

UBETの特性と応用技術に関する研究・2

Study on characteristics of UBET and its optimal application・2

木内 学*・鄭 頌 甲*
Manabu KIUCHI and Hyun-Kap CHUNG

1. はじめに

筆者らは、いわゆるUBETにより鍛造加工を含むさまざまな加工の解析を行う場合に、精度良くかつ能率的に解析しうる手法を確立することを目指して一連の研究を進めている。前報³⁾では軸対称前後方押し加工の解析を例にとり、平行速度場モデル⁴⁾を用いたUBETによる解析結果の分析と、その応用上の問題点に関する検討を行った。その結果、要素分割数よりも要素分割の位置が、解析結果に大きな影響を及ぼすこと、最適な要素分割と形成されるデッドメタルの形状・寸法との間には密接な関係があることが判明した。

そこで、本報では、要素分割位置そのものをパラメタに取り入れたUBETの応用技術について検討を進めた。その際、解析結果に影響を与える因子として、速度を仮定すべき任意境界（準独立変数：Pseudo independent parameter）の設定の仕方も新たに考慮し、さらに、木内らが提案したM・F・P・S (Modified Flexible Polyhedron Search)⁵⁾法を用いた。このような手法を用いて、種々の軸対称押し加工⁶⁾について、被加工材の最適要素への分割位置と加工荷重について検討を加え、それらを通して、UBETの最適応用技術について検討した結果を報告する。

2. 解析モデル

2-1 要素の平行速度場モデル

UBETによる軸対称押し加工の変形過程の解析に際して、被加工材（ピレット）を要素に分割する方法と、要素の種類およびそれに対応する平行速度場モデルについては、既報⁴⁾で詳細に報告したのでここでは省略する。分割された各要素内の動的可容速度場の一般形は、

$$\dot{V}_y = C_1 Y + C_2 \quad (1)$$

$$\dot{V}_r = -(1/2)C_1 R + C_3/R \quad (2)$$

三角形要素では

$$\dot{V}_y = C_4 Y/R + f(R) \quad (3)$$

$$\dot{V}_r = -C_4(1 + C_5/R) \quad (4)$$

と表される。この速度場はいわゆる平行速度場であり、要素間境界面における垂直速度分布は一様であると近似している。また、体積一定の条件を満足していることは明らかである。

2-2 仕事率の算出

要素の内部仕事率 $\dot{W}^{(i)}$ 、要素間境界における内部せん断仕事率 $\dot{W}^{(s)}$ 、工具面における摩擦損失 $\dot{W}^{(f)}$ より、全仕事率 \dot{W}_T は、

$$\dot{W}_T = \sum \dot{W}^{(i)} + \sum \dot{W}^{(s)} + \sum \dot{W}^{(f)} \quad (5)$$

となり、上界定理に基づき、これの最小化を行う。 \dot{W}_T の最小化をする際、任意境界と軸方向の最適要素分割位置とをパラメタとし、速度場と軸方向要素分割位置の最適化を図る。

3. 解析結果と考察

3-1 解析条件

以上の解析モデルを用いて、図1⁶⁾に示す軸対称押し加工の種々の場合、すなわち後方押ししのCase(1)、(2)、前方押ししのCase(1)、(2)、(3)の6つの場合についてシミュレーションを行った。後方押ししのCase(1)は、主としてパンチ

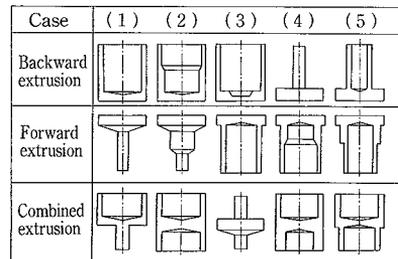


図1 押し加工⁶⁾

*東京大学生産技術研究所 第2部

の傾斜角度を変化させた場合、Case (2) はパンチの傾斜角度と側面の高さを変化させた場合、前方押し出しの Case (1) は、平面ダイの場合である。また前後方押し出しの Case (1) は、主としてパンチ傾斜角度を変化させた場合と、パンチとダイの断面積を変化させた場合、また、Case (2), (3) はパンチ、ダイ面が平面の場合である。いずれの場合も、被加工材のアスペクト比 (h/R_d) は 0.1~4.0 とし、変形抵抗 $\sigma_0=1.0$ (比変形抵抗)、摩擦定数 $m=0.05$ を用いて解析を行った。

3-2 実験値¹⁾と解析結果との予備的比較

図 2 は、後方押し出しに関する能島ら¹⁾の実験結果と本

表 1 パンチ半径 (R_p/R_d) と前方出口 (R_f/R_d) を変化させた場合の解析結果の考察 (図 4, 図 5 (a)~(d) 参照)

解析条件	前後方押し出しのパンチ先端断面が平面の場合、各アスペクト比に対する R_f/R_d , R_p/R_d を変化させた場合 (図 4, 図 5 (a)~(d) 参照)。
1) $R_f/R_d = 0$ (後方押し出しの場合) ① $h/R_d > 0.67$, $R_p/R_d = 0.65$ と、 $h/R_d > 1.0$, $R_p/R_d = 0.75$ で σ/σ_0 の最小値を持つ。 ② $h/R_d > 1.0$ でダイ側の被加工材はデッドメタルである。	
2) $R_f/R_d = 0.1 \sim 0.9$, $R_p/R_d = 0.15 \sim 0.95$ (前後方押し出しの場合) ① $h/R_d > 0.67$, $R_f/R_d > 0.3$, $R_p/R_d > 0.9$ で、パンチ直下の被加工材は剛体 (Rigid Metal) になり、前方にのみ押し出される。 ② $h/R_d > 1.5$, $R_p/R_d < 0.9$, $R_f/R_d < 0.4$ で、ダイ側の被加工材はデッドメタルになり、後方にのみ押し出される。	
3) $R_p/R_d = 1.0$ (前方押し出しの場合) ① $h/R_d > 1.5$ で、各 R_f/R_d に対する σ/σ_0 に h/R_d の影響はしない。 ② $h/R_d > 1.5$ で、パンチ直下の被加工材は、剛体 (Rigid Metal) になる。	

D・M : Dead Metal, R・M : Rigid Metal

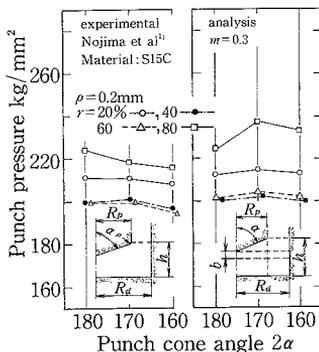


図 2 パンチ圧力に及ぼす断面減少率 r とパンチ先端角 2α の影響

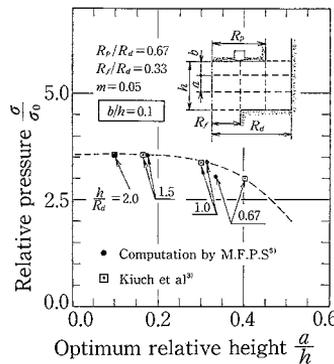


図 3 軸方向最適要素分割位置に関する本解析結果と前報³⁾の結果との比較

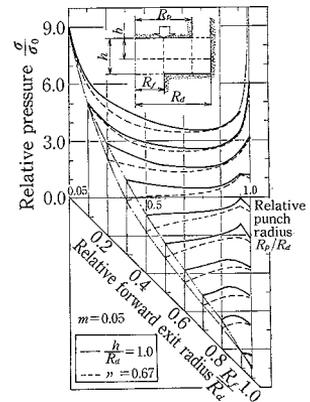


図 4 パンチ相当圧力に及ぼすパンチ半径 (R_p/R_d) と前方出口半径 (R_f/R_d) の影響 ($h/R_d = 0.67, 1.0$ の場合)

解析結果との比較で、供試材は、焼きなました S15C 材で、かたさは $H_v(20) 12 \pm 2$ である。試片寸法は $\phi 23.4 \text{ mm} \times 23.4 \text{ mm}$ で、試片にはボンデライト・ボンダリユーベ標準潤滑処理を施してある。また、実験で用いた工具のパンチ先端部のコーナ丸味半径 $\rho = 0.2 \text{ mm}$ である。実験結果の押し出し加圧力は、加工過程における最大パンチ圧力であり、最大パンチ荷重をパンチ先端断面積で除すことによって求めた値である。解析では、被加工材の変形抵抗として加工硬化をも考慮して $\sigma = 52.7 \text{ Kg/mm}^2$ とし²⁾、摩擦定数 $m = 0.3$ を用いて解析を行った。 r は押し出しによるパンチ先端断面積の減少率で、実験および解析とも $r = 20, 40, 60, 80\%$ としてある、 $r = 80\%$ で実験値と解析結果との間に若干の差が認められるものの、全体的に両者は良い対応を示している。

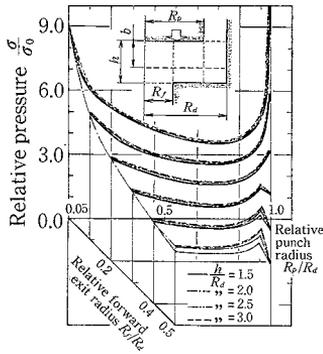
3-3 解析結果と考察

図 3 は、前後方押し出しの場合について、前報³⁾で示した結果と本解析法の結果との比較であり、図の横軸は軸方向の最適要素分割位置を示す。最適分割位置をパラメータとして最適化処理を実行しても、M・F・P・S³⁾法を用いることにより、短時間で前報¹⁾とほぼ一致する結果を得ることができ、図で示すように両者は、良い対応を示している。

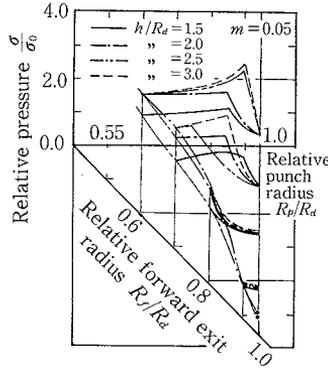
図 4, 図 5 (a), (b), (c), (d) は、前後方押し出し加工について、パンチ、ダイの断面積を変化させた場合、パンチ相当圧力と軸方向最適要素分割位置 b/R_p を 3 次元的に示した結果で、その内容は、とりまとめて表 1 に示してある。

図 4 は、 $h/R_d = 0.67, 1.0$ の、前方、後方および前後方押し出しについて、パンチの相当圧力を示す。図より、

研究速報



(a) $R_p/R_d=0.0\sim 0.5$ の場合



(c) $R_p/R_d=0.6\sim 1.0$ の場合

図5 パンチ圧力に及ぼすパンチ半径(R_p/R_d)と前方出口半径($R_f/R_d=1.5\sim 3.0$ の場合)

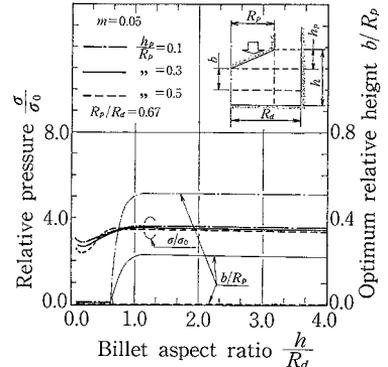
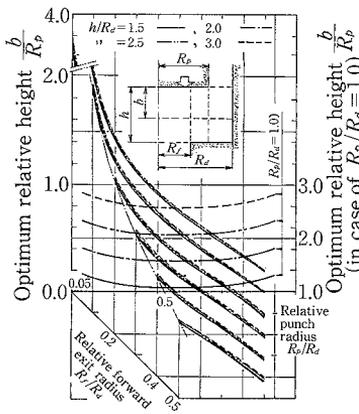
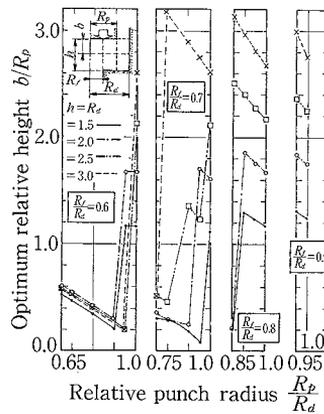


図6 パンチ圧力と軸方向最適要素分割位置に及ぼすパンチ傾斜角の影響(後方押しの場合)



(b) $R_p/R_d=0.0\sim 0.5$ の場合



(d) $R_p/R_d=0.6\sim 1.0$ の場合

図5 軸方向最適要素分割位置に及ぼすパンチ半径(R_p/R_d)と前方出口半径(R_f/R_d)の影響 ($h/R_d=1.5\sim 3.0$ の場合)

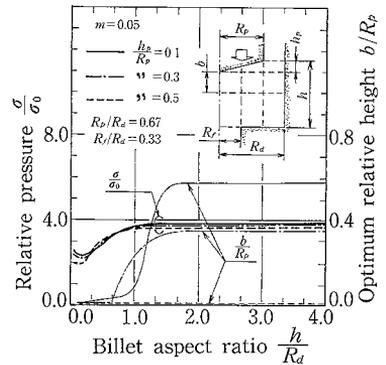


図7 パンチ圧力と軸方向最適要素分割位置に及ぼすパンチ傾斜角の影響(前方押しの場合)

R_p/R_d が大きくなるに伴い、パンチ圧力は一度低下してから増加する傾向を示す。 $R_f/R_d=0.3$ 以上の場合には、 $R_p/R_d=0.8\sim 0.95$ の近傍でパンチ圧力は急激に低下する。特に $R_f/R_d=0.4, 0.5$ で、 $R_p/R_d=0.95$ 以上になると、パンチ圧力の変化は特異点を持つようになる。これはパンチ直下の被加工材は変形しないまま加工が進むこと、すなわち、パンチ直下の被加工材は剛体 (Rigid Metal) 的に移動することと対応している。また、その場合、軸方向の最適要素分割位置もパンチ直下より、ダイに近い位置に変わり、塑性域がダイ側に移って、前方押しの変形になる。

図5(a),(b)は、前後方押しで、 $h/R_d=1.5, 2.0, 2.5, 3.0, R_f/R_d=0.0\sim 0.5$ の場合、また、図5(c),(d)は、 $R_f/R_d=0.6\sim 1.0$ の範囲の計算結果を示す。図5(a)と(c)はパンチ圧力を、図5(b),(d)は軸方向最適要素分割位置 b/R_p を示す。図5(a),(b)の

$R_f/R_d=0.3\sim 0.5$ の範囲では、 $R_p/R_d=0.95$ 以上で b/R_p が急激に大きくなる。これは、塑性域がパンチ直下からダイ側に移り、パンチ直下の被加工材は剛体 (Rigid Metal) 的に移動するようになり、変形が後方押しから前方押しに変わるためである。その際のパンチ圧力は低下する傾向を示す。図5(b),(d)で $R_f/R_d=0.8$ 以上では、被加工材は前方にのみ押し出されるようになる。

図6は、後方押し、図7は、前後方押しで、パンチの先端部が傾斜面を持つ場合の計算結果を示す。 $h/R_d=1.5$ 以上では、パンチ先端部の傾斜(h_p/R_p)が大きくなるに伴い b/R_p の値は小さくなり、さらに、 $h_p/R_p=0.5$ になると、 b/R_p は0に漸近する。そのために、この場合は要素数を増やす必要はなくなる。さらにパンチ面の傾斜 h_p/R_p が大きくなるに伴い、パンチの圧力も低くなる。

図8は、先端部が2段の傾斜面を持つパンチによる後

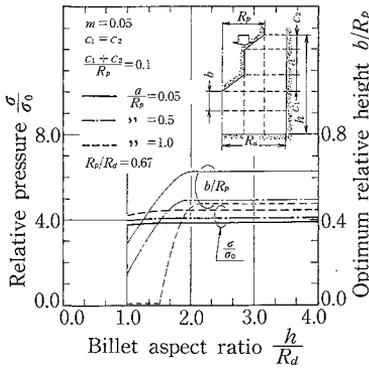


図8 パンチ圧力と軸方向最適要素分割位置に及ぼす2段傾斜面パンチの側面高さ a/R_p の影響(後方押し)

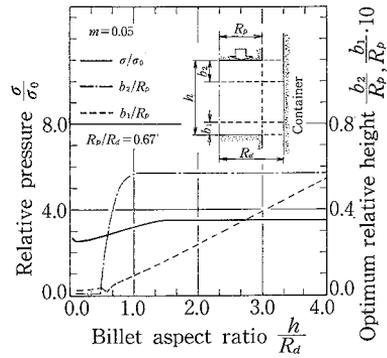


図9 パンチ圧力と軸方向最適要素分割位置に及ぼすピレット高さの影響(コンテナ壁面側に沿う前後方押し)

方押しの場合の計算結果であり、パンチの傾斜を2段とも同じにして、パンチの側面の高さ a/R_p を0.05, 0.5, 1.0のごとく変化させた場合である。 a/R_p が高くなるに従って、パンチ圧力は少しずつ増加する。他方、最適要素分割位置については、 $h/R_d=2.0$ 以上では、 a/R_p が高くなっても b/R_p はあまり変化しない。

図9は、コンテナ壁面側に沿う前後方押しで、コンテナとダイは固定されており、パンチが下降してくる場合である。軸方向の最適要素分割位置 b_1, b_2 をパラメタとし、両者とも最適化した結果を示す。 $h/R_d=1.5$ 以上では、 b_1 の値が b_2 に漸近しているが、 b_2 に対する b_1 の影響はない。そのために、この場合も前方出口側の被加工材はデッドメタルになっていると考えられる。

図10は、被加工材の内側前後方押しで、この場合もコンテナとダイは固定されており、パンチが下降してくるので上下対称ではない。 b_1 と b_2 をパラメタとして、最適化した結果を示してある。 $h/R_d=1.5\sim 2.5$ の範囲では、ダイ側にデッドメタルを形成されるが、 $h/R_d=2.5$ 以上になると、ダイ側のデッドメタル域が拡がり、パンチ下の被加工材のみが塑性域となり、後方押しの変形になる。

4. ま と め

本研究では、種々の軸対称押し加工の解析を例にとり、平行速度場モデル⁴⁾を用いたUBETの特性を調べ、その応用技術に関する検討を行った。その結果、(1)解析では、デッドメタルあるいは剛体 (Rigid Metal) 域の形成を適切に表示できるよう、要素分割位置そのものをパ

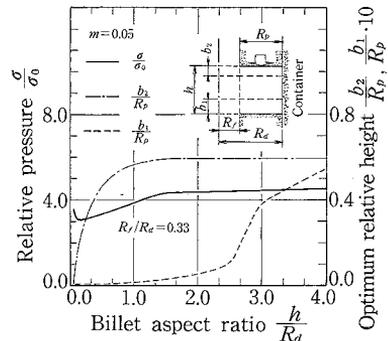


図10 パンチ圧力と軸方向最適要素分割位置に及ぼすピレット高さの影響(内側前後方押しの場合)

ラメタとすることにより、デッドメタルと剛体域形状の予測が可能であることを明らかにした。(2)また、要素の分割数が多く、パラメタとしての速度が、指定される境界の位置により解析結果に影響を与える可能性がある問題についても、M・F・P・S⁵⁾法を用いることにより有効な解が得られることを明らかにした。(3)実験値⁶⁾と比較し、解析値と実測値が、全体的に良く対応していることを示した。
(1987年10月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 能島・佐賀：塑性と加工, 21-234 (1980-7), 635. 6
- 2) 戸田・三木・中宮：第36回塑加連講論, 471.
- 3) 木内・鄭：昭62春塑加論, 412.
- 4) 木内・村田：塑性と加工, 22-244 (1981-5), 495.
- 5) 木内・金：第38回塑加連講論, 208.
- 6) 藤吹 芳弘：冷間鍛造の実際, 工学図書, 12.