

UBET の非軸対称鍛造加工への応用に関する研究 ——非対称フラッシュ部への材料充満の解析——

Study on Application of Upper Bound Elemental Technique (UBET) to Non-Axisymmetric Forging

木内 学*・唐戸 彰夫*
Manabu KIUCHI and Akio KARATO

1. ま え が き

UBET (Upper Bound Elemental Technique) は、被加工物をいくつかの単純な要素に分け、各要素内あるいは要素間における諸条件の適合を図りつつ、材料全体としての挙動を上界法によって解析する手法である。すでに、その軸対称鍛造加工への応用については、基本要素 (速度場) およびバルジング・フォルディング解析用要素 (速度場) 等の導出が行われ、それらを用いてなされた荷重、工具面圧分布、材料変形・充満等の解析結果から本手法の有効性が示されている。¹⁾ところが、非軸対称鍛造加工への応用についてみると、解析例はあり、²⁾一応の結果が得られてはいるものの、非対称部の扱いが不完全であったり、あるいは要素分割の面で解析手法としての系統性・汎用性に欠けているなど UBET としてのまとまりは十分でない。そこで本報では、非軸対称鍛造解析への UBET の応用の一段階として、軸対称製品の側方に対称的に配置された平行フラッシュを持つ擬軸対称製品 (図1参照) の加工プロセスをシミュレートできる要素 (速度場) を、従来の軸対称鍛造解析用要素 (速度場) と組み合わせる形で導出し、それを用いて、側方フラッシュ部への材料充満に与える諸因子の影響につ

いて解析を行ったので、結果を報告する。

2. 解析モデルおよび速度場

解析モデルおよび要素分割を図1に、非軸対称要素の速度場を表1に示す。図1中の要素 E_{11} , E_{12} , $E_{22}^{\text{上}}$, $E_{22}^{\text{下}}$, $E_{22}^{\text{中}}$ には $R-\theta-Y$ 円柱座標系を、 $E_{22}^{\text{上}}$, $E_{22}^{\text{中}}$ には $X-Y-Z$ 直交座標系を用いた。またこれらのうち、軸対称部 E_{11} , E_{12} には軸対称平行速度場³⁾を用い、他の要素には今回導出した非軸対称速度場を用いた。

表1において $\alpha_1 \sim \alpha_3$ は最適化パラメータ、 $f(\theta)$, $\gamma(X)$ は任意関数であるが、本解析においては $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$, $f(\theta) = \beta_1 \cos \theta + \beta_2 \cos^2 \theta$, $\gamma(X) = \beta_3 X + \beta_4$ ($\beta_1 \sim \beta_4$: 最適化パラメータ) とした。速度場は、各要素ごとに体積一定条件を、各要素境界では境界垂直速度成分の連続性を満足する必要がある。したがって表1の速度場は、工具あるいは軸対称平行速度場に面する要素境界上における境界垂直速度成分が、座標によらず一様になるようにしてある。また同じ理由で、対称面における境界垂直速度成分も一様 (=0) となるようにしてある。

本モデルの加工プロセスを図2に示す。図に示すように、加工プロセスは側方フラッシュの状態によって4ステップ、つまり、1) 「圧縮開始時で側方にフラッシュの

表1 非軸対称部動的可容速度場の一般形

$U_r =$	$\dot{U}_R(\dot{U}_X) =$	$\dot{U}_\theta(\dot{U}_Z) =$	
$E_{11}^{\text{上}}$	$C_{11}Y + C_{12}$	$C_{13}R + \alpha_1 + C_{14}/R + s(R)f(\theta)$	$(C_{15}R - \alpha_1)(\theta - \theta') - t(R)F(\theta', \theta) + PR + Q$
$E_{12}^{\text{上}}$	$C_{21}Y + C_{22}$	$C_{23}R + C_{24} + C_{25}/R$	$(\theta - \theta')(C_{26}R + C_{27}) / (\theta_0 - \theta^*)$
$E_{22}^{\text{上}}$	$C_{31}Y + C_{32}$	$-C_{31}X - A\Gamma(0, X) + \delta(Z)$	$A(Z - H)\gamma(X)$
$E_{22}^{\text{中}}$	$C_{41}Y + C_{42}$	$\alpha_2 R + \alpha_3 + C_{43}/R + s(R)g(\theta)$	$(C_{44}R - \alpha_3)\theta - t(R)G(0, \theta')$
$E_{22}^{\text{下}}$	$C_{51}Y + C_{52}$	$-C_{51}(X - X_0) - (A - H)\Gamma(X_0, X)$	$(A - Z)Z\gamma(X)$

$C_{41} = (\dot{W}_{22}^{\text{上}} - \dot{W}_{22}^{\text{中}}) / (Y_3 - Y_2)$, $C_{42} = (\dot{W}_{22}^{\text{上}} Y_3 - \dot{W}_{22}^{\text{中}} Y_2) / (Y_3 - Y_2)$, $C_{15} = -(C_{11} + 2C_{13})$, $C_{13} = (\theta^* - \theta_0)(\dot{U}_{22}^{\text{上}} R_2 - \dot{U}_{22}^{\text{中}} R_3) / (\theta_0 - \theta') / (R_3^2 - R_2^2) - R_3 F(\theta', \theta_0) / (R_3^2 - R_2^2) / (\theta_0 - \theta') - C_{11} / 2 - C_{21}(\theta^* - \theta_0) / (\theta_0 - \theta') / 2 - \alpha_1 / (R_3 + R_2) + \{P / 2 + Q / (R_3 + R_2)\} / (\theta_0 - \theta')$, $C_{14} = R_2(C_{13}R_2 - \alpha_1 + \dot{U}_{22}^{\text{中}})$, $C_{23} = \{C_{26} / (\theta^* - \theta_0) - C_{21}\} / 2$, $C_{24} = C_{27} / (\theta^* - \theta_0)$, $C_{25} = R_3 R_2 (\dot{U}_{22}^{\text{上}} R_3 - \dot{U}_{22}^{\text{中}} R_2) / (R_3^2 - R_2^2) - C_{24} R_3 R_2 / (R_3 + R_2)$, $C_{26} = -\{(C_{11} + 2C_{13})(\theta_0 - \theta') + 2F(\theta', \theta_0) / (R_3 - R_2)\} + P$, $C_{27} = -\{\alpha_1(\theta_0 - \theta') - R_2 F(\theta', \theta_0) / (R_3 - R_2)\} + Q$, $C_{43} = R_2(-\alpha_2 R_2 - \alpha_3 + \dot{U}_{22}^{\text{中}})$, $C_{44} = -(C_{41} + 2\alpha_2)$, $P = C_{44}\theta' - 2G(0, \theta') / (R_3 - R_2)$, $Q = -\alpha_3\theta' + R_2 G(0, \theta') / (R_3 - R_2)$, $s(R) = (R - R_2) / (R_3 - R_2)$, $t(R) = (2R - R_2) / (R_3 - R_2)$, $\delta(Z) = \{f(\sin^{-1}(Z/R_3)) - A(Z - H)Z\gamma(\sqrt{R_3^2 - Z^2}) / R_3 + (C_{13}R_3 + \alpha_1 + C_{14} / R_3) / \cos(\sin^{-1}(Z/R_3)) + C_{51}\sqrt{R_3^2 - Z^2} + A\Gamma(0, \sqrt{R_3^2 - Z^2})\}$, $g(\theta) = \{-C_{51}(R_3 \cos \theta - X_0) - (A - H)\Gamma(X_0, R_3 \cos \theta)\} \cos \theta + R_3(A - H) \sin^2 \theta \gamma(R_3 \sin \theta) - (\alpha_2 R_3 + \alpha_3 + C_{43} / R_3)$, $F(a, b) = \int_a^b f(\theta) d\theta$, $G(a, b) = \int_a^b g(\theta) d\theta$, $\Gamma(a, b) = \int_a^b \gamma(X) dX$
 α_i ($i=1 \sim 3$) はパラメータ、ただし $R_2=0$ のときは $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$, $\gamma(X)$, $f(\theta)$ は任意関数

* 東京大学生産技術研究所 第2部

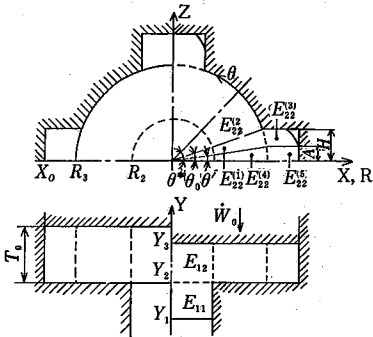


図 1 モデルおよび要素分類

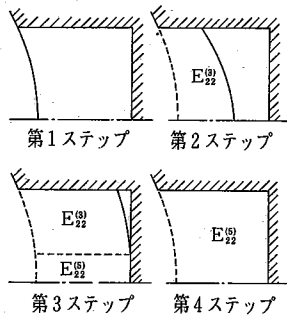


図 2 側方フラッシュ変形プロセスの分類

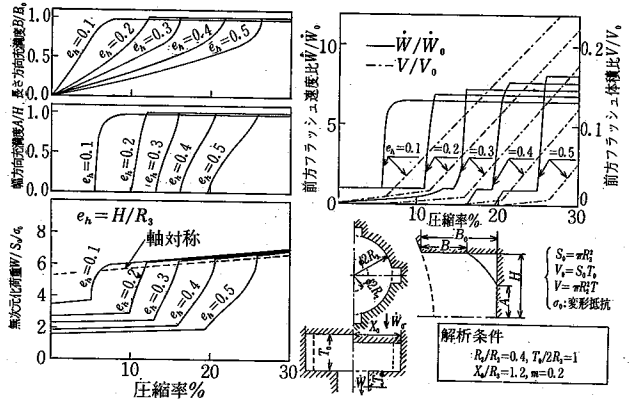


図 3 側方フラッシュ幅の影響

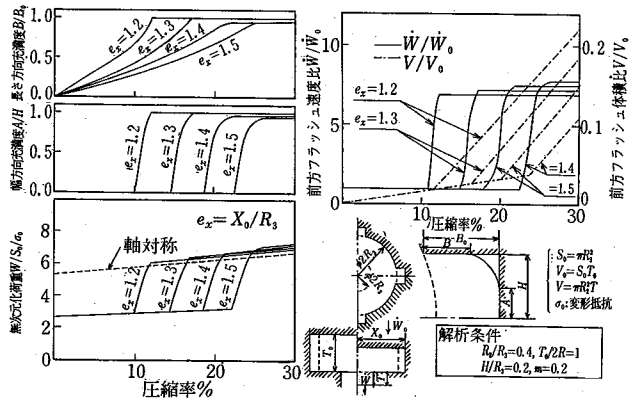


図 4 側方フラッシュ長さの影響

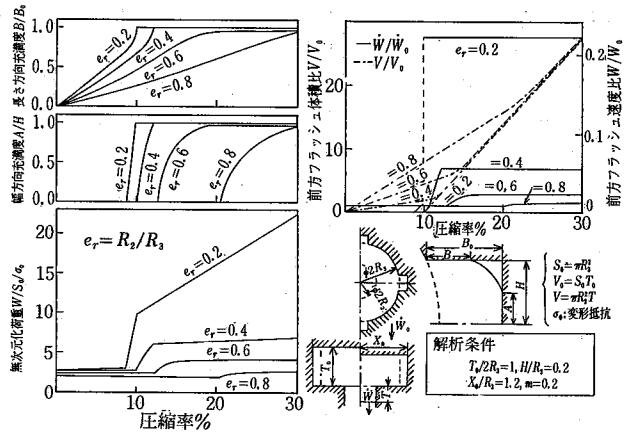


図 5 前方フラッシュ径の影響

出ていない状態 (第1ステップ), 2) 「加工開始から側方フラッシュ長さ方向端面に材料が当たるまでのプロセス (第2ステップ), 3) 「その後側方フラッシュに材料が充填しきるまでのプロセス (第3ステップ), 4) 「側方フラッシュに材料が充填しきった後のプロセス (第4

ステップ)」に分けられるが, 表1の速度場は, Aの値(図1参照) によってその全プロセスを表現しうる形をしている。すなわち $A=0$ (したがって $\theta'=0$) なら第1・2ステップ, $0 < A < H$ なら第3ステップ, $A=H$ (したがって $\theta'=\theta_0$) なら第4ステップを表す。本解析においては,

研 究 速 報

以上の速度場を用いて内部、せん断、摩擦仕事率を計算し、それらを合計した全仕事率を最小ならしめるように速度場中のパラメータを修正し、その結果得られた速度分布を最適近似解として解析を行ったが、その際、各ステップにおける最適化パラメータとしては、第1・2ステップでは前方フラッシュ速度 \dot{W}_1 および $f(\theta)$ 中の β_1, β_2 の計3コを、第3ステップでは $\dot{W}_{11}, \beta_1, \beta_2$ および $\gamma(X)$ 中の β_3, β_4 の計5コを用い、第4ステップでは、充満過程は終了しており、パラメータ操作によりフラッシュ形状を変化させる必要がないため、最適化は行わなかった。また最適化には F.P.S 法を用いた。なお、以下の解析においては定摩擦条件を用い、材料の変形抵抗は一樣で加工硬化はしないものとした。

3. 解 析 結 果

図3に、側方フラッシュ幅を変えた場合の解析結果を示す。図より、幅の広い場合ほど材料は側方フラッシュへ流出しやすいため、フラッシュ体積自体が大きいため、充満が進むには時間がかかることが、また幅が狭いと、充満はすみやかに進むが未充満部が残ってしまうことが分かる。一方、荷重については、圧縮初期には幅が狭い方が高く、充満過程終了時には逆に幅が広い方が若干高くなっているが、いずれの場合にも、側方フラッシュへ流出した材料がフラッシュ端面に当たるまで荷重値は低く、その増加の割合も小さいが、その後フラッシュに材料が充満しきるまで荷重は急激に上昇しつづけ、充満後再び荷重の増加は緩やかになる。図中の破線は、UBETの軸対称鍛造解析用プログラムを用いて、本モデルで側方にフラッシュが無い場合について解析した結果であるが、この図を見ると、側方フラッシュがある場合、圧縮初期の荷重は軸対称の場合に比べてかなり低いが、充満完了時には逆に高くなることが分かる。

図4に、側方フラッシュ長さを変えた場合の解析結果を示す。図より、フラッシュが長いほど側方フラッシュに材料を充満させるのは難しいことが分かる。荷重については、充満過程終了時の荷重が、フラッシュが長い場合ほど若干高くなっている他、全体的傾向としては図3の場合と同様になっている。

図5に、前方フラッシュ径を変化させた場合の解析結果を示す。図より、前方フラッシュ径が小さいほど材料は側方フラッシュへ流出しやすく、そのため充満もすみやかに進むが、荷重もかなり高くなってしまいうのに対して、前方フラッシュ径を適度に大きくすれば、充満状況をさほど悪化させずに加工荷重を大幅に低下させることが分かる。ただし、前方フラッシュ径を大きくしすぎると、側方フラッシュに未充満部が残ってしまうことも分かる。

図6に、ピレットのアスペクト比 A_s を変化させた場合の解析結果を示す。図より、同圧縮率時で比較すると、 A_s が大きい場合ほど材料は側方フラッシュに充満しやすことが分かる。したがって鍛造によって側方にフラッシュを持つ製品を作るには、最終製品の形状およびそれに関連した最終圧縮率から逆算して定まる、ある一定値以上の A_s を持つピレットを用いる必要があることが分かる。図7は、 A_s と荷重の関係を、圧率をパラメータとしてまとめたものである。図より、全般的傾向としては、 A_s が大きいほど荷重も高いが、 A_s がある値より小さくなると逆に A_s が小さいほど荷重が大きくなることが分かる。

図8に、摩擦定数 m を変化させた場合の解析結果を示す。図より、大差は無いものの、 m の値が大きいほど材料は側方フラッシュに充満しにくくなり、荷重も大幅に高くなってしまいうことが分かり、潤滑の重要性が示され

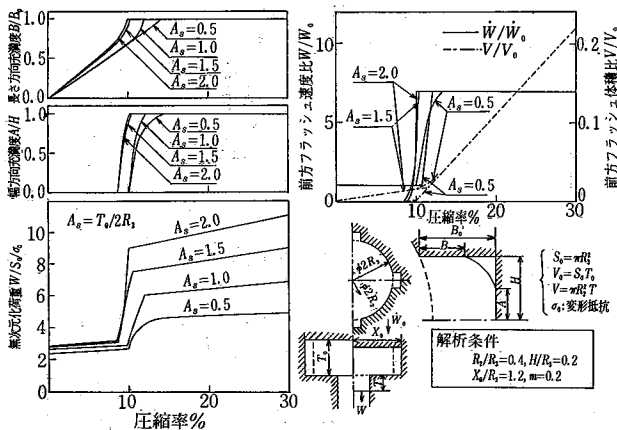


図6 アスペクト比の影響

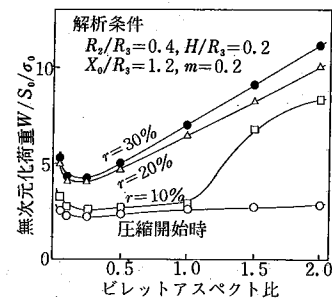


図7 ピレットアスペクト比と荷重の関係

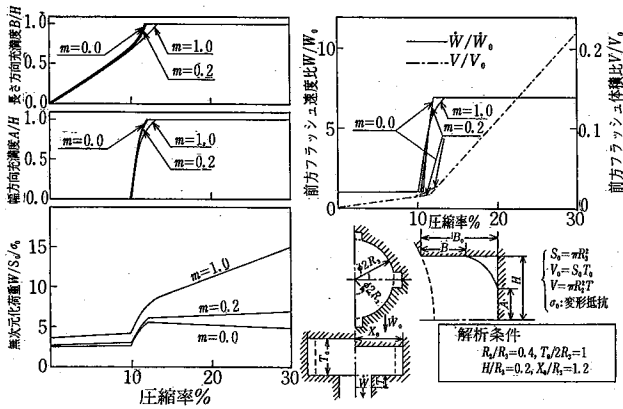


図 8 摩擦定数 m の影響

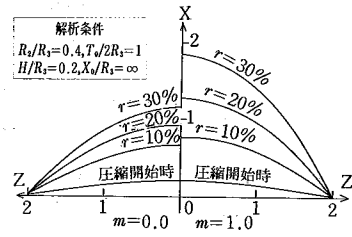


図 9 摩擦定数 m による側方フラッシュ部バルジ量の差

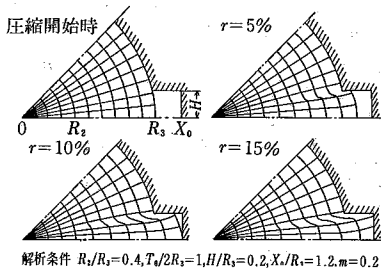


図 10 格子変形

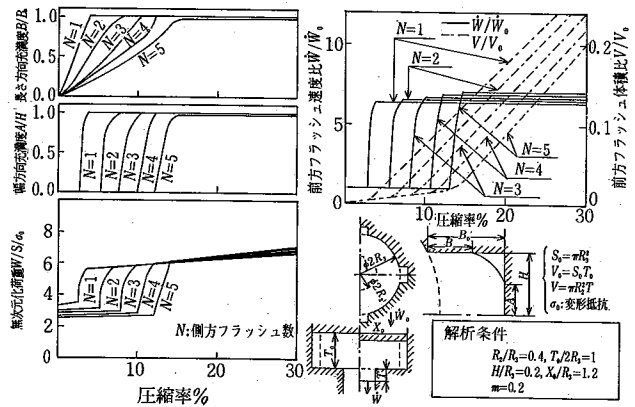


図 11 側方フラッシュ数の影響

ている。なお、図中 $m=0,0$ の場合、充滿完了後荷重が下がっているのは、 m が零のために、もともと摩擦仕事しか存在しない前方フラッシュの状態は、この場合、荷重その他には影響を及ぼさず、したがって圧縮が進むにつれて同型のより薄い製品を圧縮しているのと同様になるからである。図 9 は、 m の違いによる側方フラッシュのバルジ状態の差を、圧縮率をパラメータとして図示したものである。図より、 m が大きい方が、また圧縮が進むほどバルジ量も大きくなることが分かる。

また、図 10 は、格子変形を追跡することによって材料の側方フラッシュへの充滿過程をみたものである。

ところで、以上はすべて側方フラッシュの数を 4 とし、解析を行った結果であるが、本速度場は、表 1 の θ^* の値を $\theta^* = \pi/N$ (N : 側方フラッシュ数) となるように決めれば、側方フラッシュが一定間隔で存在する製品につ

いては、 N に関係なく適用できる。図 11 は、 N の値を 1~5 としたときの解析結果である。図より、 N が大きいほど材料は側方フラッシュに充滿しにくいことが分かる。また荷重については、圧縮初期には N が大きいほど荷重は低い、充滿過程終了時では、 N が大きいほど若干ではあるが荷重も高くなっていることが分かる。

4. ま と め

側方に平行フラッシュを持つ擬軸対称製品の鍛造加工プロセスを解析しうる速度場を開発し、それを用いて側方フラッシュへの材料充滿を解析した。得られた結果は妥当なものであり、本速度場の有効性が判明した。

(1982 年 9 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば村田, 木内: 第 32 回塑加連講論 (1981), 25
- 2) たとえば木内, 重田: 塑性と加工, 22-251(1981), 1208
- 3) 木内・村田: 塑性と加工, 22-244 (1981), 495