

塑性加工の複合数値解析に関する研究 第4報

——半密閉鍛造の解析 II——

Study on Combined Numerical Analysis 4th Report

——Analysis of Semi-closed Die Forging II——

柳本 潤*・木内 学*

Jun YANAGIMOTO and Manabu KIUCHI

1. 緒 言

近年の計算機の高速化をうけて、鍛造加工中に被加工材の受ける変形を数値的に予測することが可能となりつつあり、従来より、剛塑性 FEM¹⁾・UBET²⁾などに代表される数値解析手法の開発が行われてきた。しかし、これらの解析法の実生産加工への適用、および将来予想される問題の高度化・複雑化に関しては、いまだ多くの問題が残されている。筆者らが先に提案した複合数値解析法³⁾は、UBET と剛塑性 FEM とを複合化することにより、解析範囲の拡大、解析機能の高度化、計算時間・コストの低減を図るものであり、既報^{3,4)}において、その特性につき検討を加えてきた。本報では、前報³⁾に引き続き、複合数値解析法により半密閉鍛造の解析を行い、複合化の方法およびその結果につき検討を加える。

2. 解 析 法

2.1 複合化の概要・前報の結果の検討

複合数値解析法 (Combined Numerical Analysis: CNA) は、複数の解析法 (UBET・剛塑性 FEM) をそれぞれの特長を生かす形で複合化した解析法である。複合化の方法については前報³⁾にて述べたが、以下にその概略を説明する。

まず解析対象とする領域を、図1に示すように、主領域 (変形の少ない部分) と複合領域 (変形の大きい部分) とに分割する。主領域は UBET 解析のみを行う部分であり、複合領域は UBET 解析の結果を剛塑性 FEM 解析により補正する部分である。解析は、図2に示す手順に従って行う。すなわち、まず解析対象とする領域全体 (主領域+複合領域) について UBET 解析を行い、各 UBET 要素に対する仕事率および複合境界での速度分布を定める (Step 1)。次に、UBET 解析による複合境界での速度を境界条件とした剛塑性 FEM 解析を複合領域のみにについて行い、この部分の詳細な速度場を決定する。また、解の一部として、各 FEM 要素に対する仕事率が求まる (Step 2)。以上で、各領域 (主領域・複合領域) についての速度場が、UBET および剛塑性 FEM により定まり、また複合領域については、UBET と剛塑性 FEM の結果求めた各解析法・各要素単位の仕事率を比較することにより、仕事率に関する補正係数を計算することが可能となる。そこで、形状修正後の次の段階の UBET 解析をこの係数 (仕事率補正係数) を用いつつ行うことにより、剛塑性 FEM 解析の結果を UBET 解析に反映させる (Step 3)。

前報³⁾では、各複合領域 i 全体について、UBET と剛塑性 FEM による仕事率を比較することにより、各複合領域につき 1 個の仕事率補正係数を式(1)より定義し、

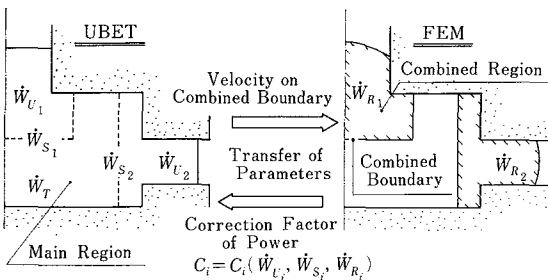


図1 複合数値解析におけるパラメータの交換

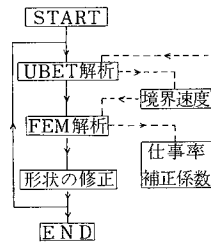


図2 解析手順

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
 UBET解析ではこの係数を考慮した式(2)に示す全仕事率 \dot{W} を最小化し、速度場の最適化を行った。

$$C_i = \frac{[(\dot{W}_R)_i + (\dot{W}_S)_i]}{[(\dot{W}_U)_i + (\dot{W}_S)_i]} \quad (1)$$

$$\dot{W} = D \cdot \dot{W}_T + \sum_i C_i \cdot [(\dot{W}_U)_i + (\dot{W}_S)_i] \quad (2)$$

- ただし \dot{W}_T : 主領域の全仕事率
- $(\dot{W}_U)_i$: 複合領域 i の UBET 解析による全仕事率
- $(\dot{W}_R)_i$: 複合領域 i の FEM 解析による全仕事率
- $(\dot{W}_S)_i$: 複合境界 i の UBET 解析によるせん断仕事率
- C_i : 複合領域 i の仕事率補正係数
- D : 主領域の仕事率補正係数

図3は、前報³⁾に示した半密閉鍛造の解析結果であるが、以上に示した方法による複合化では、材料が自由表面を多く含む場合、実験結果と解析結果との誤差が大きくなることが示されている。すなわち、それぞれのフラッシュ(複合領域)への流出量の計算に含まれる誤差に起因して、ヒレット高さの解析結果に時間遅れを生じているが、複合数値解析においては、材料全域にわたる流動(すなわち、それぞれのフラッシュへの流出量)は、仕事率補正係数を考慮した UBET 解析により決定される。したがって、この誤差には以下に示す2つの原因が考えられる。

- 1) 仕事率補正係数の決定法
- 2) UBET モデル(要素分割・速度場)

本報ではこの2点につき改良を行い、精度の向上を図ったが、その内容につき次節以後に説明する。

2.2 仕事率補正係数 C の改善

前報³⁾の解析においては、仕事率補正係数 C を、各複合

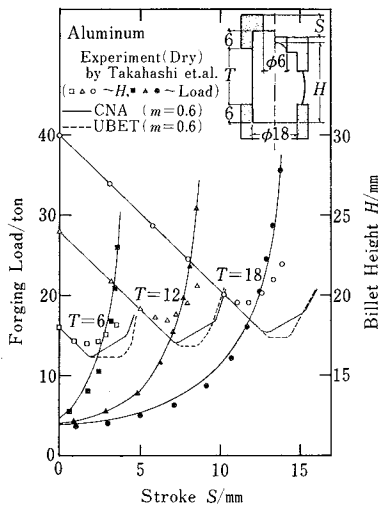


図3 半密閉鍛造の解析結果(1)

領域 i に対し1個の値 C_i で表したが、本報では、より細かい定義法(UBETの要素単位での定義)を導入する。すなわち、UBET解析およびFEM解析の結果求まる仕事率を、各UBET要素単位で比較することにより、複合領域 i 内の各UBET要素 j に対する仕事率補正係数 C_{ij} を、以下の式で定義する。

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k \in j} [(\dot{W}_R)_{ik} + (\dot{W}_S)_{ij}]}{(\dot{W}_U)_{ij} + (\dot{W}_S)_{ij}} \quad (3)$$

ただし $\sum_{k \in j} [(\dot{W}_R)_{ik}]$: FEM解析による要素 k の全仕事率のうち、UBET要素 j に含まれるものの和を取ったもの

UBET解析においては、次式の仕事率 \dot{W} を最小化し、速度場を最適化する。

$$\dot{W} = D \cdot \dot{W}_T + \sum_i \left[\sum_j C_{ij} \cdot [(\dot{W}_U)_{ij} + (\dot{W}_S)_{ij}] \right] \quad (4)$$

前報³⁾および本報における仕事率補正係数の定義を、図4にまとめて示す。

2.3 UBETの要素分割の改良

複合数値解析においては、材料の全域にわたる流動は、仕事率補正係数を考慮したUBET解析にて決定される。したがって精度向上には、UBETモデル、特に要素速度

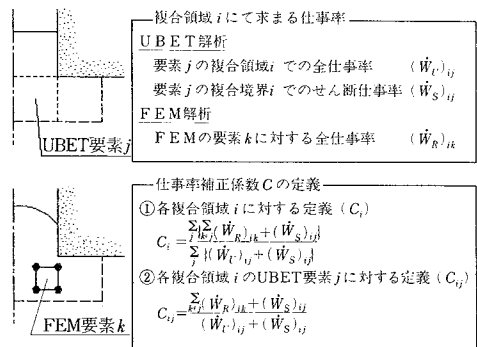


図4 仕事率補正係数の定義のまとめ

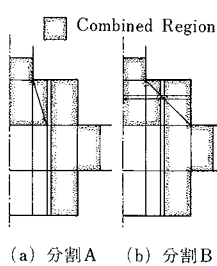


図5 UBETの要素分割

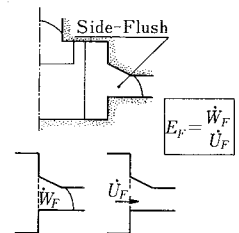


図6 仕事率補正係数の定義の拡張

場および要素分割の改良が必要となる。

本報ではそのうち、要素分割の改良を試みた。図5に2種類の要素分割(A)(B)を示すが、うち(A)は前報にて用いた要素分割、(B)は改良した要素分割であり、(B)では複合領域 $i = 1, 2$ 近傍での要素分割を細かくし、より多くの変形自由度を与えている。

以上 2.2 および 2.3 節に示した方法による解析例を、3.1 節に示す。

2.4 仕事率補正係数の拡張

以上に示してきた改良とは別に、本報においては、工具形状が複雑であり、UBET による速度場の構成が複雑である部分に対する仕事率の補正方法につき検討を行った。以後、図6に示す側方フラッシュ部にテーパを持つ工具での加工を例にとり説明する。

従来まで行ってきた複合化においては、解析を行う領域全体について UBET の速度場が構成できることを前提として、UBET と剛塑性 FEM における仕事率を比較することにより仕事率補正係数 C を定めてきた。しかし、解析対象とする領域に、UBET による速度場の構成が複雑である部分が含まれる場合には、従来の方法とは異なる仕事率補正係数の定義が必要と考えられる。そこで、側方フラッシュ部分での剛塑性 FEM による全仕事率 \dot{W}_F とフラッシュ開口部での UBET の境界速度 \dot{U}_F を用いて、以下に示す仕事率補正係数 E_F を新たに定義する。

$$E_F = \dot{W}_F / \dot{U}_F \quad (5)$$

形状修正後の次のステップでは、式(4)に示した仕事率に加え、側方フラッシュについての仕事率補正係数 E_F (式(6)下線部)を考慮した全仕事率 \dot{W} について最小化を行い、速度場を最適化する。

$$\dot{W} = D \cdot \dot{W}_T + \sum_i \{ \sum_j C_{ij} \cdot [(\dot{W}_v)_{ij} + (\dot{W}_s)_{ij}] + E_F \cdot \dot{U}_F \} \quad (6)$$

以上に示す仕事率の補正法により、任意の工具形状に対し、容易かつ柔軟に UBET と剛塑性 FEM との複合化を行うことが可能となる。以下 3.2 節に、この方法を用いての解析例を示す。

3. 解析例

3.1 半密閉鍛造の解析(1)

以後に示す解析結果はすべて材料としてアルミニウムを想定しており、変形抵抗式は式(7)を、摩擦定数は $m = 0.6$ を用いている。

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(1 + \beta \bar{\epsilon})^n \quad (7)$$

$$\sigma_0 = 12 [\text{kgf/mm}^2] \quad \beta = 1.5 \quad n = 0.28$$

まず、前報³⁾にて示した解析例(図3)のうち、フラッシュ開口部初期高さ $T = 12\text{mm}$ のものにつき、前節 2.2 および 2.3 に示したモデルの改善を行い、解析を行った。図7に、解析モデルの構成および解析結果を示す。図7のうち、a 1 が前報に示した結果である。比較のため、図7には剛塑性 FEM のみによる解析結果を併記した。

剛塑性 FEM のみによる解析結果も、実験結果との対応は必ずしも完全ではないが、複合数値解析法(CNA)による前報に示した結果 a 1 に比較して、良好な解が得られている。また、前節にて述べたモデルの改良を行った CNA の結果 a 2, b 1, b 2 について見ると、a 2 (仕事率補正係数のみを変更したもの)・b 1 (UBET の要素分割のみを変更したもの)ともに、解は改善されないが、b 2 (仕事率補正係数と要素分割をともに変更したもの)については明らかに解の改善が行われている。すなわち、解析精度向上のためには、複合化の際に仕事率補正係数 C を UBET の要素単位に定義し、同時に UBET の要素

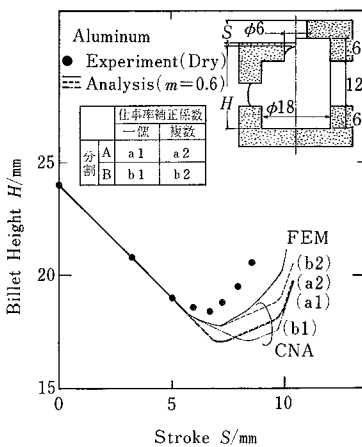


図7 半密閉鍛造の解析結果(2)

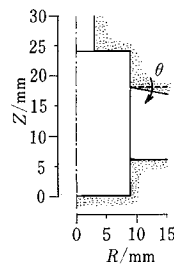


図8 解析モデル

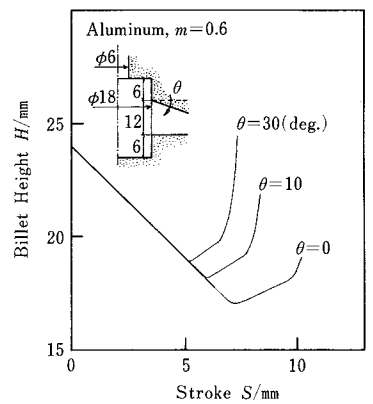
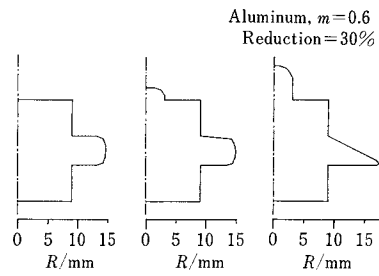


図9 テーパー角 theta の影響

研究速報



(1) $\theta = 0^\circ$ (2) $\theta = 10^\circ$ (3) $\theta = 30^\circ$

図10 ビレットプロフィールの比較

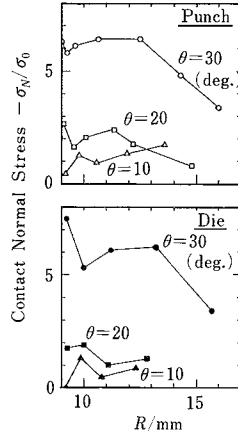
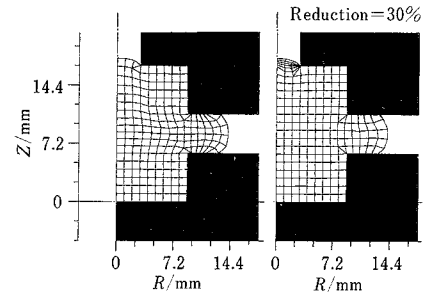


図11 側方フラッシュ部の工具面圧分布



(1) 再分割前 (2) 再分割後

図12 再分割前後での要素形状

分割にも十分な変形自由度を確保することが有効である。

3.2 半密閉鍛造の解析(2)

(テーパ部を持つ工具による半密閉鍛造)

2.4節に示した仕事率補正係数 E_F を用いた例として、側方フラッシュ部にテーパ部を有する工具による半密閉鍛造の解析例を以下に示す。解析モデルを図8に示すが、パンチ側の側方フラッシュのテーパ角 θ を変化させて解析を行い、その影響を調べた。図9にストロークに対するビレット高さの変化を、図10に圧下率30%におけるビレットプロフィールを、テーパ角 θ をパラメータとして示す。

テーパ角 θ が大きくなるほど側方フラッシュへの流動が抑えられ、結果としてビレットの高さが増加する傾向にある。また、複合数値解析法によれば、複合領域の応力分布を求めることが可能であるが、例として図11に、圧下率30%での側方フラッシュ部の工具面圧分布を示す。この部分での材料の充填率が最も高い $\theta = 30(\text{deg.})$ において、面圧の値が最も高くなっており、 $\theta = 10, 20(\text{deg.})$ の場合に比較して数倍の値に達していることがわかる。

4. 結 言

前報³⁾に引き続き、複合数値解析法(CNA)による半密閉鍛造の解析を行った。本報にて得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①仕事率補正係数 C を複合領域内の各 UBET 要素に対し定義し、かつ UBET の要素分割を改良し変形自由度を増すことにより、解の改善が可能である。
- ② UBET の速度場を構成するのが複雑な部分に対しての仕事率の補正方法を示した。この方法による解析結果

は、経験的に妥当なものである。

(1986年12月9日受理)

参 考 文 献

- 1) C.H.LEE・S.KOBAYASHI: Trans.ASME J.Eng. Ind., (1973), 865.
- 2) 木内・村田: 塑性と加工, 22-244, (1981), 495.
- 3) 木内・柳本: 昭61春塑加講論, (1986), 443.
- 4) 木内・柳本: 第36塑加連講論, (1985), 449.
- 5) S.LOHほか: Proc.1st.ICTP, Vol.2, (1984), 1051.

補 遺

本文中の解析のうち、剛塑性FEMはラグランジェ乗数法を用いている。またマトリックス構成の際に、データのバンド化を行っており、円柱の圧縮等は 10×10 分割、 $0 \rightarrow 50\%$ (50ステップ) でCPU時間は30秒程度である。また、本文中図7に示した剛塑性FEMによる解析は、中途に4回要素の自動再分割を行っており、図12に、圧下率30%での再分割前後における要素形状を示す。これは各要素の断面積を均一化した分割(ただし、自動分割のアルゴリズムの関係から、断面積は完全には均一にはならない)であるが、前報中に一部示したように、各要素当たりの内部仕事率を均一化し、要素分割を最適化することも可能である。また、新要素の積分点に対する物理量の内挿は、OHら⁹⁾による方法を用いている。この剛塑性FEM解析には、要素の自動再分割に要する時間も含めて、CPU時間は約20分必要である。また、複合数値解析も同一のプログラムで行っており、CPU時間は約3~5分程度である。なお計算は、東京大学大型計算機センターのHITAC M680/682Hシステムにて行った。