜き加工時のダイス内の被加工材の塑性流動を表す動的可容速度場（以下、単に速度場）の一般的定式化は以下のように行うことができる^{1)~3)}。

図1は、円柱座標系 (r, ψ, y) を用いる場合のダイスと被加工材との幾何学的関係を示す。長手方向すなわち押出し・引抜き方向を y 軸とし、回転方向を角度 ψ で表す。被加工材の表面形状は一般的に関数 $RS(\psi, y)$ で表されるものとする。ところで、被加工材がダイス内部（ダイキャビティー）に充満している場合には、

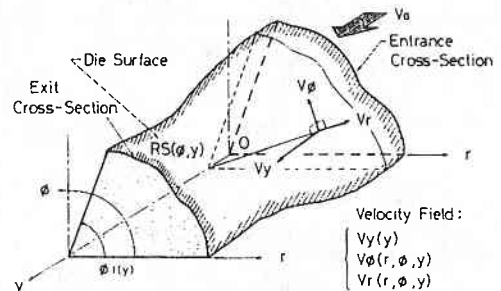


図1 円柱座標系による被加工材外表面形状（ダイス形状）の一般的表示

被加工材の表面形状はダイス面形状に一致するが、未充填の場合には、その表面の一部は自由表面となり、この部分の形状は、数学的手続きを経て別途定められる。

なお、ダイスの入口断面（または塑性変形が開始する位置での素材の横断面）および出口断面（または塑性変形が終了する位置での製品横断面）は y 軸に垂直でありその形状は既知であるとする。また、それら二つの横断面には含まれた領域を被加工材の全塑性変形域とし、その内部に発生する各方向の速度成分を v_r, v_ψ, v_y で表す。また、ダイス入口からの被加工材の流入速度を v_0 （＝横断面上で一様）で表す。

3次元動的可容速度場の構成には、次の仮定を用いる。〔仮定1〕：被加工材は剛塑性体であり、ダイス入口・出口またはその近傍の y 軸に垂直な断面が剛塑性境界である。上述のごとくこれらの境界の位置は、必ずしもダイス入口・出口の位置には一致しない。特に、平ダイスを用い、ダイス前面にデッドメタルが形成される場合には、デッドメタル発生開始位置かまたはその上流側に剛塑性境界が存在すると考えられる。したがって、剛塑性境界の位置は、速度場の最適化に際して可変パラメータとして扱う。〔仮定2〕：被加工材の y 軸に垂直な横断

*東京大学生産技術研究所 第2部

面上で、長手方向の速度成分 v_y の分布は一様である。
 [仮定3]: 回転方向の速度成分 v_ψ は、 $v_\psi(r, \psi, y) = f(r) \cdot \omega(\psi, y)$ のように変数分離形の関数表示が可能である。

[仮定2] については種々の議論があり得る。全体的な解析の簡略化を図るために、当初、この仮定を導入するが、後述するように、被加工材の横断面上での長手方向速度 v_y の分布を考慮した速度場の構成も可能であり、すでにその一般形も得ている。

以上の仮定の他に、速度場に関する制約条件としては[条件1] 体積一定の条件、ならびに[条件2] ダイスイ面上における速度の適合条件、がある。

上述の仮定、体積一定の条件、境界条件を用いて速度場の一般形を導いた結果(ただし、 $f(r) = r$ の場合)をまとめて表示すると以下のようになる。

$$v_y(r, \psi, y) = v_y(y) = \frac{v_0 \int_0^{\psi_f(y)} r_s^2(\psi, 0) d\psi}{\int_0^{\psi_f(y)} r_s^2(\psi, y) d\psi} \quad (1)$$

$$v_\psi(r, \psi, y) = r \cdot \omega(\psi, y) = \frac{-r}{r_s^2(\psi, y)} \int_0^\psi \frac{\partial}{\partial y} \{v_y(y) \cdot r_s^2(\psi, y)\} d\psi \quad (2)$$

$$v_r(r, \psi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial v_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\psi, y)}{\partial \psi} \right\} \quad (3)$$

ここで解析対象としている塑性変形域の回転(ψ)方向への広がりは、 $\psi = 0 \sim \psi_f(y)$ の範囲である。 $\psi = 0, \psi = \psi_f(y)$ は非軸対称断面を持つ被加工材をいくつかの等価な領域に分割した場合の境界面に対応しており、被加工材はこの境界面を越えて流れることはない。ここでは、式(2)はそれぞれ次式

$$\left. \begin{aligned} \psi = 0 & ; v_\psi(r, 0, y) = 0 \\ \psi = \psi_f(y) & ; v_\psi(r, \psi_f(y), y) = r \frac{\partial \psi_f(y)}{\partial y} \cdot v_y(y) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となり、式(4)は、それぞれの境界上で被加工材が境界面に沿う方向に流れていることを表している。

3. 被加工材内部の速度不連続面

製品横断面あるいはダイスイ出口横断面の角点すなわち特異点を有する場合には(図2参照)、 $\partial r_s(\psi, y) / \partial \psi$ の不連続性を数値的に処理するために、 y 軸とこれら特異点を含む面で被加工材を複数の領域に分割して扱う。この分割面は、半径(r)方向速度成分 v_r についての速度不連続面、すなわち内部せん断面 Γ_s となる³⁾。なお、この分割面は平面である必要はなく、長手(y)方向に振れた曲面であっても構わない。もちろんこの分割面に垂直な速度成分については速度の連続性が保たれる必要がある。実際には上述の速度場の構成式を $\psi = 0$ から $\psi = \psi_f$

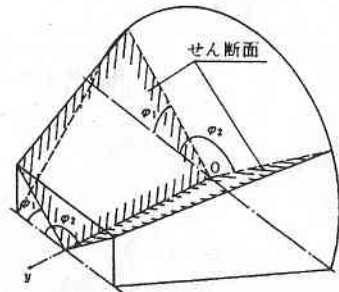


図2 被加工材内部のせん断面(速度不連続面)

(y) の方向へ向って各領域に順次適用し、被加工材全域についての速度場の数式表示を求めることになるが、式(1), (2), (3)を用いる限り、各分割面上でのこの垂直速度成分に関する連続条件は自動的に満足されることが証明できる。この分割面上(内部せん断面)での相対すべり速度は次式で表される。

$$(\Delta v_r)_{\Gamma_s} = |v_r(r, \psi^* + 0, y) - v_r(r, \psi^* - 0, y)| \quad (5)$$

ただし、 $\psi^* = \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i$ であり、 $y = y$ の位置での各分割面の角度を表す。

4. 中空材の3次元動的可容速度場の一般形

前節に示した中実材の場合とまったく同様にして、押し・引抜き加工時の中空材の3次元動的可容速度場も導くことができる^{4), 5)}。被加工材の外表面形状が $r_{so}(\psi, y)$ で、内表面形状が $r_{si}(\psi, y)$ で表され、塑性変形域の回転(ψ)方向への広がりが $\psi = 0 \sim \psi_f(y)$ であるとする、長手(y)方向、半径(r)方向、回転(ψ)方向の速度成分 v_y, v_r, v_ψ はそれぞれ次式で表される(図3参照)。

$$v_y(y) = \frac{v_0 \int_0^{\psi_f(y)} \{r_{so}^2(\psi, 0) - r_{si}^2(\psi, 0)\} d\psi}{\int_0^{\psi_f(y)} \{r_{so}^2(\psi, y) - r_{si}^2(\psi, y)\} d\psi} \quad (6)$$

$$v_\psi(r, \psi, y) = \frac{r}{r_{so}^2(\psi, y) - r_{si}^2(\psi, y)} \cdot \int_0^\psi \frac{\partial}{\partial y} \{ (r_{so}^2(\psi, y) - r_{si}^2(\psi, y)) \cdot v_y(y) \} d\psi \quad (7)$$

$$v_r(r, \psi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial v_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\psi, y)}{\partial \psi} \right\} + \frac{1}{r} \left\{ r_{so}(\psi, y) \cdot \omega(\psi, y) \frac{\partial r_{so}(\psi, y)}{\partial \psi} + r_{si}(\psi, y) \cdot v_y(y) \frac{\partial r_{si}(\psi, y)}{\partial \psi} + \frac{r_{so}^2(\psi, y)}{2} \left(\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(r, \psi, y)}{\partial \psi} \right) \right\} \quad (8)$$

被加工材の外表面はダイスイに完全に密着し、内表面はプラグまたはマンドレルに密着している場合には、 r_{so}

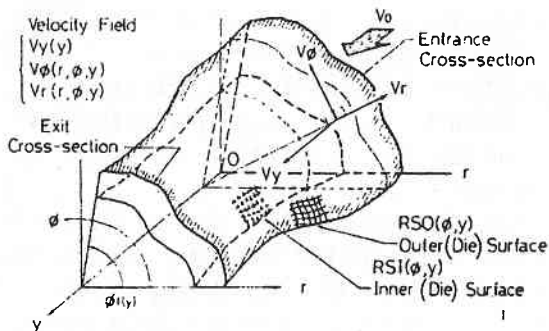


図3 円柱座標系による中空被加工材の内・外表面形状の表示

(ψ, y) , $r_{si}(\psi, y)$ はそれぞれダイス面およびプラグまたはマンドレル面に一致する。被加工材がダイキャビティやプラグキャビティに充填していない場合には、被加工材の外表面・内表面の一部は自由表面となり、その形状は、後述するように¹²⁾、被加工材の全変形仕事率が最小となるように解析を通して求められる。すなわち、中実材、中空材を問わず、ダイス内の被加工材の自由表面の形状は、最適な速度場を探索する際の準独立変数として取り扱うことになる。

製品横断面またはダイス出口横断面に角点（特異点）がある場合の被加工材の分割の必要性や内部せん断面の設定とその取り扱い方、またそこでの回転 (ψ) 方向の速度成分の連続性の保持については、中空材の場合も中実材の場合とまったく同じである。

5. 被加工材の変形仕事率

被加工材の塑性流動に伴う内部仕事率 \dot{W}_i 、せん断仕事率 \dot{W}_s 、摩擦損失 \dot{W}_f は、一般に次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_i &= \int_V \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}_{eq} dV, & \dot{W}_s &= \int_{\Gamma_s} \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \Delta v_s dS, \\ \dot{W}_f &= \int_{\Gamma_f} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \Delta v_f dA \end{aligned} \right\} (9)$$

ただし、 σ_0 は被加工材の変形抵抗、 $\dot{\epsilon}_{eq}$ は相当ひずみ速度、 Γ_s , Γ_f はせん断境界および摩擦境界、 Δv_s , Δv_f はそれぞれ Γ_s , Γ_f 上での相対すべり速度、 m は摩擦定数、 dS , dA は共に微小面積を表す。

被加工材の塑性流動に伴う全エネルギー消費率 J^* はこれら各仕事率の総和として求められる。

$$J^* = \Sigma \dot{W}_i + \Sigma \dot{W}_s + \Sigma \dot{W}_f \quad (10)$$

この J^* を最小とするダイス寸法その他の加工上の諸元を系統的に求める作業を通じて、最適ダイス形状の探索や加工条件の最適化の実現を図ることができる。

6. 解析手法の応用事例

上記3次元動的可容速度場の表示式は、被加工材の外表面形状 $r_{so}(\psi, y)$ および内表面形状 $r_{si}(\psi, y)$ が与えられれば、直ちに各速度成分の分布を計算できる柔軟かつ汎用性の高い形式を有しており、この速度分布からひずみ速度分布、更には変形仕事率へと容易に計算を進めることができる。

それらはすでに多くの場合について、押し出し加圧力、引抜き応力、製品形状の予測などに用いられ、有用な成果を得ている。その主な事例を列挙すると以下のようになる。

- (1) 直線ダイスによる丸ビレット・角ビレットの矩形棒・線、平角棒・線、多角形棒・線、異形棒・線への押し出し¹⁾。
- (2) 直線ダイスによる丸ビレットのアングル材・溝形材・T形材等各種形材への押し出し^{2)~4)}。
- (3) 偏心直線ダイスによる同心中空丸ビレットあるいは偏心中空丸ビレットの丸管への押し出しおよび引抜き⁵⁾。
- (4) 直線ダイスによる丸・異形クラッドビレットの丸・異形クラッド棒・線への押し出し^{6)~8)}。
- (5) 直線ダイスによる丸多芯クラッドビレットの丸多芯クラッド棒・線および異形多芯クラッド棒・線への押し出し^{7), 8)}。
- (6) ヘリカルダイスによる丸ビレット・丸中空ビレットのヘリカル溝付棒・ヘリカル溝付管への押し出し^{9)~11)}。
- (7) 中実・中空丸ビレットのフィン付棒・管への押し出し^{12), 13)}。

(1)はごく一般的な異形棒・線材の押し出し加工の解析であり、押し出し加圧力や最適ダイス長さを適確かつ効率良く計算し、ダイス設計に有用な知見を広範囲に提供した(図4, 5参照)¹⁾。

(2)は従来、理論的検討が不可能とされてきた各種形材の押し出し加工について、初めて行われた解析であり^{2)~4)}、本解析モデルおよび解析手法の有用性を明らかにしたものである。併せて、押し出し加圧力に与えるダイス形状・寸法の影響などについて極めて興味深い結果を提示し、この解析手法がダイス設計のための有力なツールとなり得ることを立証した(図6, 7参照)。

(3)の事例は、偏肉を有する継目無管を偏心ダイスを用いて押し出すかまたは引抜くことにより、偏肉を矯正し、肉厚偏差の少ない管材を得ることが可能であることを理論的に初めて明らかにしたものである⁵⁾。継目無管の製造分野で長く問題であった偏肉の防止あるいは削減の問題に関連して、各種加工条件が偏肉の増減に与える影響を初めて系統的に明らかにし、かつ、偏肉矯正のための具

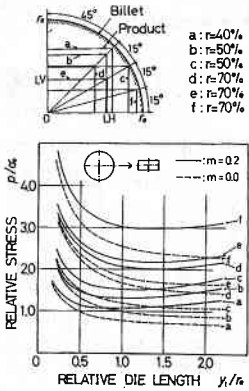


図4 丸ビレットから矩形棒・線への押出しの解析事例

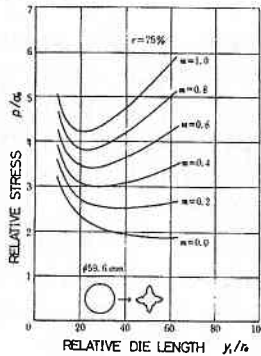


図5 異形棒押出しの解析事例

体的方策を示した。(図8参照)。

(4), (5), は各種クラッド棒・線材の製造技術にかかわる解析事例である。特に, 金属系超伝導線に代表される多芯クラッド棒・線材の引抜き加工を対象としており, 引抜き応力, 製品横断面の形状・寸法, 芯材・スリーブ材の加工限界あるいは破断限界, などを広範囲かつ体系的に解明することに成功している。本解析法の開発により, 加工時の諸特性の検討が可能となり, ダイス設計や工程設計の合理化・最適化が現実のものとなった(図9~11参照)⁷⁾。

なお, これらの問題では, 引抜きまたは押し出し加工に伴うスリーブ材およびコア材の断面形状および寸法の変化を, 解析を通して求めていくことが必要となる。そのため, ダイス出口でのそれらの形状および寸法, あるいはダイス内におけるコア材の外表面形状またはスリーブ

材の内面形状そのものも, 被加工材の全変形仕事率を最小化する際の変数の役割を果たすことになる。この場合のコア材の外表面形状の取り扱い方は, 次節に述べる被加工材のダイキャビティーへの充填の程度を推定する解析の際の被加工材の自由表面の取り扱い方と同じである(図14参照)¹²⁾。

(6)は, 自動車用部品等に見られる外表面上にらせん状の溝または条を有する棒材, あるいは外表面または内表面上に同じくらせん状の溝または条を有する管材の製造方法として採用されている押し出し加工に関する解析事例である(図12参照)⁹⁾。一連の解析を通して各加工条件が押し出し加圧力に与える影響が体系的に解明されると共に, 最適ダイス角や, コンテナの回転やスライドを含む望ましい支持方式などが明らかにされ¹⁰⁾, 当該製品の製造ラインの生産性の向上に大きく貢献した。(図13参照)¹¹⁾。

7. ダイキャビティーへの被加工材の充填限度

押し出し・引抜き加工においては, 被加工材のダイキャビティー(ダイス孔形)への充填の度合いが製品の寸法精度を左右する。また, ダイキャビティーへの充填が未達成となり, 所要の製品断面形状が得られない場合も多い。故に, 被加工材のダイキャビティーへの充填挙動をあらかじめ適確に予測することは, ダイス設計上きわめて重要である。

上述の解析モデルおよび手法は, この問題に対しても有効に適用できる。その具体的な考え方は以下のとおりである¹²⁾。最も単純な事例として, 丸ビレットまたは

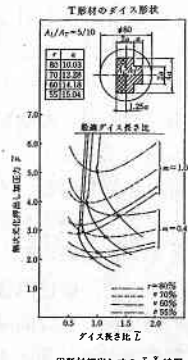
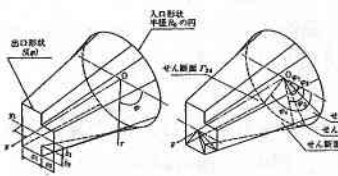


図6 T形材押し出しの解析事例

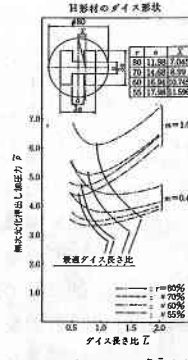
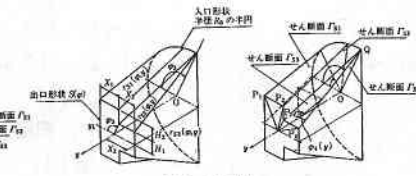
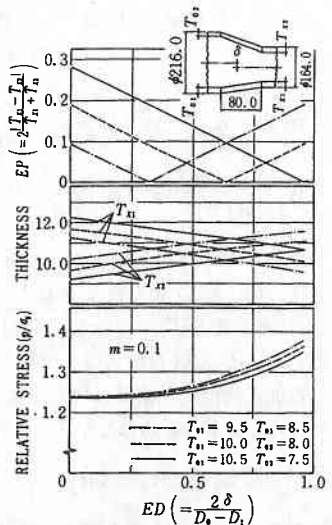


図7 H形材押し出しの解析事例



偏心度と偏肉率の関係に与える素管の偏肉率の影響

図8 偏心ダイスによる偏肉管の押し出しの解析事例

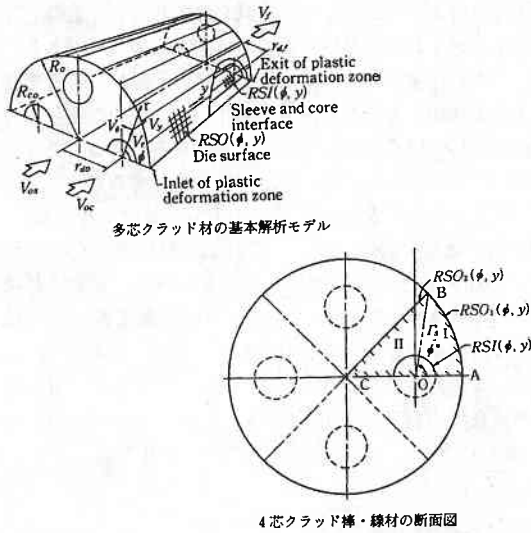


図9 多芯クラッド線の引抜き加工の解析モデル

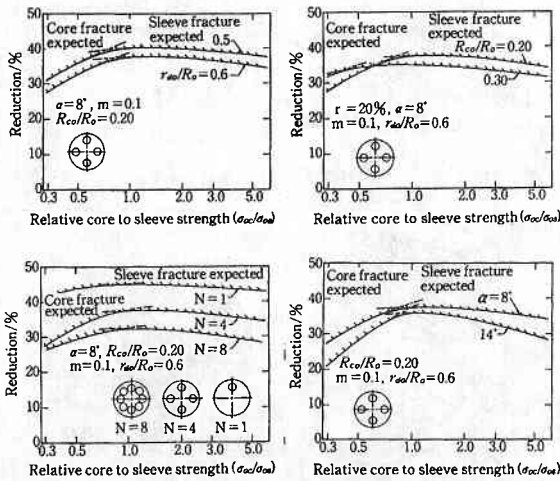
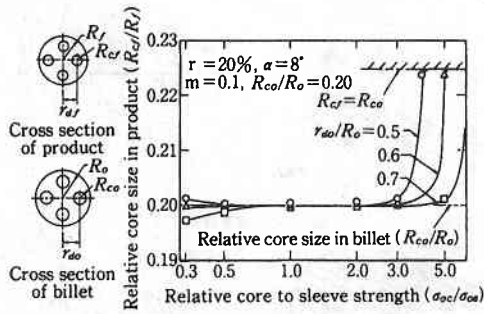


図11 多芯クラッド線の引抜き加工限界の解析例

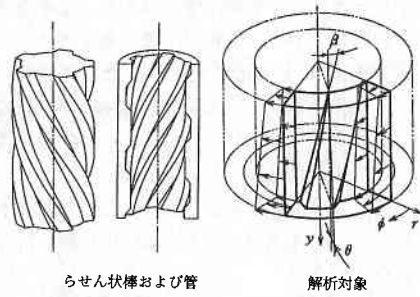
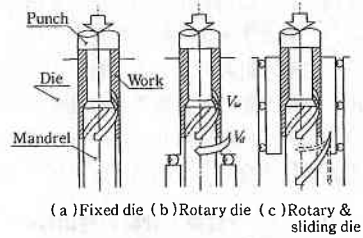


図12 らせん状異形棒・管材の押し出し加工の解析モデル



(a) Fixed die (b) Rotary die (c) Rotary & sliding die

(b) Rotary die (c) Rotary & sliding die

(c) Rotary & sliding die

ねじれ角の相対圧力への影響

図13 らせん状異形溝付管材の押し出し加工の解析事例

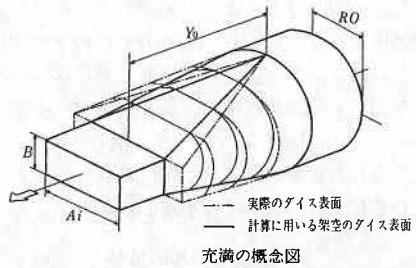


図14 ダイキャビティーへの被加工材の充填限界解析モデル説明図

丸素線から平角棒・線を押出す又は引抜く場合を考える。図14にその概要を示す。破線で示されるダイスを用いて、実線で示されるように丸ピレットまたは丸素棒が平角棒・線へと加工されるが、その際、製品は幅 A_i を有して押出されあるいは引き出される。製品断面の高さ B はダイス開口部(孔形)高さにより規定されているが、ダイスの開口部幅が十分大きい場合には、被加工材はダイキャビティーに充滿せず、製品幅 A_i は開口部幅よりも小さくなる。

この場合、被加工材の一部はダイス面に接触し、その形状はダイス面形状に一致し既知であるが、残りの部分は自由表面となり、その形状は未知である。そこで解析を実行する際には、この自由表面の形状を仮定し、関数表示を行い、これと上述の接触部の形状と併せて用いて速度場とそれに続く計算を進める。自由表面の形状を修正しつつ計算を繰り返し、被加工材の全変形仕事率を最小とする自由表面形状を探索し、得られた最終結果より、被加工材の充滿度すなわち製品横断面形状を求める。

8. フィン付棒・管材の押出し

上述の被加工材のダイキャビティーへの充滿挙動の解析法を用いて、(7)のフィン付棒・管材の押出し加工について多くの解析が行われた¹³⁾。対象となったのは、長手方向に真直ないわゆるラジアル(半径方向)フィンをその外表面または内表面上に有する棒材あるいは管材の押出しである(図15参照)。これらのフィン付棒・管材は、その伝熱特性を高めるために、薄肉かつ高いフィンを多数有することが望ましい。しかしながら、いたずらにダイスやプラグ表面に深い溝(キャビティー)を掘っても、被加工材がそこに流入して高いフィンが形成されとは限らない。

出来得る限り高いフィンを形成するために必要な加工条件、たとえば、ダイス角、リダクション、摩擦条件、素材寸法、等の組合せをあらかじめ知ることは、解析手法を持たない限りほとんど不可能である。幸い、上述の手法を適用することにより、所与の条件の下で期待できるフィンの高さ、あるいはフィン高さを最大にするために必要な加工条件等が比較的容易に予測できる。図16には、外面フィン付棒について、加工条件が最大フィン高さに与える影響を調べた例を示す。これらの結果は、実測値として良く対応することが確認されている。

9. 解析モデルの拡張

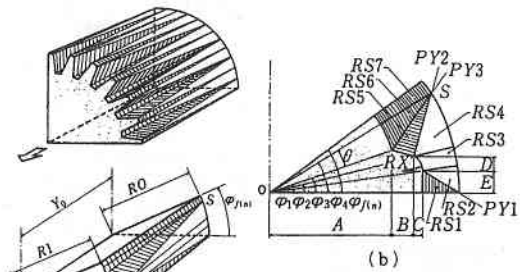
これまで紹介してきた解析事例において用いられてきた(動的可容)速度場は、前もって指摘したように、被加工材の横断面上で、長手(y)方向、すなわち押し・引抜き方向の速度成分 v_y が一様に分布するとの近似に基づくものであった。この近似については、種々の議論

があり得るが、そのような近似を導入しても、実際上有用な知見を数多く得られることは、上述の通りである。

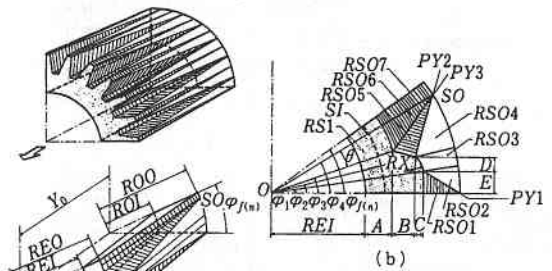
ただし、横断面上での v_y の分布を考慮した解析を要する場合があることも事実であり、そのための速度場の構成式について検討しておくことは重要である。そこで、以下、その考え方と得られた結果を紹介する^{14),15)}。

長手方向速度成分 v_y を2つの成分に分けて考える。

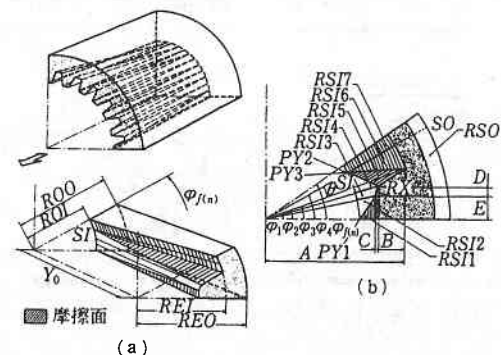
- (1) 平均速度成分 v_{ym} ; これまで用いてきた横断面上での v_y の一様分布の仮定より導かれる。定常流れ状態での各横断面でのその値 $v_{ym}(y)$ と断面積 $S(y)$ との積は体積流量に等しく、一定である。
- (2) 偏差速度成分 Δv_y ; 横断面上に実際に分布している長手方向速度成分 $v_y(r, \psi, y)$ の $v_{ym}(y)$ からのずれ(偏差)を表す。すなわち、次の関係を有する。



フィン付き棒解析モデル



外面フィン付き管解析モデル



内面フィン付き管解析モデル

図15 フィン付棒・管材の押し・引抜き加工の解析モデル

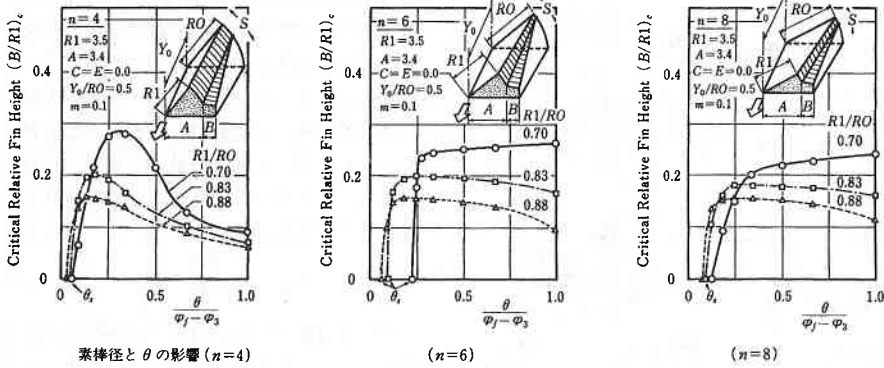


図16 フォン付棒の押し出し加工の解析事例

$$\Delta v_y(r, \psi, y) = v_y(r, \psi, y) - v_{y,m}(y) \quad (11)$$

偏差速度成分 $\Delta v_y(r, \psi, y)$ の値そのものは各横断面上で分布しているが、その横断面上での積分値はゼロとなる。

$\Delta v_y(r, \psi, y)$ の分布形を適宜想定し、体積一定条件およびダイス面あるいはプラグ・マンドレル面上での速度の適合条件を考慮しつつ速度場を構成すると、次式が得られる。

$$v_y(r, \psi, y) = \frac{v_0 \int_{\psi_s}^{\psi_f} \{r_{so}^2(\psi, 0) - r_{so}^2(\psi, 0)\} d\psi}{\int_{\psi_s}^{\psi_f} \{r_{so}^2(\psi, y) - r_{si}^2(\psi, y)\} d\psi} + \frac{2 \int_{\psi_s}^{\psi_f} \int_{r_{si}(\psi, y)}^{r_{so}(\psi, y)} P(r, \psi, y) \cdot r dr d\psi}{\int_{\psi_s}^{\psi_f} \{r_{so}^2(\psi, y) - r_{si}^2(\psi, y)\} d\psi} + P(r, \psi, y) \quad (12)$$

$P(r, \psi, y)$: 任意の C^2 級関数

$$v_\psi(r, \psi, y) = f(r) \cdot \omega(\psi, y) = \frac{-f(r)}{\int_{r_{si}(\psi, y)}^{r_{so}(\psi, y)} f(r) dr} \times \int_{\psi_s}^{\psi_f} \left\{ \int_{r_{si}(\psi, y)}^{r_{so}(\psi, y)} r \cdot \frac{\partial v_y(r, \psi, y)}{\partial y} dr + \frac{\partial r_{so}(\psi, y)}{\partial y} \cdot r_{so}(\psi, y) \cdot v_y(r_{so}(\psi, y), \psi, y) - \frac{\partial r_{si}(\psi, y)}{\partial y} \cdot r_{si}(\psi, y) \cdot v_y(r_{si}(\psi, y), \psi, y) \right\} d\psi \quad (13)$$

$f(r)$: 任意の C^2 級関数

$$v_r(r, \psi, y) = \frac{-1}{r} \int_{r_{si}(\psi, y)}^r \left\{ r \cdot \frac{\partial v_y(r, \psi, y)}{\partial y} + f(r) \cdot \frac{\partial \omega(\psi, y)}{\partial \psi} \right\} dr + \frac{r_{si}(\psi, y)}{r} \cdot \left\{ v_y(r_{si}(\psi, y), \psi, y) \cdot \frac{\partial r_{si}(\psi, y)}{\partial y} + \frac{v_\psi(r_{si}(\psi, y), \psi, y)}{r_{si}(\psi, y)} \cdot \frac{\partial r_{si}(\psi, y)}{\partial \psi} \right\} \quad (14)$$

ただし、 $f(r)$ に対しては、以下の条件が必要である。

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{f(r)}{r} \text{ が収束} \quad (15)$$

上式は中空材を対象とする場合であり、被加工材が中空材の場合は、 $r_{si}(\psi, y) = 0$ とすればよい。

$P(r, \psi, y)$ は横断面上の偏差速度成分 Δv_y の分布形を規定する未知関数であり、速度場の最適化の過程で、 $P(r, \psi, y)$ の形や含まれる係数値等の修正を行いながら、被加工材が消費する全変形仕事率を最小とする $P(r, \psi, y)$ の形を探し、これより予想される速度成分を計算する。

10. 拡張解析モデルの応用事例

押し出し・引抜き加工時に被加工材内部に発生する不均一なメタルフロー、押し出しに伴う製品先端部の形状不整、さらに、被加工材内部の塑性変形域の広がり、等について細かく知るためには、上述の拡張速度場モデルを用いて、長手方向速度成分 v_y の3次元の分布を考慮した解析を行うことが不可欠である。

図17は、丸ピレットから丸・角部を有する異形棒を押し出す場合にみられる先端部の形状不整について、この拡張モデルによる予測と実測値とを比較した結果である。両者は良い一致を示しており、解析モデルおよび手法の妥当性を知ることができる¹⁴⁾。

図18は同じ押し出し加工について、ダイスベアリング内における被加工材の塑性変形域の広がりについて検討した結果を示す。これは、ベアリング内での偏差速度成分 Δv_y について調べ、横断面上で $\Delta v_y \neq 0$ である限り塑性変形が起きていると考えられることから、押し出しストロークの増加に伴って変化する $\Delta v_y \neq 0$ となる領域長さ Y_2 を計算した結果である。この Y_2 は、ベアリングの最小必要長さに対応しており、仮に Y_2 よりベアリングが短いと、ダイスから流出後も製品内部で $\Delta v_y \neq 0$ となり、製品の振れや曲がりの発生をもたらす。このような意味

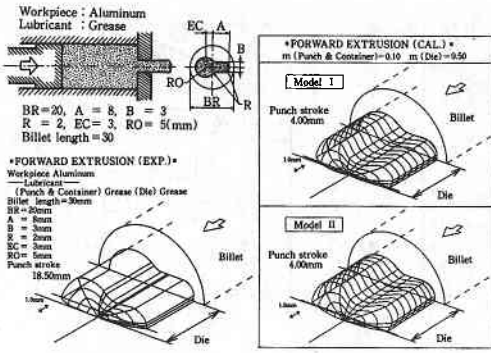


図17 異形棒押し出し時の製品先端の非正常変形の解析事例

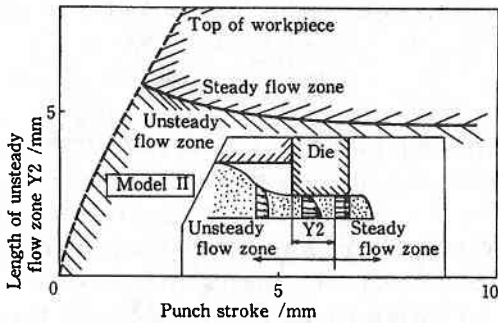


図18 ダイス内の非正常変形域長さの解析事例

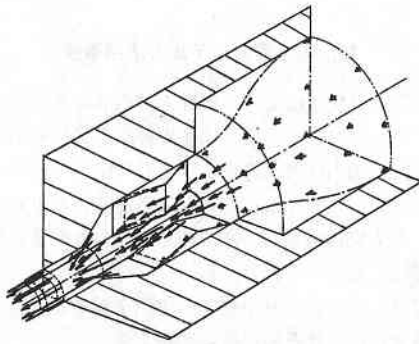


図19 4本足ブリッジダイス内の速度分布

から、 Y_2 の値の予測はダイス設計上きわめて重要であり、このような結果を導き得ることは、本解析モデルの大きな成果の一つである。

図19は、ブリッジダイスにより、丸ビレットを丸管へと押し出す場合の拡張モデルによる解析結果の一例であり¹⁵⁾、ブリッジを回避し、再度合流しつつダイス・マンドレル間へ流入していく被加工材の流動状況が適確に

とらえられていることがわかる。ダイス・マンドレル・被加工材がきわめて複雑な幾何学的関係を有するこのような押し出し加工プロセスについても、若干の手間はかかるものの、被加工材の外表面・内表面形状を数式表示または数値情報表示すれば、既報の方程式群を用いて速度場とそれに続く一連の計算が、基本的には問題なく可能である。以上紹介した解析モデル・手法の柔軟性・汎用性がここでも確認できる。

11. 結 言

本稿では、筆者らが研究を進めてきた押し出し・引抜き加工用の汎用性の高い解析手法の構成とその応用事例について紹介した。開発した解析モデルおよび手法は、きわめて柔軟性に富んでおり、およそあらゆる種類の押し出し・引抜き加工に適用可能である。また、解析を通して得られる結果も、加工力や引抜き加工限界等の算出のみならず、ダイス孔やプラグ・マンドレルキャビティへの被加工材の充満限界、製品断面の形状・寸法および精度、製品の曲がり、振れ等の予測、さらにダイス・プラグ・マンドレルの最適形状・寸法、など多岐にわたっている。このような意味から、本解析手法は、今後の押し出し・引抜き加工技術の発展のために大いに活用できると考えられ、その効果が期待される。

(1993年3月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・岸 秀敏：31回塑加連講論，(1980-11)，216.
- 2) Kiuchi, M., Kishi, H. & Ishikawa, M.: Proc. 22nd Jnt. Mach. Tool Des. Cont., (1981), 523.
- 3) 木内 学・岸 秀敏・石川政和：塑性と加工，24-266 (1983), 290.
- 4) 木内 学・石川政和：塑性と加工，24-270 (1983), 722.
- 5) 木内 学・石川政和：生産研究，33-12 (1987), 473.
- 6) 木内 学・徐瑞坤：生産研究，40-9 (1988), 425.
- 7) 木内 学・徐瑞坤：生産研究，40-10 (1988), 468.
- 8) 木内 学・徐瑞坤：生産研究，41-3 (1989), 193.
- 9) 木内 学・村松 勁・今井敏博：第37回塑加連講論，(1986-11), 89.
- 10) 木内 学・村松 勁・今井敏博：第62回春塑加講論，459.
- 11) 木内 学・村松 勁・今井敏博：第38回塑加連講論，(1987-11), 575.
- 12) 木内 学・飯島茂男・星野倫彦：生産研究，38-7 (1986), 302.
- 13) 木内 学・飯島茂男・星野倫彦：塑性と加工，29-325 (1988), 151.
- 14) 木内 学・星野倫彦：塑性と加工，30-342 (1989), 975.
- 15) 木内 学・星野倫彦：第63回春塑加講論，(1989), 95.