

鍛造加工汎用シミュレータの開発 1

—非軸対称複合鍛造の解析 1—

Development of Forging Simulator (FORMS) 1

木 内 学*・村 松 勁*・今 井 敏 博*

Manabu KIUCHI, Tsuyoshi MURAMATSU and Toshihiro IMAI

1. は じ め に

塑性加工の解析法として、UBET (Upper Bound Elemental Technique) は比較的簡便かつ経済的な解析方法である。このUBETは、軸対称汎用シミュレータ¹⁾が開発されて以来、すえ込み²⁾や押し出し³⁾⁴⁾等の基本的鍛造加工の解析に有効であることが明らかとなり、またその拡張により、被加工材の形状も軸対称ばかりでなく非軸対称形状⁵⁾⁶⁾まで、広範囲に解析例が示されつつある。特に、3次元問題 (非軸対称鍛造) に対し、UBETは現時点での有望な解析手法の一つと考えられる。

一方、実生産においては、省エネルギー・経済性等の見地より複雑形状品の鍛造化が進み、それに伴って従来法では解析困難な問題も多く発生し、経験や試行錯誤では対応しきれない状況が生まれつつある。

本研究は、複雑な鍛造工程のシミュレーションを迅速かつ精密に行うために、これまでに筆者らによって開発された各種UBET解析モデルを統合し、鍛造加工の総合的汎用シミュレータ FORMS (Forging Operation Relational Multipurpose Simulator) の開発を目指すものである。

本報では、FORMSの概要・構成・解析方法を示し、解析例として非軸対称すえ込みと非軸対称押し出しの複合加工を伴う代表的な鍛造工程を取りあげ、解析した結果を示す。また、その妥当性について実測値と比較した結果もあわせて報告する。

2. 基本的な考え方

実生産における複雑な塑性流動を伴う鍛造工程の解析を行う際、被加工材の全体的な動的相容速度場を開発し、解析モデルを構成することは容易ではない。そこで、本研究では、基本的な変形様式を対象とするUBET解析モデルを結合して連立を図ること、すなわち、実際の鍛造加工における変形が複合的であることに対応して、解析

モデルも複合化を図ることを提案する。従来の単純な塑性変形 (たとえばすえ込み、押し出し等) に対応した解析モデルを、被加工材の個々の要素ブロックに対応するものとみなし組み合わせることにより、複雑・多様な解析モデルが構成できる。

3. 構成および解析方法

図1にFORMSの構成を示す。FORMSは、入力されたデータより解析対象の全体的構成を認識し、被加工材のブロックへの分割、適合条件や境界条件の設定、仕事率の最適化を行うMain Programと、基本的なUBET解析モデルにより各ブロックの解析を行うSub Program群より構成される。Main Programと各Sub Programの間は、呼び出されるたびに図2に示すデータの交換を行う。全体の作業の流れを図3に示す。

たとえば、図4(1)の鍛造工程の解析を行う場合、被加工材は、図4(2)に示すように3個のブロックに分ける。各ブロックは非軸対称すえ込み、軸対称押し出し、非軸対称押し出しの変形様式を持つ。各ブロックに対応する基本解析モデルはすでに開発済みのものであり、おのおの妥当性は確認されている。ブロックの概要を以下に簡単に説明する。解析方法の詳細については既報¹⁾³⁾⁵⁾を参照されたい。

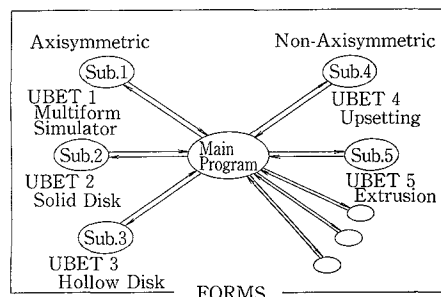


図1 FORMSの構成

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

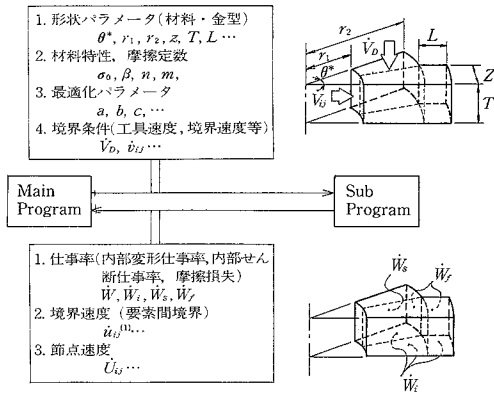


図2 プログラム間のデータ交換

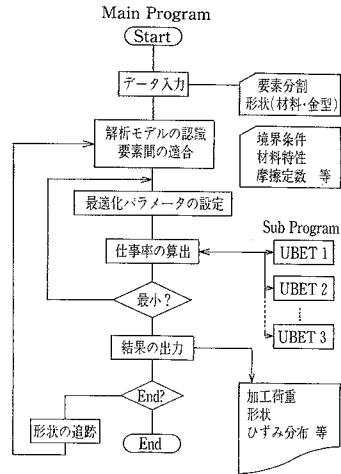


図3 フローチャート

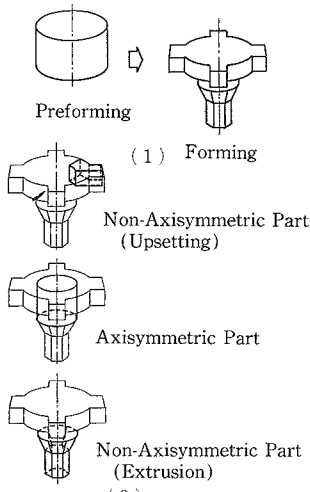
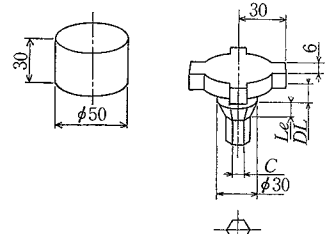


図4 解析モデルの構成



	(mm)	
Case	1	2
C	9	9
	12	
	15	
Le	10	10
		5
		3
DL	1	1

図5 解析条件

非軸対称すえ込み部を対象とする基本解析モデルは、工具速度および軸対称部からの境界速度が与えられると、仕事率と共に側方フラッシュの形状・充満状態を算出する。最適化に必要なパラメータは2個(ただし充満が進行しフラッシュが工具に接してからは4個)である。

軸対称押し部については軸対称汎用解析モデルを用いる。この場合、矩形要素が2個であり、最適化パラメータは1個必要である。

非軸対称押し部には押し・引抜き汎用解析モデルを用いる。このモデルではこの場合最適化パラメータを必要とせず、材料流入速度が与えられると仕事率を計算する。以上、モデル全体で最適化パラメータは3個(5個)であり、これらについて全仕事率の最小化を図り、動的相容速度場の最適化を行う。最小化手法としてはF.P.S.法を用いている。

4. 解析例

4.1 解析方法

図4に示す鍛造工程の解析を行った。側方フラッシュは平行形状であり、非軸対称押しは丸棒から六角柱へ行う。図5は解析で用いた各部の寸法を示す。本報では、側方フラッシュの充満過程に対する押し部の影響の解析を中心に2種類の計算を行った。Case 1は押し断面形状を変化させた場合で、断面減少率の変更に相当する。Case 2は押しシヤ径長さを変化させた場合で、押し角の変更に相当する。いずれの場合も計算結果は、相対圧力(p_n)、充満度($A/H, B/B_0$)、前方流出速度比(V/V_0)および前方フラッシュ長さ(L)を圧下率

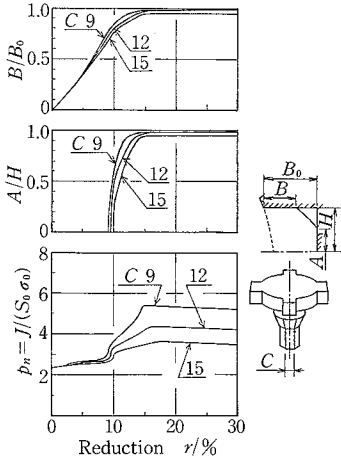


図 6 解析結果
—断面減少率の影響 1—

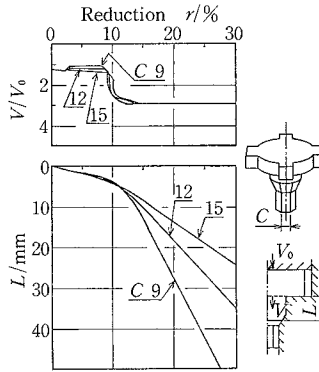


図 7 解析結果
—断面減少率の影響 2—

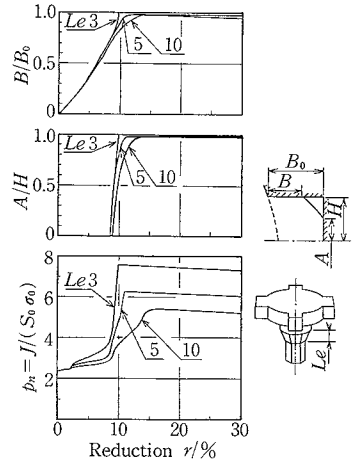


図 8 解析結果
—ダイス長さの影響 1—

(red.) に対比させて示す。なお、材料は剛完全塑性体、摩擦定数 $m=0.2$ を仮定している。

4.2 計算結果

(1) Case 1: 結果を図 6, 7 に示す。図より、前方フラッシュが型の押し部にかかる時 ($red.$ 約 3%), 相対圧力は少し上昇し、前方流出速度比は下がる。このとき、断面減少率が大きい ($C=9$) ほうが相対圧力は高く、前方流出速度比の低下は大きい。当然のことであるが、断面減少率の大きいほうが押し部の消費エネルギーが大きいためである。その後、側方フラッシュの先端が工具に接触し、相対圧力は急上昇する。そのときの圧下率は断面減少率が大きいほうが小さく (A/H)、側方フラッシュの充満度 (B/B_0) にも同様の影響を与えている。今回の条件では完全には充満しなかったが、充満の進行が止まった時点で前方フラッシュが伸び始める。最終的な充満度・相対圧力共に断面減少率の大きいほうが高い。

(2) Case 2: 結果を図 8, 9 に示す。Case 1 と同様に、前方フラッシュが型の押し部にかかる時、相対圧力は上昇し前方流出速度比は下がる。このとき、ダイス長さの短いほうが相対圧力の上昇、流出速度比の低下は大きい。充満度については、ダイス長さの短いほうが、低下率で接触し早く充満する。また、 $Le 3$ の場合、圧下率約 11% で完全に充満する。

今回の条件では、概してすえ込み部の充満が先に進み、充満完了後、前方フラッシュが伸びる傾向を持ち、側方フラッシュより軸部に向かって材料の逆流が起こると推測され、理想的な鍛造工程ではないと考えられる。

以上の結果より、本解析モデルは一般的に妥当性があ

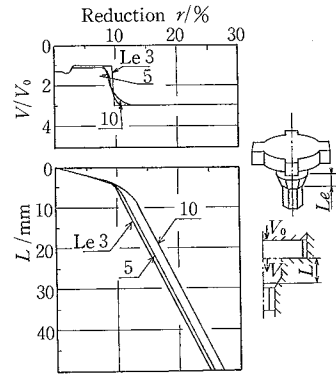


図 9 解析結果
—ダイス長さの影響 2—

ると考えられる。次に、本解析モデルの定量的妥当性の確認のために、実験結果との比較を行った。

5. 実験との比較

5.1 実験方法

図 10 に実験を行った鍛造工程を示す。材料は鉛を用いた。鉛の場合、温度、加工速度等の加工条件の違いにより変形抵抗が変化するので、実験と対応する条件で圧縮試験を行い、図 11 の結果を得、塑性域での平均的な変形抵抗値として $\sigma_0=1.25 \text{ kgf/mm}^2$ を用いることにした。なお、材料は剛完全塑性体を仮定している。摩擦定数は、既報⁶⁾と同様に、前方フラッシュ軸部のみ $m=0.2$ とし他は $m=0.5$ としてある。その他の条件は既報⁶⁾と同一である。

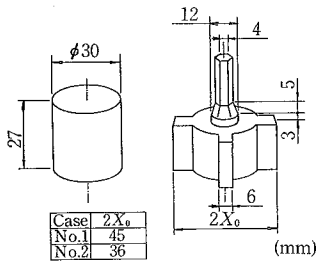


図10 実験条件

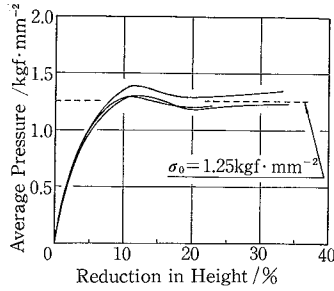


図11 平均面圧—圧下率

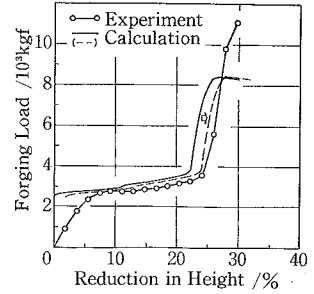


図12 実験結果と解析結果の比較
— 2X₀=45の場合1—

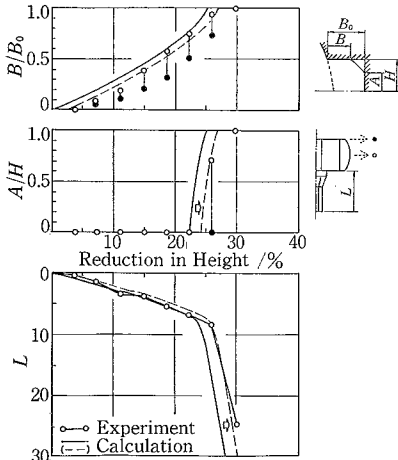


図13 実験結果と解析結果の比較
— 2X₀=45の場合2—

関する結果と同様、FORMSの結果はあたかも数%早く加工が進行しているように見える。

この原因については、実験では初期状態でピレットとダイスの間にクリアランスがあり、圧下を始めてからこのクリアランスが充満するまでに数%の圧下率を要するためと考えられる。図中の破線は、実験でのクリアランスを測定し、そのクリアランスに応じた圧下率(2%)だけ計算結果を平行移動したものである。

また、最終段階で荷重の計算値が実測値よりも低くなった原因であるが、材料の部分的な変形抵抗の評価(加工硬化、ひずみ速度効果の評価)あるいは摩擦定数の扱い等に若干問題が残されているためと考えられる。

以上のことを考慮すれば、本解析モデルによる計算結果は実測値と非常に良い対応を示し、十分妥当性があることが確認できた。

5.2 結果

図12~図13に実験結果と解析結果を比較して示す。充満度(A/H, B/B₀)に関しては、実験でのフラッシュ部は軸方向にもバルジ変形が生じるため、軸方向に見た充満度の最大値(○)と最小値(●)を測定し図に示した。

2X₀=45の場合の結果より以下のことがいえる。すなわち、荷重に関しては、その値が急激に上昇するまでは計算結果は実測値より少し高く、良い対応を示した。側方フラッシュが工具に接触して荷重が急上昇する時点の圧下率は、両者の結果共にFORMSのほうが実測値より数%低く、また最終的な荷重はFORMSの結果が実測値より低くなっている。

充満度、前方フラッシュ長さについても計算値は実測値と良い対応を示している。しかし全体的にみて、FORMSの結果と実験結果は平行にずれており、荷重に

6. ま と め

本研究はUBETを用いた鍛造加工汎用シミュレータ(FORMS)の開発を目指すものである。本報では、FORMSの概要・解析方法等について示した。その解析例として、非軸対称すえ込みと非軸対称押出しの複合加工を伴う鍛造工程に適用し、一般的に妥当性のあることを確認するとともに多くの知見を得た。また、実験結果と比較し、今回用いた解析モデルの妥当性・有効性を確認した。
(1987年4月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内学・村田良美: 塑性と加工, 22, 244 (1981)
- 2) 村田良美・木内学・矢吹豊: 塑性と加工, 26, 290(1985)
- 3) 木内学・岸秀敏・石川政和: 塑性と加工, 24, 266(1983)
- 4) 木内学・木村隆秀: 生産研究, 36, 11 (1984)
- 5) 木内学・唐戸彰夫: 塑性と加工, 26, 290 (1985)
- 6) 木内学・唐戸彰夫: 塑性と加工, 26, 292 (1985)