



軸対称部品の型鍛造工程における数値解析とプラスチックシミュレーション技術の適用

尾崎勝彦*1・吉田忠継*2・矢野正和*1・笠井貴之*1・濱野利幸*1・中崎盛彦*1・瀬川冬樹*1

Application of Numerical Analysis and Plasticine Simulation to Die Forging of Axially Symmetrical Parts
Katsuhiko Osaki, Tadatsugu Yoshida, Masakazu Yano, Takayuki Kasai, Toshiyuki Hamano
Morihiro Nakasaki and Fuyuki Segawa

Synopsis: Authors have attained an original analyzing system for forging called S.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System). Hybrid means the combination of two methods—one is FE-analysis and the other is physical simulation. S.H.P.S.S. makes it possible for even beginners to obtain appropriate solution within a short time by comparing both FE-analysis and physical simulation. The effectiveness has been already confirmed by applying to fundamental die forging.

Higher precision and lower cost of forging products have been demanded for forging companies. In order to satisfy these demands, forging processes must be rationalized more intensely. As a result of actual applications of S.H.P.S.S., by taking such environment around forging practice into account, the problems and interests in concentrated strain, excess pressure and material slipping on the tools, mapping between blank and product, and so on, are pointed out. Through these results and discussion, possibility of application of S.H.P.S.S. for actual forging processes are confirmed. Some suggestion about improvement of forging processes are proposed. As a further application, possibility of application of this system for complex problems such as crack occurrence in forging processes is also discussed by the approximation of 3-dimensional problem to plane strain problem.

Key words: die forging ; process simulation ; CAE ; FEM ; rigid plastic finite element method ; plasticine (oil clay) ; plasticine simulation ; metal flow ; strain ; pressure on tool surface ; material slipping on tool surface ; mapping ; plane strain.

1. 緒言

特殊鋼専業メーカーとして当社は、長年にわたり種々の材料開発を行ってきた。当社から出荷された棒・管材はその殆どがユーザーで鍛造加工され、最終製品になっている。このたび、材料開発に加え、ユーザーの鍛造工程にまで立ち上った種々の、相談・提案が出来る体制を目指し、S.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) と称する独自の鍛造解析システムを構築した¹⁾。当システムの特徴は、CAE解析とプラスチック実験を併用することで、解析初心者、或いは鍛造初心者でも両者を比較することにより、妥当な解が容易に得られるので、短期間の内に鍛造に関する種々の知見を得ることができるところにある。著者らは、当システムをFig.1に示したようなユーザー工程から抽出した基本的な形状の鍛造解析に適用することで、その有効性を既に確認している^{2~8)}。一方、鍛造においては、

製品の高精度化、ニアネットシェイプ化の要請が益々強くなり、この方向は鍛造工具にとっても、また、被加工材にとってもより過酷な負荷を強いるものである^{8,9)}。しかし、コスト低減に対する要求も同様に強いものがあり、これらの要請に添えていくためには、試作型数の削減、工具負荷の低減による長寿命化、被加工材の加工限界の把握、複合鍛造¹⁰⁾などのより合理的なプロセスの設計が必要である。本報告では、当システムが、上述したような要請に添え得るものであるか否かを確認するために、実際の部品鍛造解析に適用し、歪み集中箇所の指摘、過大工具負荷位置の指摘、ブランク-製品間の表面部位の移動などの抽出を行い、一部については改善工程の提案を行った。また、3次元形状の部品の一断面を2次元近似した解析を行い、実際のメタルフローと比較することで、この様な近似解析方法の有効性も確認した。さらに、ワレ発生の解析など、実際の鍛造におけるより高度な問題への適用の可能性についても検討した。

*1 技術研究所プロセス研究グループ

*2 技術研究所プロセス研究グループ, 工博

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.1. Axially symmetrical fundamental die forgings.

2. 実験及び解析方法

2・1 Tボルト

水道用埋設管継ぎ手の締結治具であるTボルトは、従来鑄造にて製造されていたが、最近では生産性向上のため、鍛造に置き換えられつつある。製品使用時の耐食性向上のため、変形抵抗の高い高合金鋼を用いており、頭部仕上げ工程に於ける工具寿命が他の工程に比較して短いという問題があった。そこでS.H.P.S.S.を用いて、複数の工程の解析を行い、それぞれの工具負荷を比較した。当該部品鍛造は、3次元変形であるが、鍛造解析ツールとして、豊富な実績と高い信頼性のある、小坂田らの開発したRIPLS-FORGE¹¹⁾を適用するために、Fig.2に示すように、断面の一部を取り出して、平面ひずみ問題として解析を行った。解析条件をTable 1に、検討した工程をFig.3に示す。また、プラスチック実験は、Table 2に示す条件下で行い、一部については、平面ひずみ近似の妥当性を確認するために、3次元鍛造を行った。プラスチック平面ひずみ実験における工具にはアクリルを用い、3次元のそれはS45Cを用いた。

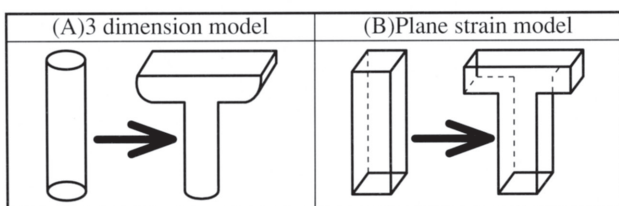


Fig.2. Plane strain model for analysis of T-bolt forging.

	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
Backward extrusion (5 step process)					*	
Backward extrusion (6 step process)						*
V-shaped punch						
Inverse V-shaped punch					*	

* : extrusion of axial part

Fig.3. Forging processes of T-bolt.

Table 1. Calculating conditions for T-bolt forging.

Initial number of element	444
Element type	4-node isoparametric square element
Flow stress/MPa	$\sigma=1400\epsilon^{0.38}$
Coefficient dependence on pressure	1/g=500
Friction coefficient	0.2(Coulomb friction)
Stroke velocity(mm/s)	800
Steps of calculation	50

Table 2. Experimental conditions for T-bolt forging.

Model material	Plasticine(oil clay)
Dimensions of specimen/mm	39H×48W×155L(for plane strain) $\phi 40 \times 160L$ (for 3-dimensional)
Stroke velocity(mm/s)	0.2
Tool materials	Plaster
Lubricant	CaCO ₃ powder
Testing temperature/°C	20(Specimen and room)

2・2 ミッションギア素形材

自動車のミッションギア素形材はFig.4に示す工程で鍛造される。当該鍛造においては、第二工程の型鍛造時の下型突起部が損傷しやすいという問題があり、その原因を解析によって調査検討した。解析条件をTable 3に示す。実際の下型は、非軸対称形状であるが、ここでは簡単のために、Fig.5に示すように、軸対称形状として解析を行った。このような僅かな非軸対称性を軸対称に近似しての解析は、深沢ら¹²⁾が時計部品鍛造に適用しており、実際のプロセス改善に供されている。



Fig.4. Forging processes of transmission gear blank.

Table 3. Calculating conditions for transmission gear blank forging.

Stage	1st	2nd
Element type	4-node isoparametric square element	
Flow stress/MPa	$\sigma = 100\dot{\epsilon}^{0.1}$ (hot)	
Coefficient dependence on pressure	1/g=500	
Friction coefficient	0.2(Coulomb friction)	
Stroke velocity(mm/s)	400	
Initial number of element	288	425
Steps of calculation	60	70

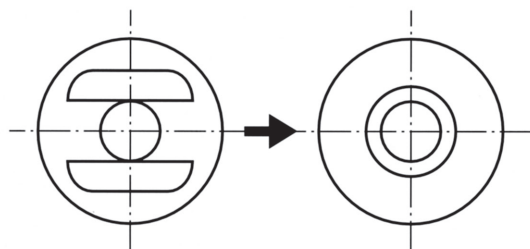


Fig.5. Axial symmetrization of transmission gear blank.

2・3 デファレンシャルギア素形材

デファレンシャルギア素形材は、素材棒をシャー切断後、Fig.6に示すような工程で鍛造される。シャー切断時には、種々の原因でせん断面にかさぶたや停留亀裂などの欠陥が生じる場合がある¹³⁾。切断工程および鍛造工程は一台の加工機、または、連続した工程で行われることが多く、切断で生じた欠陥のあるブランクを鍛造前に除去することは困難である。そのため鍛造品に欠陥が生じた場合、それが鍛造で生じたものか、或いは切断時に生じていたものか特定できず、欠陥対策を講じることは困難である。そこで当システムを用いて、当該工程の変形解析を行い、ブランク表面が鍛造品表面のどの位置に移動するかを調査した。解析条件をTable 4に、プラスチック実験条件をTable 5にそれぞれ示す。

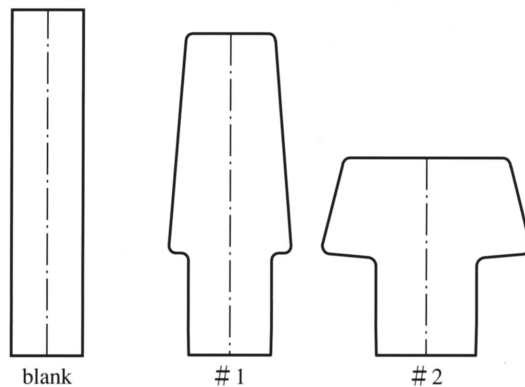


Fig.6. Forging process of differential gear blank.

Table 4. Calculating conditions for differential gear blank forging.

Process	1st	2nd
Steps of calculation	60	60
Initial number of elements	406	479
Element type	4-node isoparametric square element	
Stroke velocity(mm/s)	300	
Flow stress/MPa	$\sigma = 95.81\epsilon^{0.17}\epsilon^{0.07}$	
Friction coefficient	0.25 (Coulomb friction)	
Coefficient dependence on pressure	1/g=500	

Table 5. Experimental conditions for differential gear blank forging.

Model material	Plasticine
Tool material	JIS S45C
Lubricant	CaCO ₃ powder Vaseline
Stroke velocity(mm/s)	0.2
Testing temperature/°C	20(Specimen and room)

2・4 刻印

刻印は、鍛造品その他に会社名、ロゴマーク、型番などを転写する加工方法であり、製品表面に溝を転写するタイプと、突起を転写するタイプに大別される。後者はTボルトなど表面汚れの厳しい環境での識別性を向上する目的で使用される。その際、刻印の転写性を良くし、寸法精度の向上を図るため最終工程が閉塞性の高い高面圧の鍛造になり、工具寿命の低下が問題になることがある。鍛造品には最終工程と同時に施される場合が多い。そこで、突起形成タイプの転写性に及ぼす、刻印の種々の溝形状の影響を当システムを用いて検討した。Fig.7に検討した溝形状を、Table 6に解析条件を、Table 7にプラスチック実験条件を示す。解析は平面ひずみ問題として取り扱い、Fig.7中のタイプ1および3について行った。

Type	type1	type2	type3	type4
Channel angle of tool θ /deg	87	53	—	—
Channel width of tool W/mm	1.22	1.35	1.70	1.70
Channel depth of tool H/mm	0.64	1.37	0.84	1.27
Shape of tool				

Fig.7. Shapes of marking tools.

Table 6. Calculating conditions for marking.

Initial number of element	540
Element type	4-node isoparametric square element
Flow stress/MPa	$\sigma=1400\varepsilon^{0.38}$
Coefficient dependence on pressure	1/g=500
Friction coefficient	0.2(Coulomb friction)
Stroke velocity(mm/s)	800
Steps of calculation	50

Table 7. Experimental conditions for marking.

Model material	Plasticine
Dimensions of model	ϕ 50mm×L30mm
Tool metal	JIS S45C
Lubricant	CaCO ₃
Testing temperature	20℃(Specimen and room)

2・5 環状突起付き試片の据込み

前述のニアネットシェイプ化に伴う金型損傷の防止、およびそのための最適設計を図るには、数値解析により得られた加工中の製品の応力、ひずみの履歴から、製品の加工ワレを予測する技術が必要になる。即ち、材料特性試験から、被加工材の変形抵抗、加工限界(ワレ感受性)などの材料特性値を高精度に測定する必要がある。冷間加工においては、加工限界は安定な変形で精度の高い限界据込み試験¹⁴⁾にて測定されるのが一般的である。しかし、熱間加工に於いては、加工性が良いために通常の据込み試験では、ワレが発生せず、その感受性を検出することは難しい。そこでFig.8に示すような円周方向に引張応力が生じやすい環状突起付き試験片を作成し、これの据込み試験および解析を行った。Table 8に解析条件、Table 9に実験条件を示す。

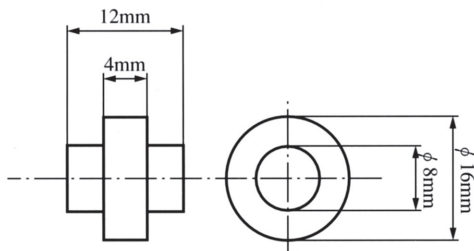


Fig.8. Cylindrical specimen with circular projection.

Table 8. Calculating conditions for upsetting of cylindrical specimen with circular projection.

Number of element	393
Stroke velocity(mm/s)	10
Average strain rate/s ⁻¹	1.43
Element type	4-node isoparametric square element
Friction coefficient	$\mu=0.2$ (Coulomb friction)
Flow stress/MPa	$\sigma=139.84$ (constant)
Reduction ratio/%	70
Steps of calculation	70

Table 9. Experimental conditions for upsetting of cylindrical specimen with circular projection.

Material of specimen	JIS SKD11
Testing temperature/℃	1125
Upsetting speed(mm/s)	10
Average strain rate/s ⁻¹	1.43
Reduction ratio/%	30~70

3. 結果と考察

3・1 Tボルト

Fig.9の最上段に実機のTボルトの断面マクロ写真、中2段に3次元型および平面ひずみ型で鍛造を行ったプラスチック試片の断面、最下段に平面ひずみ解析で得られた当該断面のメタルフローを示す。これらの比較から、平面ひずみのプラスチック実験および解析で得られたメタルフローは、実材、およびプラスチックの3次元鍛造実験で得られたそれと概略一致していることが分かる。このことから、3次元変形の一面の平面ひずみ近似、およびその解析は妥当なものであるといえる。Fig.10に検討したそれぞれの工程の、最終段階である軸部絞りの、一つ手前の閉塞鍛造工程における工具面圧と、工具上での被加工材の相対滑り速度の分布を示す。工具面圧と相対滑り速度が同時に高くなる部位の工具が選択的に損傷しやすいという文献³⁾から、T字の横棒の下部が損傷を受けやすいと推定される。また、検討した4種類の工程では、逆V型パンチ使用工程の工具負荷が最も高く、後方押し5段工程のそれが最も低いことが分かった。後方押しタイプでは、中心部に比較的広い窪みが生じ、閉塞鍛造時にこの窪み部分があるために、材料流動の自由度が増し、充填時の工具負荷が軽減されると考えられる。即ち、充填時に材料は、T字横棒部の上角部および当該窪み部分の両方に流れ込むことが出来るのに対し、逆Vタイプでは、T字横棒部の上角部への流入しか自由度がない。これら、材料流れの自由度と工具負荷の関係は、近藤らの提唱する分流法¹⁵⁾の概念で理解できる。

	#2	#3	#4
Forged steel			
3D plasticine experiment			
2D plasticine experiment			
2D CAE analysis			

Fig.9. Comparison of metal flow in T-bolt, plasticine experiments (3-dimensional, 2-dimensional), and FE analysis (plane strain deformation).

ローク比0.85のときの工具面圧と工具上を移動する被加工材料の滑り速度を示している。また、Fig.13には、それらの値のストローク比に対する推移を示している。これらの図から、第二工程の下型突起部は、初期段階および終期段階において、工具面圧と材料滑り速度が共に高くなり、当該部分が損傷を受けやすい事が示された。

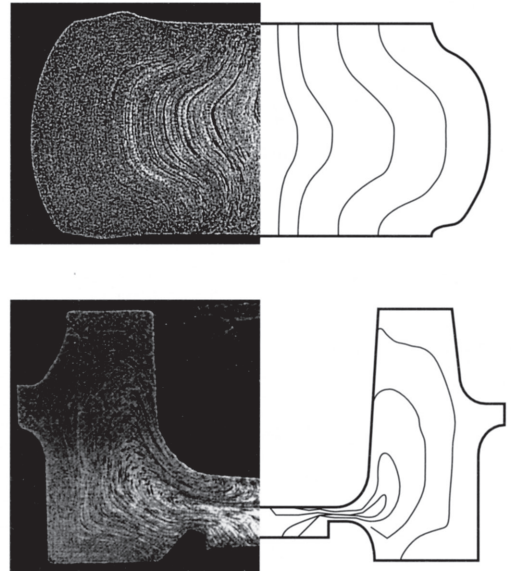


Fig.11. Comparison of metal flow in transmission gear blank and FE analyses (1st stage (upper side), 2nd stage (lower side)).

Good ← → Bad

	Backward extrusion (5step)	Backward extrusion (6step)	V-shaped punch	Inverse V-shaped punch	
Pressure on tool surface					MPa 9.8×10^4
Material slipping					mm/s 2.0×10^3

Fig.10. Pressure and slipping velocity on tool surface at final stage of each process.

3・2 ミッションギア用部品

Fig.11は、Fig.8同様ミッションギア用部品の第一工程、第二工程のメタルフローを示しており、図中左側は、実材料のマクロ組織、右側はCAE解析で得られたメタルフローを表している。解析に際しては、下型突起部の形状の軸対称化を行ったために、第二工程での下部形状は多少異なっているが、メタルフローは、解析と実材料でよく一致している。このことから、当解析結果が妥当なものであることが分かったので、これを基に第二工程における工具負荷の検討を行った。Fig.12に第二工程初期段階（充填時のストロークを1.0として、ストローク比0.06のとき）およびスト

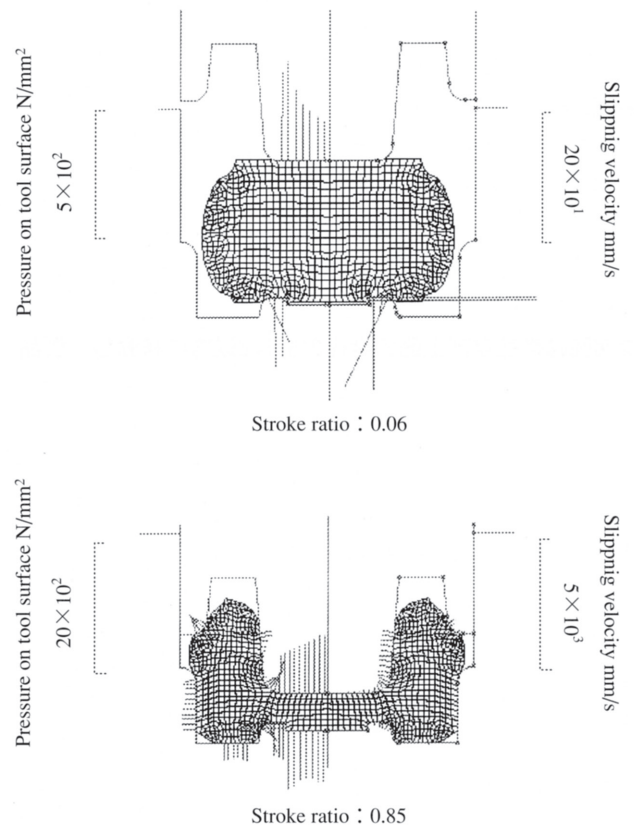


Fig.12. Pressure and slipping velocity on tool surface at 2nd stage.

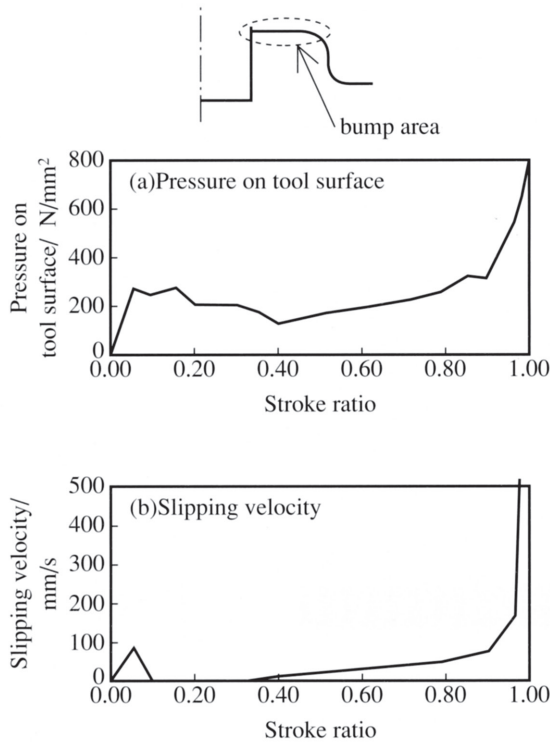


Fig.13. Effect of stroke ratio on pressure (upper side) ,slipping velocity (lower side) on tool surface.

3・3 デファレンシャルギア素形材

Fig.14は、第一工程および第二工程の、プラスチック実験およびCAE解析で得られたメタルフローを示しており、第二工程については、実材料のマクロ組織も同図中に図示した。これら、プラスチック実験、CAE解析、および実材料のメタルフローは非常によく一致しており、CAE解析結果が妥当であること、プラスチック実験および実材料の鍛造が非常に精度良く行われたことを示している。Fig.15にCAE解析結果をもとにして得られた、ブランクと製品間の表面の移動状態を示す。図に、製品各部とブランク位置との関係をブランク半径を基準にして、ブランク端面からの相対距離で示した。この図から、例えば、ブランク端面は製品傘部上面の半径の約1/2以内へ移動し、製品当該部にキズが発生した場合は、シャワー切断時の不具合を疑う必要があることが分かる。



Fig.14. Comparison of metal flow in differential gear blank, plasticine experiment, and FE analysis .

また、他の部位に発生したキズについても、ブランク位置との対応が分かるので、加工前のブランクのキズが起因である場合は対応がとりやすい。

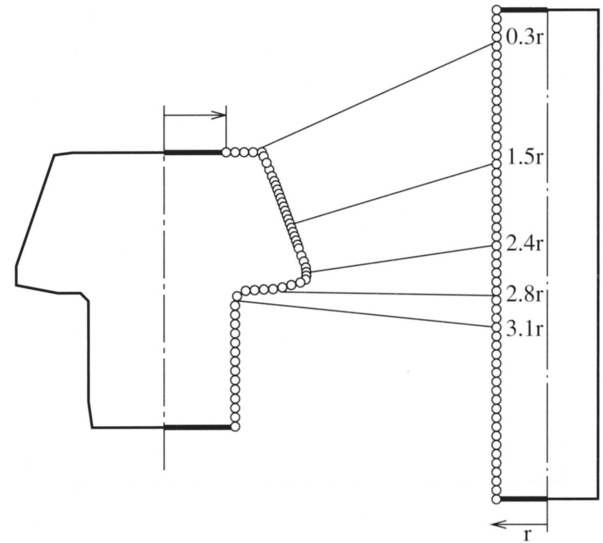


Fig.15. Mapping of surface from blank to product in differential gear blank forging.

3・4 刻印

Fig.16にV字溝およびU字溝工具による刻印の、プラスチック実験結果およびCAE解析結果を示す。変形状態が両者で良く一致しており、CAE解析が妥当であることが分かる。Fig.17に、圧下量を溝深さで除して相対化した圧下率と、溝内盛り上がり量を溝深さで除して相対化した転写率との関係のプラスチック実験結果を示す。また、Fig.18には、転写率と面圧との関係のCAE解析結果を示す。これらの図から、U字溝とV字溝では、前者の方が転写特性が良く、同一の転写率を得るための面圧は、後者の約半分程度で済むことが分かった。U字溝に於ける転写率に及ぼす溝深さの影響は、溝深さが浅い方が転写率が大きくなることが分かった。しかし、溝内充填ではなく、刻印の高さを稼ぎたい場合は、溝深さが深い方が良い。浅いU字溝において、溝内充填後の高圧下率のところで転写率が下がっているの

	Plasticine experiment	CAE analysis
Marking ratio =27%		
Marking ratio =65%		

$$\text{marking ratio} = (\text{marking height}) / (\text{channel depth of tool})$$

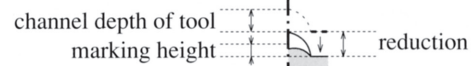


Fig.16. Comparison of plasticine experiment and FE analysis on deformation by marking.

は、軸方向に材料が逃げたためである。また、V字溝に於いては、頂角の転写率に及ぼす影響は少ないことが分かった。

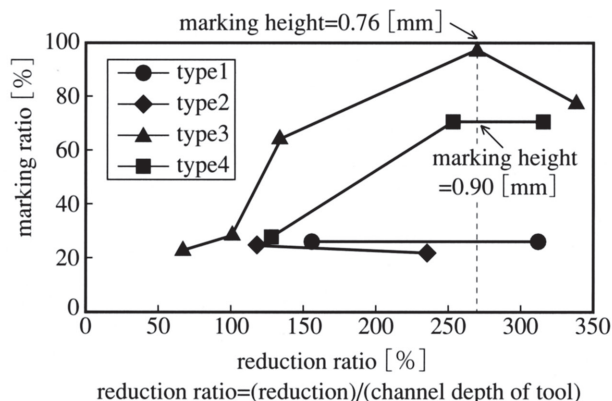


Fig.17. Influence of tool shape on marking ratio.

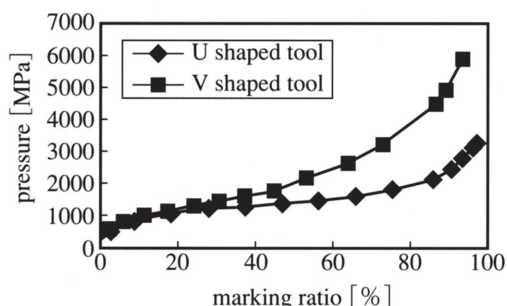


Fig.18. Influence of tool shape on marking pressure.

3・5 環状突起付き試験片の据込み

環状突起付き試験片を高さの30%まで据え込んだときの外観をFig.19に示す。突起部側面にはワレが発生している。一方、同一圧下条件、即ち、同一温度、同一圧下速度、同一圧下率で行った通常の円筒状試験片にはワレが発生しなかった。Fig.20に、CAE解析で求めた通常の円筒状試験片および環状突起付き試験片を、30%据え込んだ時の円周方向応力分布を示す。通常の円筒状試験片の側面高さ中央部における値は、64.2MPaであるのに対し、環状突起付き試験片の突起側面の高さ中央部でのそれは、140.8MPaと非常に大きい値を呈している。据込温度における降伏応力は、139.8MPaであったので、通常の円筒状試験片では、ワレが発生せず、環状突起付き試験片においては、この値を超えているためワレが発生したと考えられる。この実験と解析によって環状突起付き試験片が、熱間加工におけるワレ感受性を評価するのに適していること、および、CAE解析によって得られた応力やひずみなどを検討することによって、ワレ発生予測が可能であることが示された。即ち、当システムを適用することにより高度な鍛造工程の問題解決を容易にできる可能性があることが分かった。

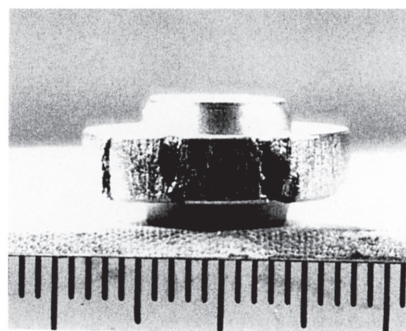
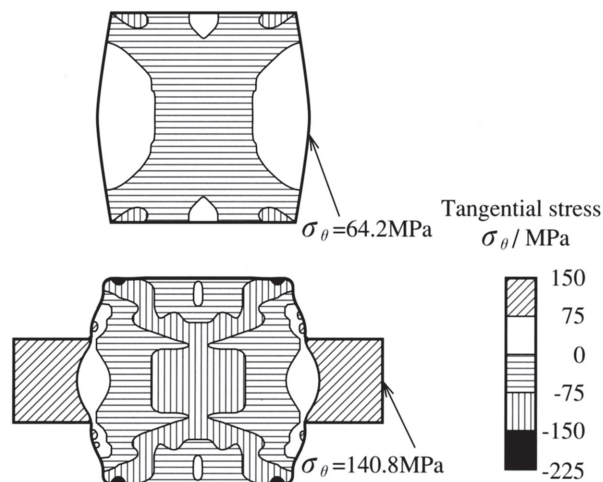


Fig.19. Cracks occurrence on side surface of ring part of specimen with circular projection.



Established flow stress $\sigma = 139.8\text{MPa}$ (constant)
Comparison a cylindrical specimen and a specimen with circular projection of tangential stress

Fig.20. Comparison of tangential stress of upsetting test of cylindrical and circular projected specimens.

4. 結言

数値解析とプラスチックシミュレーションを併用したシステムS.H.P.S.S.を型鍛造プロセスの解析に適用し、以下の知見を得た。

- (1) Tボルト、ミッションギア素形材、デファレンシャルギア素形材の鍛造プロセスの解析を行い、解析で得られたメタルフローは、プラスチック実験および実鍛造部品のそれと比較的良く一致した。このことから、実際の鍛造プロセスの検討に十分適用できることが分かった。
- (2) これらの解析から、工具寿命に影響すると考えられる、工具面圧、工具面上での材料の相対滑りを求め、それらの過大なところ、即ち、工具負荷の大なるところを指摘し、工程改善に供することが出来る。
- (3) 3次元形状部品の一断面を抽出し、その面の変形を平面ひずみにより解析を行ったところ、メタルフローが実際のそれとほぼ一致し、3次元変形の工程でも、この様な2次元近似化が可能であることが分かった。

- (4) 鍛造の最終工程でしばしば施される刻印の解析を行い、形状転写性の良い刻印溝断面形状を提案した。
- (5) 当システムを用いて、ワレの発生を、解析から得られた応力によって説明することが出来、当システムのより実的な問題への適用可能性が示された。

謝 辞

本報で行った解析には、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「RIPLS-FORGE」を使用させていただきました。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, 濱野利幸, 笠原義夫: 山陽特殊製鋼技報,4 (1997), 23.
- 2) 尾崎勝彦, 吉田忠継, 中崎盛彦: 第46回塑性加工連合講演会講演論文集 (1995), 253
- 3) 尾崎勝彦, 矢野正和, 中崎盛彦, 吉田忠継: 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1996), 190
- 4) 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継, 笠原義夫: 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1996), 192
- 5) 矢野正和, 尾崎勝彦, 中崎盛彦, 吉田忠継, 笠原義夫: 第47回塑性加工連合講演会講演論文集 (1996), 99
- 6) 中崎盛彦, 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継: 第47回塑性加工連合講演会講演論文集 (1996), 103
- 7) 中崎盛彦, 濱野利幸, 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継, 笠原義夫: 平成9年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1997), 283
- 8) 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継: 平成9年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1997), 285
- 9) 尾崎勝彦: 日本塑性加工学会関西支部第7回塑性加工講習会テキスト (1996), 18
- 10) 長谷川平一: 日本塑性加工学会鍛造分科会総会第63回研究集会資料 No.63-4 (1997)
- 11) 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
- 12) 吉田一也, 深沢元浩, 久保木功, 草野年男, 平沢克彦: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集 (1997), 205
- 13) 日本塑性加工学会編: 塑性加工技術シリーズ12, せん断加工, (1992), 102, コロナ社
- 14) 冷間鍛造分科会研究班: 塑性と加工, 22 (1981), 139
- 15) 近藤一義: 第169回塑性加工シンポジウム, (1996), 8

