

# CAEによる各種基本鍛造形状における被加工材の変形特性

吉田 忠継 \*1・尾崎 勝彦 \*2・中崎 盛彦 \*2・矢野 正和 \*2・濱野 利幸 \*2・笠原 義夫 \*3

Deformation Properties on Axially Symmetric Fundamental Die Forging

Tadatsugu Yoshida, Katsuhiko Osaki, Morihiko Nakasaki, Masakazu Yano, Toshiyuki Hamano and Yoshio Kasahara

Synopsis: Forging technologies are systematically classified by die shapes. In the present study, from these die shapes, more than 10 kinds of axially symmetric shapes were selected as “fundamental forging die shapes” and metal flow in each work was investigated by CAE analyses with plasticine (oil clay) experiments.

The findings are as follows :

- 1) In each fundamental die forging, almost identical patterns of metal flow were obtained from both analyses and experiments by adjusting boundary conditions of analyses rationally.
- 2) Although adoption of fine elements and small time increment improves theoretically accuracy of the analysis, it sometimes requires more time due to remeshing, and causes aggravation of convergence. Therefore, the optimum analysis conditions exist for each die shape.
- 3) By storing these optimum conditions and results of each die forging as data base, it is possible to solve some problems quickly without skill and to apply them to actual forging processes.
- 4) The process mentioned above was systematized as CAE analysis system called “Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System” . It has been applied to analyze metal flow of die forgings such as stud bolts, ring forgings for bearing races, blanks for automobile gear and special forging dies for tool life evaluation.

Key words: die forging; axially symmetric; fundamental forging die shapes; process simulation; CAE; FEM; rigid plastic finite element method; plasticine; plasticine simulation; metal flow.

## 1. 緒言

当社は特殊鋼専門メーカーとして長年特殊鋼の材料開発に取り組んでおり、近年の国際競争の激化や加工技術の高度化など、環境変化の激しい顧客の立場に密着した技術開発体制を整備するために、今後の発展が期待される鍛造CAE技術開発を塑性加工プロセス研究の一環として本格的に開始した<sup>1)</sup>。

鍛造工程のCAE解析技術は、近年の計算機技術および解析ソフトの目覚ましい進歩と普及に支えられ、実用段階に入ったと考えられる。例えばICTP<sup>2)</sup>では全報告件数の約6割がCAE解析に関係しており、今後もこの傾向が続くものと考えられる。しかし、現状ではCAEの利用は大学、研究機関や比較的規模の大きな企業に集中しており、鍛造業界の中核を占める小規模企業では、現場の受入体制未整備など

のため、既存のCAE技術を導入しても前評判通りの成果が得られないことをしばしば耳にする。これは、塑性加工のCAE解析では材料の変形抵抗特性や、材料と工具の接触判定などの非線型性のため、CAE解析に習熟していないと誤った結果を得る可能性が高いから<sup>3)</sup>である。今後塑性加工CAEが本格的な実用化段階を迎えるためには、使いやすいソフトの開発<sup>4)</sup>と並行して、鍛造技術とCAE技術の両面に習熟した人材の育成が課題であると考えられる。

そこで当社ではS. H. P. S. S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) と呼称するFig.1に示すCAE解析システムを開発中であり、ユーザープロセスから抽出した基本鍛造型に対して、CAE変形解析およびプラスチック(油粘土の一種)による模擬試験を実施して、両者でメタルフロー特性を合わせ込むなど結果を総合化することにより、経験の浅い者でも最適なCAE解析条件を容易に求められるシス

\*1 技術研究所プロセス研究室, 工博

\*2 技術研究所プロセス研究室

\*3 株式会社OSテック (〒704岡山市九幡557-5)

テムの構築を図った。また、本システムはCAE解析の柔軟性を活かして、製品形状の一部変更や潤滑条件などの変更を容易に行えるとともに、実験では得ることが困難な被加工材中の応力およびひずみ分布を求め、実機プロセスの改善に適用できる。更に、解析条件および解析結果をデータベースとして蓄積することにより、基本鍛造形状に似た形状の場合は解析を行わなくても塑性加工特性の概略を把握でき、実際に解析する際にも適当な解析条件を容易に知ることができる。以下に本システムを用いて得られた代表的な基本鍛造型の解析結果に関する知見を紹介する。

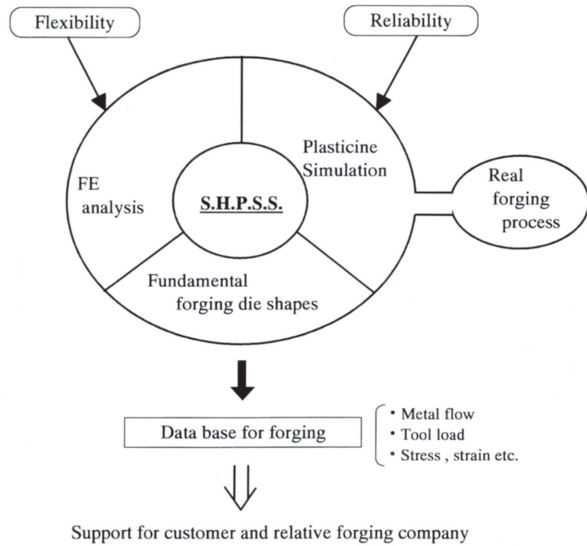


Fig.1. Symmetric die forging CAE analysis system.

## 2. 基本鍛造形状の抽出

鍛造方式は使用する型の形状により体系的に整理されており<sup>5, 6)</sup>、現場のプロセスも概ねこれにより特徴付けられる。そこでTable 1に示すように、これらの型の中から当社の素材のユーザーに関連の深い軸対称形状の基本鍛造形状として十数種類を抽出した。巻末付録のFig.A1およびFig.A2に代表的な結果を示す。

## 3. 変形解析方法

### 3・1 剛塑性有限要素法

解析には、Fig.1に示す当社で開発中の鍛造CAE解析システムS. H. P. S. S.を用いた。システムの中心部であるCAEには、Fig.2に示す軸対称剛塑性有限要素プログラムRIPLS-FORGE<sup>7)</sup>を用いた。このプログラムの特徴は、①コンピュータとの対話方式により被加工材の材質、形状、要素分割や工具および境界条件などの設定を行うプリプロセッサが付属しており、効率の良い入力ができること、②ソルバーに圧縮性を考慮した剛塑性有限要素定式および自動再要素分割の採用で所要解析時間が比較的短く、また大変形の問題でも最後まで自動的に解析ができること、③更に付属のポストプロセッサにより変形状態、メタルフロー、ひずみ分布、応力分布などを対話方式で視覚的に表示できるため結果の分析が容易に行えること、などである。

Table 1. Axially symmetric fundamental die forgings.

Name	Figure	Application	Name	Figure	Application
Heading		Bolt forging	Forward tube extrusion		
Indentation		Blank for large bearing	Backward tube extrusion		Automobile part
Forward bar extrusion			Forward and backward tube extrusion		Automobile part
Backward bar extrusion			Forward bar and backward tube extrusion (long type)		Automobile gear blank
Forward and backward bar extrusion			Forward bar and backward tube extrusion (short type)		Ring forging for bearing race

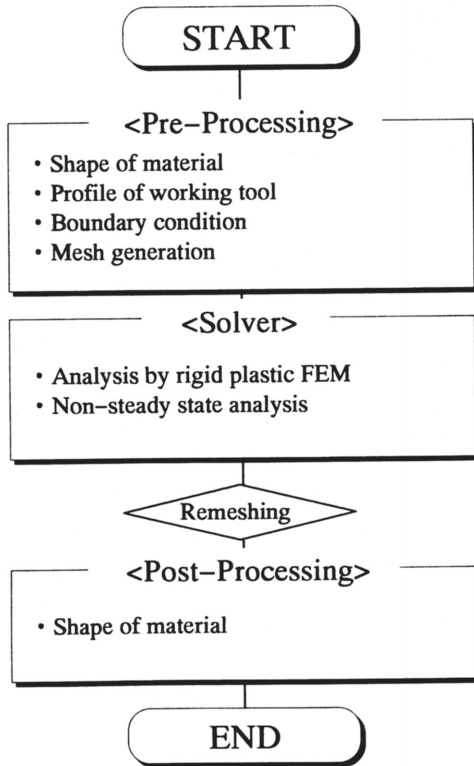


Fig.2. Flow chart of analysis (manual remeshing) .

### 3・2 プラスティシンシミュレーション

プラスティシンは炭酸カルシウムとワセリンを主成分とする英国製の油粘土で、古くから鋼の熱間加工の模擬材料として用いられてきた実績がある。特に、工具に石膏材料を、潤滑剤として炭酸カルシウム粉末を用いると、変形特性を良く再現できるといわれている<sup>8)</sup>。Fig.3に色の異なるプラスティシンを積層してメタルフローを顕在化できるように工夫した場合の試験方法の流れ図を示す。本報告では縦縞と横縞の材料をそれぞれ作成して、CAE解析のメタルフローと比較した。

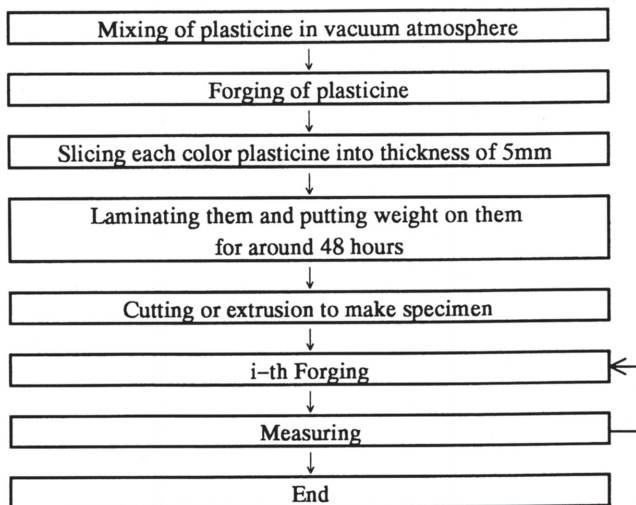


Fig.3. Process simulation of plasticine experiment.

### 3・3 各種基本鍛造形状における解析条件

#### 3・3・1 スタッドボルト

次世代の高速公共交通機関として注目されているリニア新幹線用の高強度非磁性スタッドボルトの鍛造変形解析を行った。Fig.4-1にボルトの解析モデルを、Fig.4-2にボルトのなかで変形の大きな部分だけに着目した簡易モデルを示す。両モデルとも対称性を仮定して解析領域を半分に限るものとし、CAE解析条件およびプラスティシン試験条件をTable 2-1およびTable 2-2に示す。但し、簡易モデルによる円柱の据込み試験では、一方の工具と材料間を固着摩擦条件とした。

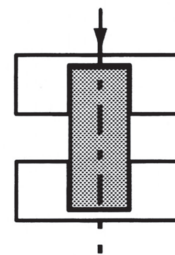


Fig.4-1. Analysis model.

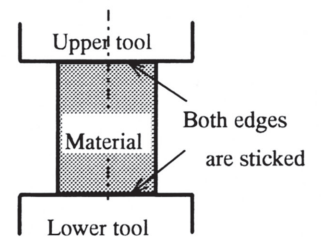


Fig.4-2. Simplified analysis model.

Table 2-1. Calculation conditions (stud bolt) .

Initial number of element	368
Element type	4-node isoparametric square element
Flow stress /MPa	$\sigma = 1.0 \dot{\epsilon}^{0.1}$ (hot) $\sigma = 1545 \dot{\epsilon}^{0.4587}$ (cold)
Coefficient dependence on pressure	1/g = 500
Friction coefficient	0.2 (Coulomb friction)
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	800
Steps of calculation	60

Table 2-2. Conditions of plasticine experiment (stud bolt) .

Model material	Plasticine (oil clay)
Dimensions of model	φ 50mm × L75mm
Tool material	JIS S45C
Lubricant	1) None 2) CaCO <sub>3</sub> powder 3) Vaseline
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	0.2 (Average strain rate : 0.029s <sup>-1</sup> )
Testing temperature /°C	20 (Specimen and room)

3・3・2 各種ベアリング用親子鍛造

ベアリングレース用素形材をバー材から鍛造により作製する際に、製品歩留りの向上の観点から親子鍛造を行うことがある。レースの寸法・形状により型設計が異なり、これに伴ってメタルフロー特性もかなり変化する。そこで、Fig.5のtype (A), (B), (C) に示すように三種類のタイプの鍛造工程に対してTable 3-1および3-2の条件で解析および試験を実施した。但し、(A), (B) はバー素材から熱間鍛造で素形材を作製する工程であり、(C) は熱間鍛造で作製したリング状素材から冷間鍛造で素形材を製造する工程である。

3・3・3 自動車用サンギアの素形材

Fig.6に自動車用サンギア素形材の多段加工の概念図を示す。第2および第3工程で前方押し、最終の第4工程で前後方押しを行うためにメタルフローが複雑になる。メタルフローを最適化するための基礎知識を得るために、Table 4-1, 4-2に示すように潤滑条件を変化させて解析および実験を行った。

Table 3-1. Calculation conditions (ring forging for bearing race) .

	(A)	(B)	(C)
Steps of calculation	80	100	50
Initial number of element	391	374	368
Element type	4-node isoparametric square element		
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	800	320	800
Flow stress /MPa	$\sigma = 91.89 \dot{\epsilon}^{0.1}$ (Hot steel)	$\sigma = 1133 \bar{\epsilon}^{0.2096}$ (Cold steel)	
Friction coefficient (Coulomb friction)	0.2	0.20, sticking	0.075, 0.30
Coefficient dependence on pressure	1/g = 500		

Table 3-2. Conditions of plasticine experiment (forging for bearing race, type (A), (B)) .

	type (A)	type (B)
Model material	Plasticine (oil clay)	
Dimensions of model	$\phi 52\text{mm} \times L65\text{mm}$	$\phi 55\text{mm} \times L90\text{mm}$
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	0.2 (Average strain rate : 0.029s <sup>-1</sup> )	
Tool material	S45C	
Lubricant	CaCO <sub>3</sub> powder, Vaseline	
Testing temperature /°C	20 (Specimen and room)	

3・3・4 型寿命評価用型

熱間の閉塞鍛造では最終充填時に型に高い圧力が発生するために型設計如何で型の損耗に大差を生じることがある。著者らは前報など<sup>1, 9)</sup>で型の損耗箇所に於ける圧力と滑り速度を低減させることが型寿命向上に重要であることを指摘した。そこで、型内のメタルフローを変化させて型への負荷を制御するための型設計指針を得る目的で、Fig.7に示す突起付きの下型とタイプa, bおよびcの3種類の上型を組み合わせTable 5-1,5-2の条件でCAE解析および実験を行い、メタルフローと型への負荷の関係を調査した。

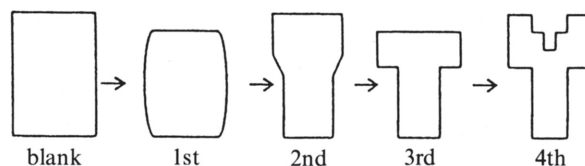


Fig.6. Forging process of sun gear blank.

Table 4-1. Calculation conditions (sun gear) .

Process	1st	2nd	3rd	4th
Steps of calculation	40	60	60	80
Initial number of element	370	370	444	452
Element type	4-node isoparametric square element			
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	800			
Flow stress /MPa	$\sigma = 91.89 \dot{\epsilon}^{0.1}$ (Hot steel)			
Friction coefficient (Coulomb friction)	0.25	0.25	0.25	0.25
Coefficient dependence on pressure	1/g = 500			

Table 4-2. Conditions of plasticine experiment (sun gear) .

Model material	Plasticine (oil clay)
Dimensions of model	$\phi 50\text{mm} \times L95\text{mm}$
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	0.2 (Average strain rate : 0.029s <sup>-1</sup> )
Tool material	Aluminium
Lubricant	CaCO <sub>3</sub> powder
Testing temperature /°C	20 (Specimen and room)

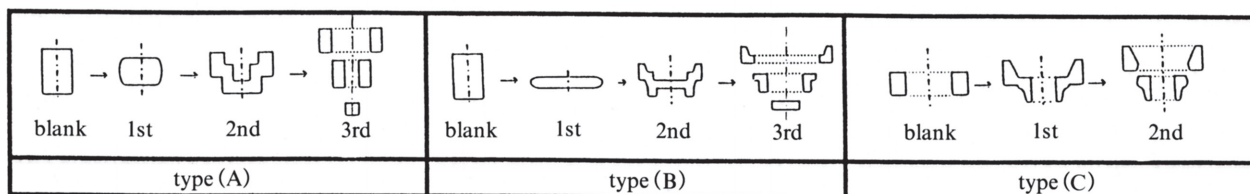


Fig.5. Ring forging processes for bearing race.

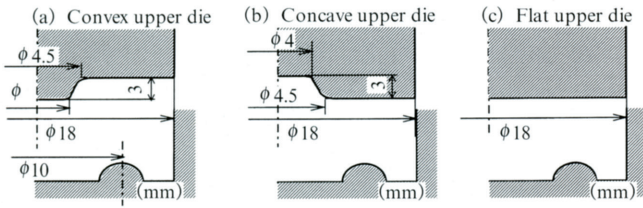


Fig.7. Die sets for tool life evaluation.

Table 5-1. Calculation conditions .

type	a	b	c
Element partition			
Filling up stroke /mm	5.37	2.83	2.56
Step of calculation	47	39	39
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	800		
Element type	4-node isoparametric square element		
Flow stress /MPa	$\sigma = 1.0 \dot{\epsilon}^{0.1}$		
Friction coefficient	0.2 (Coulomb friction)		
Coefficient dependence on pressure	1/g = 500		

Table 5-2. Conditions of plasticine experiment.

Dimensions of model	$\phi 50\text{mm} \times L10\text{mm}$
Stroke velocity /mm · s <sup>-1</sup>	0.2
Tool materials	Plaster
Lubricant	CaCO <sub>3</sub> powder
Testing temperature /°C	20 (Specimen and room)

#### 4. 実験結果および考察

##### 4・1 締結治具スタッドボルト

スタッドボルト加工の潤滑条件を3種類変化させた場合のメタルフローをFig.8に示す。各図の左半分がプラスチック実験結果、右半分がCAE解析結果を示している。また、図中上段はボルトのうち変形が集中する部分を取り出して解析した簡易モデルである。何れの条件でもプラスチック試験とCAE解析においてメタルフローが良く一致していることから、各潤滑状態を精度良く再現できる解析条件が判明した。

また、潤滑剤にワセリンを用いた場合は上面近傍の流線が面に対して直交するのでスタッドボルトの上下対称面の条件を満足する。他の潤滑条件では流線が面に直交しないため対称面にならず、むしろ頭付ボルトなどのヘディング加工に近いことが判る。即ち、摩擦係数0のモデルによりスタッドボルトの解析が可能である。

さらに、下段のモデルの実質変形部と上段の簡易モデル

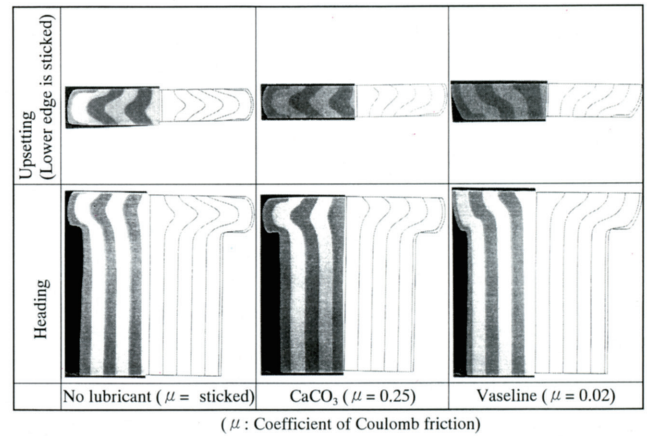


Fig.8. Comparison of plasticine experiment (left side) and finite element analysis (right side) on metal flow (heading) .

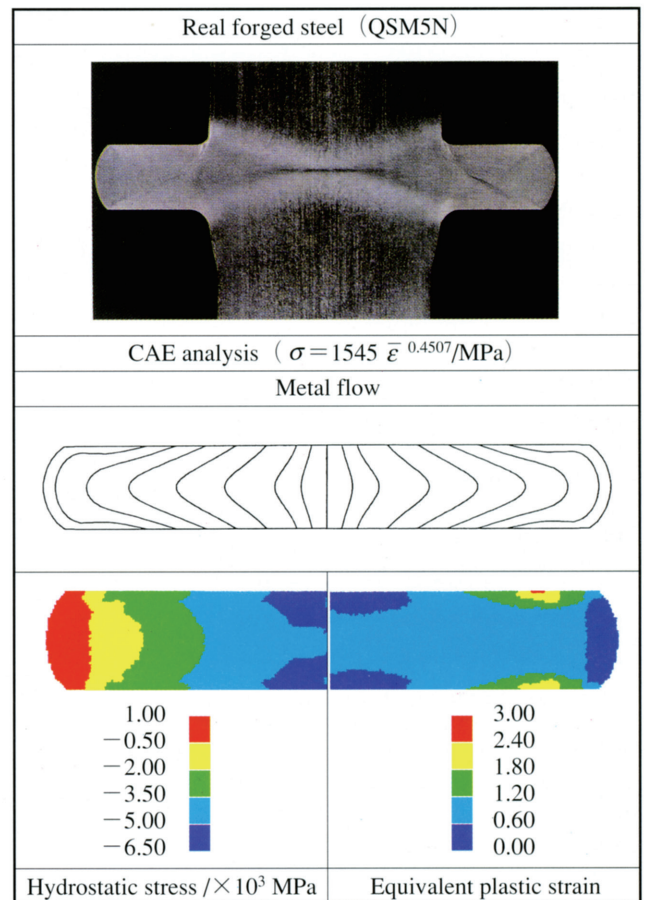


Fig.9. Comparison of stud bolt forging and upsetting analysis (cold working) .

を比較すると両者のメタルフローが何れの潤滑条件でも良く一致する。即ち、スタッドボルトの加工割れ限界の検討などでは摩擦係数0の条件で簡易モデルを適用できる。

以上は加工硬化をしない熱間鋼モデルによる検討であった。次に冷間鋼モデルにより加工硬化を生じる場合の検討を行った。Fig.9は実機の冷間鍛造品の断面マクロ写真とCAE簡易解析モデルのメタルフローを比較したもので、両者が良く一致していることが判る。このことから冷間加工

の場合でも、変形抵抗に加工硬化特性を考慮することにより精度の高い予測が可能になることが判明した。

Fig.9の下図は左半分が静水圧応力分布、右半分が相当ひずみ分布を示しており、材料の側面部に引張り応力が作用するので、この部分に割れが発生しやすいことが判る。

#### 4・2 ベアリング用親子鍛造

Fig.5のタイプAおよびBはほぼ同じ形状で、前者は肉厚が厚く、後者は薄いという差異がある。Fig.10に各タイプのメタルフローを示す。左半分はプラスティシン実験、右半分はCAE解析の結果であり、実験と解析でメタルフローが良く一致していることが判る。タイプAとBを比較すると、両者の流線の間隔は異なるが、メタルフローのパターンは良く一致している。これは、素材が中実バー材の場合、原理的に材料が圧下とともに中心から外側へ流れるので、型の基本形状がほぼ同じであれば、メタルフローもほぼ同じになると理解できる。即ち、同じ基本鍛造型に属するものであれば、寸法は多少異なってもメタルフローはほぼ同じであることから、鍛造技術において基本鍛造型の果たす役割の重要性が認識できる。

Fig.5のタイプCは素材がリングであり基本的に内側から

外側へ向かうメタルフローは少ない。そのため、Fig.10に示すようにせん断変形という本質的な変形モードが顕著に現われている。

Fig.11にFig.10と対応するひずみの分布を示す。特にタイプCの場合せん断変形が顕著であるから、せん断面近傍で大きなひずみ分布が見られる。

Fig.12は素材表面の任意の点が鍛造の変形により製品のどの部分に写像されるかを調べたものである。このような方法により、表面欠陥や脱炭層の発生機構などを分析する手掛かりが得られ、製品の品質を保証するための有力な武器になる可能性がある。

#### 4・3 自動車用サンギアの素形材

Fig.13,14および15は各種条件におけるメタルフローを示す図であり、各図の左半分はプラスティシン実験、右半分はCAE解析の結果である。Fig.13はFig.6に示す第1～3の各工程のプラスティシン実験とCAE解析結果で、両者のメタルフローが良く一致していることが判る。

Fig.14はFig.6の第4工程で工具と被加工材の間の潤滑条件を変化させた場合の結果であり、(A)に示すように潤滑剤に炭酸カルシウムを用いた場合は、図中矢印で示す穿孔部

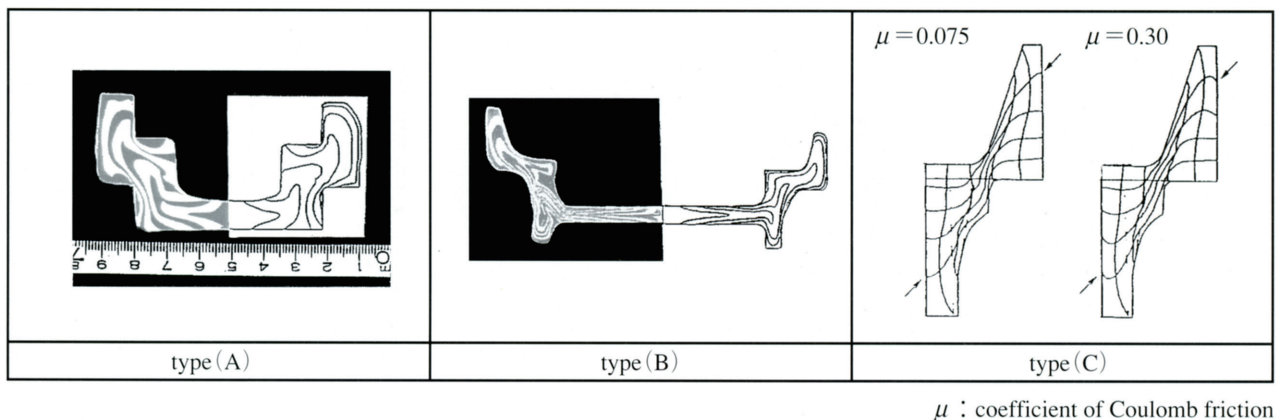


Fig.10. Comparison of plasticine experiment (left side), finite element analysis (right side) and effect of friction coefficient on metal flow (type (C)) on forging for bearing race.

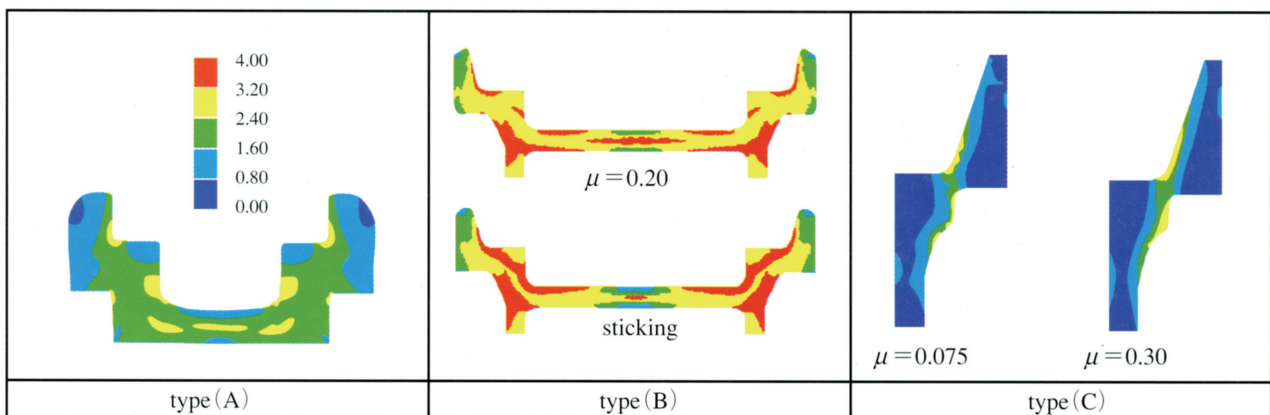


Fig.11. Distribution of equivalent plastic strain on forging for bearing race shown in Fig. 10 (CAE analysis).

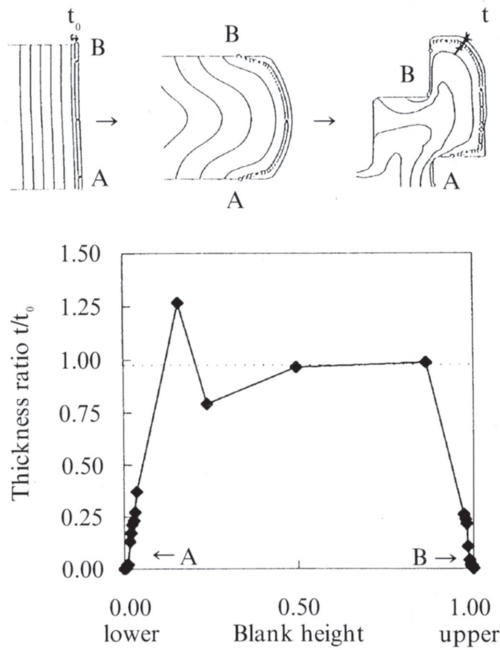


Fig. 12. Change in decarburized thickness by forging shown in Fig. 10, type (A).

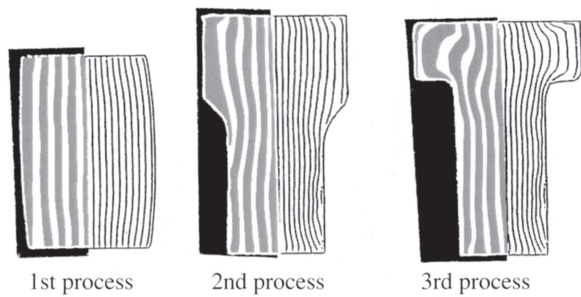


Fig. 13. Comparison of plasticine experiment (left side) and finite element analysis (right side) on metal flow. (sun gear 1st-3rd process shown in Fig. 6, lubricant:CaCO<sub>3</sub>, Coulomb friction:  $\mu=0.20$ )

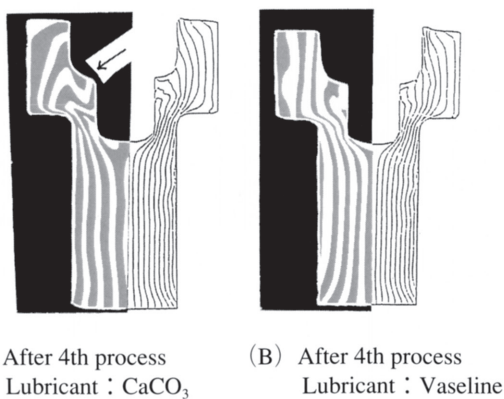


Fig. 14. Comparison of plasticine experiment (left side) and finite element analysis (right side) on metal flow. (sun gear 4th process shown in Fig. 6)

でプラスチックのメタルフローが複雑になり、流線が局部的に褶曲することが判る。一方、(B)に示すように潤滑剤にワセリンを用いた場合は流線の褶曲が軽減されており、望ましい状態であることが判る。CAE解析では工具と被加工材の間の摩擦係数としてリング圧下試験で求めた結果を用いており、(A)はクーロン摩擦係数0.25、(B)は0.02である。ワセリンの場合はメタルフローが良く一致したが、炭酸カルシウムの場合は解析で得られた流線の曲りが実験に比べて小さいことが分かる。

Fig. 15は固着摩擦条件でCAE解析を行った結果であり、実験と解析でメタルフローが良く一致している。このことから潤滑材に炭酸カルシウムを用いた実験では、加工により被加工材の表面に新生面が発生して潤滑切れを生じるため、工具と被加工材が加工の途中で固着していると判断される。このような穿孔工程では固着防止のために潤滑材の供給方法に工夫が必要である。

Fig. 16は潤滑条件が異なる場合の相当ひずみ分布を調べた結果であり、固着摩擦(C)の場合 $\mu=0.02$ の場合に比べてひずみが大きくなることが判る。



Fig. 15. Comparison of plasticine experiment (left side) and finite element analysis (right side) on metal flow. (sun gear 4th process shown in Fig. 6, lubricant:CaCO<sub>3</sub>, friction:sticking)

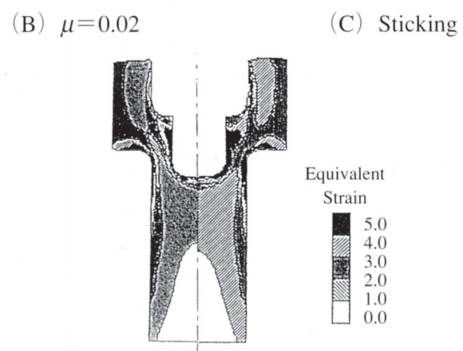


Fig. 16. Distribution of equivalent plastic strain of 4th process of sun gear shown in Fig. 6.

#### 4・4 型寿命評価用型

Fig.17はFig.7に示す3種類の型のメタルフロー変化を比較したもので、横方向に型のタイプ、縦方向にストローク率をとり、左側にCAE解析結果、右側にプラスチック実験結果を示す。両者が比較的良く一致していることが判る。

Fig.18はFig.17の型寿命評価用型タイプaおよびbの荷重・ストローク線図で、プロットは実験結果、線はCAE解析結果を示しており、両者は比較的良く一致している。また、型のタイプが異なることにより鍛造荷重がかなり変化することが分かる。

Fig.19はFig.7に示す3種類の型のメタルフローと各部の充填順位および充填時のストローク率を示す。素材は中実バー材であるから、タイプcに示すように上パンチが平坦である場合には、圧下とともに材料が内側から外側に流れる傾向にある。これに対して、タイプaは上パンチ中央の突起部のためにメタルフローが加速され、一方、タイプbは上パンチ中央の窪み部のためにこれが抑制されていることが判る。即ち、パンチの形状によりメタルフローを制御できることが判明した。

Fig.20はFig.7に示す3種類の型に対してCAE解析より得られた充填完了直前の型への負荷を示し、表面に垂直に印し

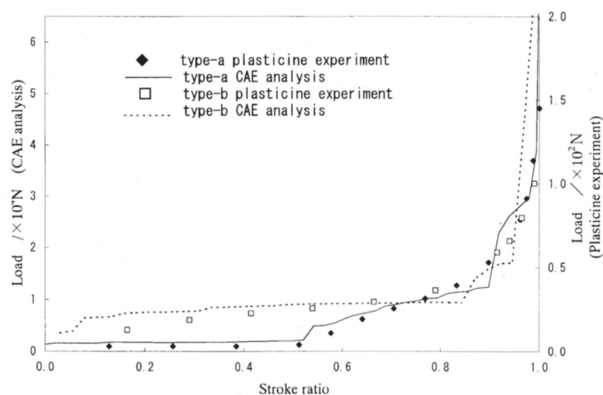


Fig.18. Comparison of plasticine experiment and finite element analysis on load - stroke ratio curves in forging shown in Fig.17.

たベクトルの長さでその絶対値を比較したものである。各図の左半分は相対すべり速度、右側は面圧を示す。図中に太い矢印で示す部分は型への負荷、即ち面圧と滑り速度の両者が大であることを意味しており、型のタイプが異なることによってその場所が変化することが分かる。このことからメタルフローパターンをコントロールすることにより、型への負荷を調節出来ることが分かる。これは近藤らの提案する分流法の概念<sup>10)</sup>で理解できる。

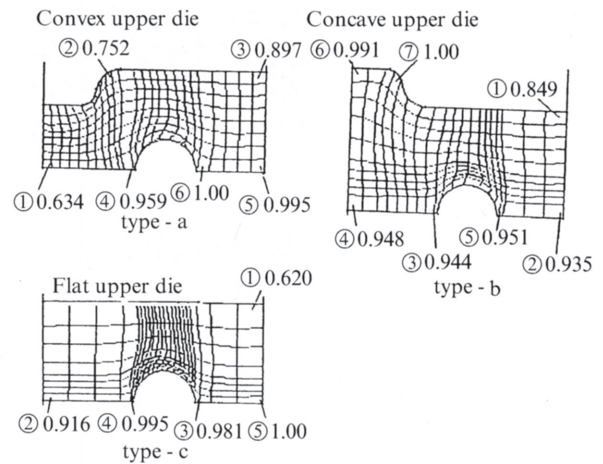


Fig.19. Filling up of each part of die set in forging shown in Fig.17.

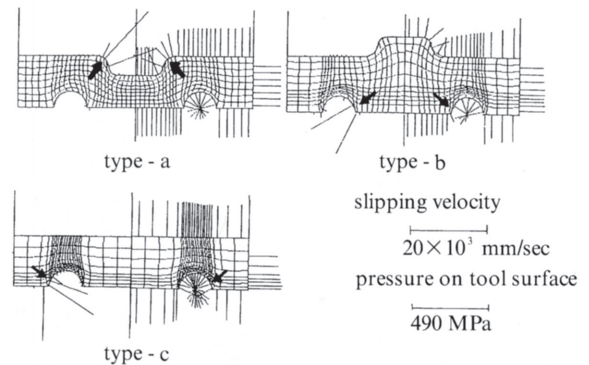


Fig.20. Material slipping (left side) and pressure (right side) on tool surface in forging shown in Fig.17.

type	type-a		type-b		type-c	
	CAE analysis	Plasticine experiments	CAE analysis	Plasticine experiments	CAE analysis	Plasticine experiments
Stroke ratio						
0.6						
0.8						
0.9						
1.0						

Fig.17. Comparison of plasticine experiment and finite element analysis on metal flow.



## 5. 結言

鍛造方式は用いる型の形状により体系的に分類されており、これらの中から軸対称形状のものを十数種類、基本鍛造形状として抽出し、それぞれCAE変形解析およびプラスチック（油粘土の一種）による模擬試験を実施して、メタルフロー特性を調べた。また、実験だけでは得ることが困難な被加工材中の応力やひずみ分布を調査して以下の知見を得た。

- (1) 各基本鍛造形状とも材料の変形抵抗特性および境界条件を合理的に考慮することにより、解析結果と実験結果でメタルフロー特性が比較的良く一致する。
- (2) 要素を細かくすることおよび時間増分を小さくすることで理論的には解析の精度が向上するが、再要素分割回数の増加などによる計算時間の増加および安定な収束性確保の観点から、各基本鍛造形状毎に実用上の最適な解析条件が存在する。
- (3) これらの最適解析条件および解析結果を各基本鍛造形状毎に蓄積（データベース化）することにより、解析のスキルフリー化と迅速な対応を可能にし、ほぼ実機に適用できるようになった。
- (4) 以上の知見をS. H. P. S. S.に組み込むことにより締結治具スタッドボルト、ベアリング用親子鍛造、自動車用サンギアの素形材、および型寿命評価用型などのメタルフロー解析に適用し、変形に及ぼす諸因子の影響を求め、製造条件の最適化等で成果が得られた。

## 謝 辞

本解析では、大阪大学小坂田研究室で開発された剛塑性有限要素プログラムを使用させて頂きました。また、一部の研究において当社で実習された、Brian C. Rulifson氏（現米COGNEX Vision for Industry社）、近藤 淳氏（当時東京理科大学）、南 太郎氏（当時九州大学）、および松永 強氏（当時上智大学）のご協力を得ました。記して謝意を表します。

## 文 献

- 1) 吉田忠継, 尾崎勝彦, 中崎盛彦, 矢野正和, 笠原義夫: 山陽特殊製鋼技報,3 (1996) ,25.
- 2) 5th International Conference on the Technology of Plasticity (1996) ,Ohio.
- 3) 北川浩, 田辺淳二, 浜田実, 富田佳宏: 日本機械学会論文集,48 (1982) No.426, 141.
- 4) 永岡宣人, 中村正俊, 西山三郎, 酒井良仁, 岩田健二, 本村貢: 第47回塑性加工連合講演会講演論文集, (1996) ,91.
- 5) Kurt Lange: 鋼の型鍛造, 鍛造技術研究所, (1983) .
- 6) 工藤英明, 大和久重雄, 竹内煌監修: 冷間鍛造ハンドブック, (株)アグネ, (1973) 12.
- 7) 森謙一郎, 島進, 小坂田宏造: 日本機械学会論文集,45 (1979) No.396, 965.
- 8) 五弓勇雄, 斎藤好弘: 鉄と鋼, 53 (1967) ,599.
- 9) 尾崎勝彦, 矢野正和, 中崎盛彦, 吉田忠継: 平成8年塑性加工学会春季講演論文集 (1996) ,190.
- 10) 近藤一義: 第169回塑性加工シンポジウム, (1996) ,8.

付録1 基本鍛造形状のメタルフロー特性

Table A1. Metal flow of axially symmetric fundamental die forging.

Name	Metal flow Plasticine Simulation	CAE analysis	Name	Metal flow Plasticine Simulation	CAE analysis
Heading			Forward tube extrusion		
Indentation			Backward tube extrusion		
Forward bar extrusion		CAE P.S.	Forward and backward tube extrusion		
Backward bar extrusion	Now on investigation		Forward bar and backward tube extrusion (long type)		CAE P.S.
Forward and backward bar extrusion	Now on investigation		Forward bar and backward tube extrusion (short type)		

付録2 基本鍛造形状の歪および応力特性

Table A2. Stress and strain distributions of axially symmetric fundamental die forging.

Name	Hydrostatic stress	Equivalent strain	Name	Hydrostatic stress	Equivalent strain
Heading	Hydrostatic stress /MPa  		Forward tube extrusion	Hydrostatic stress /MPa  	Equivalent strain  
Indentation	Hydrostatic stress /MPa  		Backward tube extrusion	Hydrostatic stress /MPa  	
Forward bar extrusion	Hydrostatic stress /MPa  	E.S. H.S. 	Forward and backward tube extrusion	Hydrostatic stress /MPa  	
Backward bar extrusion	Now on investigation		Forward bar and backward tube extrusion (long type)	Hydrostatic stress /MPa  	E.S. H.S. 
Forward and backward bar extrusion	Now on investigation		Forward bar and backward tube extrusion (short type)	Hydrostatic stress /MPa  	