

剛塑性有限要素法による押し出し据込み加工の解析

水野敏広¹・小島之夫²・水野高爾²

¹ 神奈川県立工科大学工学部機械工学科

² 名古屋工業大学工学部機械工学科

Analysis of Injection Upsetting by the Rigid Plastic Finite Element Method

Toshihiro MIZUNO¹⁾, Yukio KOJIMA²⁾, Takaji MIZUNO²⁾

Abstract

In this paper, the results of a study on the characteristics of metal flow during injection upsetting are presented. Numerical simulation are performed using rigid-plastic FEM. The metal flow in forming flange changes with flange thickness, flange diameter, work hardening characteristics of material and friction between material and bottom die. The deformation modes are classified into four or five types according to the distributions of strain rate and the dead zone, and the corresponding four or five regions in the flange thickness - flange diameter plane are shown. The effective forming pressure depends on the deformation modes.

Key Words : injection upsetting, rigid-plastic FEM, deformation modes, flange thickness, flange diameter

1. 結 言

近年、鍛造部品は省資源、省力化、コスト低減に対応するため、高精度化が進んでいる¹⁾。鍛造加工における高精度、高機能化の方策として閉塞鍛造が期待されている²⁾。閉塞鍛造は型空間に挿入された円柱素材を、一本あるいは複数のパンチによって押し出すことにより、型空間内に流動・充填させて成形する加工法である。材料は半径方向に流動するため、軸の端部または中間部に歯あるいはフランジなどをもつ部品として成形される。

押し出し据込み加工はコンテナに挿入した円柱素材をパンチにより上下型の空間に押し出すことにより、円板状フランジを成形する加工である。軸端部にフランジを成形する加工では、いわゆる造頭加工によっても成し得る。しかし、押し出し据込み加工によれば素材の座屈による制約をうけないので、厚くて体積の大きなフランジを成形できるという特徴がある^{3, 4)}。また、閉塞鍛造の行程途上でもあるが、数値シミュレーションを駆使した系統的な基礎研究は少ない。Balendra^{5, 6)}は、アルミを供試材料にフランジ厚さの実用範囲内で実験を行い、成形荷重

の変化から、フランジ厚さに依存した3つの変形様式が存在することを示唆した。Alexanderら⁷⁾およびParsonsら⁸⁾は上界法を用いた解析を行い、どちらの上界モデルも押し出し量およびフランジ厚さによらずフランジ部の速度場を半径方向のみと仮定した。有限要素法による解析例⁹⁾も報告されているが、変形機構の考察はされていない。本報では、押し出し据込み加工を対象として、フランジ厚さ、押し出し量、被加工材の材料特性および摩擦条件の加工条件因子が、成形圧力、被加工材の材料流動および成形フランジ形状に及ぼす影響について、剛塑性有限要素法による解析結果をもとに系統的に検討を行った結果を示す。

2. 解析方法および条件

押し出し据込み加工の概要をFig. 1に示す。ダイ空間の高さがフランジ厚さ ft となる。幾何条件は素材直径 d_0 で無次元化されたフランジ厚さ $T (=ft/d_0)$ および平均フランジ直径 $D (=d_m/d_0)$ によって指定する。Dは加工の進度を表すパラメータでもあり、パンチ行程 s とす

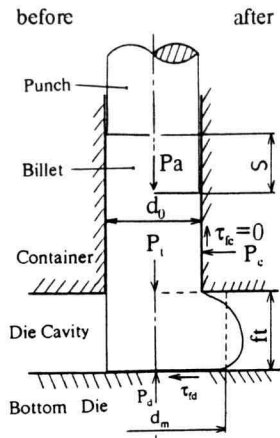


Fig. 1 Injection upsetting

ると $D = \sqrt{1+s/ft}$ となる。

解析には、ペナルティ関数法による軸対称剛塑性有限要素法^{10, 11)}を用いた。4 節点四角形アイソパラメトリック要素を適用し、節点速度に関する非線形剛性方程式は直接反復法によって解いた。体積一定のためのペナルティ数は 10^{12} とし、積分には選択低減積分法を用いた。時刻 t の形状に対して計算した節点速度を用いて微小時間 dt 後の節点座標を更新した。この場合、特異点（コンテナ出口角部、出口 $R=0$ ）において、コンテナ面上の更新された節点がコンテナ出口角部に一致するように微小時間増分 $dt = \Delta s / V$ を調節した。変形が進むと要素が扁平になり、計算が困難になったときにはリメッシュを行った。パンチ速度 V は -1.0 とした。被加工材の材料特性を考慮するため、次の変形抵抗式を用いた。

$$Y = Y_0 + F \bar{\epsilon}^n \quad (Y_0/F = 1)$$

加工硬化指数を $n = 0, 0.25, 0.5, 1.0$ の 4 種類を選び、材料特性の影響を調べた。摩擦はせん断摩擦係数 m_a で指定し、被加工材と下工具接触面を考慮し、コンテナ内接触面の摩擦力は 0 とした。これによりコンテナ内の未変形部に依存しないフランジ成形のための正味の成形圧力を求めた。摩擦条件は $m_a = 0, 0.1, 0.3, 0.5$ および固着摩擦の 5 種類とし、下工具接触面摩擦条件の影響を調べた。また、接触面圧が 0 の領域は摩擦力を加えないようにし、押し出し軸方向の拘束をとした。以上の条件で専用プログラムを作成し、フランジ厚さ T が実用範囲と思われる $0.125 \sim 1.625$ の範囲でピッチ 0.125 の 13 種類を選び、加工進度 D は最大 2.5 まで解析した。実行はパーソ

ナルコンピュータを用いた。

3. 成形圧力の解析結果

3. 1 摩擦条件の影響

フランジ成形のために伝達される成形圧力 p_t / Y_m のフランジ厚さ T および加工進度 D による変化を Fig. 2 に示す。平均変形抵抗 Y_m は変形抵抗 Y の分布から体積平均より求めた。Fig. 2(a) に示す様に $m_a = 0.1$ の場合、成形圧力は $T \approx 0.375$ で極小となり、 $T \approx 1.0$ に極大値あるいは変曲点が認められる。 m_a が大きくなると、Fig. 2(b), (c) に示す通り、極小点および変曲点は遷移し、極小点はフランジ厚さが大きい側で生じるようになる。(d) の固着摩擦は、 $p_t < p_t(m_a = 0)$ で示した。 $T \leq 1.0$ では、工具接触面摩擦力の増加に伴って成形圧力は増大することを示し、フランジ厚さが小さいほど顕著であることがわかる。これは、フランジ厚さが小さいほど下工具面上の材料の半径方向の流動が大きく、摩擦仕事率が全体の仕事率に占める割合が大きくなるためと考えられる。一方、 $T > 1.0$ では、加工進度によらず摩擦条件の影響はほぼ認められないことがわかる。工具接触面上の材料流動は摩擦条件によって余り変化はなく、成形圧力は押し出し量に依存していると言える。フランジ厚さが大きくなると、据込みによる圧縮応力により座屈曲がりが生じる可能性が出てくる。材料が工具面上を横すべりすることにより生じる横ずれ座屈に関しては、摩擦力の拘束により横すべりを防ぎ、押し出し荷重の増大なしに所要の成形を行うことが可能と考えられる。

3. 2 材料特性の影響

Fig. 3 に、材料特性を表す加工硬化指数 $n = 0$ と 0.25 の場合の成形圧力の比較を示す。加工硬化性の p_t / Y_m は非硬化性のそれに比べ小さくなっている。また、その差は加工が進むに従って大きくなる。これは、加工が進むに従って、成形フランジ内において加工硬化によるひずみの拡散が生じ、平均相当ひずみが大きくなるためと考えられる。しかし、フランジ厚さおよび加工進度による成形圧力の変化は類似した傾向を示し、極小点あるいは変曲点が同様に認められる。また、 $n = 0.5$ および 1.0 の解析結果は 0.25 の場合とほぼ差異は認められなかった。解析結果は加工硬化指数の大きさにはあまり影響されないと考えられるので、以後 $n = 0.25$ の解析結果を加工硬化性の解析結果とする。

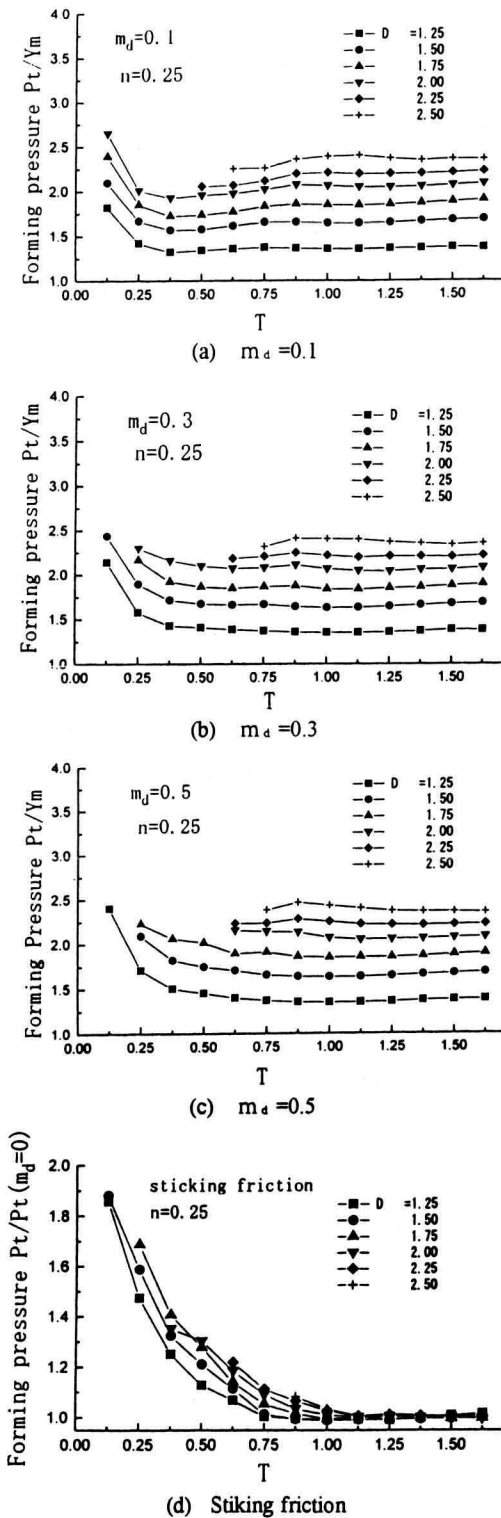


Fig.2 Effect of die friction on the effective forming pressure

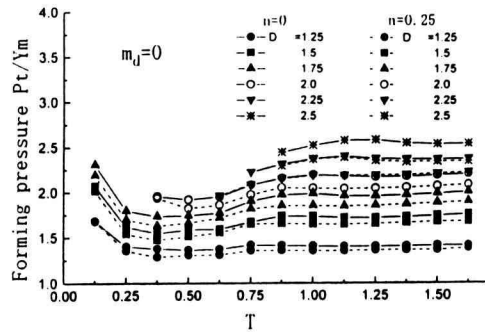


Fig.3 Effect of work hardening exponent on the effective forming pressure

4. 変形解析結果

各解析条件下での格子の変形状態および相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon} / (V/ft)$ の分布を Fig. 4 に示す。図中、網掛けの領域は初期からダイ空間に存在した材料部分 ($\phi d_0 \times ft$) を示す。ここで、 V/ft は $\phi d_0 \times ft$ の円柱が速度 V で均一に圧縮される時のひずみ速度である。材料はコンテナ内からダイ空間に押し出され、その流動は、中心軸近傍領域は直には半径方向速度をもたず、先行領域を押しつぶしながらひずみ集中領域を形成する。コンテナ出口角部近傍では、直ちに半径方向速度が生じ、圧縮力を受けながらフランジが成形される。フランジ厚さが大きいほどひずみ集中領域は下工具面近傍から離れフランジ内部に形成される傾向にあり、それにより、相当ひずみ速度分布はフランジ厚さによって大きく異なる。材料流動は材料特性および摩擦条件にも影響される。最大相当ひずみ速度面は加工硬化性の方が、さらに摩擦力の大きい方が工具面近傍から離れ軸線上に分布するようになる。また、先行領域の偏平が抑えられ、フランジ部は肉厚になり最大直径は小さくなる。 $T \leq 0.25$ では、フランジのリム部に反りが生じるが摩擦力の負荷により抑制される。 $T > 1.0$ では、何れの解析条件においても、相当ひずみ速度分布に大きな変化は見られないが、先行領域の外形状およびフォールディングの生じ方に違いが認められ、 $m_d=0$ の完全潤滑条件においてもフォールディングが生じている。しかし、いずれにおいても下工具接触部において加工が進むと中心軸近傍は工具面から若干浮き上がり、工具面圧は 0 になる。この領域はほぼ塑性変形しないデッドゾーンであり、加

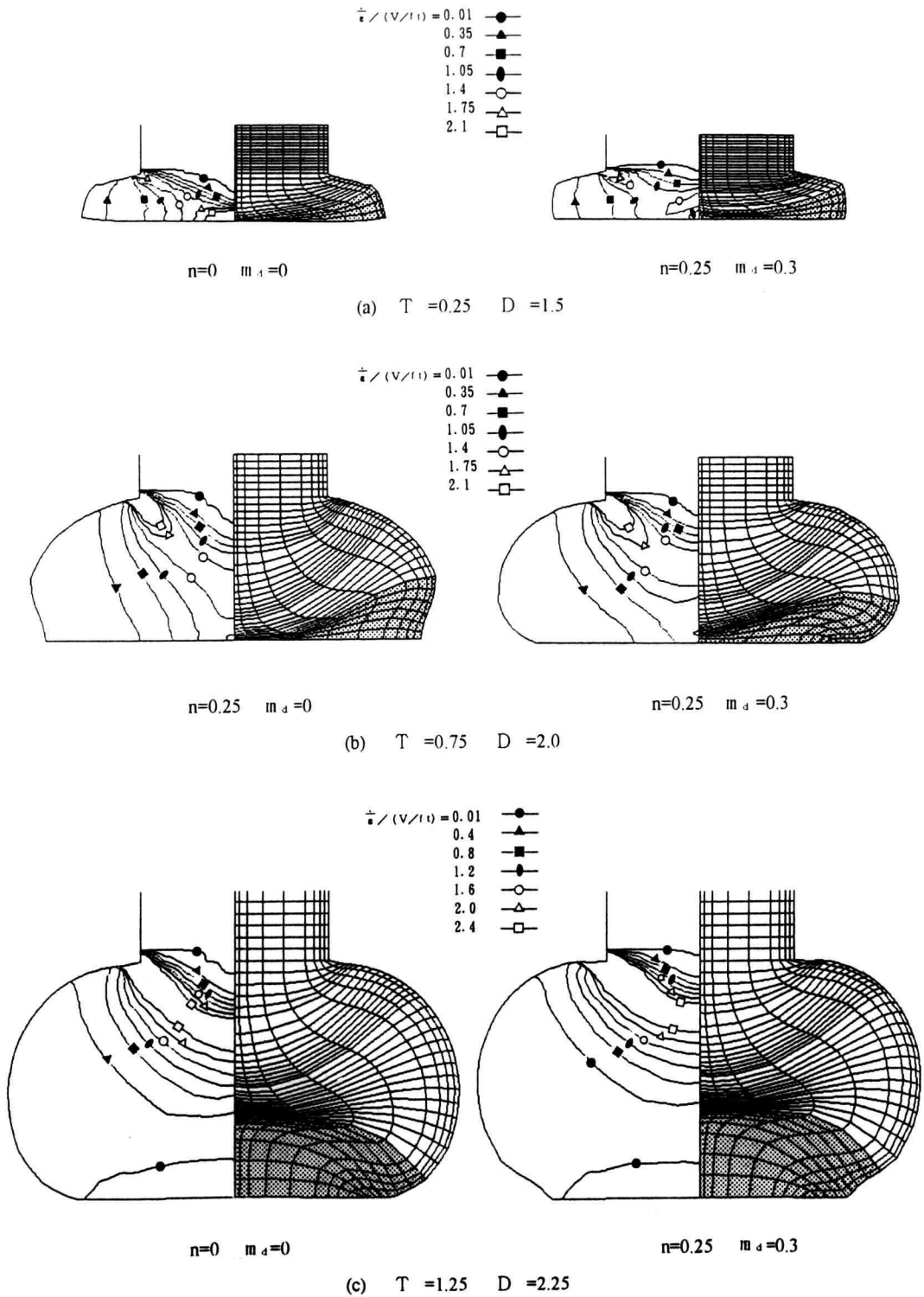


Fig. 4 Deformation patterns and strain rate contours of Injection upsetting

工の初期段階から形成される。これによりフランジ厚さが1.0よりも大きい成形では、材料特性および下工具摩擦条件は余り影響しないことがわかる。

5. 考察

押し出し据込み加工においてフランジ厚さ、被加工材の材料特性および工具接触面の摩擦条件の影響を系統的に明らかにするために、成形圧力および材料流動について比較、検討する。Fig. 2, 3から成形圧力の傾向は、フランジ厚さによる材料流動の変化によるものと考えられる。材料流動は、変形開始面、最大相当ひずみ速度面およびデッドゾーンに着目して比較すると、5つのパターンが存在することがわかる。これは成形されるフランジ内での変形開始面、最大相当ひずみ速度面の分布およびデッドゾーンの有無により分類した。そのパターンを概略化しフランジ厚さおよび加工進度との関係をFig. 5に示す。材料流動は最大相当ひずみ速度面がコンテナ出口角部から工具面中心近傍にかけて分布する(c)パターンを境に大別できる。摩擦力が小さい場合($m_a \leq 0.1$)、材料特性によらず、フランジ厚さが0.375~0.5の範囲内では(c)パターンの材料流動を呈し、それよりも小さいフランジ厚さでは、速度面がコンテナ出口角部から下工具面上に分布する(b)パターンになる。さらに、加工硬化性の場合では、変形域がコンテナ内に及ぶ(a)パターンが存在する。成形圧力はこれらの材料流動に依存していると考えられる。成形圧力は $T \approx 0.375$ で極小となり、 $T \approx 1.0$ に変曲点が認められた。これは材料流動が変化する境にほぼ一致する。図中、 $m_a = 0.3$ の場合も比較の

ために示す。加工硬化性のみ存在した(a)パターンが非硬化性においても呈するようになり、加工硬化性の場合はその範囲が拡大する。また、(c)パターンを呈するフランジ厚さは0.25近傍に移り、(b)パターンを呈する範囲は縮小する。逆に速度面が中心軸上に分布する(d)パターンの範囲は拡大する。フランジ厚さが $T > 1.0$ の場合では、材料流動に変化は認められず、下工具接触面近傍にデッドゾーンの生じる(e)パターンの材料流動は摩擦条件に依存しない。

6. 結論

ベナルティ関数法剛塑性有限要素法により押し出し据込み加工の変形解析を行った。被加工材の材料特性、フランジ厚さおよび下工具摩擦条件が、成形圧力、フランジ外形および材料流動に及ぼす影響について系統的に検討した。フランジ厚さが小さいほど、加工条件の影響は顕著であり、成形されるフランジの外形および内部のひずみ分布は大きく異なる。また、フランジ厚さが大きい加工では、加工性に対し下工具摩擦条件の影響が少ないので、摩擦力の積極利用によって成形性を向上させることが期待できる。種々、加工条件の最適化により、所要のフランジを成形することが可能である。

7. 参考文献

- 1) 近藤一義：第169回塑性加工シンポジウム資料，(1996)，1
- 2) 篠崎吉太郎：塑性と加工，33-382(1992)，1250
- 3) Plasticity division of NEL: NEL report.,196(1965)
- 4) J.C.Henry: NEL report 494, (1971)
- 5) R.Balendra: Int.J.Mach.Tool.Des.Res.,25, (1985), 63
- 6) R.Balendra: Int.J.Pro.Res.,25(1987), 889
- 7) J.M.Alexander and B.Lengyel: J.Inst.Metals., 93, (1964-65), 137
- 8) B.Parsons,P.R.Milner and B.N.Cole: J.Mech.Eng. Sci., 15, (1973), 410
- 9) Wifl,A.S.: Int.Conf.Numerical Method.Ind.Forming Processes,Swansea,U.K.,(1982), 135
- 10) O.C.Zienkiewicz 著・吉識雅夫・山田嘉昭 監訳：マトリックス有限要素法，(1984)，培風館
- 11) 富田佳宏：数値弾塑性力学，(1990)，養賢堂

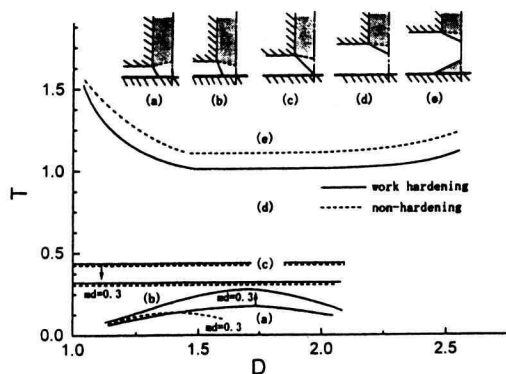


Fig.5 Change of metal flow with flange thickness and flange diameter