

# UBET による 3 次元鍛造の簡易解析法・1

A Simplified Simulation by UBET for Three-Dimensional Forging

木 内 学\*・長 田 卓\*

Manabu KIUCHI and Takashi CHODA

## 1. 序 言

鍛造における金型・荒地設計等の工程設計では試作回数を減らし、開発期間及びコストを低減するために計算機により変形過程や荷重を予測することが必要不可欠となっている。以前は軸対称モデルなど 2 次元で解析を行うことが多かったが、ウェブリブ品などの複雑な形状部品に対しては 2 次元解析では十分な変形予測を行うことが難しい場合もあり、3 次元解析へのニーズが高まっている。近年、塑性加工の解析ソフトは FEM を中心として 3 次元に拡張されつつあるが、解析に多くの計算時間やメモリを必要とすることや完全な自動リメッシュが困難であることなどの問題点も残されている<sup>1)</sup>。そこで、筆者らは短時間で簡易的に 3 次元解析を行うために UBET<sup>2)</sup> を鍛造工程へ応用する研究を進めている。これまで回転座標系で用いられることが多かった UBET の適用範囲<sup>3),4)</sup> を更に広げるために、3 次元直交座標系における直方体平行速度場・六面体傾斜速度場等の UBET 要素を構築した。それらを組み合わせるウェブリブ構造品鍛造の 3 次元解析を行った結果について報告する。

## 2. 解 析 要 素

図 1 に示す x y z 直交座標系の直方体平行速度場要素 (以下、平行速度場要素) 内に次式のような動的相容速度場を仮定する。

$$\begin{cases} \dot{w} = a_1y + b_1 \\ \dot{u} = a_2x + b_2 \\ \dot{v} = a_3z + b_3 \end{cases} \quad \dots(式 1)$$

ただし、体積歪速度  $\dot{\epsilon}_v$  が 0 となることより次の式を満たさなければならない。

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

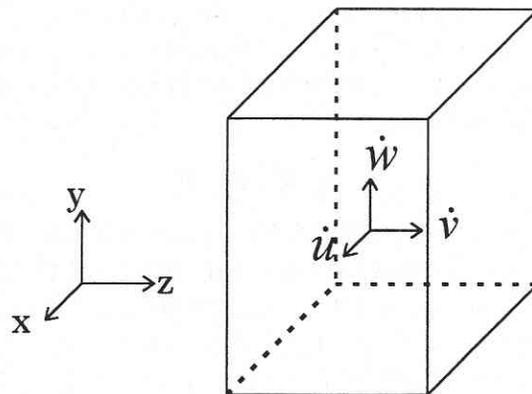


図 1 直方体平行速度場要素

$$a_1 + a_2 + a_3 = 0 \quad \dots(式 2)$$

この要素の各境界面上では法線速度は一様に分布し、変形解析中も要素形状は直方体を保つ。(式 2) と 6 つの境界条件 (うち 1 つは  $\dot{\epsilon}_v = 0$  と冗長) より未知定数が求まり、要素内の速度場が決定できる。

次に図 2 に示す六面体傾斜速度場要素 (以下、傾斜速度場要素) 内に次のような速度場を仮定する。

$$\begin{cases} \dot{w} = c_{11}y + c_{21} + c_{31}x(y - y_k)(y - c_{41}) \\ \quad \quad \quad + c_{51}z(y - y_k)(y - c_{61}) + c_{71}y^2 \\ \dot{u} = c_{12}x + c_{22} + c_{32}y(x - x_i)(x - x_{i+1}) + c_{42}x^2 \\ \dot{v} = c_{13}z + c_{23} + c_{33}y(z - z_j)(z - z_{j+1}) + c_{43}z^2 \end{cases} \quad \dots(式 3)$$

この速度場では  $\dot{w}$  は x, z 方向に線形な速度分布を持ち、要素上面では傾きのある面を表現できる。また他の境界面では法線速度が一様となるので、これと平行速度場要素とを任意に複数個組み合わせることにより、ウェブリブ構造品等の鍛造品に対して近似 3 次元変形解析が可能とな

研究速報

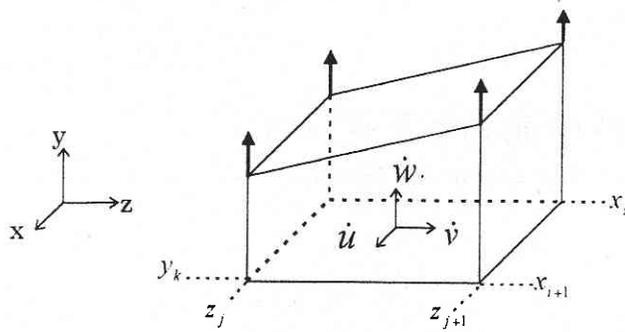


図2 六面体傾斜速度場要素

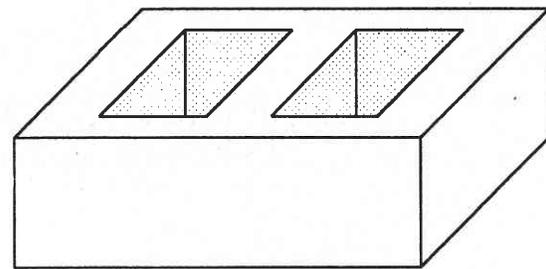


図3 鍛造品形状

る。

(式3)の15個の未定定数は、体積歪速度が0となることより得られる6つの条件式(付録参照)とx, z方向に各2個, y方向に5個の計9個の境界条件より求められ、要素内の速度場が決定できる。

3. 解析結果

上記の3次元UBET要素を図3に示す様な複数の交差したリブを持つ製品を角素材の底面と側面を下金型により拘束し、パンチで圧下することにより鍛造成形するモデルに適用した。図4, 5の様な4分の1対称モデルに対してxz方向に9個の要素に分け、またy方向にリブ部、底部塑性域、底部デッドメタル域に分け、全体に18個のUBET要素を当てはめた。リブ部では隣接要素間の材料流動を無視しているが、底部塑性域では隣接要素間の材料流動が起こるものとし、かつ、境界の法線速度の連続性が保たれるものとして被加工材全体の変形を求めた。リブ部の要素には図5(a)に示すように平行速度場要素のみを用いたモデルと、図5(b)の様にB, D, Fに傾斜速度場要素を導入し、平行速度場と組み合わせたモデルの計算を行っている。

境界速度のうち、(a)では6個、(b)では7個を準独立変数としてFPS法(Flexible Polyhedron Search Method)<sup>5)</sup>により仕事率の最小化を行った。また、素材底部に仮定した塑性域とデッドメタル域の境界のy座標も変数に組み込んでおり、準独立変数の数は(a)で7個、(b)で8個となっている。仕事率は各要素の内部仕事率、素材と工具面の摩擦損失、要素間境界面の剪断仕事率の和として求めており、この計算のためには数値積分を行っている。ある時刻tにおける速度に刻み時間dtをかけて時刻t+dtの形状を求め、仕事率を最小化して次の速度場を計算することを繰り返して変形解析を行った。

計算条件は厚さ10mmの直方体の素材に対してパンチを10mm/sの定速度で7mm圧下した。計算ではパンチ

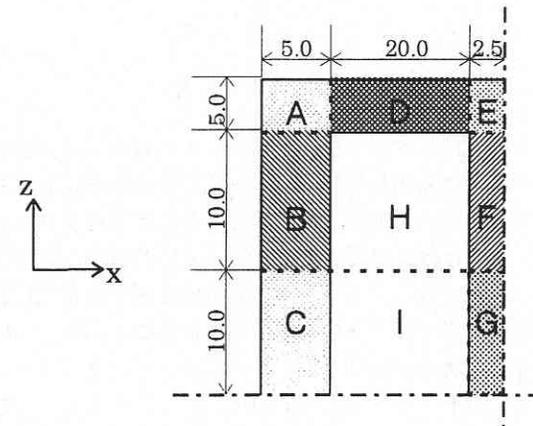


図4 解析モデル

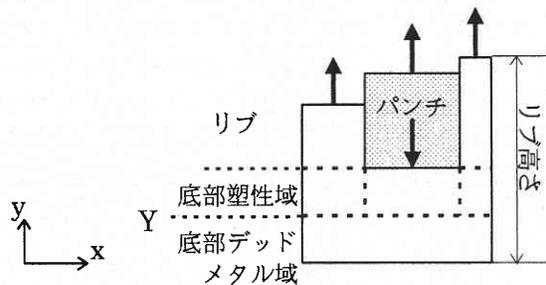


図5(a) 平行速度場要素モデル分割

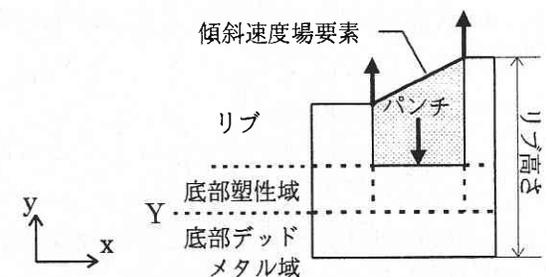


図5(b) 平行速度場要素+傾斜速度場要素モデル分割

に当たる図4のH, I部上面に常に境界速度 $-10\text{ mm/s}$ を与えている。また, 変形抵抗は $1.0\text{ kgf/mm}^2$ とし, 剪断摩擦定数 $m$ は $0.0$ と $0.7$ の2ケースについて解析を行っている。

まず図5(a)の平行速度場要素だけを用いて解析を行った結果のストロークとリブ高さ及び荷重の関係を図6に剪断摩擦定数が $0.2$ の場合, 図7に摩擦 $0.7$ の場合を示す。リブ高さは素材底部からリブ先端までの距離で表している。ただし, この場合, リブB, CとF, Gではそれぞれ常に同じ高さになることを仮定している。また, リブA, Eには隣接リブに対し段差が生じることを許し, 隣接要素間には剪断仕事だけが働くものとしている。

次に図5(b)のようにB, D, Fに傾斜速度場要素を平行速度場要素と組み合わせて適用した結果を図8, 9に示す。六面体要素と直方体要素の境界では段差が生じないように

隣接する要素と $y$ 方向速度が一致する境界条件を与えており, 隣接要素間の剪断仕事率だけでなく傾斜速度場要素内の内部仕事率も計算している。図8, 9ではB, D, Fの値を省略しているが, それぞれ隣接するリブ高さを線形につなぐ傾斜を持っており, リブ先端は連続につながれている。

摩擦定数が $0.7$ の場合にはいずれの結果でも製品角部に当たるAのリブ成長が遅れ, 逆に中心側のGの立ち上がりが早くなっている。これは金型間との摩擦や素材の材料配分によるもので, 経験的に知られている性質と合致している。摩擦定数が $0.2$ の場合には,  $0.7$ の場合に比べて(a), (b)ともリブ成長のばらつきが小さくなっており, 特に(b)ではリブ全体がほとんど揃っている。

(a)と(b)の解析結果を比較すると, 摩擦定数に関わらず(a)の方がリブ先端成長のばらつきが大きく, (b)の方が揃って

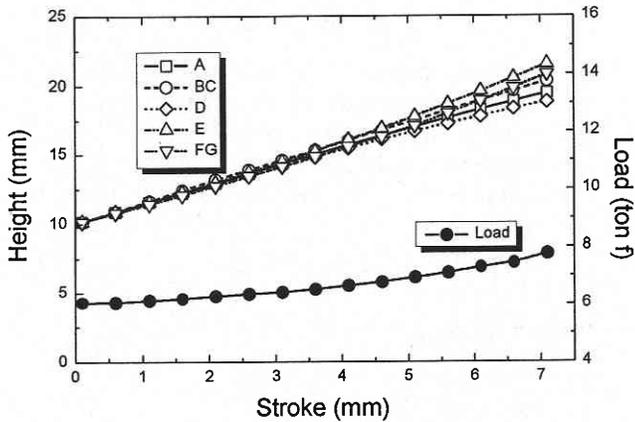


図6 平行速度場モデル  
剪断摩擦定数 $0.2$  リブ高さ・荷重

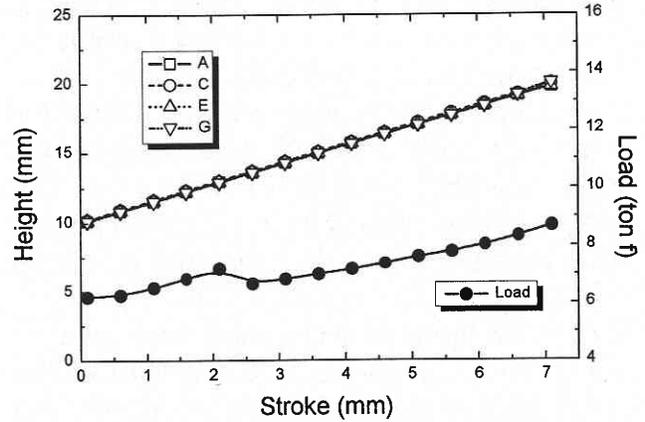


図8 平行速度場+傾斜速度場モデル  
剪断摩擦定数 $0.2$  リブ高さ・荷重

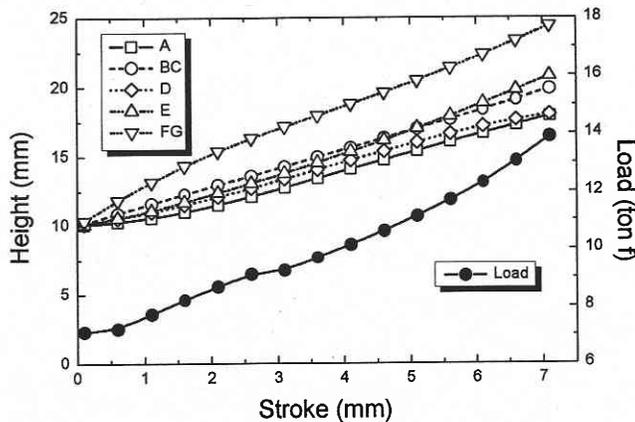


図7 平行速度場モデル  
剪断摩擦定数 $0.7$  リブ高さ・荷重

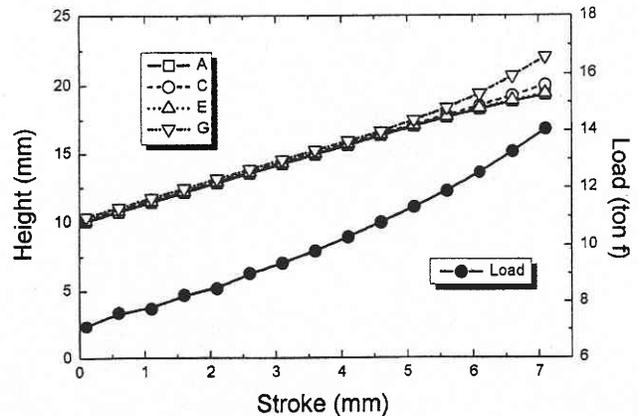


図9 平行速度場+傾斜速度場モデル  
剪断摩擦定数 $0.7$  リブ高さ・荷重

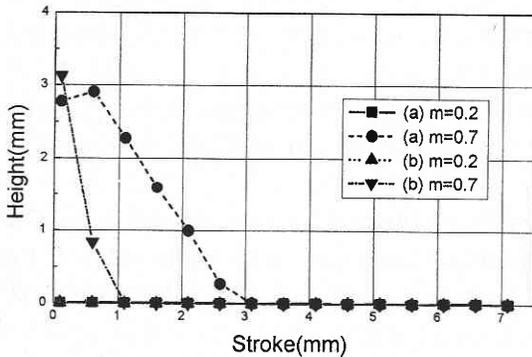


図10 底部デッドメタル域高さ

いる。これは(a)では要素間の拘束条件が不十分であったため、(b)の方がより実際に近い結果を示している。

荷重に関しては(a)、(b)ともほぼ同じ値であるが、最終の荷重で見ると若干(b)の方が高くなっている。これも(a)ではリブ部要素間の拘束が不十分なためエネルギーが低めに計算されていることによるものと思われる。

図10に底部デッドメタル域のy方向高さとの関係のグラフを示す。剪断摩擦定数が0.7の場合には初期段階で3 mm程度で、圧下に従い減少して0となる。また、摩擦が0.2の場合には初期段階より0に近い値を推移しており、初期素材厚が薄いため素材底部のほぼ全域が塑性域として流動していることがわかる。

なお本報告の計算にはSPECfp92値54.0のワークステーションを用いて、(a)で約15分、(b)では約50分のCPU時間を要している。(b)の計算時間が長くなっているのは、平行速度場要素に比べ傾斜速度場要素のエネルギー計算に数値積分を必要とする部分が多いことと、準独立変数の数も(b)の方が多くなることによるものである。

#### 4. 結 言

簡易的に3次元鍛造解析を行うために直交座標系における平行速度場要素・傾斜速度場要素のUBET要素の開発を進め、それらをウェブリブ品の鍛造解析に適用した。その結果、短時間で変形の概要と荷重を計算できることがわかった。

今後以下のような点について研究を進める必要がある。

- (1) 汎用化に向けての要素の分割方法の開発。
- (2) 形状が複雑になった場合の素材と金型の接触判定と要素再分割方法の開発。
- (3) 自由曲面等に対応できるより一般的な形状の速度場要素の構築。
- (4) 仕事率の最小化において局所解に陥らず、安定して大域的な解を得るような手法の確立。

(1996年3月22日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 湯川ほか：塑性と加工，37-421 (1996-2)，166.
- 2) 木内ほか：塑性と加工，22-244 (1981-5)，495.
- 3) 今井ほか：生産研究，41-7 (1989.7)，21.
- 4) 木内ほか：生産研究，41-10 (1989.10)，25.
- 5) D.M.Himmelblau: Applied Nonlinear Programming, McGraw Hill.

#### 付 録

・傾斜速度場要素の  $\dot{\epsilon}_v = 0$  を満たすための6条件式

$$\begin{cases} c_{11} + c_{12} + c_{13} = 0 \\ -c_{31}(y_k + c_{41}) + 2c_{42} = 0 \\ 2c_{71} - c_{32}(x_i + x_{i+1}) - c_{33}(z_j + z_{j+1}) = 0 \\ -c_{51}(y_k + c_{51}) + 2c_{43} = 0 \\ c_{31} + c_{32} = 0 \\ c_{51} + c_{33} = 0 \end{cases}$$