研 究 速 報
UDC 621.73.04：621.7.011

UBETの鍛造加工への応用に関する研究・IV
——非軸対称すえ込み加工の解析(2)——

Application of UBET to Non-Axisymmetric Upsetting Process (2)

木内　学*・鄭　顯甲**・柳本　潤*
Manabu KIUCHI, Hyun-Kap CHUNG and Jun YANAGIMOTO

1. は じ め に

近年，塑性加工分野においては，さまざまな塑性力学的数値解析法の開発の試みが盛んに行われつつある．筆者らは，比較的簡便かつ有効であり経済的にも有利な解析手法であるUBET法の鍛造加工への応用に関し，一連の研究を進めている[1-6]．前報[1]では，アスペクト比が小さく，肉厚が大きい非軸対称中空素材を対象として，自由表面の軸方向バルジ変形を考慮しない解析モデルを提案し，非軸対称すえ込み加工の解析を行った．

本報では，前報[1]にて提案した解析モデルを，自由表面の軸方向バルジ変形をも表現しうる一般性のある解析モデルに拡張し，正方筒形・六角筒形および円筒形のすえ込み加工への適用を行うとともに，解析モデルの妥当性を確認するため，実測値との比較を行った．また，圧下部の初期端面積が同一な，幾つかの非軸対称中空素材のすえ込み加工の解析を行い，それらの比較を通して種々の知見を得たので，その結果を以下に報告する．

2. 解析モデルと基礎式

2.1 動的可容速度場

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．前報[1]では，被加工材を中心軸（y軸）方向に一つの要素層に分割し解析を行ったが，これは，被加工材の軸方向バルジ変形を考慮していない場合に相当する．

本報では，図に示すように，被加工材を中心軸方向に垂直な分割（境界）面によりn個の要素層に，また，周方向（θ方向）に垂直な分割（境界）面によりk個の要素に分割する場合について検討する．ただし，解析モデルは上下対称性より上1/2部分についてのみ考えるものとする．

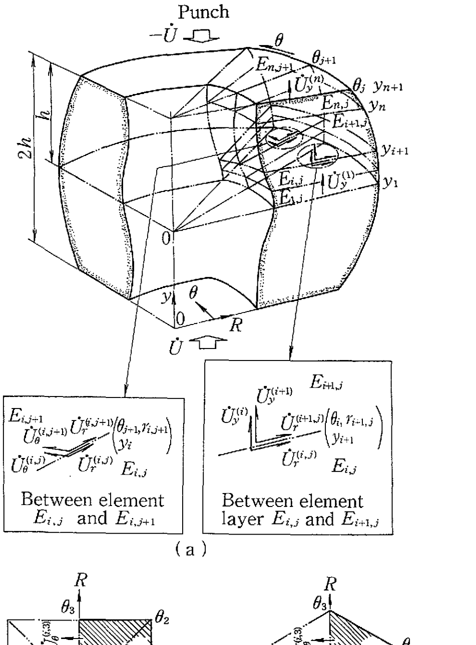
軸方向にi番目の要素（以後要素層iと称する），周方向にj番目の要素$E_{i,j}$内での動的可容速度場を，体積一定の条件を考慮して，次式のように表現する．

$$\dot{U}_y^{(i)}=C1_i\cdot y^2+C2_i\cdot y+C3_i \tag{1}$$

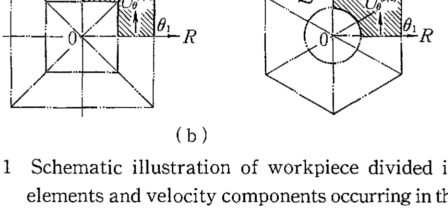
$$\dot{U}_r^{(i,j)}=r\cdot(a_{i,j}\cdot\theta+b_{i,j})/(1+y^2)+(a_{i,j}'\theta+b_{i,j})/r-r\cdot(C1_i\cdot y+C2_i/2) \tag{2}$$

$$\dot{U}_\theta^{(i,j)}=-r\cdot(a_{i,j}\cdot\theta^2+2b_{i,j}\cdot\theta-E_{i,j})/(1+y^2) \tag{3}$$

ここで，$C1_i$，$C2_i$，$C3_i$，$a_{i,j}$，$b_{i,j}$，$E_{i,j}$は未知係数である．ただし，この速度場では，軸方向速度$\dot{U}_y^{(i)}$は各要素層間の境界面上で一様に分布するものとしており，また，半径方向速度$\dot{U}_r^{(i,j)}$および周方向速度の表示式$\dot{U}_\theta^{(i,j)}$は，未知係数の値に応じて，被加工材の内・外面自由表面に



(a)



(b)

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

*東京大学生産技術研究所　第2部
**(財)韓国機械研究所

生ずるさまざまな変形を表現しうる形となっている．

2．2　解析モデルに課せられる諸条件

2．2．1　速度の連続条件

被加工材の内・外表面において，隣接する要素層間および要素間で段差が生じないものとすると，次式が成立する．

要素層間境界面 $[\theta=\theta_j,\ r=r_{i+1,j},\ y=y_{i+1}]$

要素層間での半径方向の相対すべりは発生しないものとして，

$$\dot{U}_r^{(i,j)}=\dot{U}_r^{(i+1,j)}\qquad(i=1\sim n-1,\ j=1\sim k+1)\tag{4}$$

要素間境界面 $[\theta=\theta_{j+1},\ r=r_{i,j+1},\ y=y_i]$

$$\dot{U}_r^{(i,j)}=\dot{U}_r^{(i,j+1)}\qquad(i=1\sim n+1,\ j=1\sim k-1)\tag{5}$$

なお，要素間の軸方向の相対すべりは発生しないように速度場の構成がなされている．また，要素層間境界面 $[y=y_{i+1}]$ での軸方向速度の連続条件より，次式が得られる．

$$\dot{U}_y^{(i)}=\dot{U}_y^{(i+1)}\qquad(i=1\sim n-1)\tag{6}$$

隣接する要素間境界面 $[\theta=\theta_{i+1},\ r=r_{i,j+1},\ y=y_i]$ での周方向速度の連続条件より，次式が得られる．

$$\dot{U}_\theta^{(i,j)}=\dot{U}_\theta^{(i,j+1)}\quad(i=1\sim n+1,\ j=1\sim k-1)\tag{7}$$

2．2．2　境界条件

（1）　工具速度：被加工材と工具との接触面 $[y=y_{n+1}]$ での軸方向速度は，工具速度 $-\dot{U}$ に等しいことから，

$$\dot{U}_y^{(n)}=-\dot{U}\tag{8}$$

（2）対称条件：被加工材の軸方向に見た対称面 $[y=y_1]$ での軸方向速度は0であるから，

$$\dot{U}_y^{(1)}=0\tag{9}$$

また，Fig. 1（b）に示すように，周方向に対称面（$\theta=\theta_1,\ \theta_3$）がある場合，その境界面上で周方向速度は0であるから，

$$\dot{U}_\theta^{(i,1)}=0\qquad[\theta=\theta_1,\ y=y_i]\ (i=1\sim n+1)\tag{10}$$

$$\dot{U}_\theta^{(i,3)}=0\qquad[\theta=\theta_3,\ y=y_i]\ (i=1\sim n+1)\tag{11}$$

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．要素層が n 個で，各要素層における周方向要素分割数が k 個の場合，$C1_i$，$C2_i$，$C3_i$，$a_{i,j}$，$b_{i,j}$，$E_{i,j}$，$(i=1\sim n,\ j=1\sim k)$ の計 $5nk+3n$ 個の未知係数がある．また，上記の諸条件式より，未知係数に関し $5nk-2k+2n-1$ の条件式が得られ，従って，$2k+n+1$ 個の未知係数が準独立変数となる．これらの準独立変数に関し，仕事率を最小化することにより被加工材全体の速度場を定める．なお，仕事率の最小化手法としては，直接探索の一種であるF・P・S法を用いる．

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 $\dot{W}_f$，要素層間境界上でのせん断仕事率 $\dot{W}_s$ により，

$$\dot{W}=\Sigma\dot{W}_i^{(i,j)}+\Sigma\dot{W}_f^{(n,j)}+\Sigma\dot{W}_s^{(i+1,j)}\tag{12}$$

で表され，上述の準独立変数に関して全仕事率 $\dot{W}$ の最小化を行い，速度場を最適化する．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適用した．

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，また，各積分点ごとに相当ひずみの累積を行うことにより，加工硬化を取り扱った．

3．解析結果と実験結果との比較

3．1　実験条件および解析条件

以上に示した解析モデルの妥当性を確認するために，非軸対称中空素材のすえ込み加工の解析ならびに実験を行い，被加工材のプロフィルおよび加工荷重について，両者の比較を行った．実験条件および解析条件をTable 1に示す．本実験ならびに解析は，被加工材の初期形状の変化に伴う加工荷重ならびに変形形状の差を調査することを目的としている．試験片の初期端面形状はそれぞれ正方筒形（Case 1），正六角筒形（Case 2），円筒形（Case 3）であり，各Caseを通し初期内径 D_i および端面積 S_A は同一としてある．試験片の材質は，市販のA1050H14の引抜き棒であり，耐力は11.9kgf/mm²である．また，試験片の化学成分をTable 2に示す．

被加工材の変形抵抗は，単軸圧縮試験より得られた結果をもとに，次式で近似した．

$$\theta_{eq}=103.95(1+2\varepsilon_{eq})^{0.2}\qquad(\mathrm{MPa})\tag{13}$$

なお，試験片端面は研磨仕上げを行っており，圧下端面は，グリースによる潤滑を行った．解析では，摩擦定数 $m=0.7$ を用いたが，これは，本実験の場合，試験片の

Table 1　General chart of working conditions used for analysis and experiment

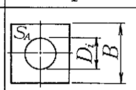
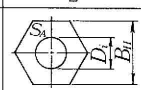
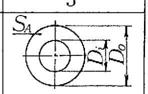
Case	1	2	3
Shape			
Condition	$h_o=32.0,\ 48.0$ $D_i/B=0.625,\ 0.469$ $h_o/B=1.0,\ 1.5$	$h_o=32.0,\ 48.0$ $D_i/B_H=0.568$ $h_o/B_H=0.91,\ 1.371$	$h_o=32.0,\ 48.0$ $D_i/D_o=0.556,\ 0.416$ $h_o/D_o=0.89,\ 1.333$
Area of top surface (S_A)	Constant	Constant	Constant
Friction factor m	0.7	0.7	0.7
Lubricant	Grease	Grease	Grease
Hardening	$\bar{\sigma}=103.95(1+2\bar{\varepsilon})^{0.2}$/MPa	$\bar{\sigma}=103.95(1+2\bar{\varepsilon})^{0.2}$	$\bar{\sigma}=103.95(1+2\bar{\varepsilon})^{0.2}$

Table 2　Composition of workpiece (wt %)

	Cu	Si	Fe	Mg	Zn	Cr	Ti
A1050H14	0.01	0.10	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01

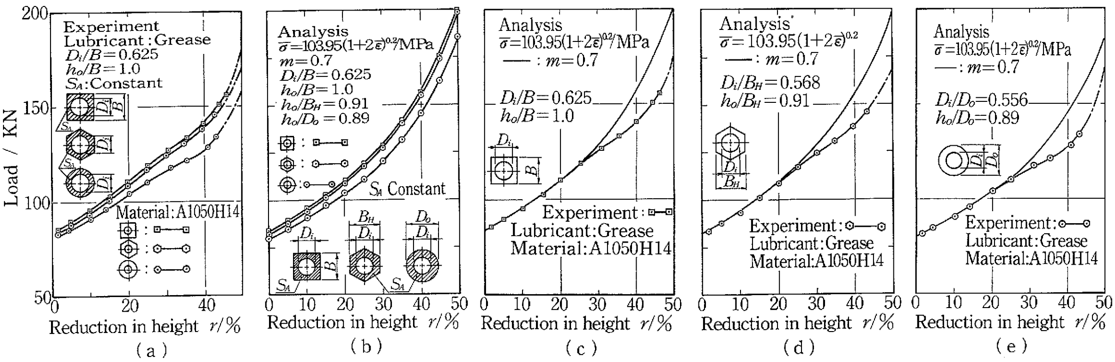


Fig. 2 Comparison of the computed loads with the experimental results in square, hexagon and cylindrical ring upsetting ($h_o/B=1.0$, $D_i/B=0.625$)

肉厚が小さいため，加工開始後すぐにグリースが押出されてしまい，潤滑の効果が低いと判断したためである．なお，木内ら[2]により，無潤滑の場合には，摩擦定数$m=0.7$程度は妥当な値であることが示されている．

3.2 実測値と解析結果との比較

3.2.1 $D_i/B=0.625$, $h_o/B=1.0$の場合

（1） 加工荷重の比較

一般に，すえ込み加工においては，被加工材が異なる端面形状を有していても，内径ならびに初期端面積が同一である場合には，外形形状の差が加工荷重にほとんど影響を及ぼさないことが予想される．このような場合についての実験結果ならびに解析結果を，Fig. 2（a），（b）に示す．図より加工荷重は，解析結果・実験結果いずれも，正方筒形→正六角筒形→円筒形の順にわずかながら小さくなる傾向を示している．ただし，円筒形については，圧下率の増加に伴い他の形状との差が大きくなる傾向にあるが，これは，変形モードならびに工具直下に形成される剛体域（デッドメタル）の形状の差に起因しているものと考えられる．

また，加工荷重の実測値と解析値との比較を，それぞれの試験片形状ごとにFig. 2（c），（d），（e）に示す．いずれの場合も，解析値と実測値とは圧下率25％近傍までは極めて良い対応を示しているが，本実験の場合，それ以上の圧下率になると，被加工材に座屈変形が発生するため，解析値と実験値との差が大きくなる傾向にある．また，実験では，圧下率50％以上になると軸方向の対称面近傍で折れ込み変形が生じるため，加工荷重は急激に増加する傾向を示す．

（2） 変形形状の比較

Fig. 3（a）（b）はそれぞれ正方筒形および円筒形の場合の変形形状について，解析結果と実験結果とを比較したものである．全般的に両者は良く対応しているものの，圧下部端面の内径側の変形については，解析結果のほうがわずかに大きい．

また，正方筒形の場合，軸方向対称面上の局所変形（座

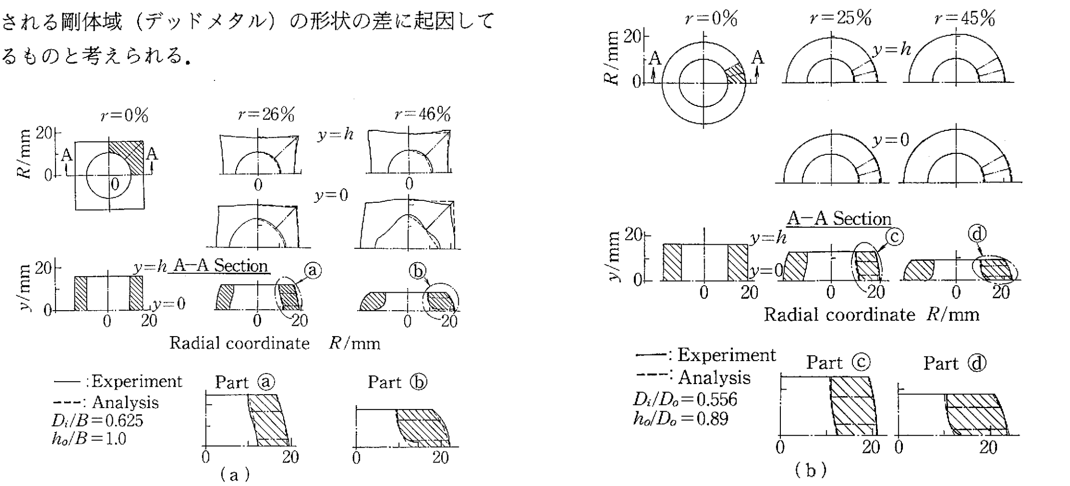


Fig. 3 Comparison of the computed spread contours with experimental results in square and cylindrical ring upsetting ($h_o/B=1.0$, $D_i/B=0.625$)

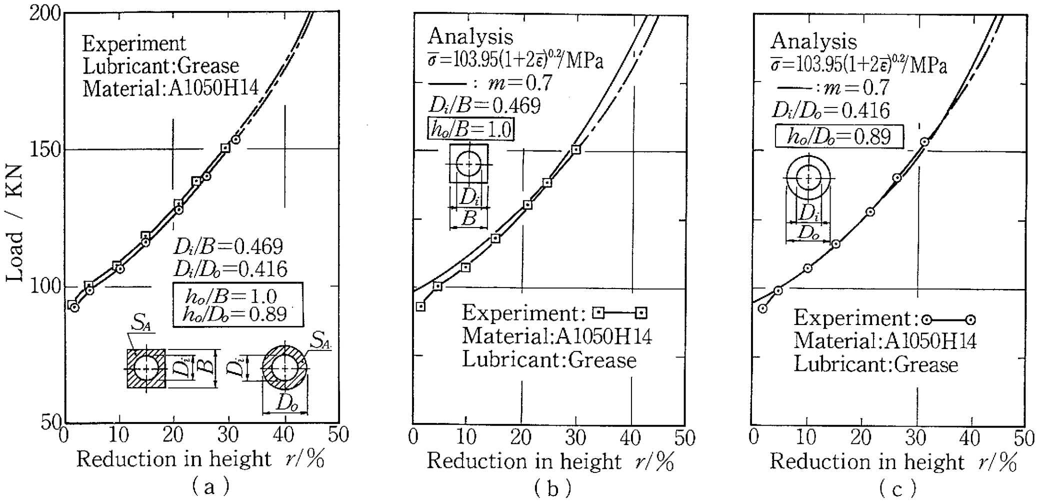


Fig. 4　Comparison of the computed loads with the experimental results in square and cylindrical ring upsetting ($h_o/B=1.0$, $D_i/B=0.469$)

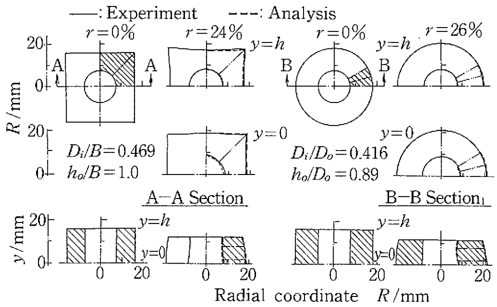


Fig. 5　Comparison of the computed spread contours with experimental results in square and cylindrical ring upsetting ($h_o/B=1.0$, $D_i/B=0.469$)

屈変形）については，解析結果と実験結果との間に差が認められるものの，この部分以外においては，解析結果と実験結果とは良い対応を示している．

3.2.2　$D_i/B=0.469$, $h_o/B=1.0$の場合

（1）　加工荷重の比較

正方筒形と円筒形の場合について，被加工材の外径および高さ3.2.1節と同一条件とし，内径を小さくすることにより端面積のみを大きくした場合の加工荷重の変化を，Fig. 4の（a），（b），（c）に示す．肉厚が大きい場合にも，実験では圧下率の高い領域において若干の座屈変形を生じており，解析値と実験値の間には若干の差が認められるものの，おおむね両者は良く対応している．

（2）変形形状の比較

被加工材の変形形状について，解析結果と実測結果との比較をFig. 5に示す．肉厚が薄い場合（Fig. 3参照）に比較して，解析結果と実験結果との対応はより良くなっていることがわかる．

4．ま　と　め

本報では，前報[1]にて提案した速度場を拡張するとともに，解析モデルの有効性を確認することを目的として，非軸対称中空素材のすえ込み加工の解析ならびに実験を行い，両者の比較を行った．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，妥当な結果を与えうる．

2）　内径が同一であり外面の形状が異なる中空素材の圧縮加工においては，端面の面積が同じである場合，加工荷重はほぼ同じである．

等のことが判明した．

今後は，コンテナ壁面による拘束の問題の取り扱いを可能とすべく解析モデルをさらに拡張するとともに，スプライン・平歯車などの鍛造加工の解析を行う予定である．

（1989年6月5日受理）

参　考　文　献

1）　木内　学・鄭　顕甲・柳本　潤：39回塑加連講論，375.
2）　木内　学・柳本　潤・今井敏博・鄭　顕甲：塑性と加工，28-319(1987-8).
3）　木内　学・村田良美：塑性と加工，22-244(1981).
4）　木内　学・村田良美：塑性と加工，22-246(1981).
5）　木内　学・鄭　顕甲・今井敏博・柳本　潤：塑性と加工，28-323(1987-12).
6）　木内　学・鄭　顕甲：昭62春塑加論，419.
7）　木内　学・鄭　顕甲：第38回塑加連講会，599.
8）　木内　学・鄭　顕甲：昭62春塑加論，695.