

UBET の鍛造加工への応用に関する研究 I

—中空円板のすえ込み加工の解析—

Study on Application of UBET (Upper Bound Elemental Technique) to Forging I

—Analysis of Hollow Disk Forging—

木 内 学*・今 井 敏 博**・鄭 顕 甲***・柳 本 潤*

Manabu KIUCHI, Toshihiro IMAI, Hyun Kap CHUNG and Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

中空円板のすえ込み加工は、鍛造の基本的加工法の一つであるばかりでなく、摩擦係数の決定に用いられるなど重要な意味を有する加工法である。この中空円板のすえ込み加工に関する解析は、従来より種々試みられており、スラブ法によるリング圧縮試験のキャリブレーション¹⁾をはじめ、工藤²⁾や Avitzur³⁾による上界法を用いた解析例、剛塑性有限要素法による解析例⁴⁾等が報告されている。筆者らは、UBET の鍛造加工への応用の一環として、UBET による中空円板のすえ込み加工の解析に関する研究を行っている。

従来より、UBET は自由表面を多く含む解析には向かないとされてきたが、すでに、円柱ピレットのすえ込み加工におけるバルジ変形の解析ばかりでなく、フォルディング現象もシミュレート可能であることが示されている⁵⁾。筆者らは円柱ピレットのバルジ変形速度場を拡張することにより、自由表面を内径側と外径側に持つ中空円板の UBET による解析法を開発した。さらに、材料の加工硬化を考慮した解析や工具による壁面拘束の問題への応用を可能とした。本報では、新速度場を提案し、妥当性の確認、他の解析法による結果や実測値との比較について報告する。

2. 解析モデルと基礎式

2-1 解析モデル

解析対象となる中空円板（以下ワークと呼ぶ）を、図 1 に示すごとく軸方向に n 等分する。解析モデルはその対称性より 1/2 部分についてのみ考える。

要素 E_i 内での動的相容速度場を次式に示す。

$$\dot{U}_r^{(i)} = (a_i r - A_i/r)y + b_i r - B_i/r \quad (1)$$

$$\dot{U}_y^{(i)} = -a_i y^2 - 2b_i y + c_i \quad (2)$$

ここで、 a_i, b_i, c_i, A_i, B_i は未知係数である。この速度場が体積一定の条件を満たすのは明白である。

2-2 解析モデルを構成する諸条件

① 連続条件

要素間境界において相対すべりがなく、かつ、変形後、ワークのプロファイルに段差が生じないために、

$$\dot{U}_r^{(i)} = \dot{U}_r^{(i+1)} \quad [y = y_{i+1}] \quad (3)$$

また、要素間の垂直速度の連続条件より、

$$\dot{U}_y^{(i)} = \dot{U}_y^{(i+1)} \quad [y = y_{i+1}] \quad (4)$$

② 境界条件

1) ワーク-工具面での軸方向速度は、工具速度 $-\dot{U}$ に等しい。

$$\dot{U}_y^{(n)} = -\dot{U} \quad [y = y_{n+1}] \quad (5)$$

2) ワークの軸方向対称面 $y = y_1$ での軸方向速度は 0 である。

$$\dot{U}_y^{(1)} = 0 \quad [y = y_1] \quad (6)$$

ワーク全体の速度場を定めるためには、 a_i, b_i, c_i, A_i, B_i ($i=1 \sim n$) の計 $5n$ 個の未知係数を定める必要がある。上記の連続条件および境界条件から、未知係数に関し $3n-1$ 個の方程式が得られる。したがって、 $2n+1$ 個の未知係数が準独立変数となる。この準独立変数を仮定すると、ワーク全体の速度場が定まり全仕事率を計算することができる。次に、準独立変数に関して全仕事率の最小化を図り、速度場の最適化を行う。

2-3 仕事率の算出

① 内部仕事率

上記の速度場より、要素 E_i の内部仕事率 $\dot{W}^{(i)}$ は

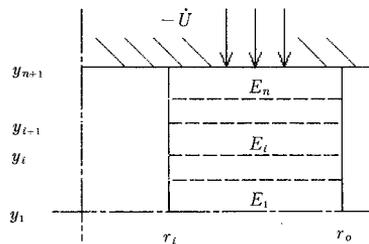


図 1 解析モデルと要素分割

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

** 日本電装(株)

*** 韓国機械研究所

$$\dot{W}_f^{(i)} = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dv \quad (7)$$

ここで、 $\bar{\sigma} = \sigma_0(1 + \beta \bar{\epsilon})^n$ (8)

$$\dot{\epsilon} = \{2/3(\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2 + 2\dot{\epsilon}_{r\theta}^2)\}^{1/2} \quad (9)$$

② 摩擦損失

ワーク-工具間の摩擦損失 \dot{W}_f は、

$$\dot{W}_f = \int_s (\sigma_0 m / \sqrt{3}) \cdot |\Delta \dot{U}_r| ds \quad (10)$$

ここで、 m は摩擦定数 (friction factor)

$|\Delta \dot{U}_r|$ は相対速度

前述の条件より、要素間境界における相対すべりは生じないので、せん断仕事率は 0 である。また、上記の各積分は数値積分を用いた。

上の方法で求めた各仕事率から全仕事率は、

$$\dot{W} = \sum \dot{W}_i^{(i)} + \dot{W}_f \quad (11)$$

で表され、準独立変数に関して、この \dot{W} の最小化を図る。最小化手法として、F. P. S. 法 (Flexible Polyhedron Serch Method) を用いた。

ワークの変形および相当ひずみは、最適化を経た速度

場から節点の変位増分および積分点の相当ひずみ増分が予測できるので、これらを累積して求める。この手順を繰り返してシミュレーションを進める。1 段階の圧下量はワーク初期高さの 1% とした。

3. 妥当性の確認および他の解析法との比較

上記の解析法を用いて数値計算を行い、妥当性の確認および他の解析法による結果との比較を行った。

3-1 摩擦定数 $m=0$ かつ加工硬化のない場合

まず、 $m=0$ で硬化のない場合を想定して計算を行った。その結果、ワークは均一に変形し内・外径部共にバルジ変形は生じなかった。また、平均工具面圧は常に σ_0 に等しく一定であった。これらの結果は、与えられた条件より予期できる結果と合致している。

3-2 上界法による結果との比較

Avitzur による上界法を用いた解析例³⁾と同一条件について計算し、結果を比較した。材料は $\sigma_0=1$ の剛完全塑性体である。図 2 に各種形状における摩擦定数と相対圧力の関係、図 3 に相対高さに対する相対速度を比較して示す。

相対圧力では本解析法のほうが少し低い値を示した。また、相対速度では差が認められるが、これは仮定している速度場の相違によるものと考えられる。

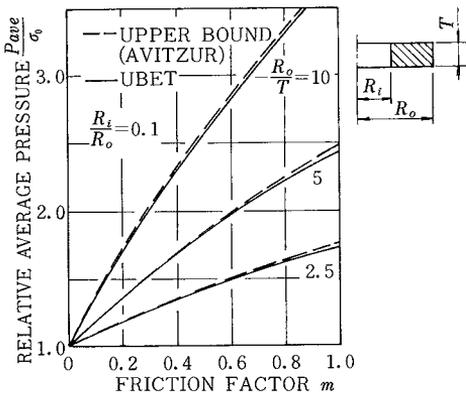


図 2 摩擦定数と相対圧力の関係の比較

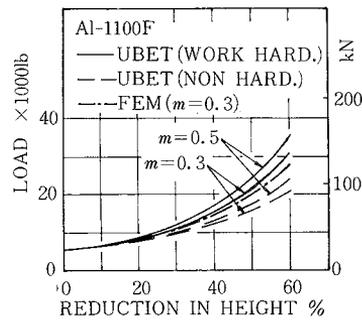


図 4 加工荷重と圧下率の関係の比較

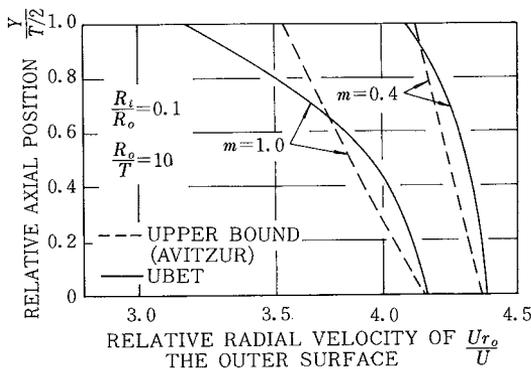


図 3 相対高さに対する相対速度の関係の比較

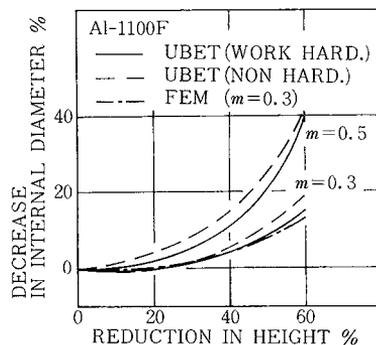


図 5 内径変化率と圧下率との関係の比較

研究速報

3-3 剛塑性有限要素法(FEM)による結果との比較

小林らによる剛塑性有限要素法を用いた解析例⁴⁾と同一条件について計算し、結果を比較した。図4に加工荷重、図5に内径変化率をおのおのの圧下率に対比させて示す。本解析法の結果は加工硬化を考慮する場合と、考慮しない場合の両方を示す。材料特性を(12)式に示す。なお、形状は $R_i=1.5$, $R_o=3.0$, $T=2.0$ (in)である。

$$\bar{\sigma} = 113.76(1 + 0.768\bar{\epsilon}) \text{ MN/m}^2 \quad (12)$$

加工荷重は、加工硬化を考慮した場合、FEMの結果に対しわずかに高いものの良い対応を示している。一方、内径変化率も加工荷重と同様に良い対応が認められる。また、加工硬化を考慮した結果は硬化を考慮しない結果より少ない値を示している。これは変形仕事率の均一化に対応する傾向とみられ、定性的に妥当性のある結果と言える。

次に、圧下率が20%、40%および60%におけるワークのプロファイルをFEMと本解析法の結果を比較して図6に示す。良い対応が認められるが、細部で若干差が生じた。この理由として、本解析例では要素が少なく形状が細かく表現できないこと、フォールディングを考慮していない要素を用いていることが考えられる。しかし、圧下率60%で、上下対称軸線上において内径部の凹みが、本解析例では多少顕著であるが、表現できているところなど重要な特徴はとらえていると思われる。

3-4 リング圧縮試験との比較

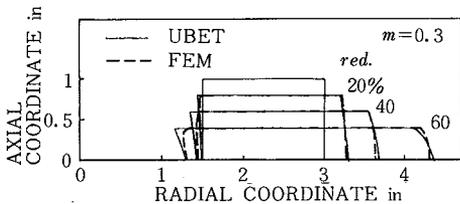


図6 ワークのプロファイルの比較

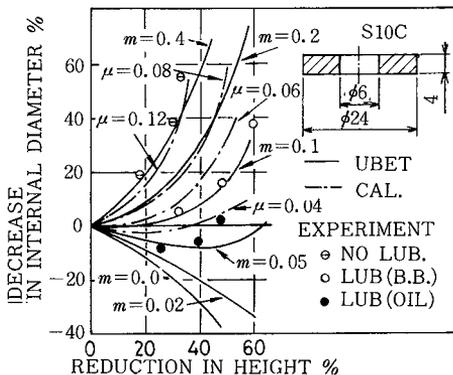


図7 キャリブレーション曲線との比較

図7にスラブ法によるリング圧縮試験のキャリブレーション曲線⁵⁾と各種潤滑剤による実験結果⁷⁾、および同一加工条件を用いて本解析法により求めた結果を示す。

摩擦力の仮定には、面圧に乗ずる摩擦係数 μ を用いる方法と、せん断変形抵抗に乗ずる摩擦定数 m を用いる方法があり、リング圧縮試験のキャリブレーション曲線は前者を、本解析法は後者を用いている。したがって、この図から μ と m の関係を予測することができる。また、本解析法による曲線は実験結果と良い対応を示し、良好なシミュレーションであることが推察できる。

以上、種々の観点より、今回開発した解析法の妥当性の確認および他の解析法による結果との比較等を行い、本解析法が、実際の問題に十分対応し得る解析法であると判断することができた。そこで、筆者らは中空円板のすえ込み実験を行い、摩擦定数の決定やワークの変形プロファイルの比較などを試みた。

4. 実験結果との比較

実験に供した試験片の形状を図8に、素材(S25C)の化学成分を表1に示す。その応力-ひずみ関係式を(13)式に示す。

$$\bar{\sigma} = 35.0(1 + 50.0\bar{\epsilon})^{0.228} \text{ kgf/mm}^2 \quad (13)$$

なお、試験片と工具の境界は、無潤滑とテフロン紙による潤滑の2種類とした。

実験結果および解析結果を、図9に加工荷重、図10に内径変化率をおのおのの圧下率に対比させて示す。

加工荷重に関し、本解析法による結果と、実験結果とを比べると、無潤滑における摩擦定数として $m=0.5$ 、テフロン潤滑における摩擦定数として $m=0.1$ が推定され

表1 化学成分

	(wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
S25C	0.25	0.23	0.48	0.025	0.016

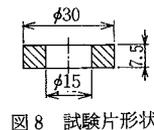


図8 試験片形状

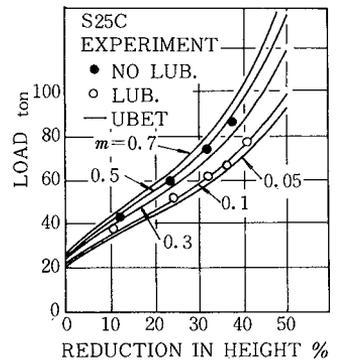


図9 加工荷重と圧下率

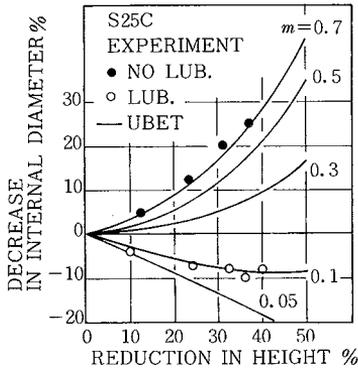


図 10 内径変化率と圧下率

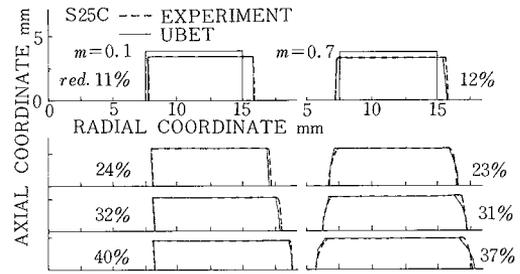


図 11 ワークのプロフィール

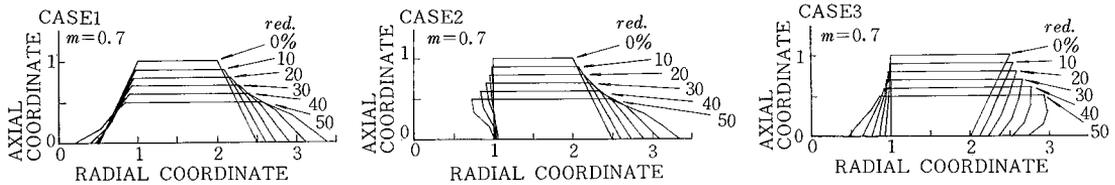


図 12 本解析法の応用例

るが、一方、内径変化率に関する結果からは、無潤滑における摩擦定数として $m=0.7$ 、テフロン潤滑における摩擦定数として $m=0.1$ が推定される。すなわち、無潤滑の場合、加工荷重の比較より得られた結果とは一致していない。これは、UBET では、加工荷重が実際の値よりも高くなる傾向を持つことを考え合わせれば納得しうる結果であり、本実験における無潤滑状態の摩擦定数は $m=0.7$ に近いと考えられる。一般に、理想的な無潤滑(真実接触面積比 100%)条件に比べて、現実的に簡便に実施しうる無潤滑状態において摩擦定数 $m=1.0$ を実現するのは困難と思われ、本実験で使用した工具および試験片の面粗さ(研削仕上げ $R_z < 6.3\mu\text{m}$)を考慮すれば、これはかなり実際の結果である。

次に、ワークのプロフィールについて実験および解析の結果を比較して図 11 に示す。解析結果は $m=0.1$ および $m=0.7$ を用いたものである。

一般的に良い対応が認められる。特に、 $m=0.1$ の場合はほぼ一致している。 $m=0.7$ の場合は外径の工具接触部付近で差が認められる。この原因は、FEM と比較したときと同様に、実際にはフォルディングが発生しているが、本解析法ではそれを考慮しない要素モデルを使用しているためと考えられる。 $m=0.1$ で良い対応を示すのは、テフロン潤滑ではほとんどフォルディングが発生しないためである。

以上のことから、本解析法は m が非常に大きくフォル

ディングの影響の大きい範囲では、加工荷重が若干高くなり、形状も少し差が認められるが、それ以外の m の範囲では良い対応が得られ、実際の問題に十分対応できる解析法であると言える。

5. 実際の問題への応用

本解析法は、軸対称でかつ平行平板にはさまれる任意断面のワークへの適用が可能である。図 12 にその一例を示す。

6. ま と め

本研究では、UBET による円柱ビレットのバルジ変形速度場を応用して、自由変形表面を持つ中空円板のすえ込み加工に関する、加工硬化の考慮が可能な解析法を開発した。本解析法を用いて計算した結果と他の解析法や実験による結果との比較を行い、本解析法の特徴について検討するとともに、実際の問題への適用についての有効性を確認した。
(1985年9月4日受理)

参 考 文 献

- 1) Male, A. T.・Cockcroft, M. G.: *J. Inst. Metals*, 93, (1964/65), 38
- 2) Kudo, H: *Int. J. Mech. Sci.*, 2(1960), 102
- 3) B. Avitzur・F. Sauerwine: *Trans. ASME* 100, (1978), 340
- 4) H. MATUMOTO・S. I. OH・S. KOBAYASHI: *Proc. 18th Int. MTDR Conf.* 3
- 5) 木内・村田・矢吹: 塑性と加工, 26, 290, (1985)
- 6) 佐藤・高橋: 第 22 回塑加連講論, 259
- 7) 村松: 第 7 回冷鍛実務講座, 66