

UBETの特性と応用技術に関する研究・1

Study on Characteristics of UBET and its Optimal Application

木 内 学*・鄭 顕 甲**

Manabu KIUCHI and Hyun Kap CHUNG

1. は じ め に

筆者らは、いわゆるUBETにより、塑性加工時の被加工材の変形過程を精度良くかつ能率的に解析する手法を確立するため、UBETの特性の解明とその応用技術に関する研究を進めている。本報では、最も一般的かつ使いやすい平行速度場モデル¹⁾を用いたUBETに関し、軸対称前後方押し加工を例にとり、被加工材の、要素への分割位置および分割数が解析結果に与える影響について系統的な検討を行った。さらに、それらの結果を通じて被加工材の塑性域およびデッドメタル域と要素への分割方法の関係について検討した結果を報告する。

2. 解析モデルと基礎式

2.1 要素の平行速度場モデル

UBETによる軸対称変形の解析に際して、被加工材(ピレット)を要素に分割する場合、要素の種類としてはいろいろ考えられるが、ここでは、いわゆる矩形要素、および三角形要素を用いるUBETを対象として、その解析手法上の特性の解明を行う。ただし、三角形要素はその斜辺の位置によって4種モードに分けて考える¹⁾。分割された各要素内の動的可容速度場は、次のように定義されるものとする。

矩形要素の動的可容速度場の一般形は、

$$\dot{V}_y = C_1 Y + C_2 \tag{1}$$

$$\dot{V}_r = -(1/2) C_1 R + C_3 / R \tag{2}$$

三角形要素の動的可容速度場の一般形は、

$$\dot{V}_y = C_4 Y / R + f(R) \tag{3}$$

$$\dot{V}_r = -C_4 (1 + C_5 / R) \tag{4}$$

ここで、 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, f(R)$ は要素の幾何学的条件と境界速度により定まる定数および関数である。三角形要素の動的可容速度場の表示式中の定数 C_4, C_5 は、三角形の各モードによって異なる。この速度場はいわゆる

平行速度場であり、要素間境界面における垂直速度分布は一樣である。また、体積一定の条件を満足していることは明らかである。

2.2 仕事率の算出

要素の内部仕事率 $\dot{W}^{(i)}$ 、要素間境界におけるせん断仕事率 $\dot{W}^{(s)}$ 、工具面における摩擦損失 $\dot{W}^{(l)}$ より、全仕事率 \dot{W}_T は、

$$\dot{W}_T = \dot{W}^{(i)} + \dot{W}^{(s)} + \dot{W}^{(l)} \tag{5}$$

となり、上界定理に基づき、これの最小化を行うことにより、速度場を最適化する。また最小化手法としては直接探索法の一つであるF.P.S.法を用いる。図1に計算のフローチャートを示す。

2.3 一部要素の細分割際の境界条件と解析手法

図1に示すように、被加工材の変形が複雑になる可能性がある部分に関しては、この部分の変形自由度を増加させるため、当初の分割により得られた要素の細分割を行う。この場合、元の要素と、細分割して得られた要素

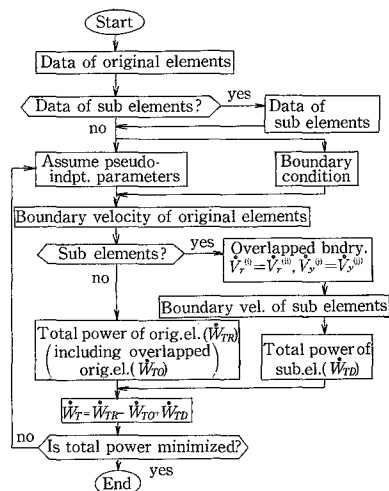


図1 計算のフローチャート

*東京大学生産技術研究所 第2部

**韓国機械研究所

研究速報

の境界速度は、次の適合条件を満足する。

$$\dot{V}_r^{(i)} = \dot{V}_r^{(ii)} \quad (6)$$

$$\dot{V}_y^{(i)} = \dot{V}_y^{(ii)} \quad (7)$$

また、その際の全仕事率 (\dot{W}_T) の算出は、

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{TR} - \dot{W}_{TO} + \dot{W}_{TD} \quad (8)$$

ここで、 \dot{W}_{TR} は元の要素分割での全仕事率、 \dot{W}_{TO} は元の要素のうちで細分割される要素に関する全仕事率、 \dot{W}_{TD} は細分化して得られた要素にかかわる全仕事率である。

3. 解析結果と考察

3.1 解析条件

以上の解析モデルを用いて、図2に示す軸対称前後方押し出し加工の6つのケースについてシミュレーションを行い、UBETの特性を調べた。図2のCase-(1), (2), (3)は、主としてr方向に分割位置を変化させた場合、Case-(4), (5)は、主としてy軸方向に分割位置を変化させた場合、Case-(6)は、粗く分割した要素のうち、一部を取り出し、さらに細分割した場合である。被加工材のアスペクト比 (h/R_d) は0.5~4.0とし、被加工材の変形抵抗 $\sigma_0 = 1.0$ (比変形抵抗)、摩擦定数 $m = 0.05$ を用いて解析を行った。

3.2 r方向分割位置の影響

図3はCase-(1), (2), (3)について、最適化された全仕事率を示す。横軸は被加工材のアスペクト比を示す。Case-(1)の場合は、被加工材のr方向の変形が、y軸方向にみても一樣になるような形で、拘束される分割であるため、アスペクト比が大きくなるに従い最適化された全仕事率が大きく増加する。また分割位置cの影響は現れない。Case-(2)は、 $y = h/2$ で要素分割した場合で、Case-(1)に比べ被加工材のr方向の変形の自由度が増えるため、アスペクト比が大きい範囲で、Case-(1)の場合に

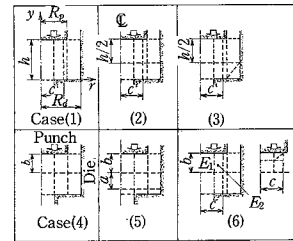


図2 解析条件

比較して全仕事率が低くなるが、この場合でもr方向の分割位置cの影響はないことがわかる。また、Case-(3)は、Case-(2)の場合にさらに三角形要素を入れ、いわゆる、ダイコーナの被加工材の変形にデッドゾーンを想定した場合であるが、アスペクト比が1.0以下で、Case-(2)より高い全仕事率を与える。これは、アスペクト比が1.0以下では三角形要素によるデッドゾーンの想定が大き過ぎるためであり、アスペクト比が1.5以上の場合は、後述するように、 $y = h/2$ の分割線より下の領域はすべてデッドメタルになっており、その内部での要素分割は実際に意味を持たないので、Case-(2)と同じ全仕事率となると考えられる。

3.3 y軸方向分割位置の影響

図4は、Case-(4)の詳細な解析結果であり、y軸方向にみた要素分割位置 b/h を変化させた場合である。この場合、 b/h が1に近く、または0に近くなると、内容的にみて、Case-(1)に漸近する。 b/h の変化と共に鍛造圧力(平均ポンチ面圧)が大きく変化するのは、主として、被加工材中に形成されるデッドメタルに対しての、要素分割の適・不適に起因している。UBETでは、個々の要素全体が塑性域となるか、剛体域(デッドメタル)となる

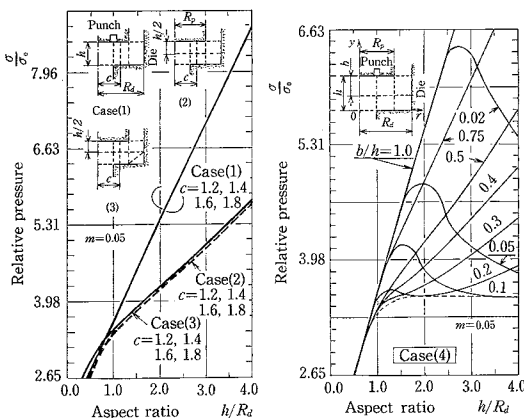


図3 半径方向要素分割位置の影響 図4 y軸方向要素分割位置の影響

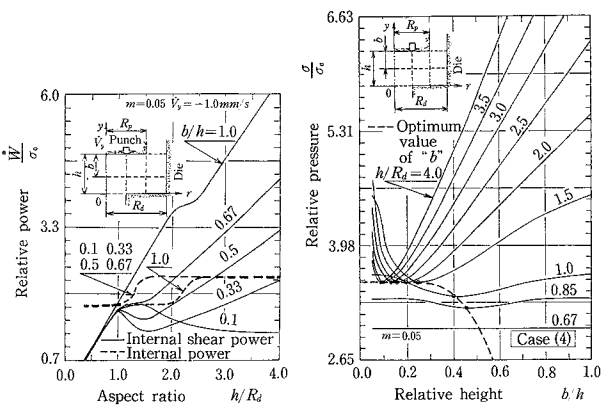


図5 内部せん断仕事率の影響 図6 y軸方向の最適分割位置 (b/h)

か、の二者択一となるので、仮に実際のデッドメタルの形成域とかけ離れた場所で要素への分割が行われると、実際の変形とは大きく異なる変形を無理に起こさせるのに要する仕事率あるいは加工荷重を算出する結果となる。図4の結果は、このことを示している。これらの結果より、最適な解は図中に示された破線（各曲線の包絡線）で示されうると考えられ、これより、被加工材のアスペクト比と各場合の最適な b/h の関係を知ることができる。

図5は、Case-(4)の場合、 b/h の変化に従う、内部せん断仕事率の影響について示してある。この図よりも、適切な要素分割を行わないと、被加工材の変形に、内部境界上で大きな内部せん断が起り、アスペクト比の増大に伴い内部せん断仕事率が増加することがわかる。上述のCase-(4)と同様な意味で、図6も、より良い解を得るためには、被加工材の変形を柔軟に表現しうる要素分割を適用する必要性を示しており、その際のアスペクト比に対する b/h の最適値を示す。これより、 b/h の最適値を選ぶことにより、アスペクト比が1.5以上の場合では全仕事率が一定値になることがわかる。

図7の(1)、(2)、(3)、(4)、はCase-(5)の場合であり、 y 軸方向の分割位置 a/h を変化させた場合の結果を示す。これらの場合は、 a/h の値の増加とともに、Case-(4)の場合に漸近する。Case-(5)の場合は、Case-(4)の場合のピレット下部の要素を細分割した場合に相当する。図7の(1)~(4)よりわかることは、要素数の増大よりは、要素分割位置が結果に大きく影響を与えるということである。いずれの場合も、新たな細分割境界が、デッドメタル境界に近接するほど、全仕事率（ポンチ面圧）は低下するという結果を与える。図7(1)~(3)中に示した破線は各曲線群の包絡線であり、相互に一致する。また、これらの包絡線は、図4に示した包絡線とも

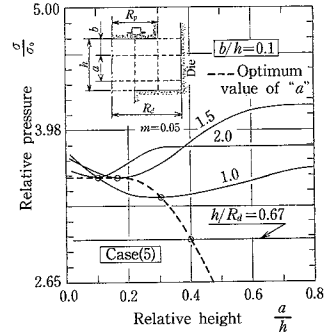


図8 y -軸方向に細分割した場合の最適分割位置 (a/h)

一致する。ただし、図7(4)のように、当初の分割位置そのものが不適、すなわち当初の要素分割がすでにデッドメタルの形成と干渉している場合には、当然のことながら細分割の効果は期待できない。

図8はCase-(5)での要素分割位置 a/h の最適値を表している。この場合、すでに指摘したように、 a/h の最適値と b/h の和 ($a/h + b/h$) を、Case-(4)の b/h の最適値と比較すると、これらはほとんど一致していることがわかる。以上の結果より、平行速度場モデルでは、要素の分割位置を、被加工材中のデッドメタルの形成に対応しうるよう適切な位置に設定しないと、妥当な解が得られないことがわかる。

3.4 デッドメタル域の推定および摩擦の影響

図9に、Case-(4)の b/h が最適となる場合と、Case-(5)の $a/h + b/h$ が最適となる場合の、各要素の y 軸に垂直な境界上での y 軸速度 (V_y) の分布を示す。Case-(4)では、アスペクト比が1.5以上の範囲で、内部の y 軸に垂直な境界と、下部のダイス出口の自由境界での速度が0となっている。これより、その領域はデッドメタル

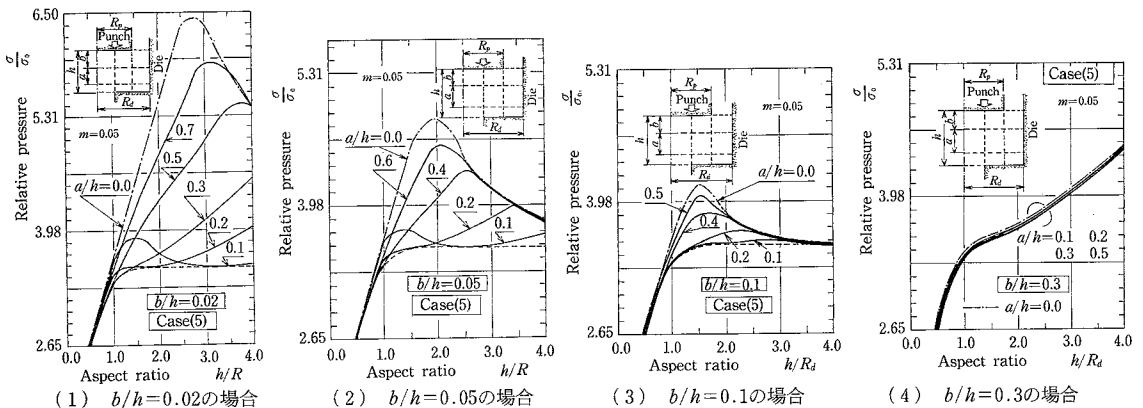


図7 y -軸方向の細分割の影響

研究速報

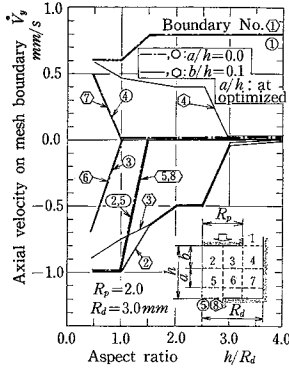


図9 a/hが最適の場合の \dot{V}_y の分布

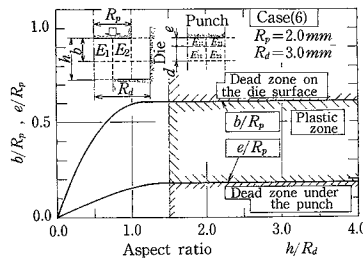


図10 デッドゾーン

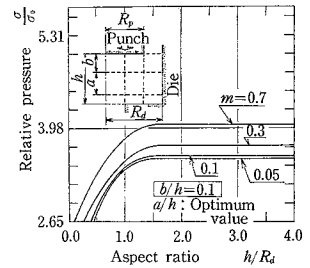


図11 摩擦の影響

になっていることがわかる。また、Case-(5)の場合、アスペクト比が1.5以上からは、内部垂直境界の番号5, 6, 7と8番の自由境界も速度が0となっており、その境界を含む下の三つの要素はデッドメタルとなっていることがわかる、Case-(4)のb/hの最適値とCase-(5)のa/h+b/hの最適値がほぼ同じであるため、両者とも同位置でデッドメタルを形成していると考えられる。

図10は、Case-(6)の場合であり、Case-(4)のb/hが最適となる場合に、さらに、ポンチ直下のデッドメタルの形成を推定するために、ポンチ直下の粗分割した二つの要素E₁, E₂を取り出し、さらに、E₁₁, E₁₂, E₂₁, E₂₂の四つの要素に分割し、e/hの値を変化させ、その最適値を調べた。その結果、予想どおり、e/hにも最適値が存在し、ポンチ直下でもデッドメタルを考慮することにより、より良い解が得られることがわかった。たとえば、アスペクト比が1.5以上の場合、b/R_p=0.6, e/R_p=0.18の位置で全仕事率が最低になる。

図11は、Case-(5)の場合、平均ポンチ面圧に与える摩擦の影響について示す。これは、b/h=0.1でa/hが最適値を持つ場合に関する結果であり、摩擦定数mが0.05, 0.1, 0.3, 0.7, と大きくなるに従い、当然のことである

が、摩擦損失のみ増加し、内部仕事率および内部せん断仕事率の変化は生じない。

4. ま と め

本研究では、軸対称前後方押し出し加工の解析を例にとり、平行速度場モデルを用いたUBETの特性の解明とその応用技術に関する検討を行った。その結果、要素数よりも要素分割の位置が、解析結果に大きな影響を及ぼすこと、最適な要素分割と、デッドメタルの形成とは密接な関係があり、デッドメタルの形成を適切に表示できるような要素分割が好ましいこと、逆に要素分割位置そのものをパラメタとすることにより、少ない要素数で良好な解を得、かつデッドメタル形状の予測が十分可能であることが判明した。(1987年4月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・村田：塑性と加工, 22-244 (1981-5), 495.
- 2) 木内・今井・鄭・柳本：第36回塑加連講論, 437.
- 3) 木内・今井・鄭・柳本：同上, 441.
- 4) 木内・今井・鄭・柳本：昭61春塑加講論, 451.
- 5) 木内・今井・鄭・柳本：同上, 455.
- 6) 木内・柳本：同上, 443.
- 7) H. Kudo: Int. J. Mech. Sci., 2 (1960), 102.