

UBETの鍛造加工への応用に関する研究・V

——非軸対称すえ込み加工の解析(1)——

Application of UBET to Non-Axisymmetric Upsetting Process (1)

木内 学*・鄭 顕甲*・柳本 潤*

Manabu KIUCHI, Hyun-Kap CHUNG and Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

筆者らは、塑性加工解析手法の一種であるUBET (Upper-Bound Elemental Technique)法を用いて、さまざまな鍛造加工の解析に関する一連の研究を進めている¹⁻⁷⁾。UBET法は、筆者らがすでに報告した研究成果からも明らかなように、極めて有用かつ経済的な解析手法であり、解析精度についても、適切な数学的モデルを構成することにより、十分満足できる結果が得られることが確認されている。本報では、これらの研究の一環として、非軸対称中空素材のすえ込み加工の解析を可能にする数学的モデルの開発を試みた。すなわち、非軸対称のびまたは圧縮変形を対象とする一般性のある速度場を新たに提案し、これを用いた解析手法を定式化した。また、解析の有効性を確認するため、剛塑性FEMによる解析結果^{8,9)}との比較を行った。その結果、本報で提案した速度場は、被加工材の自由表面の変形後の形状に関して、現時点で十分満足できる結果を与えるものとは言えないが、全般的に、妥当性のある結果を与えることが確認された。また、本解析法の応用例として、幾つかの非軸対称すえ込み加工について解析を行い、種々の知見を得たので、以下に報告する。

2. 解析モデルと基礎式

2.1 変形要素と速度場

解析対象とする非軸対称中空素材 (以下被加工材と称する) を、Fig. 1(a)に示す。図に示すように、本報では、とりあえず被加工材を中心軸方向(y軸)に一つの要素層に、また、周方向(θ方向)にk個の変形要素に分割する。被加工材の要素への分割に際して、中心軸方向に一つの要素層を想定したのは、本報では、すえ込み加工による被加工材のバルジ変形を考慮していないためである(バルジ変形の取り扱いについては次報以下で検討する)。j番目の要素E_j内での動的・可容速度場を、一般的に次

式のように表現する。

$$\dot{U}_y^{(j)} = C1 \cdot y + C2 \tag{1}$$

$$\dot{U}_r^{(j)} = (A_j \cdot r^2 + B_j \cdot r)(a_j \theta + b_j) + (a_j' \theta + b_j')/r - 0.5C1 \cdot r + D_j \theta^2 r^2 + Q_j \cdot r \theta^2 \tag{2}$$

$$\dot{U}_\theta^{(j)} = -(3A_j \cdot r^2 + 2B_j \cdot r)(0.5 \cdot a_j \theta^2 + b_j \theta) - D_j \theta^3 \cdot r^2 - 2/3 Q_j \theta^3 \cdot r \tag{3}$$

ここで、C1, C2, A_j, B_j, a_j, b_j, D_j, Q_jは未知係数である。また、解析の効率化を図るため変数変換を行い、式(2), (3)を、次式のように表現することもできる。

$$\dot{U}_r^{(j)} = r^2 \cdot (A_j^* \theta + Q_j^* + D_j \theta^2) + r \cdot (P_j^* \theta + B_j^* - 0.5C1 + Q_j \theta^2) + (a_j' \theta + b_j')/r \tag{4}$$

$$\dot{U}_\theta^{(j)} = -r^2 \cdot (1.5A_j^* \theta^2 + 3Q_j^* \theta + D_j \theta^3) - r \cdot (P_j^* \theta^2 + 2B_j^* \theta + 2/3 Q_j \theta^3) \tag{5}$$

ここで、A_j*=A_j·a_j, B_j*=B_j·b_j, Q_j*=A_j·b_j, P_j*=B_j·a_jである。

ただし、この速度場では、軸方向速度 \dot{U}_y は被加工材内部のy軸に垂直な断面上で一様に分布する。したがって、被加工材の変形中または変形後の外形状、内形状はy軸方向に直線状をなしていると仮定していることを注意されたい。半径方向速度 \dot{U}_r および周方向速度 \dot{U}_θ は、未知係数の値に応じて、被加工材の内面および外面の変形後の

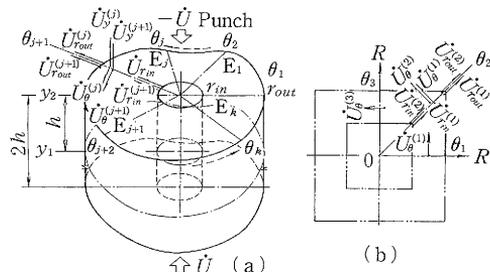


Fig. 1 Schematic illustration of workpiece divided into elements and velocity components occurred in them

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
周方向の形状をさまざまに表示しうる形となっている。この速度場より得られる各方向ひずみ速度成分は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{yy} &= C1 \\ \dot{\epsilon}_{rr} &= 2A_j^* \cdot \theta \cdot r + 2Q_j^* \cdot r + P_j^* \cdot \theta - (a_j' \cdot \theta + b_j') \\ &\quad / r^2 + B_j^* - 0.5C1 + 2D_j \theta^2 \cdot r + Q_j \theta^2 \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= -2A_j^* \cdot \theta \cdot r - 2Q_j^* \cdot r - P_j^* \cdot \theta + (a_j' \cdot \theta + b_j') \\ &\quad / r^2 - B_j^* + 0.5C1 - 2D_j \theta^2 \cdot r - Q_j \theta^2 \\ \dot{\epsilon}_{\theta r} &= 0.5 \{ A_j^* \cdot r + P_j^* - 1.5A_j^* \theta^2 \cdot r - 3Q_j^* \theta \\ &\quad \cdot r + a_j' / r^2 - D_j (\theta^2 + 2) \theta \cdot r + 2Q_j \theta \} \\ \dot{\epsilon}_{\theta y} &= \dot{\epsilon}_{yr} = 0 \\ \dot{\epsilon}_v &= \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上式より体積ひずみ速度一定の条件が満たされていることは明らかである。

2・2 解析モデルに課せられる諸条件式

(1)連続条件 被加工材の内表面と外表面において、変形後、隣接する要素間で段差が生じないものとする、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{in}^{(j)} &= \dot{U}_{in}^{(j+1)} \quad (7) \\ [\theta = \theta_{j+1}, r = r_{in}] \quad (j=1 \sim k-1) \\ \dot{U}_{out}^{(j)} &= \dot{U}_{out}^{(j+1)} \quad (8) \\ [\theta = \theta_{j+1}, r = r_{out}] \quad (j=1 \sim k-1) \end{aligned} \right\}$$

また、隣接する要素間の境界面上における周方向速度の連続性より、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\theta}^{(j)} &= \dot{U}_{\theta}^{(j+1)} \quad (9) \\ [\theta = \theta_{j+1}] \quad (j=1 \sim k-1) \end{aligned} \right\}$$

(2)境界条件

1) 工具境界面での軸方向速度は、工具速度 $-\dot{U}$ に等しいことから、

$$\dot{U}_y^{(2)} = -\dot{U} \quad [y = y_2] \quad (10)$$

2) 被加工材の軸方向にみた対称面 $y = y_1$ で、軸方向速度は0であるから、

$$\dot{U}_y^{(1)} = 0 \quad [y_1 = 0] \quad (11)$$

また、Fig. 1(b)に示すように、周方向にも対称条件を満足する面($\theta = \theta_1, \theta_3$)がある場合、その面上での周方向速度は0であるから、

$$\dot{U}_{\theta}^{(1)} = 0 \quad [\theta = \theta_1] \quad (12)$$

$$\dot{U}_{\theta}^{(3)} = 0 \quad [\theta = \theta_3] \quad (13)$$

被加工材全体の速度場を求めるためには、動的可容速度場に含まれる未知係数を定める必要がある。周方向に要素数が m 個ある場合、 $C1, C2, A_j^*, B_j^*, Q_j^*, P_j^*, a_j', b_j', D_j, E_j, (j=1 \sim k)$ の計 $8k+2$ 個の未知係数がある。Fig. 1(a)の場合、上記の連続条件および境界条件から、未知係数に関し $4k-2$ (\dot{U}_{θ} は r の2次式であるため、式(9)には $2(k-1)$ の方程式が含まる)個の方程式が得られる。したがって、その差の $4k+4$ 個の未知係数が準独立変数となる。

また、Fig. 1(b)の場合は、2個の要素に対する未知係数は18個である。また未知数に関する方程式の数は10個である。したがって、その差の8個の未知係数が準独立変数になる。これらの準独立変数を仮定すると、被加工材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。準独立変数の値の決定は、全仕事率の最小化、すなわち速度場の最適化を達成する過程で行われる。なお、仕事率の最小化の手法としては、直接探索法の一つであるF・P・S法を用いている。

2・3 仕事率の算出

全仕事率 \dot{W} は、各要素の内部仕事率 \dot{W}_i 、工具面上での摩擦損失 \dot{W}_f 、要素境界上でのせん断仕事率 \dot{W}_s 等により、

$$\dot{W} = \sum \dot{W}_i^{(j)} + \sum \dot{W}_f^{(j)} + \sum \dot{W}_s^{(j)} \quad (14)$$

で表され、上述の準独立変数に関して、この \dot{W} の最小化を図ることになる。なお、 $\dot{W}_i, \dot{W}_f, \dot{W}_s$ の計算に際しては、シンプソン法による数値積分を利用し、また解析を進める際の1ステップあたりの圧下量は初期高さの1%とした。

3. 解析結果と考察

3・1 解析条件

以上の解析モデル(本報では、Fig. 1(b)を用いた場合)を用いて、Table 1に示す6種類の場合についてシミュレーションを行った。Case 1は、外形状・内形状が共に正方形である中空素材をすえ込む場合であり、Case 2~5は、外形状が正六角形で、内形状がそれぞれ長方形、不規則六角形、正六角形、円形である場合である。Case 1では、Parkらの剛塑性FEMによる解析結果^{8,9)}と比較する都合のため、摩擦定数を $m=0.0, 0.5$ とし、被加工材の変形抵抗についてはFEMによる解析に用いている値と同一とした。Case 2~5の場合には、とりあえず $m=0.1, 0.3$ とし、被加工材の変形抵抗は $\sigma_0=1.0$ (比変形抵抗)として、加工硬化を考慮していない。

3・2 摩擦定数 $m=0$ の場合の解析結果

まず、Case 1について、(15)式で示される変形抵抗を

Table 1 General chart of working conditions used for analysis

Case	1	2	3	4	5
Shape					
Hardening	Hardening	Non($\sigma_0=1$)	Non($\sigma_0=1$)	Non($\sigma_0=1$)	Non($\sigma_0=1$)
Friction factor	$m=0.0$ $=0.5$	0.1 0.3	0.1 0.3	0.1 0.3	0.1 0.3
Inner	R・S	RT・S	Irregular hexagon	R・H	Round
Outer	R・S	R・H	R・H	R・H	R・H

Note: R・S; Regular Square R・H; Regular Hexagon
RT・S; Rectangular Square.

研究速報

用い、 $m=0$ を想定した解析を行った。その結果をFig. 2(a), (b)に示す。被加工材は均一に変形し、内・外面共に周方向のバルジ変形は生じていない。これらの結果は、 $m=0$ の条件より予想される結果と合致している。

3.3 剛塑性FEMによる結果^{8,9)}との比較

Parkらによる剛塑性FEMを用いた解析例^{8,9)}と同一条件について計算し、結果を比較した結果をFig. 3(a), (b)に示す。この場合、被加工材は焼なましAl-1100であり、変形抵抗は次式で表される。

$$\bar{\sigma} = 72.74(1 + \bar{\epsilon}/0.052)^{0.3} \text{ MPa} \quad (15)$$

また、本解析では、摩擦定数 $m=0.5$ とした。全体的に見て解析結果は、両者の間で良い対応をしているが、本解析の結果はParkらの結果より加工荷重をやや高く評価している。Fig. 3(b)に示した自由表面の変形形状についてのParkらによる結果のうち、 $y=h$ における形状は工具に接している面上の、 $y=0$ における形状は軸方向にみた中央面上での変形形状を表している。変形形状については、被加工材断面の対角線上、特に外面コーナ一部

近傍で、本解析結果とFEMによる解析結果との間に多少のくい違いがあるが、全般的には良い対応が得られていると思われる。特に、軸方向のバルジ変形が少ない低下率の段階では、両者がほぼ一致しているのがわかる。変形後の形状についての解析結果にくい違いが見られるのは、本解析のモデルでは軸方向のバルジ変形および座屈変形を考慮していないこと、要素分割数が少ないため、被加工材の変形の自由度が低いこと、などのためであると考えられる。

4. 本解析モデルの応用例

以上の結果より、本解析モデルが、非軸対称中空素材のすえ込み加工について、ほぼ妥当な結果を与えることが判明したので、その応用としてTable 1に示すCase 2~5の場合について解析を行った。Case 2は $\alpha=90^\circ$ 、Case 3は $\alpha=73.9^\circ$ 、Case 4は $\alpha=60^\circ$ である。Fig. 4(a)~(d)には、各場合の平均面圧を、Fig. 5(a)~(d)には、変形後の形状を示す。各場合とも平均面圧は、低下率の増加に伴い増加するが、被加工材の断面積の差に対

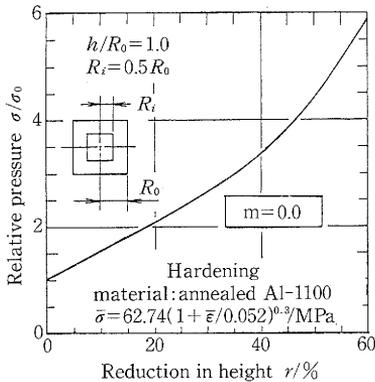


Fig. 2 (a) Relative pressure-displacement curve for the square-ring compression (Case 1)

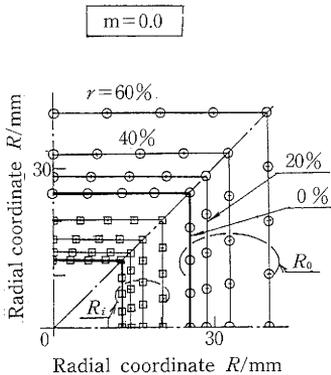


Fig. 2 (b) Top views in the square-ring compression at every 20% reduction in height (Case 1)

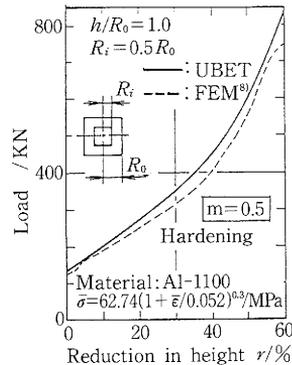


Fig. 3 (a) Load-displacement for the square-ring compression (Case 1)

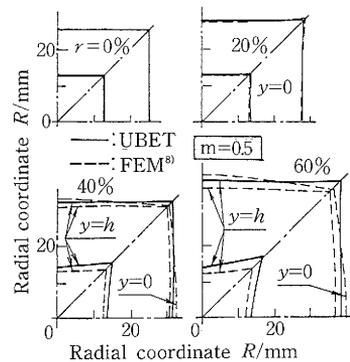


Fig. 3 (b) Top views in the square-ring compression at every 20% reduction in height (Case 1)

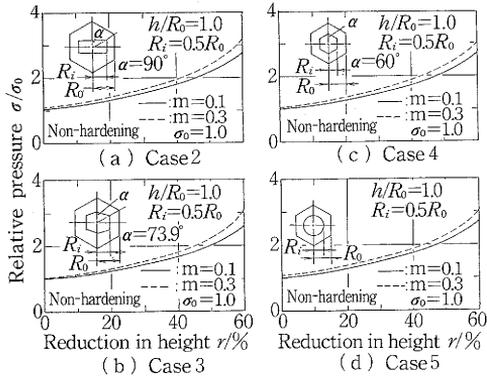


Fig. 4 Relative pressure-displacement curve for the hexagon-ring compression

応して平均面圧に差があるのがわかる。変形後の内面形状をみると、Case 2~4の場合、 m が増大し、 α の値が大きくなるとともに、内側へ向かっての変形が大きくなることわかる。特に、図中の縦軸の近傍の変形が大きいが、これは、被加工材の縦軸方向の肉厚が、横軸方向の肉厚よりも大きいことと関係している。この傾向のまとめをFig. 6に示す。Case 5の場合は、分割した要素の境界面と周方向両対称面の近傍で、内側への変形に若干の差を示すが、ほぼ均一に変形することがわかる。

5. ま と め

本研究では、非軸対称中空素材のすえ込み加工の解析を可能とする新しい速度場を提案し、解析モデルの有効性を確かめるため、剛塑性FEMによる解析結果との比較を行った。その結果、

1. 本解析モデルは、被加工材の変形形状や加工荷重についてほぼ妥当な結果を与えるが、自由表面の軸方向バルジ変形や座屈変形などの変形を適確に解析するためには、速度場を更に拡張する必要があること、

2. 本解析手法は、パソコンレベルの電算機での運用が可能であること、などが判明した (16ビットパソコンで、圧下率60%まで30時間以内、ただし、大型計算機で4分以内)。

今後、速度場の改善、あるいはバルジ変形などを取り扱う多層要素モデルの開発等の研究を進める予定である。
(1988年10月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・村田良美：塑性と加工, 22-244 (1981)
- 2) 木内 学・村田良美：塑性と加工, 22-246 (1981)
- 3) 木内 学・柳本 潤・今井敏博・鄭 顯甲：塑性と加工, 28-319 (1987-8)
- 4) 木内 学・鄭 顯甲・今井敏博・柳本 潤：塑性と加

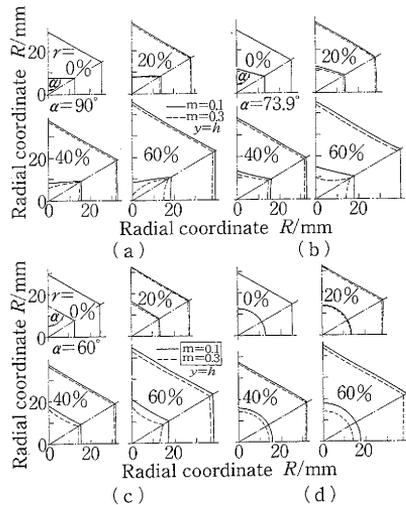


Fig. 5 Top views in the hexagon-ring compression at every 20% reduction in height

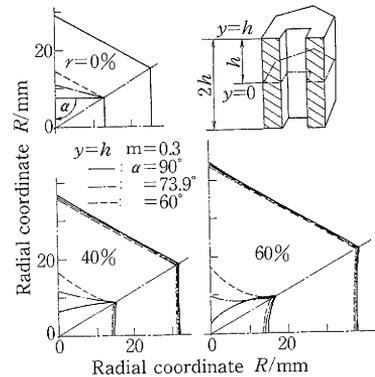


Fig. 6 Top views in the hexagon-ring compression at 40% and 60% reduction in height

工, 28-323 (1987-12)

- 5) 木内 学・鄭 顯甲：昭62春塑加論, 419
- 6) 木内 学・鄭 顯甲：第38回塑加連講会, 599
- 7) 木内 学・鄭 顯甲：昭63春塑加論, 695
- 8) Park, J.J. and Oh, S.I., "Application of Three-Dimensional Finite Element Analysis to Metal Forming Process", Proc. 15th. NAMRC., pp. 296~303, 198.
- 9) Park, J.J. and Kobayashi, S., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Compression", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, pp. 165~176. 1984.