研 究 速 報　　　　UDC 621.777：621.7.01

押出し加工の解析手法の拡張

Development of Simulation Method for Extrusion

木 内　学*・柿 木 敏 行*
Manabu KIUCHI and Toshiyuki KAKINOKI

1. は じ め に

著者らは，押出し加工法を対象とする汎用性の高い解析手法を見いだし，従来得られなかった多くの成果を系統的に得ることを可能としてきた．

本報では，上記解析手法をさらに拡張したモデルの概要を説明し，これまでの解析結果との比較を通してその改良の効果を示し，さらにデッドメタル形状の予測方法について細かく検討を行ったので，それらの結果を報告する．

2. 一般化モデル

〔1〕 中実材の三次元動的可容速度場の一般形

非軸対称押出し加工の数式モデルとしては，著者らにより，**図1**に示す如き一般化三次元押出しの際の被加工材の動的可容速度場(1)〜(3)式が提案された[1)〜4)]．

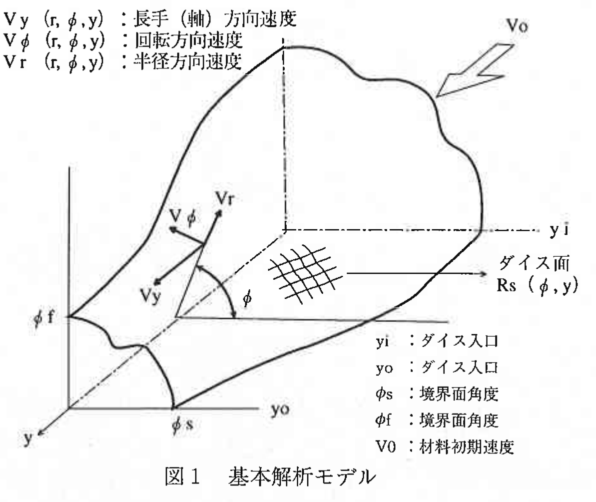

図1　基本解析モデル

$$Vy(r, \phi, y)=\frac{V_0\int_{\phi_s}^{\phi_f} Rs^2(\phi, 0)\,d\phi}{\int_{\phi_s}^{\phi_f} Rs^2(\phi, y)\,d\phi} \tag{1}$$

$$V\phi(r, \phi, y)=r\cdot\omega(\phi, y)=\frac{-r}{Rs^2(\phi, y)}\int_{\phi_s}^{\phi}\frac{\partial}{\partial y}\{Vy(r, \phi, y)\cdot Rs^2(\phi, y)\}\,d\phi \tag{2}$$

$$Vr(r, \phi, y)=-\frac{r}{2}\left\{\frac{\partial Vy(r, \phi, y)}{\partial y}+\frac{\partial\omega(\phi, y)}{\partial\phi}\right\} \tag{3}$$

ただし，$Rs(\phi, y)$ は被加工材の外表面形状を表す．もちろん，ダイス・コンテナ等の工具に接している部分の形状は，それらの形状に一致する．

〔2〕 拡張された中実材の三次元動的可容速度場

上記式(1)〜(3)の導出の際には，長手方向速度 Vy は被加工材の横断面上に一様に分布すると仮定した．そこで被加工材の横断面上で速度 Vy が分布し得るものとし，また，**図2**に示すように，被加工材の塑性変形域がダイス入口・出口の前後にも広がっているものとして導出された三次元動的可容速度場を式(4)〜(6)に示す．ただし，ここでも，$Rs(\phi, y)$ は塑性域全体の被加工材の表面形状を表す．

$$Vy(r, \phi, y)=\frac{V_0\int_{\phi_s}^{\phi_f} Rs^2(\phi, 0)\,d\phi}{\int_{\phi_s}^{\phi_f} Rs^2(\phi, y)\,d\phi}-\frac{2\int_{\phi_s}^{\phi_f}\int_0^{Rs(\phi, y)} r\cdot P(r, \phi, y)\,dr\cdot d\phi}{\int_{\phi_s}^{\phi_f} Rs^2(\phi, y)\,d\phi}+P(r, \phi, y) \tag{4}$$

ただし，$P(r, \phi, y)$：任意のC級関数とする．

*東京大学生産技術研究所　第2部

$$P(r,\phi,y)=f1(y)\cdot f2(\phi)\cdot f3(r)$$

$$f1(y)=a1\cdot\left(\frac{y-Lk-Lf}{Lb+Lk+Lf}\right)^{a2}\cdot\frac{y-a3}{Lb+Lk+Lf}\cdot\left(\frac{Lf-y}{Lb+Lk+Lf}\right)^{a4}$$

$$f2(\phi)=a5\cdot\phi^2+a6\cdot\phi+1$$

$$f3(r)=a7\cdot\left(\frac{r}{r_0}\right)^2+\frac{r}{r_0}$$

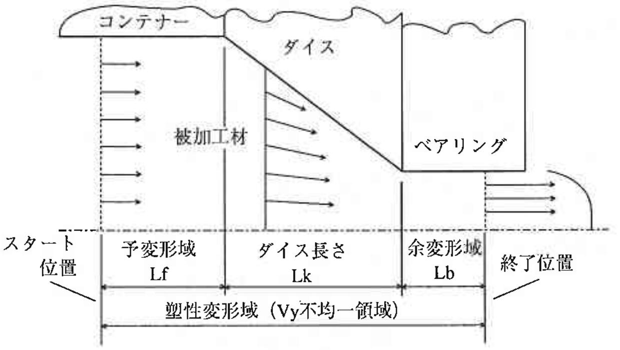

図 2　塑性変形域

$$V\phi(r,\phi,y)=r\cdot\omega(\phi,y)=-\frac{2\cdot r}{Rs^2(\phi,y)}\int_{\phi_s}^{\phi}\left\{\int_0^{Rs(\phi,y)} r\cdot\frac{\partial Vy(r,\phi,y)}{\partial y}dr+\frac{\partial Rs(\phi,y)}{\partial y}\cdot Rs(\phi,y)\cdot Vy(Rs(\phi,y),\phi,y)\right\}d\phi \quad (5)$$

$$Vr(r,\phi,y)=-\frac{1}{r}\int_0^r r\cdot\left\{\frac{\partial Vy(r,\phi,y)}{\partial y}+\frac{\partial\omega(\phi,y)}{\partial\phi}\right\}dr \quad (6)$$

〔3〕 全変形仕事率

構成された三次元動的可容速度場より各仕事率が算出でき，それらの総和として全仕事率が求められる．なお，速度場の定式化に際し導入したすべてのパラメータの値は，シンプレックス法を用いて全仕事率 W の最小化を図る過程においてその最適値が決定される．

3. 解　析　条　件

以下の各条件について解析を行い，これまでの解析結果との比較を行い，拡張した解析モデルの妥当性について検討し，あわせてその応用の可能性について調べた．

条件Ⅰ：[Vy 均一/横断面＋固定内部せん断面]

条件Ⅱ：[Vy 均一/横断面＋自由内部せん断面]

条件Ⅲ：[Vy 不均一/横断面＋自由内部せん断面]

各場合につき最適化させたパラメータは次のとおりである（**図 2** 参照）．

・ダイス長さ（Lk），・内部せん断面入り側角度（θ），・塑性変形域（Vy 不均一分布）開始位置，（予変形域長さ　Lf），・塑性変形域（Vy 不均一）終了位置，（余変形域長さ　Lb），・Vy の不均一分布を表す関数の係数 7 個

4. テーパーダイスによる押出しの解析例

（1） 押出し力の比較

図 3 に最も単純な丸棒の押出しの場合のダイス長さと押出し加圧力との関係を示す．実線は条件Ⅰ，●，▲，■は条件Ⅲ（ただし，丸棒であるため内部せん断面はない）により求めた結果である．条件Ⅲの結果はわずかではあるが条件Ⅰの結果を下回っており，条件Ⅰに対する条件Ⅲの優位性がわかる．

図 4 は同様に角（正方形）棒押出しの場合の結果を示す．丸棒の場合と同じ傾向が得られている．なお，角（正方形）棒の場合，45° の位置に内部せん断面を想定することがバランスがよいため，せん断面入り側角度（θ）に自由度を与えてもその効果はあまりみられない．

図 5 は平角棒の押出しの場合である．明らかに，せん断面に自由度を与え，さらに横断面上での Vy の分布を許容することにより，解析結果が改善されることがわかる．

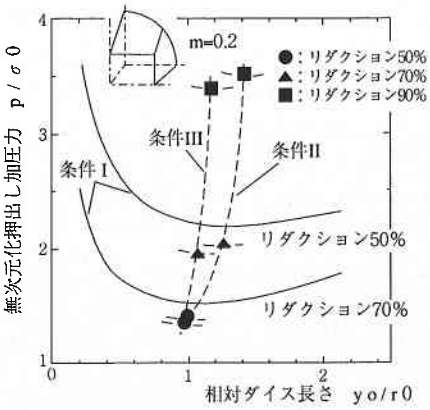

図 3　丸棒の押出し加圧力の比較

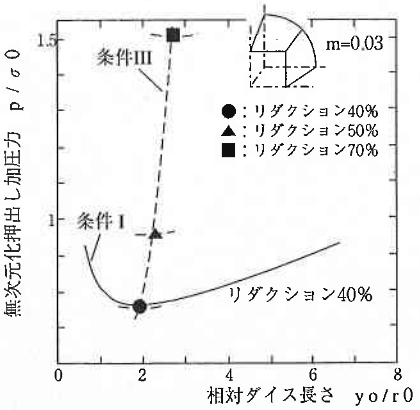

図 4　角棒の押出し加圧力の比較

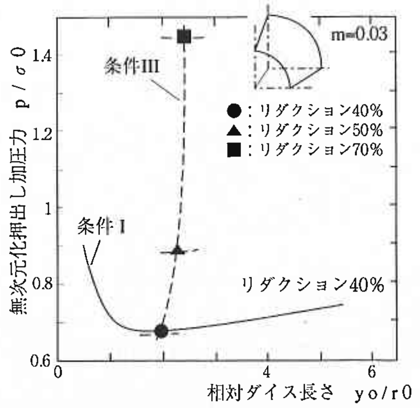

図 5　平角棒の押出し加圧力の比較

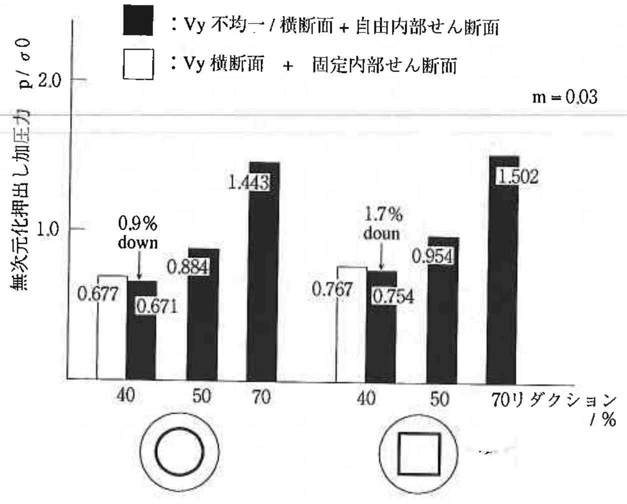

図 6　丸棒・角棒の押出し加圧力の減少率

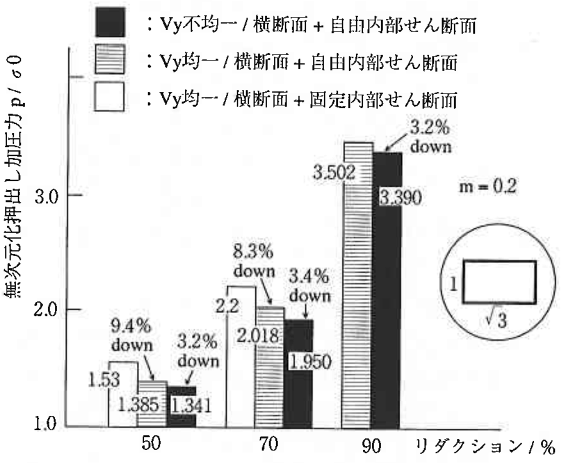

図 7　平角棒の押出し加圧力の減少率

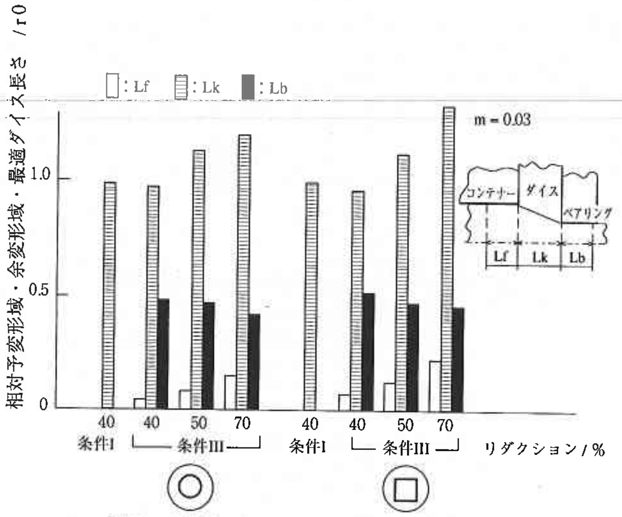

図 8　丸棒・角棒押出しの塑性変形域

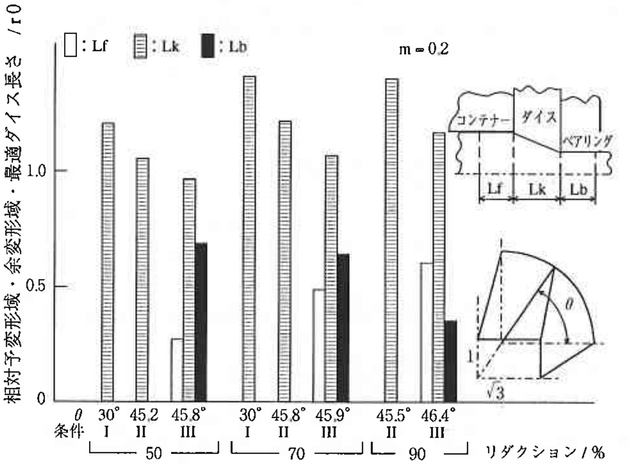

図 9　平角棒押出しの塑性変形域

図 6，7 は上述の解析条件（解析モデル）による結果の改善の度合いを押出し力の減少率により比較した結果である．内部せん断面に自由度を持たせることによる減少は 8 ～ 9 %で，その改善の大きさがわかる．一方，条件Ⅲすなわち Vy に自由度を持たせることによる減少率は，0.9% ～3.4%とやや少ないが，丸棒～平角棒のデータを見比べてみると，製品断面形状が複雑になるほどその効果が増していくことがわかる．

（2）　塑性変形域の広がり

図 8，9 は，最適ダイス長さ（Lk）とその前後の塑性変形域の広がり（Lf, Lb）について推定した結果である．

最適ダイス長さは，条件がⅠ～Ⅲと変わるとともに，短くなる傾向にある．このため，真の最適ダイス長さは条件Ⅲの結果よりもさらに短いことも予想される．

予変形域長さ Lf，余変形域長さ Lb の変化をみると，リダクションが大きくなるとともに Lf は大きくなり，Lb は逆に小さくなる傾向にある．つまりリダクションが増大し，押出し時の変形が大きく激しくなると，最適ダイス長さ Lk とともに予変形域も大きくなる．一方，この場合ビレット寸法は一定であり，リダクション増大とともにダイス孔寸法が小さくなるため，ベアリング部に流入した被加工材の流れはその自由度が低下し，乱れは急速に静まり均一化する傾向を示す．

図 9 には，内部せん断面入口角度の最適値（θ）も表示してある．条件Ⅰでは30°で固定して考えているが，自由度を与えた条件Ⅱ，Ⅲでは45°付近に最適値があることがわかる．これは，内部せん断面で分割された領域の入口・出口での面積比がほぼ同一となることが望ましいことを示している．

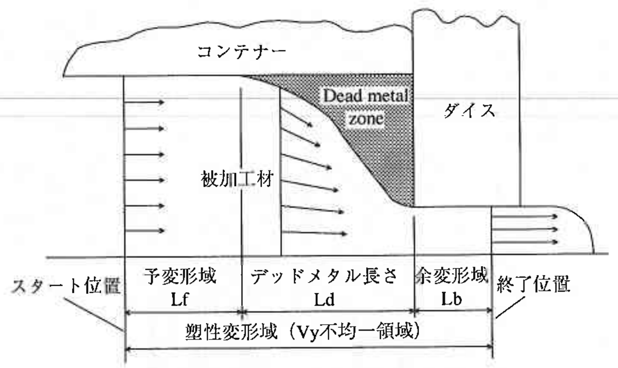

図10　塑性変形域 (フラットダイス)

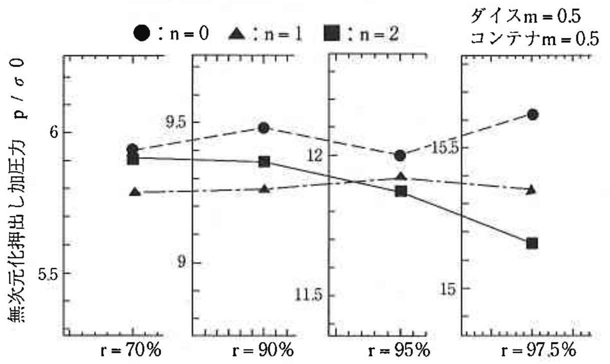

図11　デッドメタル形状と押出し力

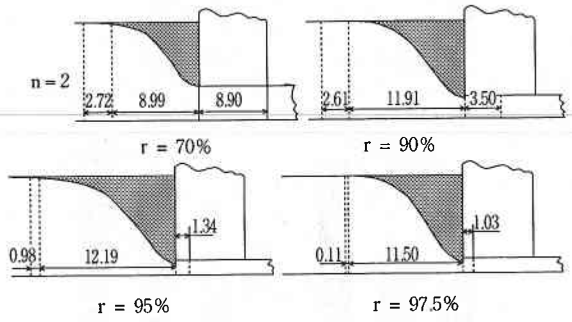

図12　最適デッドメタル形状

5. フラットダイスによる押出しの解析

通常アルミ材等の押出し加工では，フラットダイスを用いる．この場合には，ダイス前面にデッドメタルが形成されるが，その形状・寸法を正確に予測することは重要である．ここでは，改良した解析モデルを用いてこのデッドメタル形状・寸法のより良い近似方法を検討してみた．

(1)　解析条件

以下条件Ⅲの解析モデルを用いる．

図10に示すように，デッドメタル長さをLdとし，その手前に予変形域Lfがあるものとする．通常フラットダイスの場合，ダイスベアリング内の変形を無視するが，実際には被加工材の流れの乱れは残っており，この領域を余変形域Lbとする．

以下，3種類のデッドメタル近似形状について比較を行った．n=0は直線状，n=1は単純なSin曲線状，n=2はコンテナ面側に膨らませた変形Sin曲線状のデッドメタルに対応する．なお，リダクションは70, 90, 95, 97.5%の4段階とした．

(2)　押出し力の比較

図11に各条件下の押出し力の計算値を示す．どの条件下でも直線よりもSin曲線を用いた近似のほうが優位であることがわかる．また，リダクションが高くなるにつれ，コンテナ面側へ膨らんだ変形Sin曲線の方が優位となる傾向を示す．実際の押出しでは，リダクションが90%を超えるものがほとんどであるため，n=2以上のデッドメタル形状が適切な解析結果を与えることが予測される．

(3)　塑性変形域

図12に最適化により求められた塑性変形域を示す．n=2の場合，リダクションの増大とともに，予変形域長さLfは減少する．これは，デッドメタル形状が素材の流入にとって安定したものとなるため，その手前における被加工材の流れの乱れが少なくてすむためと考えられる．

余変形域長さLbの値は，高リダクションの場合ほど短くなる．これは，ダイス孔寸法の減少にともない，ベアリング内での流れの自由度が急速に失われることと同時に，デッドメタルが曲線的形状を有することにより，ベアリング部へ流入する過程で被加工材の流れの整流化が促進されめているためと考えられる．

デッドメタルの実形状の予測は，ダイス設計を行う上で非常に重要となるので，この様な解析手法のさらなる高度化と活用が求められている．

6. ま　と　め

本研究では，押出し加工の解析手法の拡張を行い，その特性の検討を行った．その結果，内部せん断面に自由度を持たせ，さらに横断面上で長手方向速度分布に自由度を持たせることにより，解析結果が大きく改善され得ることを明らかにした．

(1994年3月11日受理)

参 考 文 献

1)　木内・岸：31回塑加連講論，(1980)，216
2)　木内・岸・石川：昭55春塑加講論，(1981)，435
3)　木内・岸・石川：32回塑加連講論，(1981)，267
4)　木内・岸・石川：塑性と加工，24-266 (1983)，290
5)　木内・星野・飯島：生産研究，39-3 (1983)，92