

異形材の押し出し加工の理論

Theory of Non-Axisymmetric Extrusion

木内 学*

Manabu KIUCHI

上界定理を応用し、非軸対称断面を有する各種棒・線材・形材など、いわゆる異形材の押し出し・引抜き加工に関し、ダイス内の材料の塑性流動や加工力、あるいは最適ダイス形状ならびに寸法などを、総合的に解析し得る一般化された計算手法を開発し、これを用いて矩形・L形・T形・H形材など種々の異形材の、最適加工条件等について検討した結果について報告する。

1. ま え が き

金属加工業の各分野において、各種鋼材・合金鋼をはじめ、銅・アルミニウムおよびそれらの合金、などの非軸対称断面を有する棒材・線材・形材（以下、これらを総称し異形材と呼ぶ）は、極めて広範囲な用途に供されている。それらの一部は圧延加工により製造されているが、その多くは押し出し加工または引抜き加工により製造されている。近年、これら異形材に対する工業的な需要の増大ならびに用途の多様化と、加工技術としての生産性の高さ、ならびに加工機械・生産設備の簡便さことから、異形材の押し出し（引抜き）加工に関する関心がしだいに高まりつつある。たとえば、円柱ピレットからの短形棒材への押し出し加工は、非常に広く行われており、アルミ・アルミ合金・銅・銅合金・各種鋼材・合金鋼などに適用され、その製品は自動車・電気機器・各種機械・住宅機器等に利用されている。

以下、本稿では押し出し加工を中心に述べる。工業的に用いられている押し出し加工は、前方押し出し・後方押し出し・静水圧押し出しなどいくつかの形式に分類されるが（図1参照）、いずれの場合にも、ピレットと呼ばれる素材片をコンテナの中に入れ、ラムまたは静水圧などを使ってピレットに加圧力を与え、所要の形状寸法を有するダイスの穴からピレットすなわち材料を流出させ、所要の一端断面を有する長尺の製品を得る。しかしながら、このような一見単純に見える押し出し加工においても、ダイス内における材料の塑性流動は複雑であり、特に非軸対称性を有する異形材の場合には、材料の流れは長手（押し出し）方向軸まわりの回転速度成分を有し、非常に難解であって、その挙動を適確に把握するのは容易ではない。したがってまた、所要の製品を得るための適切な加工条件あるいは適切な工具形状・寸法等を見出すことも難しく、これらの問題に当たっては、ほとんどの場合、経験的知識に頼っているのが実情である。

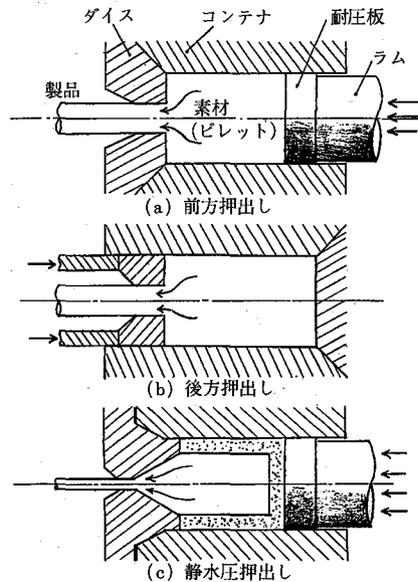


図1 押し出し加工法の概要

丸棒・丸線あるいは円管の押し出し（引抜き）加工の研究に比較して、異形材の押し出し（引抜き）加工に関する理論的研究は非常に少なく、その内容も、総合的・体系的なものはみられず、限定的・部分的なものがほとんどである。たとえば、V. Nagpal と T. Altan¹⁾は、流れ関数を導入して円柱ピレットから楕円棒を押し出す際の加工力の計算を行い、B. B. Basily と D. H. Sansom は丸棒から正方形棒を引き抜く場合の上界解を求めているが、これらは特定の断面形状を有する製品の押し出しに関する解析であり、その解析手法の構成には汎用性が欠けている。D. Y. Yang と C. H. Lee²⁾は、変形の過程で素材の断面形状が相似性を保ちつつスパイラル状に加工を受ける場合のダイス内における素材の流れを示しうる動的相容速度場を提案し、R. Prakash と O. M. Khan³⁾は同様に多角形断面材が断面形状の相似性を保ちつつ押し出し・引抜き加工を受ける場合の上界解を示した。これら

* 東京大学生産技術研究所 第2部

の解析も特殊な事例に関する研究である。B. Avitzur⁴⁾は、座標変換の手法を利用して、円柱ビレットから正方形棒を押し出す場合の上界解を求めており、S. Hoshino と S. Cunasekera⁵⁾も円柱ビレットから正方形棒を押し出す場合の上界解を求めている。総じてこれらの研究は、いずれも異形材の押し出し・引抜き加工の非常に限定された分野を対象としており、特定の断面形状を対象とする部分的・個別的なものである。

筆者らは^{6),7),8),9)}、この異形材の押し出し・引抜き加工の分野について、総合的・体系的な検討を可能とする汎用的な手法の開発を進め、いわゆる上界法を用いて、汎用性を有する解析手法の開発に成功し、これを用いて種々の場合について解析・検討を進めた結果、従来得られなかった多くの知見が得られた。すなわち、この解析手法により円柱ビレットまたは棒から矩形・正方形・六角形・歯形断面を有する棒・線材へ押し出し加工を行う場合、あるいはまた、正方形・矩形ビレットまたは棒から矩形・正方形・六角形断面と有する棒・線材へ押し出し加工を行う場合などについて解析を進め、加工力や最適ダイス形状について多くの成果を得て、この解析手法の有効性を明らかにした。さらに解析手法を拡張して、丸棒あるいは円柱ビレットから、L形・T形・H形断面を有する形材（以下、L形材、T形材、H形材と呼ぶ）を押し出す場合についても解析を進め多くの有用な結果を得た。このような形材の押し出し加工については、これまで体系的に解析が行われた例は無く、本研究によって初めて理論的なアプローチの可能性が示された。以下、本稿では異形材の押し出し加工について、筆者らが行った研究の概要について述べる。

2. 3次元動的可容速度場の構成

非軸対称押し出し加工時のダイス内の素材の流動は、長手（押し出し）方向軸まわりの回転速度成分を有するため、一般にその動的可容速度場の定式化が困難であるとされてきたが、筆者らは以下に示す仮定ならびに手順を用いてこれを行った。

図2には円柱座標系 (r, φ, y) における異形材の押し出し加工時の幾何学的関係を示す。長手方向すなわち押し出し方向を y 軸とし、回転方向を角度 φ で表す。ダイス面の形状は一般的に関数 $r_s(\varphi, y)$ で表されるものとし、ダイスの入口断面（＝素材の横断面）および出口断面（＝製品断面）は y 軸に垂直とし既知であるものとする。ダイス内の材料の各方向速度成分を v_r, v_φ, v_y で表し、ダイス入口からの流入速度を v_0 （断面内で一様）とする。

3次元動的可容速度場（以下単に速度場と記す）の定式化に当たって、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・出口の y 軸に垂直な断面が剛塑性境界である。〔仮定2〕：ダイス内の y 軸に

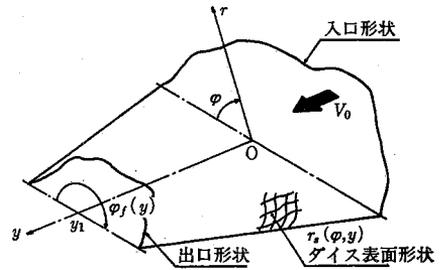


図2 円柱座標系におけるダイス形状の一般的表示

垂直な断面上で、長手方向の速度成分 v_y は一様である。〔仮定3〕：回転方向の速度成分 v_φ は半径方向に線形分布し、 $v_\varphi(r, \varphi, y) = r \cdot \omega(\varphi, y)$ のように変数分離形の関数表示が可能である。

〔仮定2〕について種々の議論があり得るが、素材や製品が真直である限り、入口・出口境界で v_y が一様でなければならないという境界条件を考慮しつつ、全体的な解析の簡略化を図り速度場の定式化を実現するためには、この仮定は必須のものである。以上の仮定他には、速度場に関する制約条件としては、体積一定の条件、ならびにダイス面上における境界条件がある。

ダイス内における材料の塑性流動は、体積一定の条件を満足することから、各速度成分の間には次式が成立する。

$$\frac{\partial v_r(r, \varphi, y)}{\partial r} + \frac{1}{r} v_r(r, \varphi, y) + \frac{\partial v_y(r, \varphi, y)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi(r, \varphi, y)}{\partial \varphi} = 0 \quad (1)$$

また、境界条件として、ダイス面に接している材料はダイス面の形状 $r_s(\varphi, y)$ に沿って流動しなければならないことから、次の幾何学的関係が成立する。

$$v_r(r_s(\varphi, y), \varphi, y) = v_\varphi(r_s(\varphi, y), \varphi, y) \times \frac{1}{r_s(\varphi, y)} \frac{\partial r_s(\varphi, y)}{\partial \varphi} + v_y(y) \frac{\partial r_s(\varphi, y)}{\partial y} \quad (2)$$

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くことが可能であり、その結果のみをまとめて表示すると以下ようになる。なお解析の手順については文献(6), 9)を参照されたい。

$$v_y(r, \varphi, y) = v_y(y) = \frac{v_0 \int_0^{\varphi, (0)} r_s^2(\varphi, 0) d\varphi}{\int_0^{\varphi, (y)} r_s^2(\varphi, y) d\varphi} \quad (3)$$

$$v_\varphi(r, \varphi, y) = r \cdot \omega(\varphi, y) = \frac{-r}{r_s^2(\varphi, y)} \int_0^\varphi \frac{\partial}{\partial y} \{v_y(y) \cdot r_s^2(\varphi, y)\} d\varphi \quad (4)$$

$$v_r(r, \varphi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial v_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\varphi, y)}{\partial \varphi} \right\} \quad (5)$$

ただし、ダイス入口の y 座標を $y=0$ 、ダイス出口で $y=y_1$ とする。またここで解析の対象としているダイス内の材料の変形域の回転 (φ) 方向への広がり $\varphi=0 \sim \varphi_f(y)$ の範囲である。 $\varphi=0, \varphi=\varphi_f(y)$ は、非軸対称断面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、この場合材料はこの境界面を越えて流れることはないとして速度場の構成が行われている。式(4)は $\varphi=0, \varphi=\varphi_f(y)$ においてそれぞれ次式

$$\left. \begin{aligned} \varphi=0; v_\varphi(r, 0, y) &= 0 \\ \varphi=\varphi_f(y); v_\varphi(r, \varphi_f(y), y) &= r \frac{\partial \varphi_f(y)}{\partial y} \cdot v_y(y) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となり、式(6)は上述の境界条件が満たされていること、すなわち、それぞれの境界面上で材料が境界面に沿う方向に流れていることを表わしている。

3. 塑性流動に伴うエネルギー消費率

円柱座標系において、ダイス内の材料の任意の点におけるひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_{rr}, \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{r\varphi}, \dot{\epsilon}_{\varphi y}, \dot{\epsilon}_{yr}$) は、前節の速度分布より一般にひずみの定義式を用いて求められるが、式(3)、(4)、(5)から判るように、速度の各成分はダイス面形状を表す関数 $r_s(\varphi, y)$ が与えられると全て定まる。したがって同様の意味で、ひずみ速度の各成分あるいはそれらより算出されるエネルギー消費率は、全て関数 $r_s(\varphi, y)$ の1階微分・2階微分あるいはそれらの積分によって表されることが判る。

材料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。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_i &= \int_V \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi} dV, \quad \dot{W}_s = \int_{\Gamma_s} \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \Delta v_{rs} dS, \\ \dot{W}_f &= \int_{\Gamma_f} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \Delta v_{rf} \cdot dA \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、 σ_0 は材料の変形抵抗、 $\dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}$ は相当ひずみ速度、 $\Gamma_s \cdot \Gamma_f$ はせん断境界・摩擦境界、 $\Delta v_{rs} \cdot \Delta v_{rf}$ はそれぞれ $\Gamma_s \cdot \Gamma_f$ 上での相対すべり速度、 m は摩擦定数、 $dS \cdot dA$ は共に微小面積を表す。

一般にダイス入口・出口の剛塑性境界は速度不連続面となり Γ_s に相当する。そこでの相対すべり速度 Δv_{rs} は次式で求められる。

$$\Delta v_{rs} = (v_\varphi^2(r, \varphi, y^*) + v_r^2(r, \varphi, y^*))^{1/2}, \quad (y^*=0, y_1) \quad (8)$$

さらにダイス面は摩擦境界 Γ_f であり、相対すべり速度 Δv_{rf} は次式で計算される。

$$\Delta v_{rf} = \{v_y^2(y) + v_\varphi^2(r_s(\varphi, y), \varphi) + v_r^2(r_s(\varphi, y), \varphi, y)\}^{1/2} \quad (9)$$

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

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

実際に $\dot{W}_i, \dot{W}_s, \dot{W}_f$ を求めるに際しては、必要に応じて数値積分法を用いる。そしてこの 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、最適ダイス形状や加工条件の最適化について明らかにすることができる。

4. 材料内部の速度不連続面

丸棒または円柱ピレットから矩形・多角形などの単純な異形棒・線材、あるいはL形・T形・H形材等の一般形材を押し出す場合のように、ダイス横断面のプロファイルが特異点を有する場合には(図3参照)、中心軸とこれら特異点を含む面で材料を複数箇の領域に分割して扱う必要があり、この分割面は内部的な速度不連続面、すなわちせん断面 Γ_s となる。もちろんこの分割面に垂直な速度成分 v_φ については速度の連続性が保たれる必要があり、第2節で示した速度場の構成方法を領域 I, II, III, ... と順次適用して各領域での速度場を求める際に、この速度の連続条件を用いて、あるいは別の表現によればこの連続条件を満足するように速度場を定めることができる。この分割面上での相対すべり速度は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta v_{rs} &= (\Delta v_r)_{rs} = |v_r(r, \varphi^*+0, y) - v_r(r, \varphi^*-0, y)| \\ &= \left| -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial \omega(\varphi^*+0, y)}{\partial \varphi} - \frac{\partial \omega(\varphi^*-0, y)}{\partial \varphi} \right\} \right| \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $\varphi^* = \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i$ であり各分割面の位置を表す。

5. ダイス面の関数表示と材料の分割

実際にダイス形状の例を図4、図5、図6に示す。これらはいずれもいわゆる直線ダイスである。直線ダイスの場合、ダイス面の形状関数 $r_s(\varphi, y)$ は入口の断面形状(この場合、素材(丸棒)の断面形状に等しい)および出

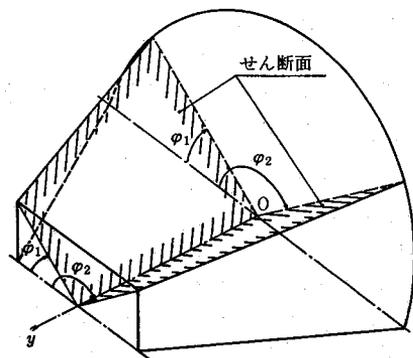


図3 材料内部のせん断面(速度不連続面)

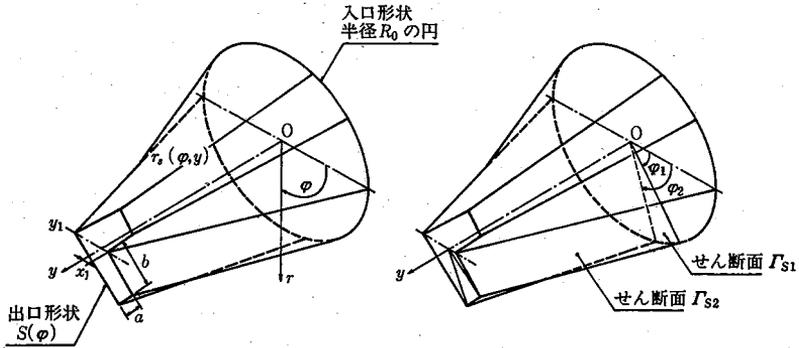


図4 L形材のダイス形状(解析例-1)

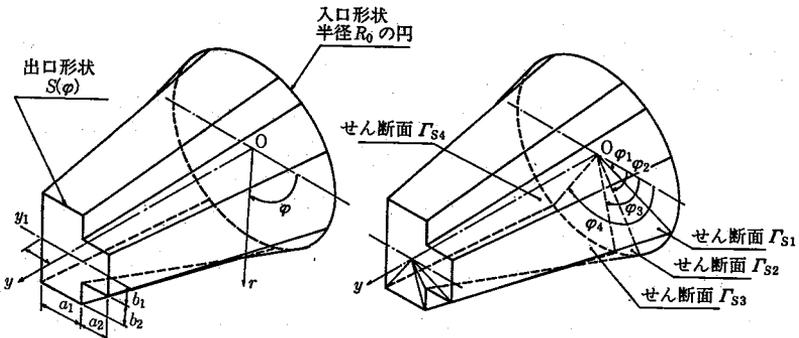


図5 T形材のダイス形状(解析例-2)

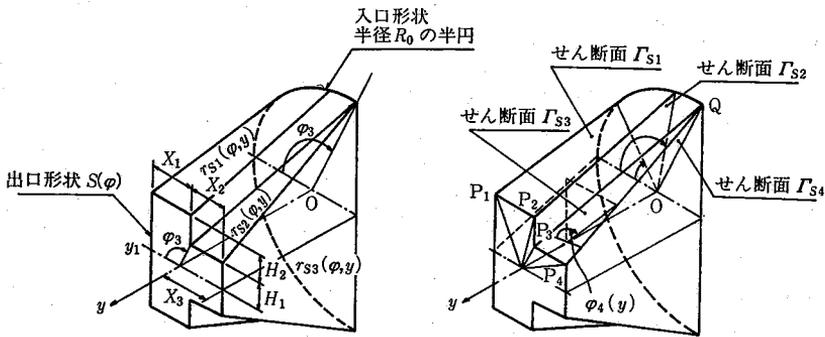


図6 H形材のダイス形状(解析例-3)

口の断面形状が与えられると、一般に次式で表される。

$$r_s(\varphi, y) = \frac{S(\varphi) - R_0}{y_1} y - R_0 \quad (12)$$

ただし、 $S(\varphi)$ は出口の断面形状を表す関数であり、 R_0 は素材(丸棒)の半径、 y_1 はダイス入口を $y=0$ とするときの出口の y 座標、すなわちダイス長さに相当する。

図4に示す上下等価なL形材の場合、出口断面の各頂点はそれぞれ上述の特異点となるので、計算に際してはこれらの特異点と y 軸を含む面でダイス内の材料を上下それぞれ3箇の領域(上下非対称の場合は全体を6箇

の領域)に分割して扱う。この場合の $S(\varphi)$ は図中に示す記号を用いて次式で表される。

$$S(\varphi) = \left. \begin{aligned} &x_1 / (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ &: 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\ &= (\sqrt{2} b + x_1) / (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ &: \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 \\ &= (\sqrt{2} a - x_1) / (\sin \varphi - \cos \varphi) \\ &: \varphi_2 \leq \varphi \leq \pi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同様に図5に示すT形材の場合は材料を5箇の領域に分割して扱う。この場合の $S(\varphi)$ は図中の記号を用い

て次式で表される。

$$\left. \begin{aligned}
 S(\varphi) &= (a_1 + a_2 - a_3) / \cos \varphi & : 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\
 &= (b_1) / \sin \varphi & : \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 \\
 &= (a_1 - a_3) / \cos \varphi & : \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_3 \\
 &= (b_1 + b_2) / \sin \varphi & : \varphi_3 \leq \varphi \leq \varphi_4 \\
 &= (-a_3) / \cos \varphi & : \varphi_4 \leq \varphi \leq \pi
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

H 形材のような場合には多少特別な配慮が必要となる。すなわち、 y 軸を H 形断面の中心に設定し、上述の手法に基づいて材料の分割を行おうとすると、図 7 に示すように死角に入る部分が発生する。このため、H 形材の対称面でダイスならびに材料全体を 2 分し、半円形断面の素材から H 形材の半分の形材（みかけ上 T 形材に等しい）を押し出す場合を考え、図 6 に示すように座標軸を設定して特異点に対応する材料の分割を行う。ただしこの場合、分割面 Γ_{s3} がダイス出口断面の特異点 P_3 と素材の半円形断面の特異点 Q とを含むように y 軸の位置を定める。さらに全体を 2 分した H 形材の対称面は、材料内部の変形あるいは速度場の対称面でもあるので、解析の簡略化のため、この対称面と各領域への分割面とはダイス面上においてのみ交ることが許されると考えておく。すると図 6 において分割面 Γ_{s1} , Γ_{s2} , Γ_{s3} は平面であるが、第 IV 領域と第 V 領域を分ける分割面 Γ_{s4} は y 軸方向にねじれた曲面となることに注意されたい。この場合の $S(\varphi)$ は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned}
 S(\varphi) &= (X_1 + X_2 - X_3) / \cos \varphi & : 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\
 &= (H_1 + H_2) / \sin \varphi & : \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 \\
 &= (X_1 - X_3) / \cos \varphi & : \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_3 \\
 &= H_1 / \sin \varphi & : \varphi_3 \leq \varphi \leq \varphi_4(y)
 \end{aligned} \right\}$$

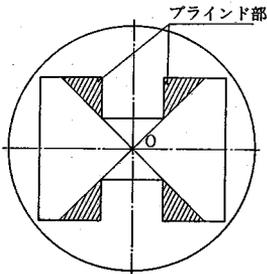


図 7 H 形材の場合の材料の分割

この分割された H 形材の場合のダイス面ならびに対称分割面の形状をまとめて表示すると次式となる。

$$\left. \begin{aligned}
 r_s(\varphi, y) &= \{S(\varphi) - P(\varphi)\} \frac{y}{y_1} + P(\varphi) \\
 &: 0 \leq \varphi \leq \varphi_3 \\
 &= \left\{ (H_1 - R_0) \frac{y}{y_1} + R_0 \right\} / \sin \varphi \\
 &: \varphi_3 \leq \varphi \leq \varphi_4(y) \\
 &= -X_3 / \cos \varphi \\
 &: \varphi_4(y) \leq \varphi \leq \pi
 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ただし $P(\varphi)$ は素材の断面形状であり次式で示される。

$$\left. \begin{aligned}
 P(\varphi) &= -X_3 \cos \varphi + \sqrt{R_0^2 - X_3^2 \sin^2 \varphi} \\
 &: 0 \leq \varphi \leq \varphi_3 \\
 &= -X_3 / \cos \varphi \\
 &: \varphi_3 \leq \varphi \leq \pi
 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

また分割面 Γ_{s4} のねじれを表す角度 $\varphi_4(y)$ は次式となる。

$$\varphi_4(y) = \tan^{-1} \left[- \left\{ (H_1 - R_0) \frac{y}{y_1} + R_0 \right\} / X_3 \right] + \pi \quad (18)$$

6. 計算結果ならびに考察

以上、L 形材・T 形材・H 形材の各場合を例にとり、ダイスの入口・出口の断面形状、ひいてはダイス面の形状の関数表示について説明した。このようなダイス面形状 $r_s(\varphi, y)$ の表示式を用いて速度場・ひずみ速度の各成

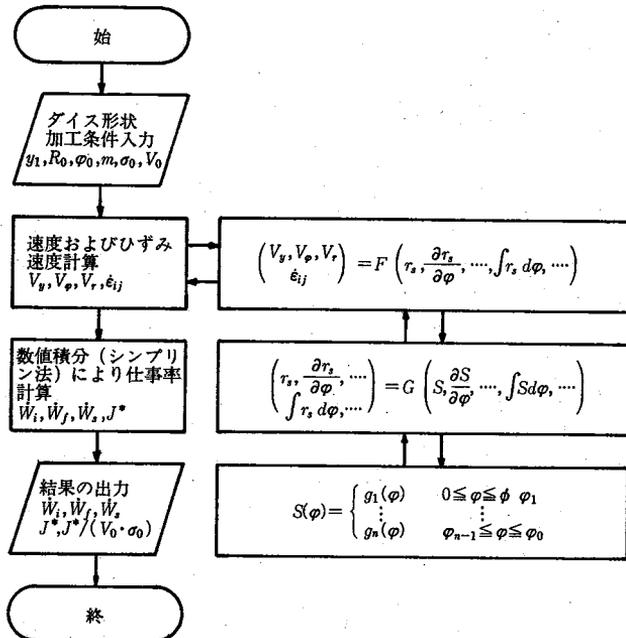


図 8 計算の流れ図

分・各変形仕事率など、解析上の諸元が既述の手続きに従って計算できる。計算の流れの概要を図8に示す。以下得られたいくつかの結果について述べる。図中 r は減面率、 m は摩擦定数を表し、 A_T はダイス出口の全断面積を表す。ところで以下の図で円柱ピレットの中心軸と y 軸とを一致させた場合に、この y 軸を含む垂直面によって分けられたダイス出口断面のうち、図で左側の面積を A_L で表す。さらに図に示すダイス長さ比 \bar{L} は、ダイス長さ L とピレットの半径 R_0 の比として定義する。押しし加圧力 P は素材の変形抵抗 σ_0 で無次元化した値 \bar{p} で表す。

図9は、丸棒から正方形棒を押し出す場合の、ダイス半角 α_c と無次元化押し加圧力 \bar{p}/σ_0 との関係について、筆者らの手法による計算結果⁷⁾と Avitzur らの結果⁴⁾とを比較した図である。念のために行った丸棒から丸棒を押し出す場合については、両者の結果は完全に一致している。丸棒から正方形棒を押し出す場合については、筆者らの計算結果に比して Avitzur らの結果はかなり大となっており、筆者らの解析法が Avitzur らの方法に比較して優位にあることが判る。この理由として、Avitzur らは動的可容速度場を関数表示し切るためにかかなり無理な近似を導入しているのに対し、筆者らは速度場の表示を無理のない一般形として導き、そのままの形でエネルギー消費率の計算式を導く方法を考案したこと、すなわち、与えられたダイスの形状・寸法を表す関数式の微分形・積分形を組み合わせることにより、動的可容速度場はもちろん全変形仕事率を、無理な近似や省略をする

ことなく、直接的に求める解析手法の開発に成功したことが考えられる。図10は同じく丸棒から正方形棒を押し出す場合について、筆者らの計算結果⁷⁾と Hoshino らの結果⁵⁾を比較したものである。横軸にはダイス長さ y_1 を素材半径 r_0 で割った相対ダイス長さ y_1/r_0 を示してある。この場合両者の結果はほとんど一致しており、問題にする程の差異はない。ただし Hoshino らの解析法はその適用範囲が丸棒から正方形棒の押し出しの場合に限定されているのに対して、筆者らの方法には汎用性があり、種々の場合に適用できる。

以上の比較検討により、筆者らの解析手法が妥当なものであると考えられるに至った。そこでこの解析手法を用いて一連の数値解析を行ったので、以下その代表的な例のいくつかを示す。

図11は、丸棒(円柱ピレット)から種々の断面形状・寸法を有する矩形棒を押し出す場合の無次元化押し加圧力 $\bar{p}(p/\sigma_0)$ とダイス長さ比 $\bar{L}(y_1/r_0)$ の関係を示す。図より、減面率 r ・摩擦定数 m の増加に伴う押し加圧力の増加の他に、同一減面率であっても製品断面の縦横比が増すほど加圧力が増す傾向があることが判る。これは、製品断面が扁平化するほど、ダイス内部の素材の流れに軸まわりの回転速度成分の占める割合が増し、内部的なせん断仕事率が増すことによるものであるが、定量的にその傾向が明確にとらえられている。また各場合について最適ダイス長さなども容易に知り得る。なおこれらの場合、いずれも矩形の頂点と中心軸を結ぶ面が内部的な速度不連続面となっていることに注意されたい。

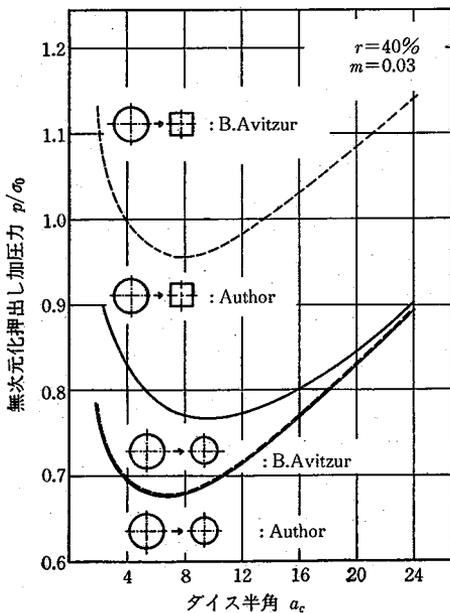


図9 丸棒から正方形棒を押し出す場合のダイス半角と押しし加圧力に関する解析結果の比較

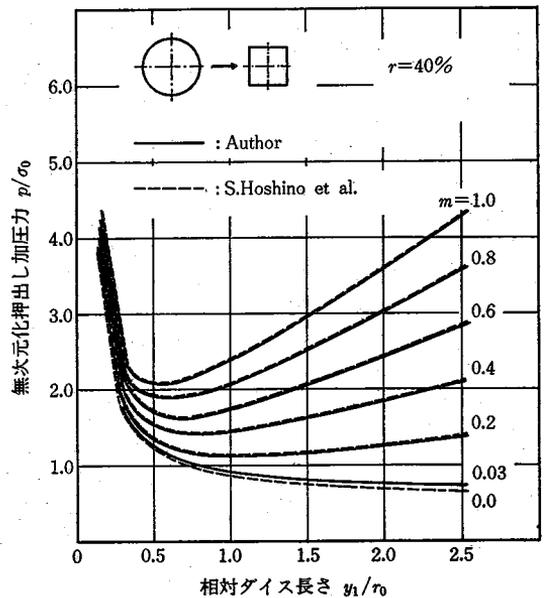


図10 丸棒から正方形棒を押し出す場合のダイス長さ y_1/r_0 と押しし加圧力に関する解析結果の比較

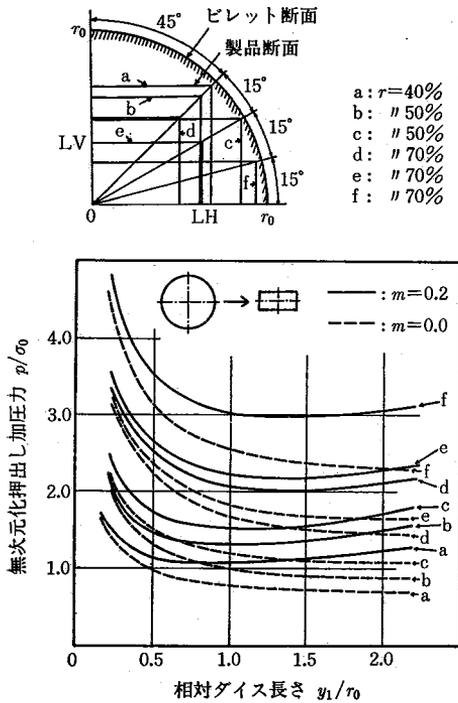


図11 丸棒（ビレット）から各種正方形・矩形棒を押し出す場合のダイス長さとして押し出し加圧力の関係

図12, 図13は, 正方形棒から六角形棒・各種の矩形棒を押し出す場合, あるいは矩形棒から各種の矩形棒を押し出す場合の \bar{L} と $\bar{L}(y_1/r_0$ または y_1/x_0 : 12 図参照) の関係を示す. 図より, 素材と製品の断面形状が相似の場合の押し出し加圧力が最低であり, 相似性がなくなるに当たって加圧力が増すことが判る. これらの計算結果も従来解析的手法によっては得られなかったものであるが, 本解析手法により容易に計算できるようになったことに大きな意義がある.

図14は円柱ビレットからL形材を押し出す際の, ダイス長さ比 \bar{L} と無次元化押し出し加圧力 \bar{p} の関係を, 種々の減面率 r や摩擦定数 m の場合について計算した結果である. 図から明らかのように, 各場合について \bar{p} を最小化する \bar{L} の最適値 ($\bar{L})_{opt}$ が存在することが判る. 図中 ($\bar{L})_{opt}$ の変化を実線で示してあるが, r が大なるほど, また m が小さいほど, ($\bar{L})_{opt}$ は大きくなることが判る. 図15は, このL形材の押し出しについて, ダイスの出口断面の y 軸 (または y 軸を含む垂直面) に対する位置を変化させた場合の最小無次元化押し出し加圧力 ($\bar{p})_{min}$ と ($\bar{L})_{opt}$ の変化を調べた結果である. 図より ($\bar{p})_{min}$ はダイスの出口断面において $A_L/A_T=3.5/10$ なる関係が満足される近傍において最小の値を示すことが判る. これらの結果は, ダイスの設計に対して重要な指針を与えることになる.

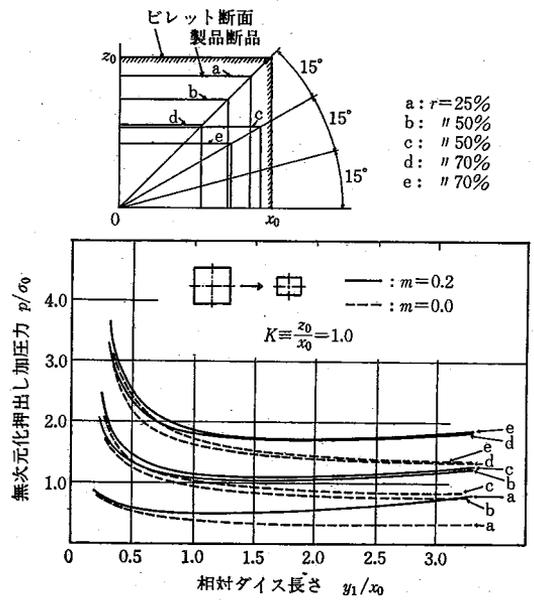


図12 正方形棒から正方形・矩形棒を押し出す場合のダイス長さとして押し出し加圧力の関係

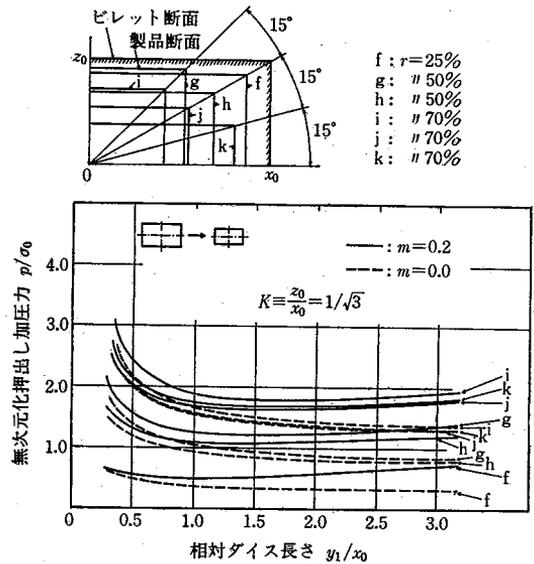


図13 矩形棒から正方形・矩形棒を押し出す場合のダイス長さとして押し出し加圧力の関係

図16は円柱ビレットからT形材を押し出す際の \bar{L} に対する \bar{p} の変化を示す. r や m が異なる各場合について ($\bar{p})_{min}$ を与える最適ダイス長さ比 ($\bar{L})_{opt}$ が存在することが判り, 図にはこのような加工条件の変化による ($\bar{L})_{opt}$ の変化を実線で示している. 図17はダイス出口断面の y 軸に対する位置を表す因子 A_L/A_T を変化させた場合の ($\bar{p})_{min}$ ならびに ($\bar{L})_{opt}$ の変化をみた結果である.

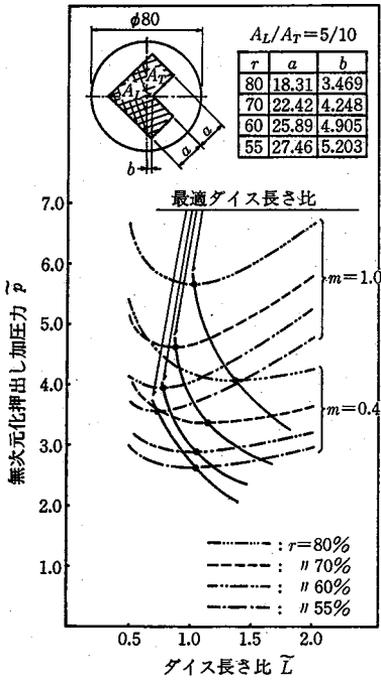


図14 L形材押し出し時の無次元化押し出し加圧力 \bar{p} とダイス長さ比 \bar{L} との関係

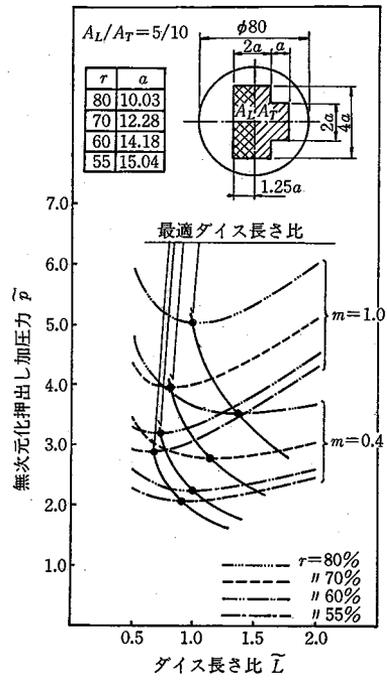


図16 T形材押し出し時の \bar{p} - \bar{L} 線図

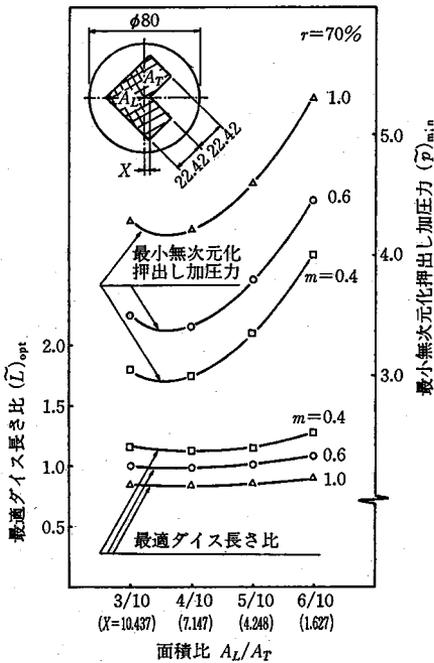


図15 L形材押し出し時にダイス出口断面の面積比 A_L/A_T が $(\bar{p})_{min}$, $(\bar{L})_{opt}$ に与える影響

図よりT形材では $A_L/A_T=5.5/10$ の近傍で $(\bar{p})_{min}$ が最も小さくなることが判り、これまたダイス設計上極めて重要な情報が得られる。

図18は円柱ピレットからH形材を押し出す場合の \bar{L} と \bar{p} の関係を、 r や m が異なる種々の場合について調べた結果である。L形材、T形材の場合と同様の結果が示されており、 $(\bar{p})_{min}$ あるいは $(\bar{L})_{opt}$ の値が容易に計算できることが判る。

7. まとめ

本稿においては、上界法を用いて矩形・多角形・L形・T形・H形材等いわゆる異形材の押し出し(引抜き加工)を解析する手法の概要とその応用例のいくつかを示した。すなわち、ダイス内の素材の塑性流動を一般的に表示しうる動的相容速度場の構成法について示し、これをもとに素材の全変形エネルギー消費率あるいは最適加工条件等を算出する一連の解析手順を示した。さらに得られた解析式を代表的な異形材である矩形・L形・T形・H形材の押し出し加工の解析に適用し、ダイス長さ、最小押し出し加圧力、あるいはダイス出口断面の最適配置等について妥当と思われる結果を容易に算出できることを示した。これらの結果の評価については未だ検討の余地が残されているが、このような異形材の押し出し加工の理論的な検討が初めて可能となったこと、また本解析法が従来

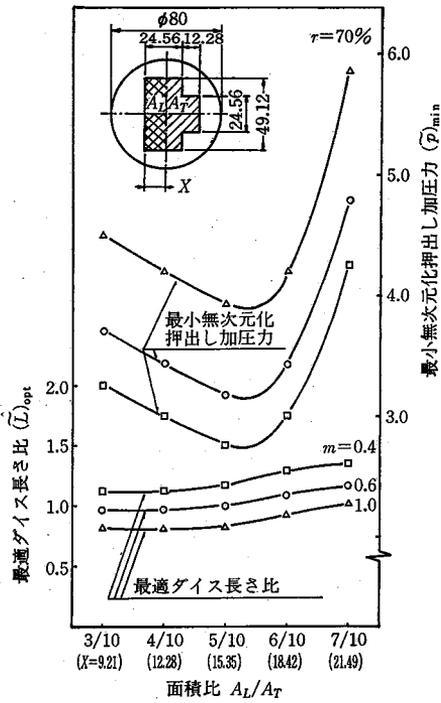


図17 T形材押し出し時に A_L/A_T が $(\bar{p})_{\min}$, $(\bar{L})_{\text{opt}}$ に与える影響

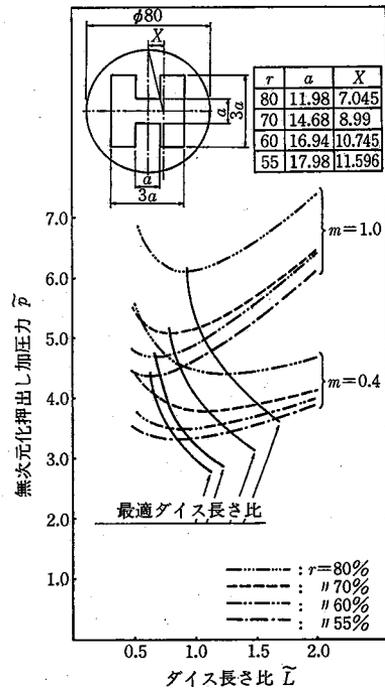


図18 H形材押し出し時の $\bar{p}-\bar{L}$ 線図

にない汎用性の高い方法であり、各種の異形材について広範な適用が可能であることは、重要な研究成果であり、今後この分野の学問的・技術的体系化に役立つものと考えられる。
(1983年11月22日受理)

参考文献

- 1) Nagpal, V. & Altan, T.: Proc. 3rd North Amer. Metalworking Res. Conf., (1975), 26
- 2) Yang, D. Y. & Lee, C. H.: Int. J. Mech. Sci., 20 (1978), 541
- 3) Prakash, R. & Khan, O. H.: Int. J. Mach. Tool Des.

- Res. Conf., 19th (1979), 1
- 4) Avitzur, B. et al.: Proc. 20th Int. Mach. Tool Des. Res. Con., (1979), 149
- 5) Hoshino, S & Cunasekera, J. S.: Proc. 21st Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., (1980), 97
- 6) Kiuchi, M., Kishi, H. & Ishikawa, M.: Proc. 22nd Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., (1981), 523
- 7) 木内 学・岸 秀敏: 31回塑加連講論, (1980-11), 216
- 8) 木内 学・岸 秀敏・石川政和: 昭和56年春塑加講論, (1981-5), 435
- 9) 木内 学・岸 秀敏・石川政和: 塑性と加工, 24-266 (1983), 290