研究論文

複数工程における
高精度シミュレーションに関するシーズ育成研究

本田　崇*　白川　正登*　永井　智裕*　石井　治彦*

Basic study on highly accurate Simulation of multistep deforming processes.

HONDA Takashi*, SHIRAKAWA Masato*, NAGAI Tomohiro and ISHII Haruhiko*

抄　　録

成形シミュレーションの評価，解析の高度化を目的に，大変形する素材に対してメタルフローの解析手法の開発を行った。アルミニウムを素材とする冷間鍛造や軸受鋼を素材とする熱間鍛造に対して，高精度な成形シミュレーションを検討後，開発したメタルフロー解析を実施して，良好な評価が可能であることを確認した。

1.　緒　　言

近年，製品の高付加価値化に伴い，小ロット，複雑形状，難加工材を素材とする製品への塑性加工の適用が広がっている。このような従来と異なる製品に対して，有限要素法（以下 FEM）に代表されるシミュレーションを活用した効率的な成形条件の検討が行われている。FEM は，計算対象を要素と呼ばれる単純な形状の集合で表現することで，複雑な形状でも変形，応力，ひずみなどの物理量を計算することが可能な近似手法である。

成形シミュレーションでは，要素の頂点である節点の軌跡から，材料の変形の流れ（メタルフロー）の評価が可能である。ただし，複数の工程からなる複雑な加工では，要素の形状が大きく崩れ，計算を継続できなくなる。これに対して，変形したモデルの外形，応力，ひずみなどの物理量を再構築した新たなモデルへ再マッピング（リメッシュ）することで，要素の崩壊を回避することが多い（図 1)。ただし，リメッシュにより大きな変形に対して計算を継続することが可能となるが，節点位置も再構築されるため，同一節点の追跡は継続できないといった別の課題が生じる。

そこで本研究では，軸対称であらわせる基本的な 2 次元モデルの変形を対象に，FEM のリメッシュにより失われる材料の流れの情報を補完するメタルフローの解析手法を開発した。

2.　メタルフロー解析技術の開発

2.1　処理の流れ

リメッシュにより節点位置は再構築されるため，メタルフローの評価には成形シミュレーションの節点とは別の評価点を設定する必要がある。

本研究では，成形シミュレーションとメタルフロー解析を同時に行わず，成形シミュレーシ

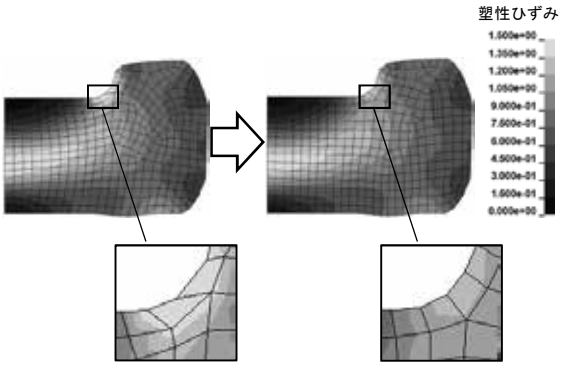


図 1　FEM のリメッシュの例

*　下越技術支援センター

ョンの結果を用いて，メタルフロー解析用に設けた評価点の移動を計算させる手法を検討した。これにより，評価点の位置には制約がなく，成形シミュレーションの節点とメタルフロー解析の評価点は全く異なる位置でもよい。

本研究におけるメタルフロー解析の流れを図2に示す。メタルフローの解析を行うにあたり，事前に成形シミュレーションを実施して，素材の変形を把握しておく。メタルフローの解析では，まず，設定した評価点と成形シミュレーションモデルの位置の関連付けを行う。次に，リメッシュを行う間のモデルの変形に評価点を追跡させる。評価点の追跡にあたっては，評価点を内包する成形シミュレーションモデルの要素の変形に伴い評価点の位置を計算する。新たなシミュレーションモデルの要素が構築されるリメッシュ時には，リメッシュまでの変形に伴い移動した評価点と，再度位置の関連付けを行う。

このように，成形シミュレーションモデルとの関連付けと追跡を繰り返し行うことで，成形シミュレーションの結果に対して任意の位置に設定した評価点の計算が可能となる。

2.2　評価点の計算手法の検討

FEMでは，節点でのみ変形，応力，ひずみなどの物理量が計算される。そのため，要素内部の物理量については，節点の物理量をもとに形状関数と呼ばれる関数で近似して求められる。さらに，要素の形状に依らず，また変形の前後であっても同じ形状関数で処理できるよう，要素はξ-η座標系へ正規化される。図3に要素の正規化のイメージと形状関数を示す[1)]。

本研究では，FEMと同様に，ξ－η 座標系への正規化と形状関数を活用した評価点の計算方法を検討する。まず，それぞれの評価点を内包する要素を ξ－η 座標系へ正規化して，評価点の位置（ξ，η）を求める。ここで，もとのX-Y座標系では，要素の変形に伴い評価点の位置は変化する。一方，正規化された ξ－η 座標系における節点の座標は常に（±1, ±1）であり，評価点の位置（ξ，η）も変化しない。したがって，内包する要素における評価点の位置（ξ，η），変形後の節点の位置および形状関数によって，変形後の評価点の移動を求めることができる。

評価点を個別の点ではなく，実際の素材のメタルフローのようなラインとすることで，実成形における鍛流線の活用のように，材料の流れの評価が可能となる。本研究では，形状に合わ

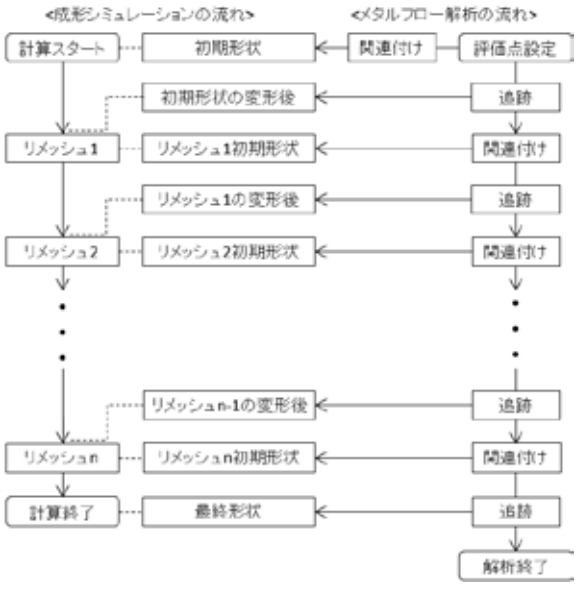


図2　メタルフロー解析の流れ

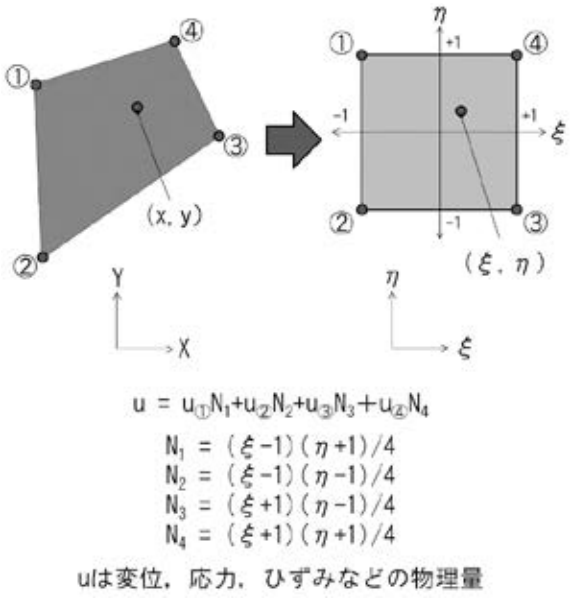


図3　要素の正規化のイメージ

せた任意のラインの数を設定できるとともに，異なる向きの補助ラインを設定できるようにした（図 4)。これにより，例えば実際の素材と同じ向きのメタルフローとこれと直行する補助ラインによる格子形状の解析も可能であり，実成形では観測できない詳細な流れの評価を行うことができる。

本研究では，成形シミュレーションおよびメタルフロー解析のソフトウェアとしてサイバネット（株）製 ANSYS LS-DYNA17.2 を用いた。ANSYS LS-DYNA は Fortran をベースとした独自の開発用言語（ANSYS Parametric Design Language）を備えており，結果の ASCII 出力，データの処理が可能である。この言語を用いてメタルフロー解析技術の開発を行った。

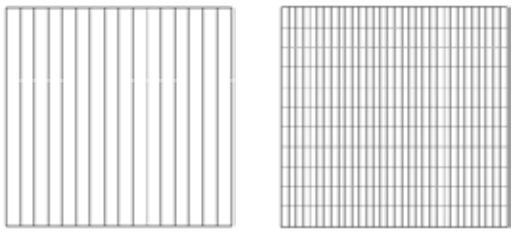
3. 冷間鍛造への適用

3.1 A1070 の冷間鍛造による成形試験

メタルフロー解析の対象として，アルミニウム Al070 を素材とした基礎的な成形試験を実施した。メタルフロー解析に先立ち，まず，この成形試験を再現できる高精度な成形シミュレーションを検討した。次に，得られた結果に対して，開発したメタルフロープログラムを適用して，実成形サンプルから得た鍛流線との比較を行い，流れの再現を確認した。

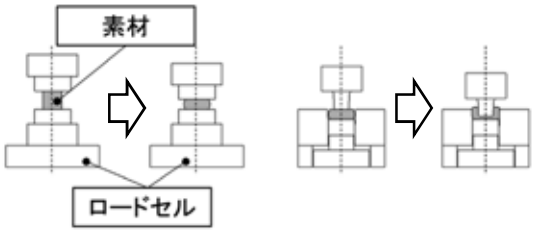
実施した成形試験の工程図を図 5 に示す。成形試験は据え込みと後方押し出しの 2 工程とした。据え込み工程ついては，下型にロードセルを組み込んで成形荷重の測定を行った。後方押し出し工程では，金型の構造上，下型にロードセルを組み込むことができない。そこで，パンチストレート部にひずみゲージを貼り，測定したひずみから成形荷重を求めた。ひずみと荷重の関係については（株）島津製作所製万能試験機 UH-F500kNC を用いて確認した。後方押し出し工程における成形の様子を図 6 に示す。

成形に用いた素材と成形後の形状を図 7(a)～(c)にそれぞれ示す。素材は直径 φ26.14mm，高さ 25.3mm の押し出し素材の旋削加工品を用いた。また，それぞれの工程の潤滑条件については，据え込み工程では無潤滑，後方押し出し工程では良好な離型を実現するため日本工作油（株）製 AB-3005W を用いた。



(a) 径方向 20 本　　(b) 径方向 30 本
高さ方向補助 10 本

図 4　評価点を結んだ評価ラインの例



(a)据え込み工程　　(b)後方押出工程

図 5　成形試験の工程図

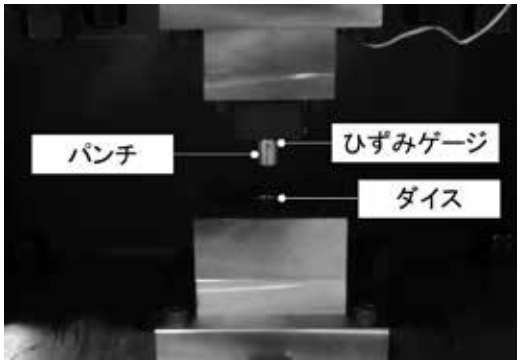


図 6　後方押し出し工程の成形の様子

(a)素材　　(b)据え込み　　(c)後方押出

図 7　成形に用いた素材と成形後の形状

3.2　成形シミュレーション

実施した成形試験に対して，成形荷重および成形品の形状を再現可能なシミュレーションの検討を行った。精度の高い計算結果を得るには，素材の材料特性である応力-ひずみ曲線と金型と素材間の摩擦の設定が重要となる。ここで，形状については摩擦，成形荷重については材料特性の設定から受ける影響が大きい。そこで，まず摩擦係数を検討して形状の合わせこみを行い，次に材料特性の検討により成形荷重の合わせこみを行った。

成形に関わる材料特性として，材料の応力-ひずみ曲線は引張試験の結果をもとに作成されることが多い。ただし，本研究のような複数の工程からなる鍛造では 200%以上の変形が発生するのに対して，金属の引張試験は数十%程度の伸びで破断するため，全ての加工範囲の結果を得ることができない。よって，引張試験の破断以降については試験結果の外挿が行われるが，どのような外挿方法が適切であるか検討が必要である。本研究では，変形抵抗を n 値で表した最も一般的な式である n 乗硬化則とアルミニウムの再現性が高いといわれる Voce の式の 2 つを比較した[2)]。本研究で用いた A1070 の応力-ひずみ曲線を図 8 に示す。

据え込み工程における主な寸法の比較を表 1 に，後方押出工程の成形品とシミュレーション結果の比較を図 9 にそれぞれ示す。成形品の形状は，3D Systems,Inc.製非接触型 3D スキャナー Geomagic Capture にて測定した。据え込み工程，後方押出工程の摩擦係数はそれぞれ 0.2，0.075 とした。両工程ともに，実形状を非常によく再現でき，良好な結果を得た。

据え込み，後方押出工程における成形荷重の比較を図 10 にそれぞれ示す。Voce の式を適用する場合，いずれの工程の成形荷重も良好に再現できた。一方，n 乗硬化則を適用した場合には，後方押出工程の荷重が過大になってしまう。Voce の式は，変形抵抗の飽和応力を定義できることが特徴であり，変形抵抗が頭打ちになるアルミニウムの特性を良好に再現できたものと考えられる。

以上の検討より，材料設定の重要性を確認するとともに，前節の成形試験をシミュレーションで良好に再現できた。

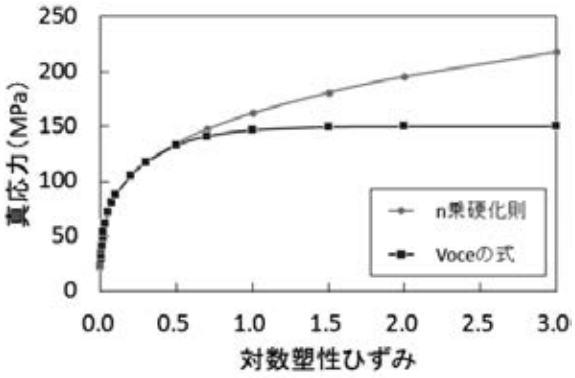


図 8　A1070 の応力-ひずみ曲線

表 1　据え込み工程における主な寸法の比較

比較項目	実成形	計算結果
高さ(mm)	14.4	14.4
最大径(mm)	35.6	35.5
端面の径(mm)	32.5	32.4

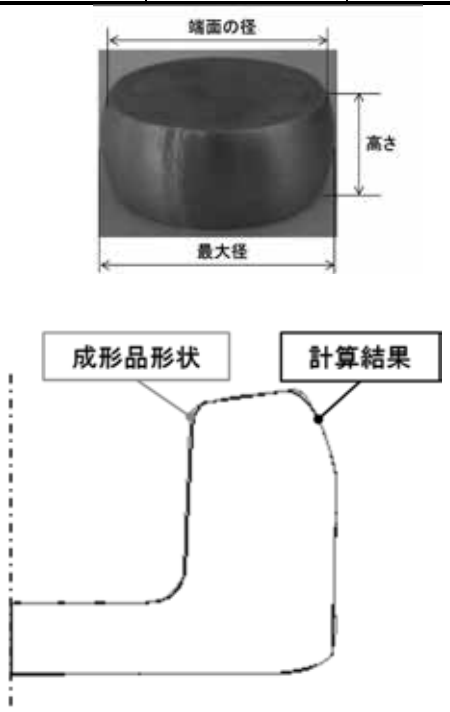
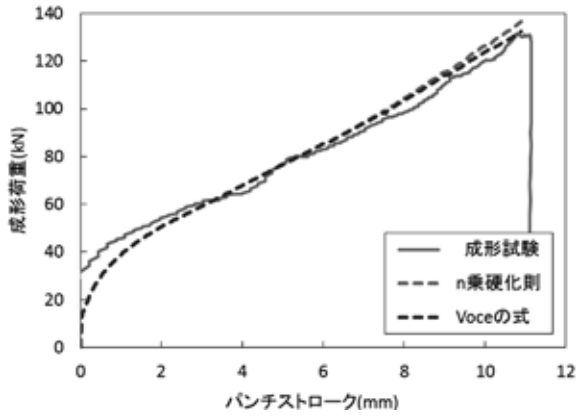


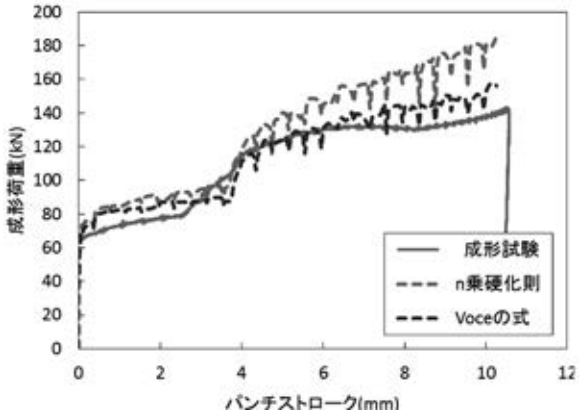
図 9　後方押出工程の成形品と
シミュレーション結果の比較

3.3　メタルフロー解析

成形シミュレーションの結果をもとに，高さ方向に 10 本，径方向に 30 本のラインを設定してメタルフローの追跡解析を行った。成形中のメタルフローの変化を図 11 に示す。成形シミュレーションのリメッシュのタイミングで出力したすべての形状でメタルフローが観察できることから，成形の途中についても評価することができる。また，解析をとおして，それぞれの評価点は一貫した固有の番号で識別されるため，成形後の評価点から元の素材の位置の検索など，実製品の鍛流線観察では困難な評価が可能である。

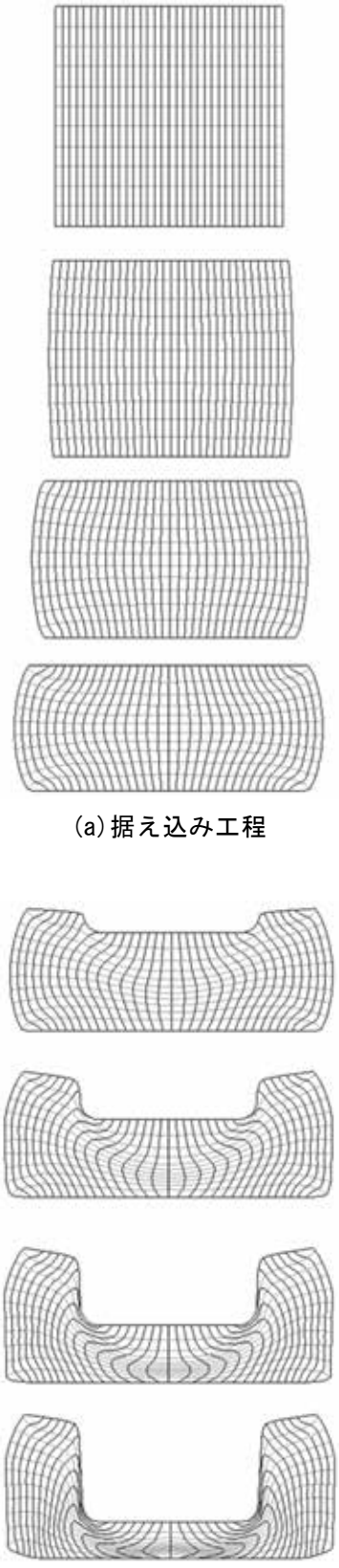


(a)据え込み工程



(b)後方押出工程

図 10　成形荷重の比較



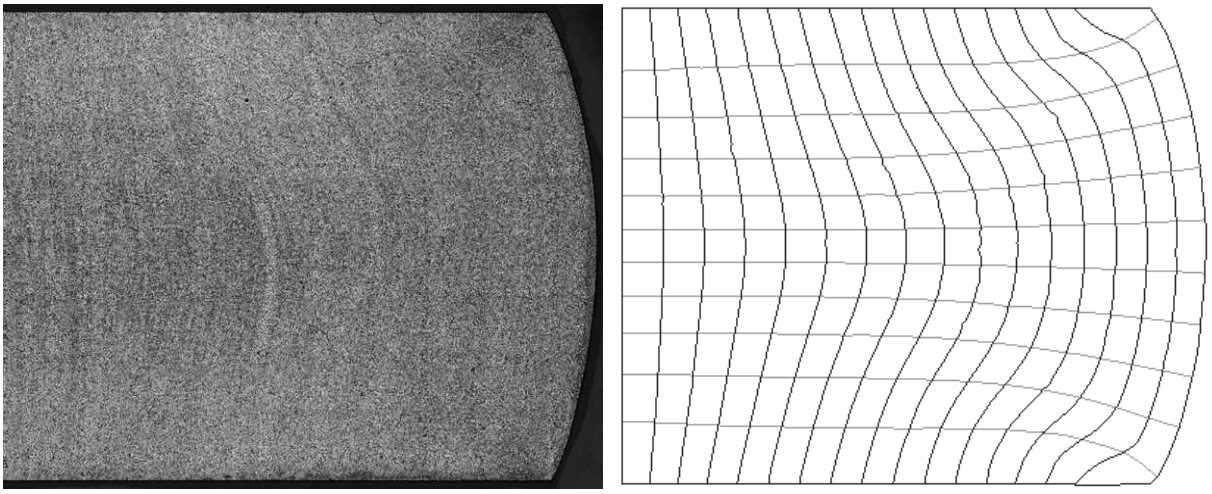
(a)据え込み工程

(b)後方押出工程

図 11　メタルフローの変化

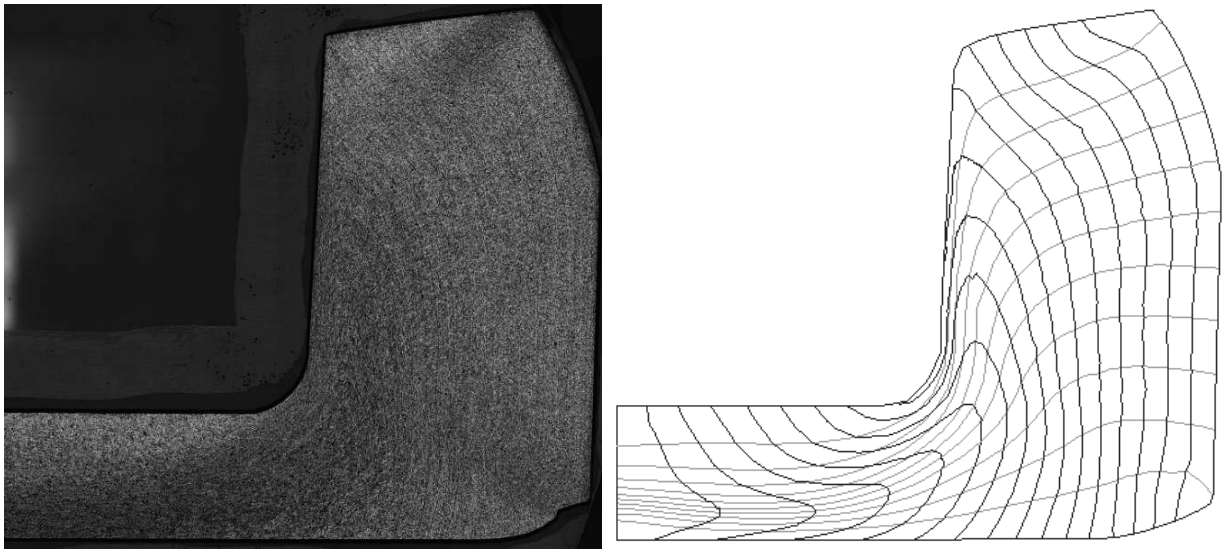
図 12 に解析結果と成形試験サンプルとの比較を示す。成形試験サンプルは，切断，研磨後，40℃の 10%水酸化ナトリウム水溶液で約 40 分エッチングを行った。据え込み工程におけるメタルフローの広がりや後方押出工程におけるパンチで圧下される材料の粗密などの特徴の一致から，材料の流れを良好に再現していることがわかる。また，補助線を活用することで，さらに流れの変化が確認しやすくなっている。

以上の検討により，開発したメタルフロー解析を精度のよいシミュレーション結果に適用することで，良好なメタルフローの再現ができることを確認できた。



実成形形状　　解析結果

(a)据え込み工程



実成形形状　　解析結果

(b)後方押出工程

図 12　解析結果と成形試験サンプルとの比較

4. SUJ2 の熱間鍛造への適用

4.1 成形シミュレーション

次に，実際の製品の工程の一部を対象に，成形シミュレーションおよびメタルフロー解析の適用を試みた。素材は軸受鋼 SUJ2，形状は 3 章の成形試験と相似形で，直径φ64.8mm とおよそ 2.5 倍のサイズである。成形に用いた素材と成形後の形状をそれぞれ図 13 に示す。

本章で扱うサンプルは，成形温度が 1180℃と高く，また成形のひずみ速度は 6/sec と非常に速い。成形温度が高い場合，温度，成形速度が材料特性に与える影響は大きくなるが，このような条件では材料特性の取得が難しく，シミュレーションにあたってデータがない場合もある。

ここで，炭素鋼では，圧延での荷重の推定のため多くの研究が行われており，温度，成形速度，含有炭素量をもとに材料の変形抵抗を見積もる実験式が提案されている [3]。本研究では，実験式の一つである美坂の式による推定を検討した。ただし，美坂の式は適用できるひずみ速度，温度，ひずみの範囲が指定されており，本章で扱うサンプルの成形条件はこの範囲から外れている。また，SUJ2 は軸受鋼であり，推定した特性にずれが生じることが予測される。そこで，本研究では美坂の式により推定された材料特性をベースに，成形試験から得られた成形荷重と成形シミュレーションの成形荷重が一致するよう応力-ひずみ曲線のカーブフィッティングを行い，適切な材料特性の設定を検討した。また，摩擦については 3 章と同様に，ワークの変形形状からの推定を行った。

本研究で用いた SUJ2 の応力-ひずみ曲線を図 14 に，成形荷重の比較を表 2 にそれぞれ示す。

(a)素材　(b)据え込み　(c)後方押出

図 13 成形に用いた素材と成形後の形状

美坂の式を用いた結果では，成形荷重に大きなずれがみられる。一方，フィッティング後の結果はよく一致しており，推定された材料特性は妥当と考える。

形状の比較を表 3, 4 に示す。摩擦係数を 0.75 と設定することで，据え込み工程における胴部最大径，上下端面の径の一致および後方押出工程の形状を良好に再現できた。

以上のとおり，前節の成形試験を精度よくシミュレーションできることを示した。

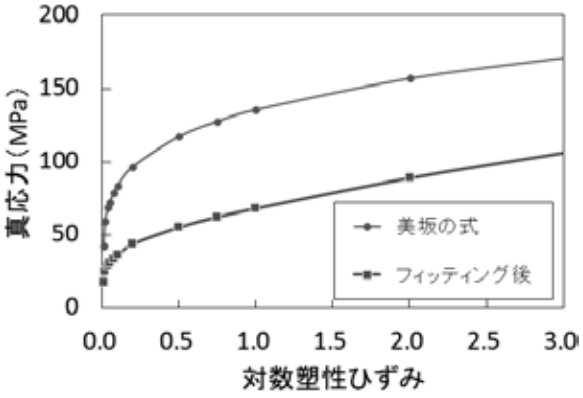


図 14　SUJ2 の応力-ひずみ曲線

表 2　成形荷重の比較(kN)

工程名	実成形	美坂の式	フィット後
据え込み	441	868	436
後方押出	833	1449	838

表 3　据え込み工程成形後の形状の比較

比較項目	実成形	計算結果
高さ(mm)	35.0	35.0
最大径(mm)	94.0	93.4
端面の径(mm)	81.1	82.1

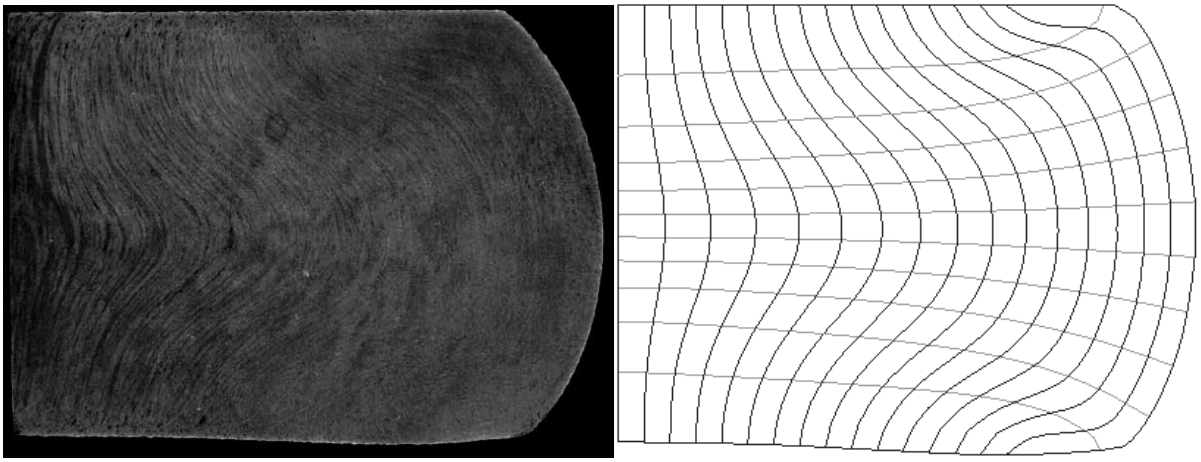
表 4　後方押出工程成形後の形状の比較

比較項目	実成形	計算結果
高さ(mm)	41.2	41.6
最大径(mm)	95.4	94.9

4.2　メタルフロー追跡解析

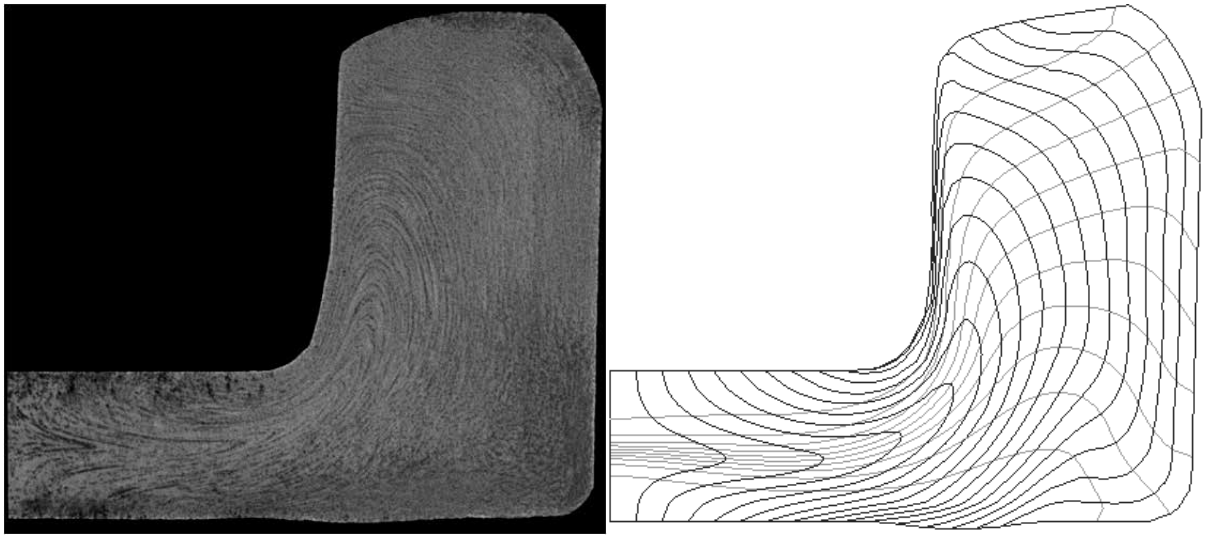
成形シミュレーションの結果をもとに，メタルフロー解析を行った。図 15 に成形試験サンプルとの比較を示す。成形試験サンプルについては，切断，研磨後，70℃の 50%塩酸で約 40 分エッチングを行った。

成形品と解析の結果から，材料の流れは非常によく一致していることがわかる。したがって，3 章の A1070 と同様に，精度のよい成形シミュレーションの結果を用いたメタルフロー解析により，材料の流れを非常によく再現できることがわかった。また，3 章との比較から，成形形状が相似形であっても材料特性および摩擦の違いにより材料の流れに差が生じるが，この差についても精度よく解析可能なことを示した。



実成形形状　　解析結果

(a)据え込み工程



実成形形状　　解析結果

図 15 解析結果と成形試験サンプルの比較

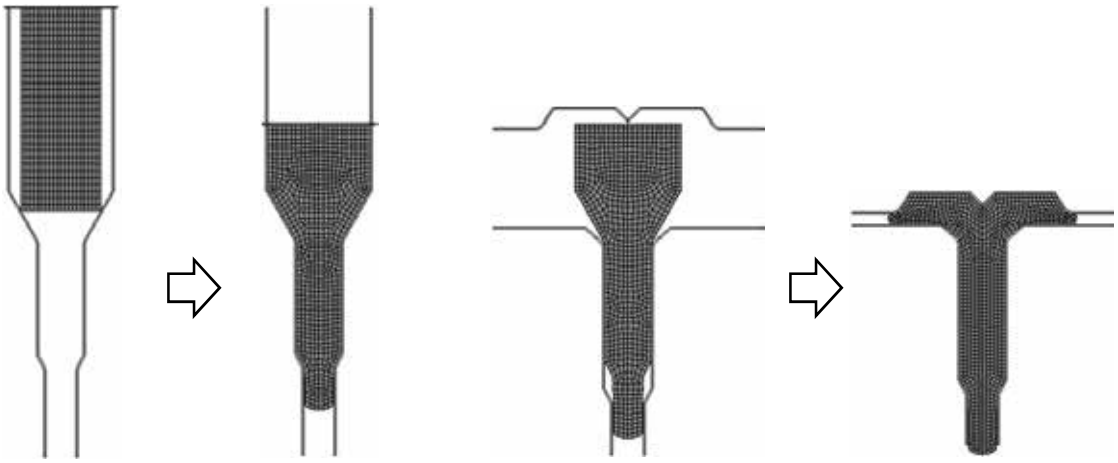
5. 応用例

3，4 章の検討から，材料特性および摩擦の適切な設定により，成形シミュレーションによる良好な成形試験の再現を確認した。また，その計算結果を用いたメタルフロー解析の再現精度が高いことも確認した。そこで，より実際の製品形状に近い成形に対して，メタルフロー解析の適用を行った。材料の設定については SUJ2 の特性を用い，摩擦係数は 0.05 とした。

まず，フランジ付シャフトを 2 工程で成形するシミュレーションを実施して，その結果にメタルフロー解析を行った[4]。図 16 に成形シミュレーション結果と得られたメタルフローを示す。

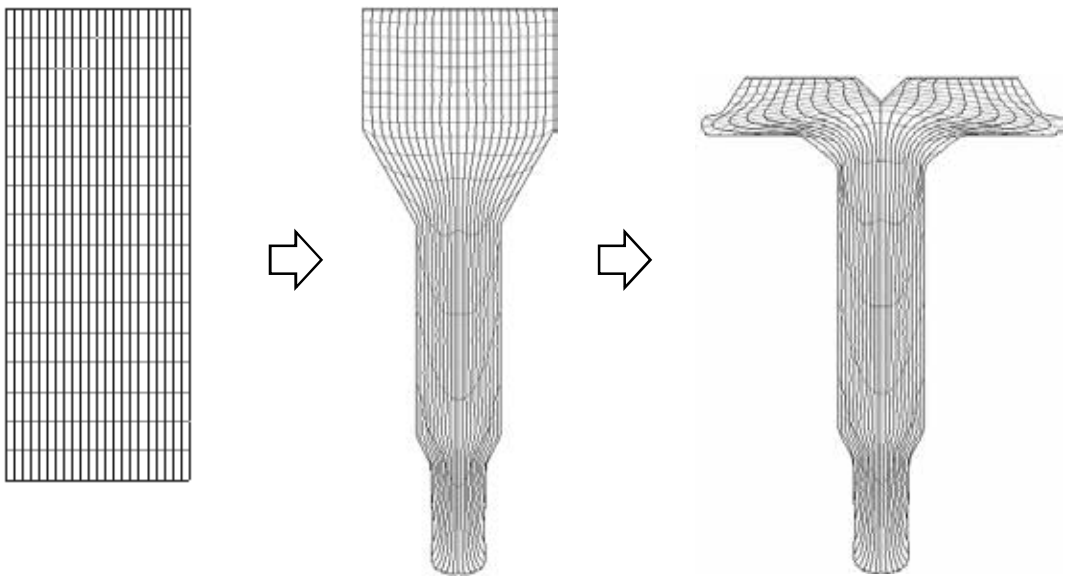
次に，単一の工程ではあるが変形が大きい閉塞鍛造に対しての適用を行った[5]。図 17 に胴部中央部にフランジを有する製品への適用例を示す。

いずれの結果も，メタルフロー解析により，材料の流れの粗密分布を良好に示すことができた。



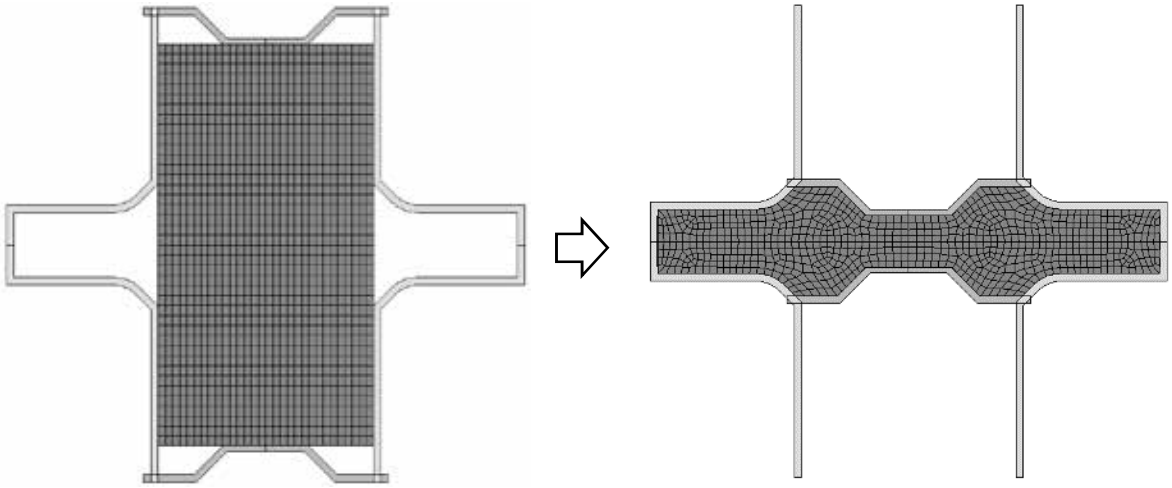
1 工程目　　2 工程目

(a) 成形シミュレーション

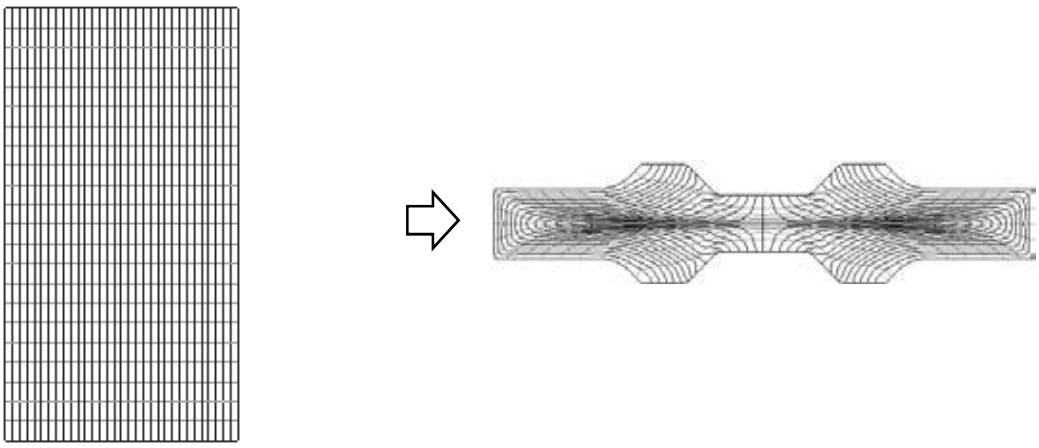


(b) メタルフロー解析

図 16 フランジ付シャフトへの適用



(a) 成形シミュレーション



(b) メタルフロー解析

図 17 胴部中央部にフランジを有する製品への適用

6. 結　　言

（1）A1070 および SUJ2 を素材とした成形に対して，適切な摩擦係数，材料特性を設定することで，形状および成形荷重を精度よくシミュレーションで再現できることを示した。

（2）リメッシュを伴う大変形のシミュレーション結果をもとに，メタルフローを解析可能なプログラムを開発した。成形後の評価点がどこからきた材料であるかといった，実製品ではできない評価が可能である。

（3）精度の良い成形シミュレーション結果にメタルフロー解析を実施することで，材料の流れも良好に再現できた。

参考文献

1）三好俊郎，"有限要素法改訂版"，培風館，No.298，1998，pp.179-181.

2）名古屋市工業研究所，"月刊名工研 No.762"，2015, p.3.

3）日本塑性加工学会編，"わかりやすい鍛造加工"，日刊工業新聞社，2005，pp.16-17.

4）日本塑性加工学会編，"わかりやすい鍛造加工"，日刊工業新聞社，2005，pp.49-50.

5）日本塑性加工学会編，"わかりやすい鍛造加工"，日刊工業新聞社，2005，p.113.