

鍛造加工汎用シミュレータの開発 3

—非軸対称複合鍛造の解析 3—

Development of Forging Operation Relational Multipurpose Simulator (FORMS) 3rd Report

木内 学*・村松 勁*・今井 敏博*
Manabu KIUCHI, Tsuyoshi MURAMATSU and Toshihiro IMAI

1. はじめに

鍛造工程の開発や設計は、従来より、経験や実験による試行錯誤に依存することが多く、開発期間の短縮や開発工数の削減を図るためには、数値解析により加工荷重や被加工材の変形を予測し、最適工程を直接的に設計できるようにすることが強く望まれている。この目的を達成するために、筆者らはUBETを応用した鍛造加工汎用シミュレータ (FORMS) の開発に関し、一連の研究を進めている。UBETは解析工数が少ないことを特徴としており、形状が複雑な3次元問題に対し、有効であると考えられる。

これまで、FORMSの考え方や解析方法、応用例について示してきた¹⁾²⁾。前報³⁾では、FORMSの構成要素の拡張として、新たに開発した非軸対称後方押しに対応する解析モデルを用いて、図1に示す鍛造工程の解析結果および実測値と比較した結果について報告した。

今回、前報で示した非軸対称後方押し時の解析モデルを拡張して、後方押し時に被加工材の裏面外周部にし

ばしば発生するヒケ (Cavity) の解析を試みた。この種のヒケは鍛造工程でしばしば問題になるが、設計段階での予測が難しく、特に形状が非軸対称になると、これまで事前の対応がほとんど不可能とされてきた。裏面のヒケに関しては、W.C. Hahn, Jr. ら⁴⁾が上界法で、森ら⁵⁾がFEMで解析しているが、いずれも軸対称問題である。本報ではヒケを考慮した非軸対称後方押し解析モデルを示すと共に、被加工材が型から離れる状況の解析方法について検討した結果、また解析例として軸対称前方押しとの複合鍛造 (図1) に関する解析結果を示す。またその妥当性について実際の鍛造工程と比較した結果も併せて報告する。

2. 解析方法

図2は前報で示した非軸対称後方押し時の解析モデルとその要素分割を示す。被加工材裏面のヒケを考慮するために、要素IIIおよびIVの底面が持ち上がる状態を仮定する。本研究では対象が非軸対称であるため、図3に示す3種類のヒケの形態を考える。すなわちMode 1は要素IVの底面だけにヒケが発生すると仮定し、底面におけるy方向速度 V_c は r および θ の1次関数で表示されるものとする。Mode 2は要素IIIおよびIVの底面に同じ形のヒケが発生すると仮定し、そのy方向速度 V_c は r のみの1次関

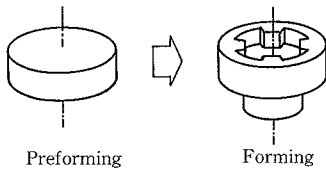


図1 鍛造工程

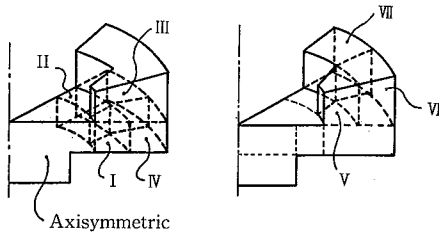


図2 解析モデルおよび要素分割

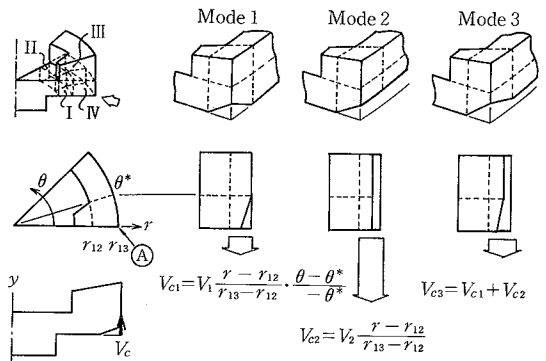


図3 仮定したヒケの形態

*東京大学生産技術研究所 第2部

表 1 動的可容速度場

Element	$\dot{U}_r(\dot{U}_s, \dot{U}_t)$	$\dot{U}_\theta(\dot{U}_\phi, \dot{U}_\beta)$	\dot{U}_y
I	$-\frac{1}{s}(\int sG(s, \phi)ds + \int \frac{F(s)}{\phi^*} ds - f(\phi))$	$F(s) \frac{\phi}{\phi^*}$	$G(s)(y-y_{11})$
II	$-\frac{1}{2}tY_1 + \frac{1}{t} \int \frac{F(t-t_0)}{\beta^*} dt + \frac{g(\beta)}{t}$	$F(t-t_0) \frac{\beta-\beta^*}{-\beta^*}$	$Y_{12} + Y_2$
III	$W_{22}(\theta)R1(r)$	$H(r) \frac{\theta-\theta_0}{\theta^*-\theta_0} + I(r)(\theta-\theta_0)(\theta-\theta^*)$	$-\frac{1}{r}[W_{22}(\theta)R2(r) + \frac{H(r)}{\theta^*-\theta_0} + I(r)\{2\theta-\theta_0-\theta^*\}](y-y_{11}) + v_{c2}(r, \theta)$
IV	$W_{21}(\theta)R1(r) + K(\theta)(r-r_{12})(r-r_{13})$	$H(r) \frac{\theta}{\theta^*}$	$-\frac{1}{r}[W_{21}(\theta)R2(r) + \frac{H(r)}{\theta^*} + K(\theta)R3(r)](y-y_{11}) + v_{c1}(r, \theta) + v_{c2}(r, \theta)$
V	0	0	$G(s)(y_{12}-y_{11})$
VI	0	0	$-\frac{1}{r}[W_{21}(\theta)R2(r) + \frac{H(r)}{\theta^*} + K(\theta)R3(r)](y_{12}-y_{11}) + v_{c1}(r, \theta) + v_{c2}(r, \theta)$
VII	0	0	$-\frac{1}{r}[W_{22}(\theta)R2(r) + \frac{H(r)}{\theta^*-\theta_0} + I(r)\{2\theta-\theta_0-\theta^*\}](y_{12}-y_{11}) + v_{c2}(r, \theta)$

数で表示されるものとする。Mode 3はMode 1とMode 2が同時に生じると仮定したものである。おのおの場合に応じて、 y 方向速度 V_c をこれまで用いてきたおのおの要素の \dot{U}_y に付加しモデル全体の速度場を構成する。なお、 V_1, V_2 (図3参照)は最適化パラメータであり、要素IVのA点における V_c を与える。完成した全体の速度場を表1に示す。なお、各関数については、前報²⁾と同じであり、ここでは省略する。各要素の速度場は体積一定の条件、境界条件および要素間の連続条件を満たしている。なお、各速度場は図4の座標系に準じている。

さて、要素IIIおよびIVの \dot{U}_y は、前報では、 $y=y_{11}$ において $\dot{U}_y=0$ という境界条件を満たしているが、 V_c を付加することにより、この境界において $\dot{U}_y \neq 0$ となる場合が起こりえる。すなわち、図5に示すように $V_c > 0$ な

らば被加工材は工具から離れ、 $V_c=0$ の時、被加工材は工具によって拘束されている。また、 $V_c < 0$ となる場合が生じるが、これは工具の中に被加工材が食い込むことを意味しており不適當である。したがって、仕事率の最小化において、 V_1, V_2 は正または0という拘束条件が必要である。

筆者らは最適化手法として直接探索法の一つであるF.P.S.法を用いているため、パラメータに対する拘束条件の設定はできない。そこで、図6に示すフローチャートによる方法を用いた。すなわち、各ステップごとに、まず、前述したヒケの各Modeについて最適化を行う。それらの結果の中で、 V_c が正かつ仕事率が最小になるModeをそのステップの結果とする。条件に適するModeがない場合は、ヒケを考慮しない場合(Constraint)を再度計算し結果とする。これを繰り返し、所定の形状まで計算を進める。FEM等では、材料が型から離れる状況の判定は応力や節点反力の方向により行われるのが一般的である。しかし、UBET(上界法)では応力や反力の算出については手法上の問題があるため、上記の方法は仕事率が最小になったときの速度の方向で判定しようとするも

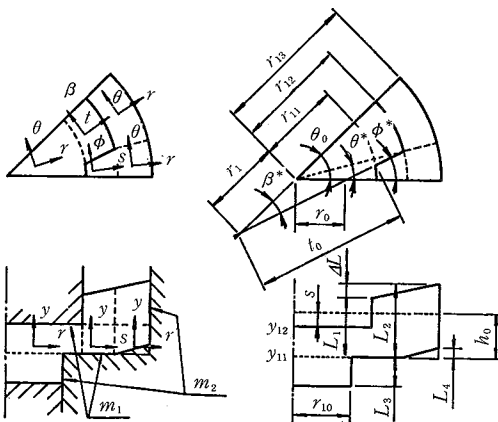


図4 座標系および記号

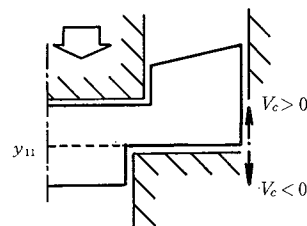


図5 V_c の影響

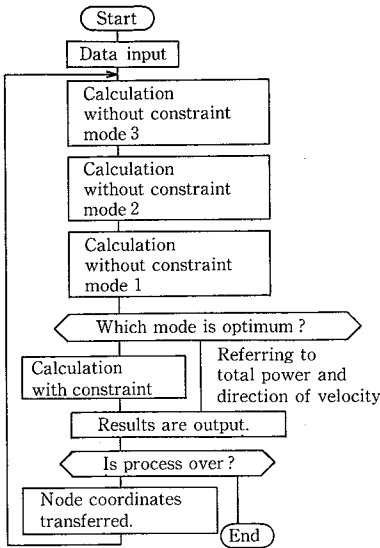


図 6 ヒケを解析するためのフローチャート

のである。この方法は、この種の問題へのUBETの適用に際して、計算時間は増加するものの、有効な方法であるといえる⁹⁾。

3. 解析例

3.1 計算結果 1

以上、説明した解析モデルを用いて、前述の複合鍛造の解析を行った。図 7 はその結果を示したものである。変形および相対圧力の挙動については前報に示すとおりであり、詳細については省略する。図中、破線はヒケを考慮しない計算結果を、▽記号はヒケが発生し始める圧下率 (s/h_0) を示している。

図 7 (a) より、ここで用いた条件では、ヒケは加工初期より発生するのではなく、圧下率 0.22 にて発生することがわかる。ヒケが発生した後、相対圧力はヒケを考慮したほうが低く、ヒケを考慮することの有意性が理解できる。また、この条件では、ヒケは終始 Mode 1 のみであるとの結果を得た。これは断面①では壁厚が断面②等の他の部分に比べて厚いため、ヒケが発生しやすいことと対応している。図 7 (b) は後方押しの高さを表したもので、ヒケを考慮することによりヒケの発生に伴って、断面①の外周部の高さが高くなっている。図 7 (c) は前方押し長さとしヒケの大きさを表している。

3.2 計算結果 2

ブランクの外径寸法を変えて計算を行った結果を図 8 に示す。この結果より、外径の小さいほうがヒケが大きくなることわかる (図 8 (c))。これはブランクの初期高さが同じであるため、外径の小さいほうが後方への流

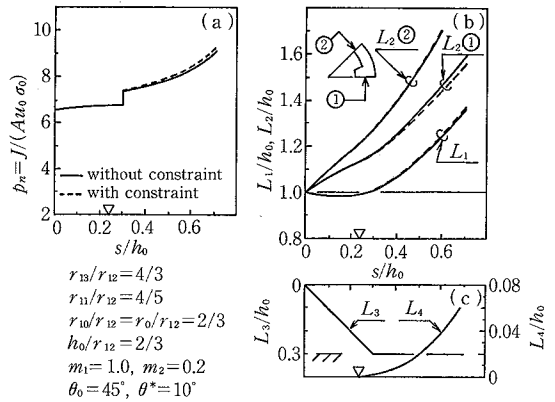


図 7 解析結果 1-1

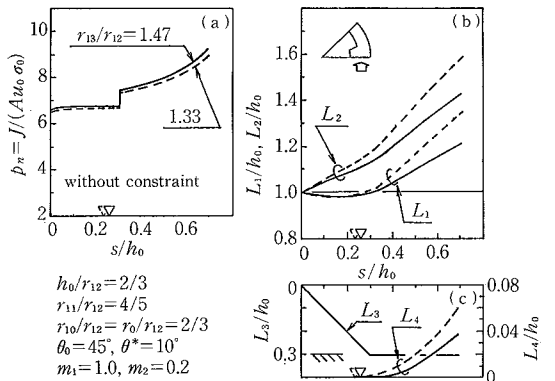


図 8 解析結果 2

出速度は大きく、そのため、ヒケが大きくなるものと考えられる。また、外径の小さいほうが、ヒケの発生する圧下率もわずかに低い。ただし、ヒケの形態はいずれの場合も Mode 1 のみであるとの結果を得た。

4. 実測値との比較

以上、簡単に計算結果を示した。結果は妥当であると考えられる。次に、本解析モデルの定量的評価を行うために実際の鍛造工程との比較を行った。

4.1 解析方法

ここで取り上げた鍛造工程 (図 1) では、図 9 に示すように、ブランクは裏面外周部に角度 γ のテーパを有している。計算に際しては、速度場と境界条件は 2. 節で示したものをそのまま用いることとし、裏面外周部のテーパ部を自由表面と考慮して計算した。ヒケについては 2. 節と同様の取り扱いを行っている。

4.2 結果

後方押し高さ、ヒケの大きさ、前方押し長さとし圧下率との関係を、計算結果と実測値を対比させて図 10 に

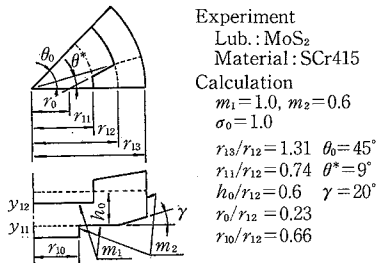


図9 実験条件

示す。前報のヒケを考慮しない解析では、断面①と断面②の後方押し出し高さに差が生じていた。図10(a)より、この点についてはヒケを考慮してもわずかし改善されないことがわかる。図10(b)は裏面外周部のヒケについて計算値と実測値を比較した結果である。テーパ部を自由表面として計算した結果 (L_4) と実測値を比較すると、加工初期において実験ではヒケが発生しないため少し離れているが、ヒケ発生後の挙動は実測値に対し良い対応を示した。しかし、断面①以外では速度場の構成にまだ改善の余地があり、十分なヒケの評価はできていない。一方、同図に示す L_4' はヒケを考慮するために付加した速度項の影響のみを示したもので、実測値と直接比較することはできないが、大きさは実測値と比べ小さい。ただし、ヒケの発生開始時の圧下率はほぼ一致している。また、この解析ではMode 1のみが発生しようとの結果を得たが、実験でも要素IVに相当する部分のみがヒケであり、この現象は一致している。

また、図11は断面①のヒケ部の断面形状について、解析結果と実測値とを比較した結果である。全体的に良い対応を示しているが、実際にヒケの影響が大きくなる加工の後半において、内部での形状がずれている。より精度の高い解析を実現するためにはヒケに関する速度場の改善が必要である。

5. ま と め

本研究では、前報で示した非軸対称後方押し出しの解析モデルを拡張し、後方押し出しにおいて被加工材の裏面外周部に発生するヒケの解析を試みた。また、UBETを用いて材料が型から離れる状況の取扱方法についても検討した。

この解析モデルを用いて非軸対称前後方複合押し出し加工の解析を行った。その結果、妥当かつ有効な結果が得られた。また、上記複合加工の実測値と比較し、ヒケの発生時期や形態 (Mode) 等妥当性のある結果が得られた。なお、ヒケ発生部の形状について解析結果の精度向上を図るためには、ヒケに関する速度場のより以上の改善が必要であることを確認した。(1988年8月18日受理)

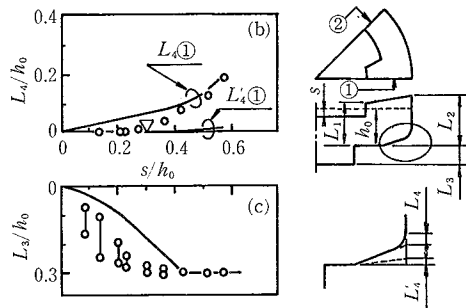
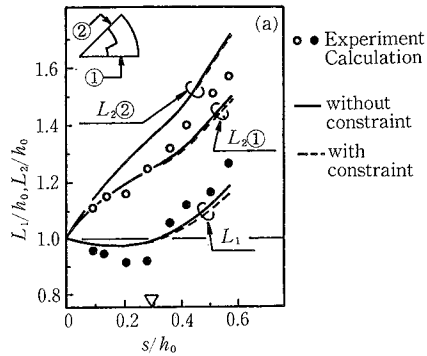


図10 実測値との比較 1

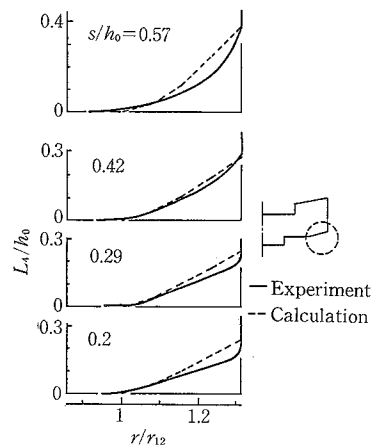


図11 実測値との比較 2

参考文献

- 1) 木内学・村松勤・今井敏博：第37回塑加連講論，89。
- 2) 木内学・村松勤・今井敏博：昭62春塑加講論，459。
- 3) W.C. Hahn, Jr.・B. Avitzur・E.D. Bishop: Trans. ASME Ser. B, 95 (1973), 849。
- 4) 森謙一郎・小坂田宏造：第31回塑加連講論，231。
- 5) 木内学・今井敏博・鄭頭甲・柳本潤：塑性と加工，28-319 (1987)，841。