

## UBETによる3次元鍛造の簡易解析法・2

A Simplified Simulation of Three-Dimensional Forging by UBET・2nd Report

木内 学\*・長田 卓\*  
Manabu KIUCHI and Takashi CHODA

## 1. 序 言

鍛造の工程設計においては、計算機による変形・荷重予測が必要不可欠である。近年、鍛造解析ソフトはFEMを中心として3次元問題に拡張されつつあるが、計算時間の長さやリメッシュの困難さなどの問題点も残されている。

筆者らは短時間で簡易的に3次元鍛造解析を行うためにUBET (Upper Bound Elemental Technique)<sup>1)</sup>を応用する研究を進めている<sup>2),3)</sup>。前報<sup>2)</sup>では、上記目的に有効と思われる3次元直交座標系の直方体平行速度場・六面体傾斜速度場のUBET要素を紹介し、それらを組み合わせてウェブリブ構造品の鍛造時の変形解析を行った結果を報告した。

本報告では、日の字型リブを持つ製品の鍛造実験を行い、UBETによる数値解析結果の妥当性について検討した。その結果、リブの成長に関する予測値は実験結果と大旨一致することが確認された。また荷重の予測値は実験値よりも高く表れる傾向があるため、リブ側面の摩擦定数の取り扱いに関してプログラムを改良したところ精度良い近似解析が可能となった。

## 2. 鍛 造 実 験

UBETによる解析結果の妥当性を検証するために、写真1及び図1に示す日の字型リブを持つ製品の鍛造実験を行った。鍛造条件は以下のとおりである。

素材：純アルミ (A 1050)

鍛造温度：300℃ (素材, 金型とも)

鍛造速度：10 mm/min

素材形状：70.6×39.6×32.0

下型内に保持した角素材をパンチにより所定量圧下してリブを後方押し出し成形する。潤滑剤を塗布した場合と無潤滑の場合の実験を行い、荷重やリブ高さを測定した。その結果を図2から図4に示す。リブ高さは図1に示す①から⑤の5ヶ所を測定し、対称な位置にある点をすべて測定して、その平均値を表示してある。荷重は潤滑有りの場合にはほとんど上昇しないのに対して、無潤滑の場合にはストロークとともに上昇する。リブ高さはいずれの場合も製品角部に当たる①の成長が悪く、中心側の⑤が早く、その成長速度の相違は、無潤滑の場合、非常に大きくなる。

\*東京大学生産技術研究所 第2部

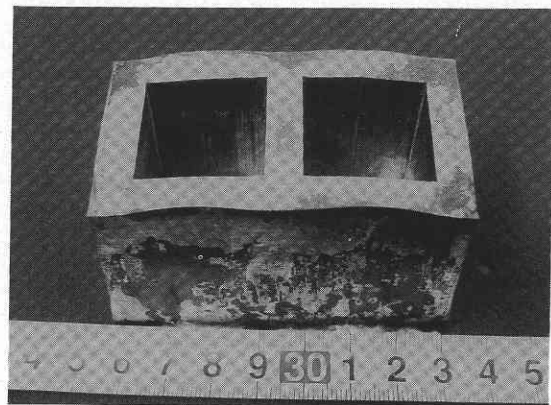


写真1 日の字型リブ成形品

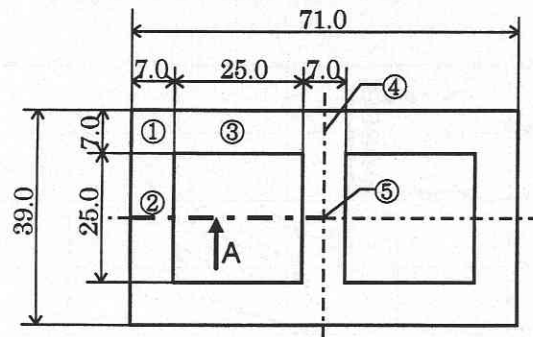


図1 製品形状

滑の場合の実験を行い、荷重やリブ高さを測定した。その結果を図2から図4に示す。リブ高さは図1に示す①から⑤の5ヶ所を測定し、対称な位置にある点をすべて測定して、その平均値を表示してある。荷重は潤滑有りの場合にはほとんど上昇しないのに対して、無潤滑の場合にはストロークとともに上昇する。リブ高さはいずれの場合も製品角部に当たる①の成長が悪く、中心側の⑤が早く、その成長速度の相違は、無潤滑の場合、非常に大きくなる。

研究速報

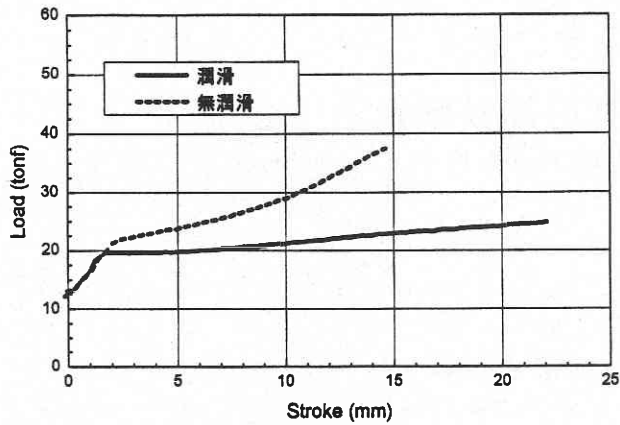


図2 実験 ストロークと荷重

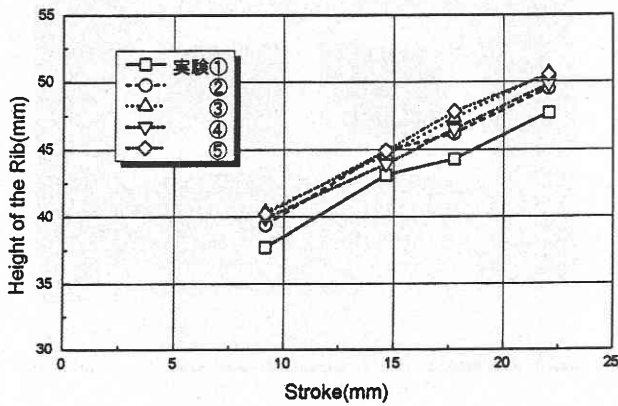


図3 実験 (潤滑有り) リブ高さ

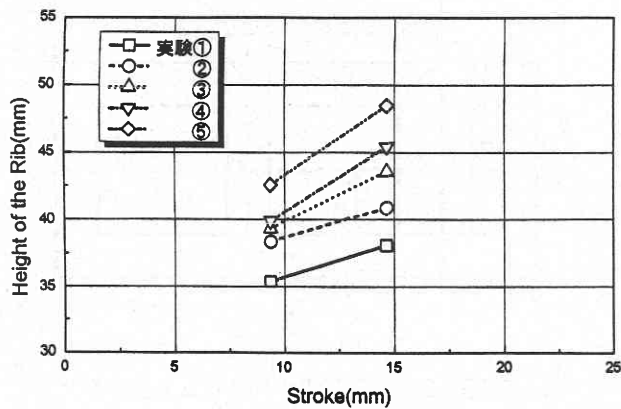


図4 実験 (無潤滑) リブ高さ

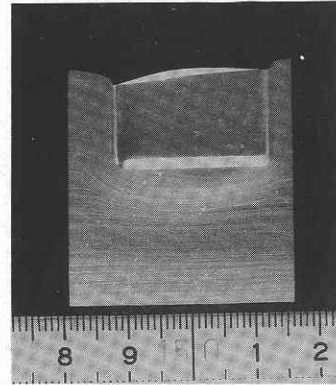


写真2 素材断面 (潤滑有り) 圧下 5 mm

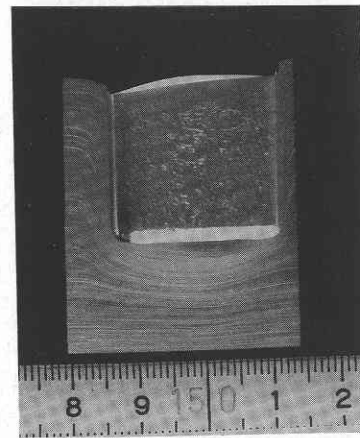


写真3 素材断面 (潤滑有り) 圧下 10 mm

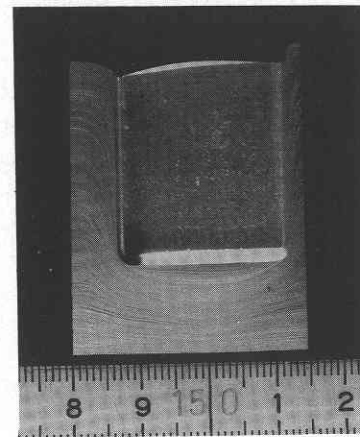


写真4 素材断面 (潤滑有り) 圧下 15 mm

また、鍛造後の素材を図1の一点鎖線部で切断し、矢印Aで示す向きから断面内の材料流動の観察を試みた。切断した素材は研磨後、水酸化ナトリウム水溶液で約2時間腐食して写真撮影を行った。(写真2から4)

### 3. 解析モデル

解析には(式1)で表される直方体平行速度場要素と(式2)の六面体傾斜速度場要素を用いた。

平行速度場要素では各境界面で法線方向速度が $v$ 一様とな

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

ただし、体積歪速度 = 0 より、 $a_1 + a_2 + a_3 = 0$

$$\begin{cases} \dot{w} = c_{11}y + c_{21} + c_{31}x(y - y_k) + c_{51}z(y - y_k) \\ \dot{u} = c_{12}x + c_{22} + c_{72}x^2 \\ \dot{v} = c_{13}z + c_{23} + c_{73}z^2 \end{cases} \dots\dots (式2)$$

ただし、体積歪速度 = 0 より、

$$c_{11} + c_{12} + c_{13} = 0, \quad c_{31}z + 2c_{72} = 0, \quad c_{51} + 2c_{73} = 0$$

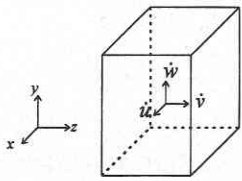


図5 直方体平行速度場要素

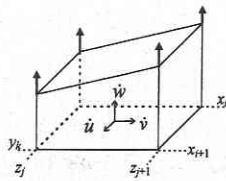


図6 六面体傾斜速度場要素

一. 傾斜速度場要素では 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の成長を表現できる。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、素材表面に段差を生じず、連続した自由表面を持つ変形モードの解析が可能となる。なお、傾斜速度場要素は前報で紹介したものよりも次数を少なくして解析における計算量を減らしているが、速度場の持つ性質はほぼ同じである。

4. 解析結果

日の字型リブ製品を4分の1対称モデルとして図7のように要素分割して解析を行った。図7の斜線部ではリブ部に傾斜速度場要素を用いてリブ上面を連続に結び、それ以外の部分にはすべて平行速度場要素を用いた。パンチに当たる6つの要素の上境界面に圧下速度0.16667 mm/sを与

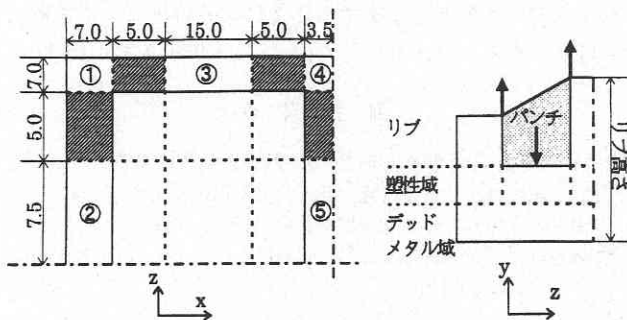


図7 要素分割

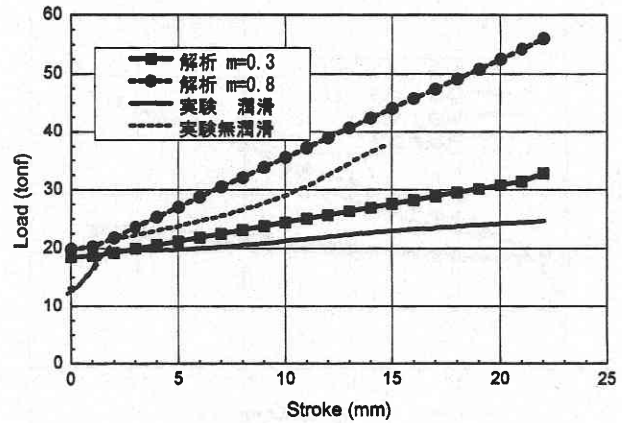


図8 ストロークと荷重 (均一摩擦)

えた。素材底部は高さ方向に見て塑性域とデッドメタル域に分割し、その境界面の y 座標も変数に取り込んである。要素数は底部塑性域とリブ部を合わせて24個で、準独立変数13個に対してFPS (Flexible Polyhedron Search) 法<sup>4)</sup>を改良した手法により仕事率を最小化した。潤滑有りの場合の剪断摩擦定数を0.3、無潤滑の場合の同定数を0.8とし、変形抵抗は21 kgf/mm<sup>2</sup>とした。その結果のストローク荷重線図を実験結果とあわせて図8に示す。

図8を見ると潤滑・無潤滑いずれの場合にも、解析結果の荷重の上がり方が実験結果よりも大きくなっている。これは、解析においてリブ側面全体が金型に接してパンチ底面や下型底面と同様の摩擦を受けるものとしていることが一因であると考えられる。この解析を厳密に行うには、リブ側面における面圧や実際の接触面積等を考慮する必要があるが、本報告ではリブ側面の摩擦定数を他の部分とは変えて計算を行うことにした。

5. 改良したプログラムによる解析結果

パンチ底面や下型底面とリブ側面とで異なる摩擦定数を設定して計算できるようにプログラムを手直しし、摩擦定数を、潤滑剤ありの場合に対応するモデルではパンチ底面等で0.3、リブ側面で0.1とし、無潤滑に対応するモデルではパンチ底面等で0.8、リブ側面で0.6とした。荷重とリブ高さを図9から図11に示す。

図8と図9を比較すれば、リブ側面の剪断摩擦定数を他の部分とは別に設定することにより荷重の近似が良くなっていることがわかる。リブ側面の摩擦定数は製品形状、潤滑条件、金型の抜き勾配、パンチ先端の角R等により異なると考えられる。今回の解析では実験結果をもとにリブ側面の摩擦定数を決定したが、一般的に使用し得る定数の決定については今後もう少し検討する必要がある。

研 究 速 報

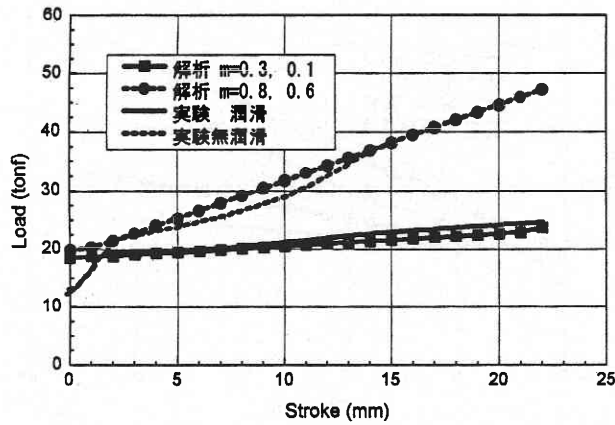


図9 ストロークと荷重 (リブ側面の摩擦定数を別に設定)

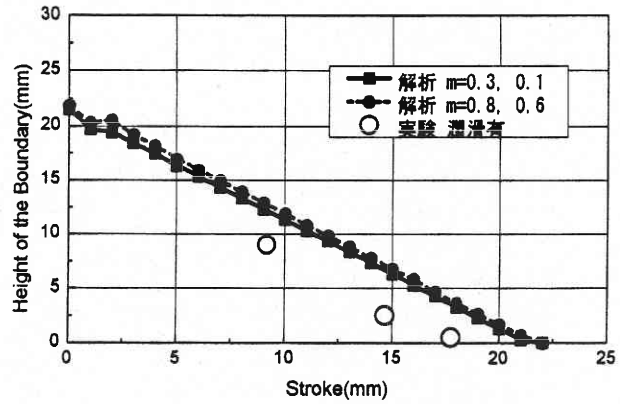


図12 塑性域とデッドメタル域の境界位置

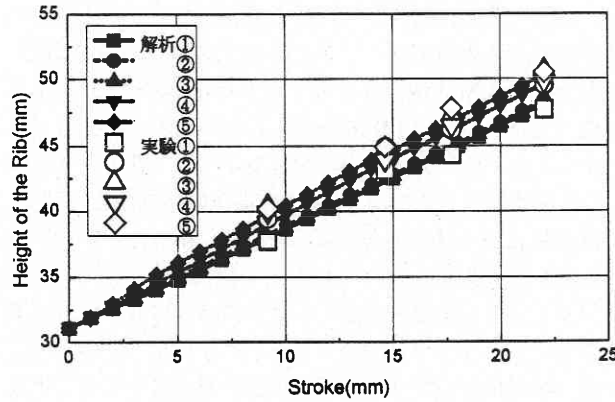


図10 解析 (m=0.3, 0.1) と実験 (潤滑有り) のリブ高さ

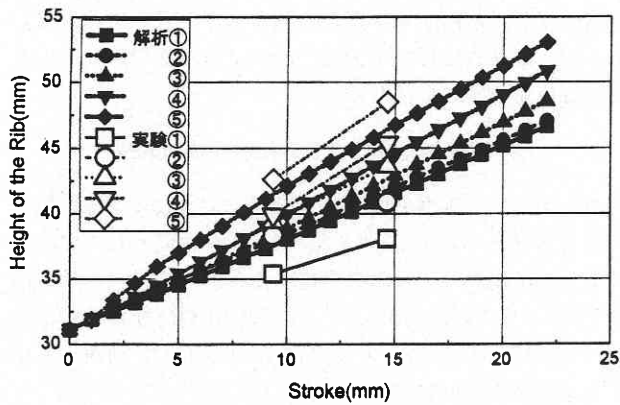


図11 解析 (m=0.8, 0.6) と実験 (無潤滑) のリブ高さ

リブ高さに関しては、製品角部で遅く、中心側で早い、という解析によるリブ成長の相違の傾向は実験結果に一致している。ただし、無潤滑モデルの解析結果では実験値に比べてリブ高さの不均一さが小さくなっており、解析ではリブ先端を平面で近似してつないでいるためにその高さが

平均化されることが一因であると思われる。また、解析と実験のいずれの結果でも、無潤滑では潤滑の有る場合に比べてリブ高さの不均一さが大きくなっており、リブ側面の摩擦による拘束がない場合には、リブへの材料の流れ込みが均一化しやすく、その高さが揃い易いことが分かる。

次に写真2から4より流線が直線となっている部分をデッドメタル域、曲線となっている部分を塑性域とみなすこととして、剛塑性境界位置の素材底部からの高さを測定した。解析による境界位置の予測値とあわせて図12に示す。図12を見ると解析結果の境界位置の方が少し高くなっている。数値的にずれがあるのは解析モデルの流動域では一様な速度分布を仮定していることなどによるためであると考えられる。解析結果の境界位置がストロークに従って線形に小さくなっていく傾向は実験結果に一致しており、妥当な結果であると思われる。

6. 結 言

日の字型リブ製品の鍛造実験を行い、3次元直交座標系UBETによる解析結果の妥当性を検討した。その結果、リブ高さは傾向的に実験結果と一致することが確認できた。鍛造荷重に関しては、リブ側面の摩擦定数が他の部分とは異なっていることを考慮することにより精度よい近似解析が可能となることがわかった。(1996年9月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内ほか：塑性と加工，22-244(1981-5)，495.
- 2) 木内ほか：生産研究，48-6(1996-6)，319.
- 3) 木内ほか：平8春塑加講論，(1996)，188.
- 4) D.M. Himmelblau: Applied Nonlinear Programming, MacGraw Hill.