

UBETの応用に関する研究 (第5報)

— 円柱のすえ込み時のバルジング, フォルディングの解析 —

Study on UBET (Upper Bound Elemental Technique) · 5th Report
— Analysis of Disk Forging with Side-Surface Foldover —

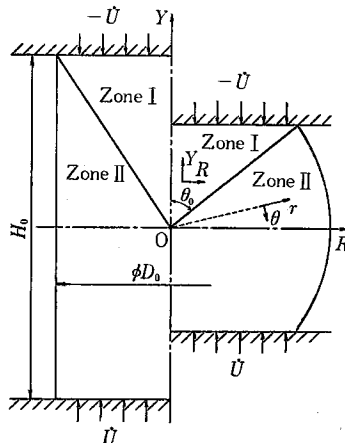
村田良美*・木内学*
Yoshimi MURATA and Manabu KIUCHI

1. 緒言

上界法は、従来、自由表面の多い加工問題の解析にはあまり向かないとされ、適用例も比較的少なかった。筆者らは、前報¹⁾において、UBETの基礎理論を応用して、単純な速度場を持つ要素を組み合わせるにより、円柱ビレットのすえ込み加工の解析を行い、自由表面の多い加工に対してもUBETが適用できることを示した。しかし、前報で用いた解析モデルでは、ビレットのバルジ変形の解析はできるが、いわゆるフォルディングの問題を直接論ずることは不可能だった。本報では、ビレットのバルジング、フォルディングを解析できる数式モデルを提案し、それをを用いた解析結果について考察を加える。

2. 解析モデルと基礎式

変形途中のビレットを図1に示すごとく、2つの領域 Zone I, Zone II に分割する。ただし、解析モデルはその対称性より、ビレットの1/2部分についてのみ考えるものとする。Zone I 内での速度場の一般形を、点Oを



第1図 バルジング, およびフォルディング解析モデル

中心とする円筒座標系により、次式のように仮定する。

$$\dot{U}_x = R(ay + b), \dot{U}_y = -ay^2 - 2by, \dot{U}_\theta = 0 \quad (1)$$

この速度場は前報の解析で使用したものと同一である。Zone II 内での速度場の一般形は、点Oを極とする球面座標系により表すものとし、また Zone I と Zone II の境界は $\theta = \theta_0$ で示されるとする。さて、Zone I の速度場を球面座標系で表すと次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \dot{U}_r &= ar^2 \cos \theta (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + br (\sin^2 \theta - 2 \cos^2 \theta) \\ \dot{U}_\theta &= 2 ar^2 \sin \theta \cos^2 \theta + 3 br \sin \theta \cos \theta \\ \dot{U}_\phi &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Zone I と Zone II の速度場は、その境界において、垂直速度成分の連続条件を満足する必要がある。したがって、Zone II 内での θ 方向速度の一般形を次式のように仮定する。

$$\dot{U}_\theta = (2 ar^2 \cos \theta + 3 br) \sin \theta \cos \theta (1 + f(r) \cdot g(\theta)) \quad (3)$$

ここで、 $f(r)$, $g(\theta)$ は、それぞれ、 r , θ の関数である。 $g(\theta_0) = 0$ を満足するような関数形を $g(\theta)$ に選べば、境界における垂直速度成分の連続条件は満足される。ところで、球面座標系では、軸対称問題について、材料の流動速度とひずみ速度の間に、次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \partial \dot{U}_r / \partial r, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = (\partial \dot{U}_\theta / \partial \theta + \dot{U}_r) / r \\ \dot{\epsilon}_{\phi\phi} &= (\dot{U}_r \sin \theta + \dot{U}_\theta \cos \theta) / (r \sin \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

体積一定の条件により、 $\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{\phi\phi} = 0$ 、したがって次式が成立する。

$$\partial \dot{U}_r / \partial r + 2 \cdot \dot{U}_r / r = -(\partial \dot{U}_\theta / \partial \theta + \dot{U}_\theta \cot \theta) / r \quad (5)$$

(5)式に(3)式を代入し、さらに $f(r) = C_1 r^2 + C_2 r + C_3$ と置くと、 \dot{U}_r は以下のように求められる。

$$\dot{U}_r = A_1 r^4 / 6 + A_2 r^3 / 5 + A_3 r^2 / 4 + A_4 r / 3 \quad (6)$$

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

ただし, $A_1 = 2aC_1 \cos \theta \{ (2 - 4 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \}$
 $A_2 = 2aC_2 \cos \theta \{ (2 - 4 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \} + 3bC_1 \{ (1 - 3 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \}$
 $A_3 = 2aC_3 \cos \theta \{ (2 - 4 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \} + 3bC_2 \{ (1 - 3 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \} + 4a \cos \theta (1 - 2 \cos^2 \theta)$
 $A_4 = 3bC_3 \{ (1 - 3 \cos^2 \theta)g(\theta) - \sin \theta \cos \theta g'(\theta) \} + 3b(1 - 3 \cos^2 \theta)$

以上, (1), (3), (6) 式より, Zone I, Zone II 内の速度場が定式化された。また, (3), (6) 式より, $g(\theta_0) = 0, g'(\theta_0) = 0$ を満足するような関数形を $g(\theta)$ に選べば, Zone I, Zone II の速度成分は, 境界 $\theta = \theta_0$ において, 垂直方向 (θ 方向), せん断方向 (r 方向)とも連続となり, 領域間の相対すべりは生じない。したがって, 以下の解析では, 上述の関係を満足する $g(\theta)$ の関数形を用いた。このようにすると, ビレットの全仕事率は, Zone I, Zone II の内部仕事率および Zone I-工具接触面の摩擦仕事率の和となる。また, この速度場にふくまれる a, b, C_1, C_2, C_3 , さらに $g(\theta)$ 内のパラメータを変化させることにより, 全仕事率の最小化を図ることができる。そして, ビレットの形状, 諸定数が与えられると, 速度場の最適化処理を経て, ビレット全域の速度場が定まり, 微小変位後のビレットの形状が予測できる。この際, ビレット自由表面で, 工具面と接触あるいはオーバーラップした部分はフォルディングしたものとみなす。この手順を繰り返すことにより, ビレットのフォルディング, バルジングをシミュレートすることができる。なお, 内部仕事率の計算には数値積分を, また, 最適化の手法としては F. P. S.法を用いた。

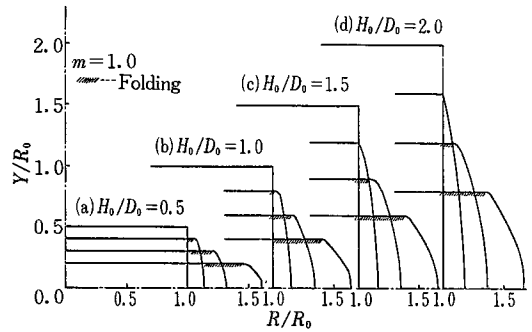
3. 計算結果および検討

上述の解析モデルを用いて, 以下の場合について数値計算を試みた。ビレットの寸法は, すべてビレットの初期直径 D_0 , 初期半径 R_0 により無次元化しており, アスペクト比 (初期高さ比) $H_0/D_0 = 0.5 \sim 2.0$ に変化した。材料は, 剛完全塑性体であり, 変形抵抗 $\sigma_0 = 1.0$ (比変形抵抗), 摩擦については定摩擦の仮定を用い, 摩擦定数 $m = 0.0 \sim 1.0$ の値をとるものとした。一段階あたりの圧縮量は, ビレット初期高さの 1% とし, ビレット高さが初期高さの 40% になるまで計算を行った。また, $g(\theta)$ として, 以下の関数形を用いた。

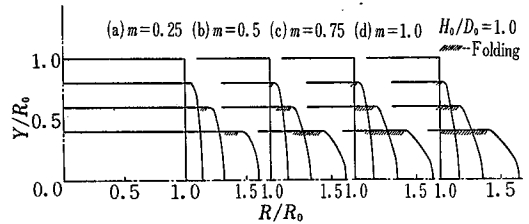
$$g(\theta) = \log(1.0 + \alpha\theta) - \alpha\theta - \beta(\log(1.0 + r\theta) - r\theta) \quad (7)$$

ただし, $\theta = 2(\theta - \theta_0)/(\pi - 2\theta_0)$

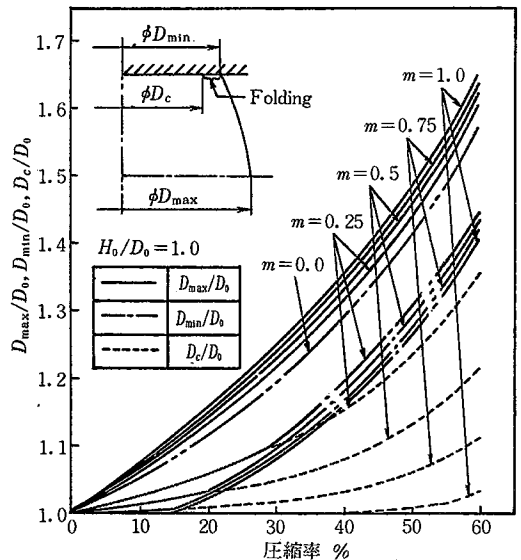
まず, 解析モデルの妥当性を確かめるために, ビレット-工具接触面での摩擦応力が 0 の場合について解析を行った。その結果, 摩擦応力のない場合, ビレットは均一に変形し, 所要加工圧力も妥当であることが確認された。図 2 に, $H_0/D_0 = 0.5 \sim 2.0, m = 1.0$ の場合のビレットの変形状態を示す。ビレットは, 加工初期には単純なバルジ変形をするが, 加工が進むにつれて, 自由表



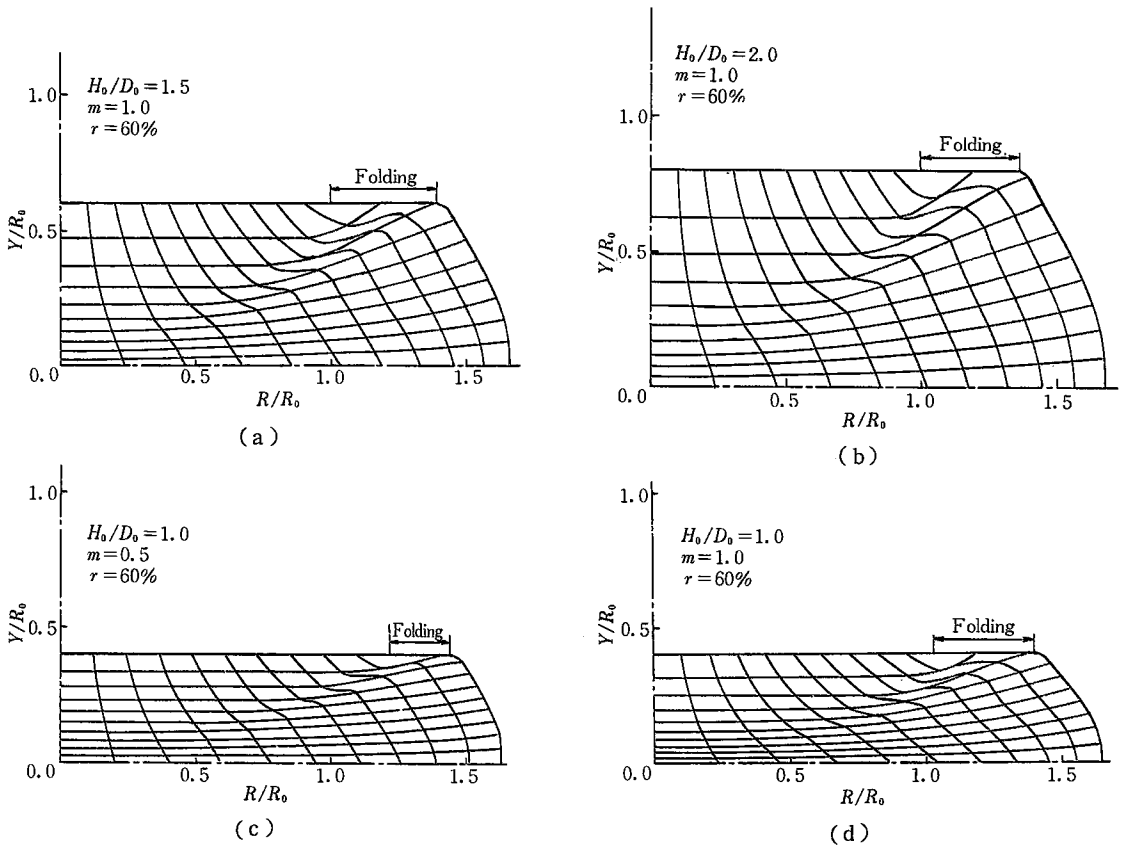
第 2 図 ビレットの変形状態



第 3 図 摩擦条件のビレットの変形におよぼす影響

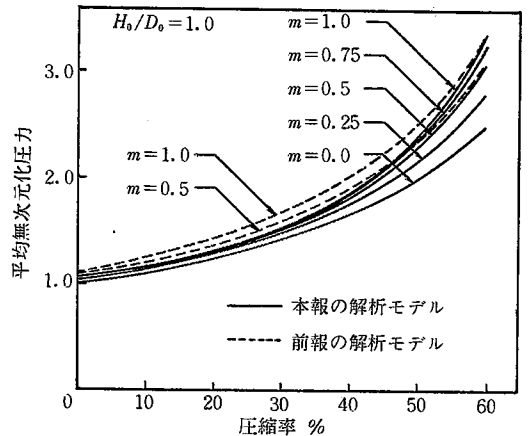


第 4 図 ビレットの変形過程



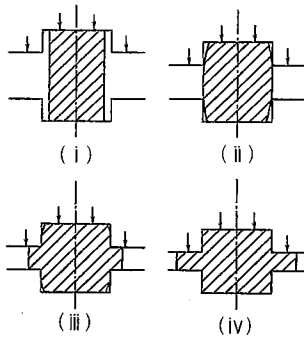
第5図 ビレットの内部格子の変形状態

面がフォルディングしていく状態が再現されている。図3に、摩擦条件のビレットの変形状態におよぼす影響、 $H_0/D_0 = 1.0$ の場合について示す。摩擦条件が厳しいと、工具接触面での相対すべりが拘束され、バルジ変形量およびフォルディング量が大きいたことが分かる。図4に、圧縮率と、ビレット形状を特徴づける、ビレット最大径比 D_{max}/D_0 、ビレット最小径比 D_{min}/D_0 、初期端面拘束率 D_c/D_0 の関係を示す。摩擦条件が厳しいほど、 D_{max}/D_0 が大きくなり、逆に、 D_{min}/D_0 が小さくなっているが、摩擦条件の影響は、それよりもむしろ D_c/D_0 に顕著に表れており、摩擦によりビレット-工具間の相対すべりが拘束されていることが分かる。また、フォルディングは、摩擦条件が厳しいほど早い段階で発生し、フォルディングが発生すると D_{max}/D_0 の増加率が大きくなる。図5に、 $H_0/D_0 = 1.5, 2.0, m = 1.0$ および $H_0/D_0 = 1.0, m = 0.5, 1.0$ で、ビレットが初期高さの40%まで圧縮されたときの内部格子の変形状態を示す。アスペクト比が小さい場合ほど変形が厳しくなること、また、摩擦条件は、自由表面形状にもまして内部の変形状

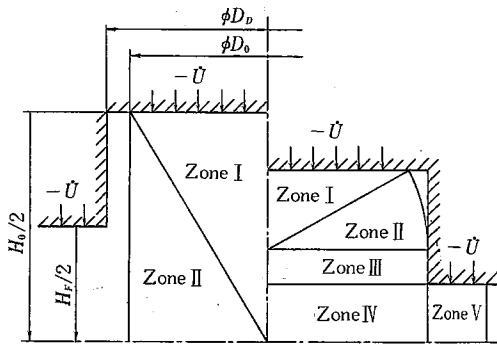


第6図 圧縮率と加工圧力の関係

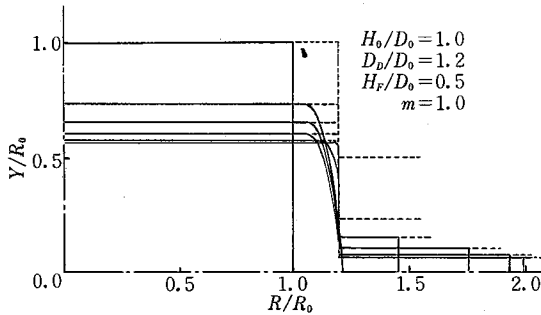
態に大きな影響を与えることが分かる。図6に、 $H_0/D_0 = 1.0$ の場合の圧縮率と所要加工圧力の関係を示す。前報の解析モデルに比べて、本報の解析モデルのほうが圧力が小さくなっているが、これは、前報の解析モデルがフォルディングを再現できないため、特に、摩擦条件が



第7図 ビレットの型への充填過程



第8図 鍛造の型充填度解析モデル

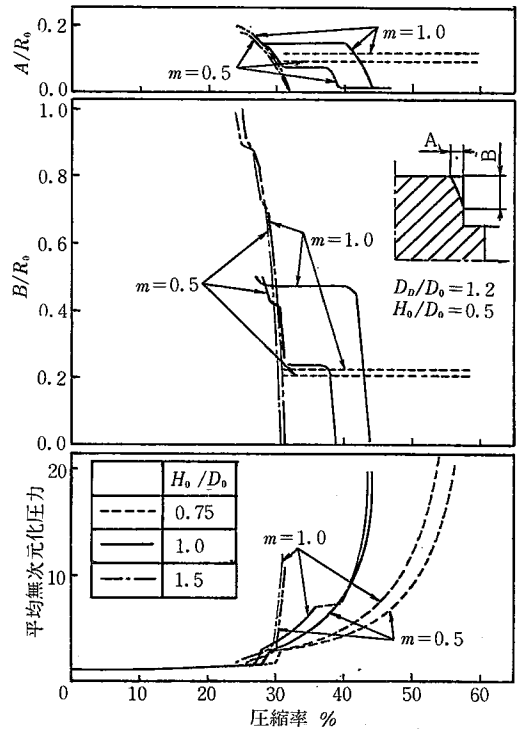


第9図 型への充填過程の一例

厳しいときに、実際の変形状態と大きな差を生じるのに対して、本報の解析モデルは、フォルディングを再現でき、実際の変形状態により近いとと考えられる。

4. 鍛造の型充填度の解析

本報の解析モデルを応用して、図7に示す、簡単な型鍛造過程について、ビレットの型への充填度の解析を行った。図7.(i) → (ii)の過程に対しては、図8の左半分を示すように、本報の解析モデルをそのまま用いる。



第10図 圧縮率と加工圧力、未充てん部長さの関係

図7.(ii) → (iv)の過程に対しては、図8の右半分を示すように、ビレットを5つの領域に分け、Zone I, Zone Iについては本報の解析モデルを応用し、Zone III, Zone IV, Zone VについてはUBETの矩形要素²⁾を使用する。図9に、型への充填過程の一例を示す。図10に、圧縮率と加工圧力、未充てん部長さの関係を示す。摩擦条件が厳しいほど、また、型の深さが浅いほど、型に充填しにくいことが分かる。

5. 結 言

円柱ビレットのすえ込み加工の際のバルジング、フォルディングを解析しうる新しい速度場を開発し、それを用いた計算結果を示した。得られた結果は、実際の変形と比較して妥当であり、本速度場の有効性が判明した。

(1981年9月3日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内, 村田: 第31回塑加連講論, (1980), 355
- 2) " , " : 塑性と加工 vol. 22, no 244 (1981-5), 495