

# 汎用構造解析ソフトウェアに実装されたアダプティブFEM および各種メッシュフリー解法を用いた

## 鍛造シミュレーションの計算精度の比較検討

Comparison of Computational Accuracy for Forging Simulation using Adaptive FEM and Various Mesh-free Methods Implemented in General-Purpose Structural Analysis Software

戸倉 直<sup>1)</sup>

Sunao Tokura

1) 博(工) (株)トクラシミュレーションリサーチ (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子3-36-1-801, E-mail: tokura.sunao@tokurasimresearch.com)

Forging simulation of metallic materials involves large plastic flow, and in normal FEM, elements cannot treat large deformations, resulting in computation errors. To address these problems, high-performance FEM such as adaptive remeshing and various mesh-free solution methods have been developed. These methods were applied to forging analysis, and the computation accuracy was compared with the results of experiments in previous research and software developed for forging analysis. As a result, the differences in computation accuracy depending on element type and solution method were revealed.

**Key Words :** *forging simulation, adaptive FEM, EFG*

### 1. はじめに

金属材料の鍛造シミュレーションは大きな塑性流動をともなうため、通常のFEMでは要素が大変形に追従できず計算エラーとなる場合が多い。こうした問題への適用のためアダプティブリメッシングのような高機能FEMおよび各種メッシュフリー解法が開発されている。現代の汎用構造解析ソフトウェアにはこれらの手法が実装され、容易に適用できる環境が整備されているが、こうした手法の計算精度を定量的に比較した事例はそれほど多くないと思われる。そこで本稿では通常のFEMにおける様々な要素フォーミュレーション、アダプティブFEMおよびメッシュフリー解法のひとつであるElement Free Galerkin (EFG) 法[1]の比較を試みた。対象としたのは先行研究による実験結果が公開されている円柱材料の据込み鍛造であり、計算結果を実験および鍛造解析専用ソフトの結果と比較検討した。その結果、要素タイプや解法による計算精度の違いが明らかとなった。シミュレーションには塑性加工解析にひろく用いられている動的陽解法FEMソフトウェアAnsys LS-DYNA R13 SMP (共有メモリー並列) 倍精度版[2]を用いた。解法はすべて動的陽解法を適用し、4コア並列で計算を実行した。

### 2. 解析モデル

モデルは文献[3]で実験に使われたビレットの寸法を基にして作成した。Fig.1にモデル形状と寸法記号を示す。円柱形状のビレットの初期高さ $h_0$ と初期直径 $d_0$ はともに25 mmである。モデルは剛体床の上に置かれており、上から剛体平面で圧縮される。ビレットは上下対称に樽型に変

形(バレルング)するが、このときの上端の直径を $D_t$ とする。直径は高さ方向中間位置で最大となり、このときの直径を $D_m$ とする。

### 3. 材料物性

材料は文献[3]に従い、アルミ材AA6082 (JIS A6082-T6相当)とした。ただし当該文献には具体的な物性値が記載されていないため、材料物性に関しては応力-塑性ひずみ関係に指数則 (Eq.1) を仮定し、文献[4]で示されている引張試験の応力-ひずみ曲線にフィッティングするよう、パラメーター $K$ と $n$ を決定した。

$$\sigma = K \varepsilon_p^n \quad (1)$$

ここで $\sigma$ は真応力、 $\varepsilon_p$ は塑性ひずみである。使用した材料物性を表1に示す。密度、ヤング率、ポアソン比はアルミ材の一般的な値を用いた。

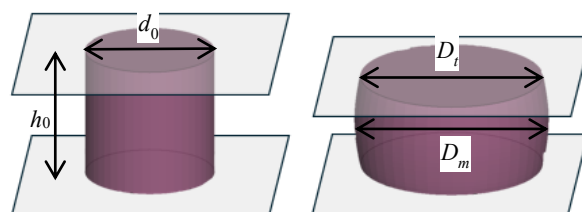


Fig.1 Model geometry

Table 1 Material properties of AA6082

Parameter	Value	Unit
Density, $\rho$	$2.7 \times 10^{-9}$	ton/mm <sup>3</sup>
Young's modulus, $E$	70000	MPa
Poisson ratio, $\nu$	0.3	-
$K$	410.855	MPa
$n$	0.0845	-

4. 解析条件

ピレットの下面に接して剛体床を設定し，上方から移動剛体壁を準静的にピレット圧縮方向に移動させた．据込み鍛造で材料が樽型に変形する場合，工具との摩擦係数が重要であるが，文献[3]の実験では潤滑剤を用いていないことが記述されているのみで，具体的な摩擦係数 $\mu$ が不明なため，本稿では塑性加工解析で一般的に使われる値として $\mu=0.1$ を設定した．比較した解析ケースを表2に示す．

Table 2 Analysis Cases

Case	Element formulation
1. FEM Hexa RI	• Hexahedral solid element • Reduced integration
2. FEM Hexa SR	• Hexahedral solid element • Selective reduced integration
3. FEM Tetra	• Tetrahedral solid element • Reduced integration
4. FEM adaptive	• Tetrahedral solid element • Reduced integration • Adaptive remeshing
5. EFG	• Element Free Galerkin

5. 解析結果

Fig.2に鍛造シミュレーションの一例として次数低減積分六面体ソリッド要素による変形図を示す．図は断面が見えるように一部を切り取って表示している．文献[3]に倣い，変形の進行をEq.2で定義される高さ方向の対数ひ

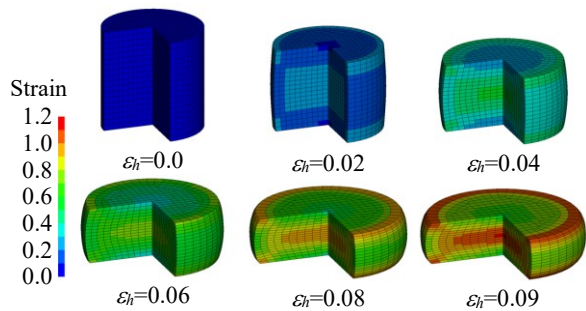
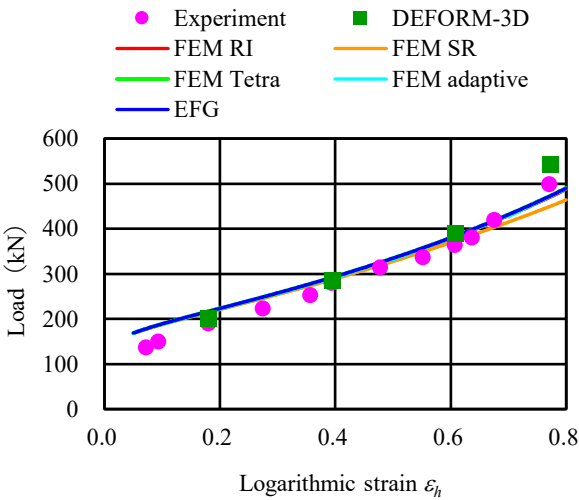


Fig.2 Deformation and plastic strain contour

ずみ（以下とくに断らない限り単にひずみと記す）の値とともに示している．Eq.2において， $h_f$ は変形途中のピレットの高さである．また図のカラーは相当塑性ひずみである．予想されるようにピレットは軸対称で樽型に変形しており，材料の全領域が塑性変形していることがわかる．

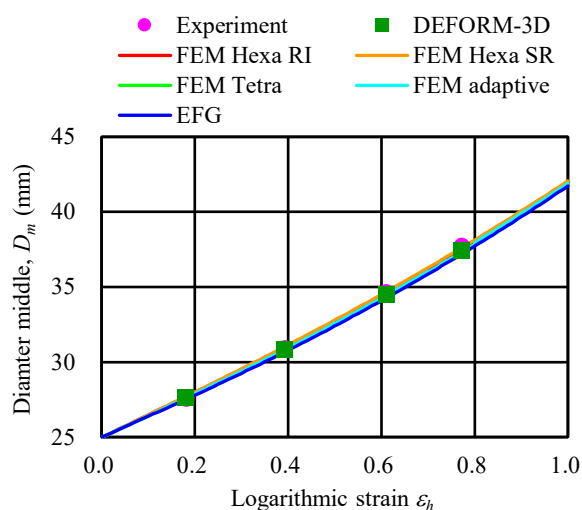
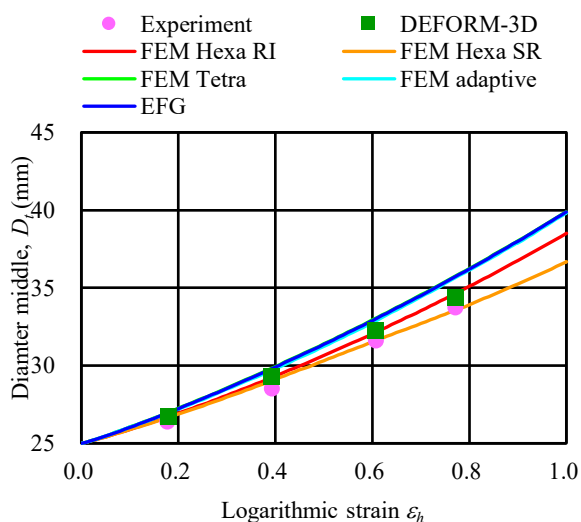
$$\epsilon_h = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right) \tag{2}$$

シミュレーションで得られたひずみ-荷重曲線と文献[3]で示された実験値および鍛造解析専用ソフトウェア DEFORM-3Dの結果との比較をFig.3に示す．どの結果も実験との大きな乖離は見られないが，グラフからは精度の優劣が明確でないため，同図に実験値と各ケースとの最小二乗誤差の値およびDEFORM-3Dの最小二乗誤差を基準とした比率を示した．これをみるとわずかではあるがFEM六面体低減積分要素が最も良好な結果を示している．変位に関しては，ひずみと樽型変形の直径の関係，すなわちひずみ- $D_m$ 曲線およびひずみ- $D_t$ 曲線と，その最小二乗誤差をFig.4および5に示す． $D_m$ ， $D_t$ ともにFEM六面体選択型低減積分要素が最も実験と近い結果を示しており，鍛造解析専用ソフトであるDEFORM-3Dより良好な結果となっている．



Case	Least square error	Ratio
DEFORM-3D	567.9840	1.000
FEM Hexa RI	564.2028	0.993
FEM Hexa SR	635.5958	1.119
FEM Tetra	607.4913	1.070
FEM adaptive	586.9390	1.033
EFG	611.5976	1.077

Fig.3 Strain-load curve and least square error

Fig.4 Strain-Diameter  $D_m$  curve and least square errorFig.5 Strain-Diameter  $D_t$  curve and least square error

## 6. パラメーター同定および影響度評価

これまでの計算で用いた材料物性値 $K$ および $n$ と、材料とツール間の摩擦係数 $\mu$ は文献[3]の実験データから直接決めたものではない。そこで実験値をターゲットとして最適化ソフトウェアを用いてパラメーター同定を試みた。使用したソフトウェアはAnsys社製最適化ソフトLS-OPT V6.0.0[5]である。最適化手法としてはSupport Vector Machineに基づく応答曲面法を用いた。目的関数はカーブフィッティングの考え方を適用し、Fig.3, 4および5で示す実験値のカーブとシミュレーションで得られたカーブとの間の面積の最小化とした。

$$A = \omega_l A_l + \omega_m A_m + \omega_t A_t \rightarrow \text{Minimize} \quad (3)$$

ここで $A_l$ ,  $A_m$ ,  $A_t$ はそれぞれひずみ-荷重曲線、ひずみ- $D_m$ 曲線、ひずみ- $D_t$ 曲線に関する面積であり、重みは各曲線の面積の大きさをほぼ均等にするために $\omega_l=1.0$ ,  $\omega_m=1 \times 10^7$ ,  $\omega_t=1 \times 10^9$ とおいた。設計変数とその側面制約条件は以下のように設定した。

$$\begin{aligned} 350 &\leq K \leq 500 \\ 0.04 &\leq n \leq 0.25 \\ 0.05 &\leq \mu \leq 0.2 \end{aligned} \quad (4)$$

最適化計算は7ケースのサンプリングを1セットとして6回の繰り返し計算を行い、目的関数が収束した時点で終了した。パラメーター同定で得られた値は以下のとおりとなった。

$$\begin{aligned} K &= 407.303344 \\ n &= 0.198937972 \\ \mu &= 0.140763525 \end{aligned} \quad (5)$$

得られた値によるシミュレーションと実験結果およびDEFORM-3Dとの比較および実験カーブとの最小二乗誤差をFig. 6, 7, および8に示す。いずれもDEFORM-3Dより実験に近い結果となっている。また、パラメーター同定計算の過程で得られたパラメーターの影響度をあらわすグラフをFig.9に示す。これをみるとひずみ-荷重曲線に関しては $K$ 、ひずみ- $D_m$ 曲線およびひずみ- $D_t$ 曲線に関しては $\mu$ の影響が大きいことがわかる。

## 7. まとめ

本稿では市販の汎用構造解析ソフトウェアの様々な要素フォーミュレーションを据込み鍛造シミュレーションに適用し、実験との比較を行った。その結果、適切な設定であれば汎用構造解析ソフトであっても鍛造解析ソフトよりも高精度な解析結果が得られることが示された。鍛造シミュレーションで良好な結果が得られない場合はソフトウェア自体の計算精度を議論する前に、使用する要

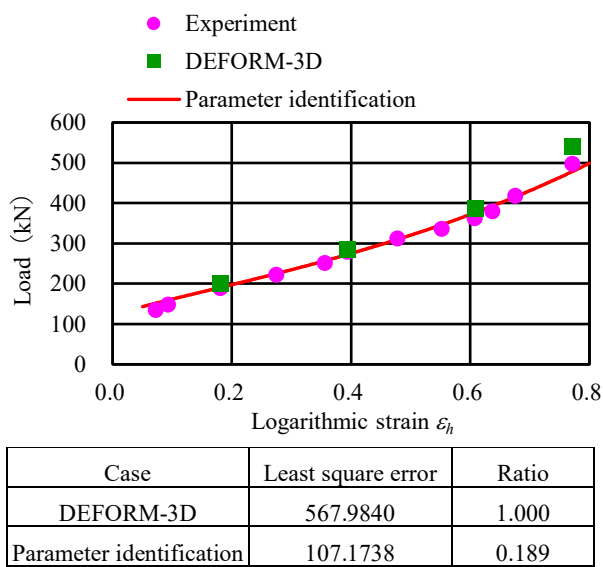


Fig.6 Strain-load curve and least square error of parameter identification

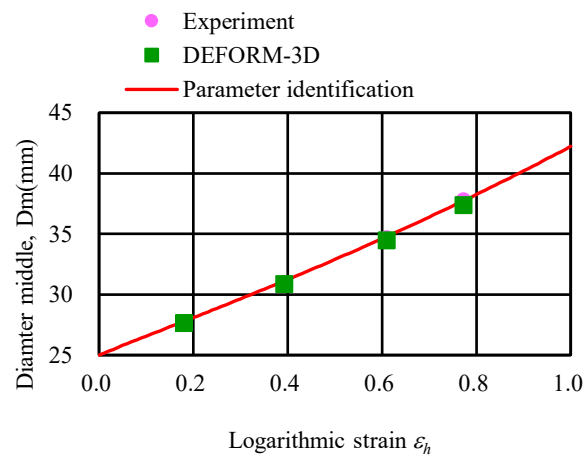


Fig.7 Strain-Diameter  $D_m$  curve and least square error of parameter identification

素の特徴を検討する必要があると思われる。鍛造の計算では四面体要素、あるいは四面体要素を用いたアダプティブリメッシングによる計算が行われることが多いが、Fig.4および5では四面体要素の結果が最も実験結果と一致しない結果が示されている。本稿で用いた四面体要素は非圧縮状態で体積ロッキングを起こしやすい要素であり、それが低精度な結果の要因であることが推定される。鍛造加工では材料は塑性変形し、非圧縮状態となるため、本来体積ロッキングを起こしやすい要素を用いるのは避けるべきであり、使用する要素が体積ロッキングの対策

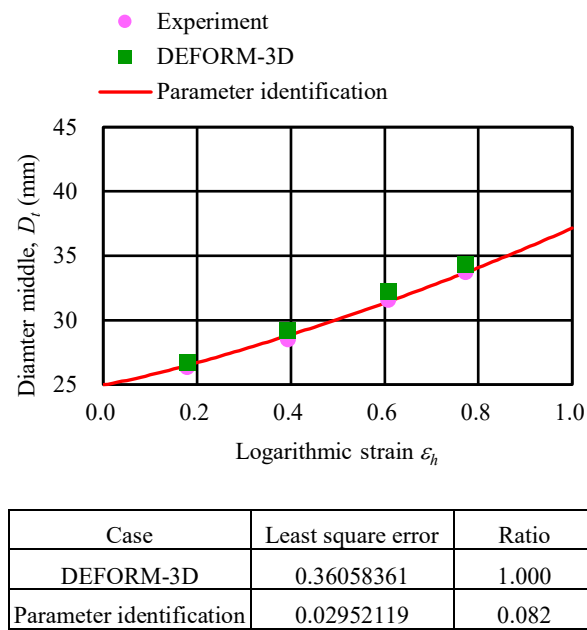


Fig.8 Strain-Diameter  $D_l$  curve and least square error of parameter identification

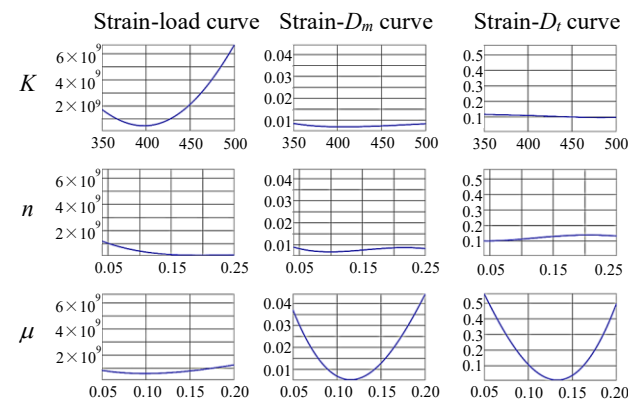


Fig.9 Parameter influence curves

がとられた要素かどうかを確認する必要がある。EFGに関しては本稿で行った1ケースのみでは十分な精度検証は行えていない。今後の課題としてカーネル関数の定式化手法や影響半径など多くのパラメーターの効果を詳細に検討する必要がある。

各ケースの計算時間を表3にまとめる。本稿で使用したモデルはモデルごとに要素数が異なり、またアダプティ

Table 3 Computation time (Intel Core i7-12700K 3.5 GHz)		
Case	CPU Time (m:s)	Zone cycle (ns)
FEM Hexa RI	9:21	95.560
FEM Hexa SR	34:48	347.699
FEM Tetra	25:46	48.128
FEM adaptive	17:30	61.513
EFG	51:52	578.165

ブ計算では計算途中で要素数が増えるため、単純に経過時間だけでは比較しにくい。そのため、1要素1ステップ当たりの計算時間（zone cycle）も併せて示した。

#### 参考文献

- [1] Shaofan Li, Wing kam Kiu: Meshfree Particle Methods, Springer, pp.68-122, 2004.
- [2] LS-DYNA® KEYWORD USER'S MANUAL, 09/24/21 (r:14186) LS-DYNA R13, Livermore Software Technology (LST), An Ansys Company, 2021.
- [3] Tahir Altinbalik: AN EXPERIMENTAL STUDY OF

BARRELING AND FEM BASED SIMULATION IN COLD UPSETTING OF ALUMINUM, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067-3604, Vol. III, No. 1, 2011.

- [4] Xintao Cui: Mechanical properties of aluminium alloy 6082-T6 plate and butt weld joint: Experimental test, numerical modelling and application, J. Phys.: Conf. Ser. 2390 012101, 2022.
- [5] LS-OPT® User's Manual, Livermore Software Technology, 2019.