

精密鍛造への塑性加工CAEシステムの適用

吉田 忠継*1・笠井 貴之*2・尾崎 勝彦*2

Practical Use of Numerical Analysis and Plasticine Simulation to Precision Die Forging
Tadatsugu Yoshida, Takayuki Kasai and Katsuhiko Osaki

Synopsis: Plasticity simulation system called S.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) has been developed and mainly applied to customers forging process simulation. In recent years net-shape forging technique for adding high value to their products has been developed in customers forging processes. On the other hand, life reduction of tools such as die and punch due to increase of forging pressure on tool surface has become remarkable. Concerning such an environment around forging, authors developed simulation technique for estimation and reduction of load on tool surface and stress in tool in customers forging process. The followings have been clarified:

- 1) Relation between temperature of work piece and forging load on tool in semi-hot forging of gear blank.
- 2) Relation between forming limit and process condition in precision cold forging of axial reduction.
- 3) Relation between division pattern of segmental dies and stress in dies for precision cold forging of cup shape product.

As mentioned above plasticity simulation system called S.H.P.S.S. can be adopted for practical forging processes.

Key words: die forging ; process simulation ; CAE ; FEM ; plasticine simulation ; metal flow ; strain ; pressure on tool surface ; material slipping on tool surface ; stress in die.

1. 緒言

当社は軸受鋼，機械構造用鋼からステンレス鋼，工具鋼などに至る幅広い鋼種を棒鋼・管・素形材の形状に製造している特殊鋼専門メーカーであり，長年特殊鋼の材料開発に取り組んでおり，複雑な形状の加工には，当社のクリーンな鋼材および工具鋼が適用されてきた。

近年，メガコンピティション時代に突入し，顧客では従来にも増して国際競争力強化の観点から鍛造工程などの生産性向上およびコスト低減が行われており，さらに，素材供給メーカーに対しても素材の加工性改善のための品質改善が求められている。

その一方で，省エネ，省力，省工程，高付加価値などに資する複合鍛造，亜熱間鍛造，精密鍛造など新しい鍛造技術の開発が精力的に行われており，またこれらの技術とフォーマーなどの高生産性技術を組み合わせる試みも実施されるなど，素材の被加工特性とその加工技術の有機的な結合が一段と求められている。

当社ではこれらの要求にいち早く対応し，顧客の満足度

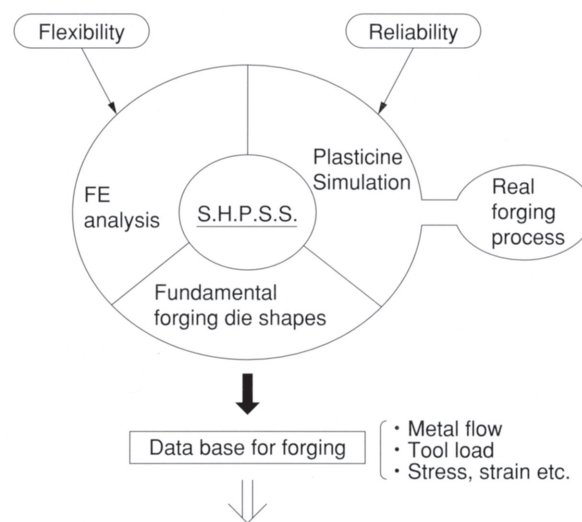


Fig. 1. Concept of S.H.P.S.S..

を高める取り組みを推進している。その一環として，顧客の鍛造工程に関する理解を深め，素材開発に的確にフィー

*1 技術研究所 プロセス研究グループ，工博

*2 技術研究所 プロセス研究グループ

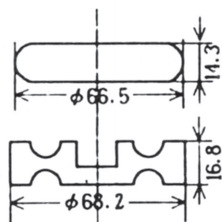


Fig. 2. Dimensions of upset and forged blank for gear.

Table1. Calculating conditions for gear blank forging.

Stroke velocity(mm·s ⁻¹)	9.49, 94.9, 949.0
Flow stress(MPa)	$\sigma=2.153 \cdot (\epsilon+0.15)^{-0.1334} \cdot \dot{\epsilon}^{0.1119} \cdot \exp(39980/8.314/(T+273))$
Friction coefficient	Coulomb friction $\mu=0.2$
Coefficient dependence on pressure	1/g=100, 500
Steps of calculation	30

Table2. Discussed parameters in gear blank forging.

	temperature(°C)	strain rate(s ⁻¹)
series 1	800,900,1000,1100	10
series 2	900	1,10,100

ドバックし、また直接ユーザーも支援できる体制を目指しており、数年前から、S.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) と称するFig.1のCAE解析システムを開発している。本システムの特徴は実験の信頼性とCAE解析の柔軟性を活かして製品形状や加工条件などの検討を精度良く行うとともに、実験では得ることが困難な被加工材と型の応力及びひずみ分布を可視化して、実機工程の課題抽出を容易化するとともに、工程改善にも適用できる点にある。

解析精度の検証のために、第1報から第3報^{1, 2, 3)}では、顧客の工程から抽出した10種類程度の基本鍛造型^{4, 5)}に対して、剛塑性有限要素プログラムRIPLS-FORGE[®]を使用したCAE変形解析およびプラスチック(油粘土)による模擬実験を実施し、両者の比較を徹底的に行った。また、各種鋼材の変形特性評価手法を開発し、得られた評価式の各パラメータが変形特性(転写性、型負荷など)に及ぼす影響を調査するとともにデータベース化を図った。

本報では顧客の鍛造工程で特に要求の強い型の寿命向上に関して、前記のCAEシステムによる型への負荷の推定を実施するとともに、顧客の使用環境に応じた工具設計および工具材料選定のための型応力解析手法を検討した。そして、以下の事例に適用してCAEシステムの実用化を図った。

- (1) ギア用素形材の亜熱間型鍛造における型負荷の検討
- (2) 精密冷間軸絞り性の検討
- (3) 精密冷間鍛造用分割型の応力解析

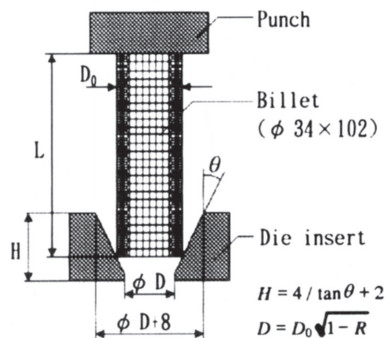


Fig. 3. Mesh model for FE analysis and tool set up of axial reduction.

Table3. Calculating conditions for axial reduction.

Dimensions of billet(mm)	$D_0 \times L = \phi 34 \times 102$
Punch velocity(mm·s ⁻¹)	100
Stroke length(mm)	67.2
Flow stress(MPa)	$\sigma = 880.94 \epsilon^n$
Work hardening exponent n-value	0.0, 0.1, 0.2, 0.3
Coefficient of Coulomb friction μ	0.0, 0.1, 0.2
Die half angle θ (deg)	5, 10, 15, 20
Reduction of area R(%)	15, 20, 25

2. 実験および解析方法

2・1 ギア用素形材の亜熱間型鍛造における型への負荷特性の検討

加熱温度を800°C~1100°Cに低減することを特徴とする亜熱間鍛造技術が製品の精密化および省エネなどの観点から注目されており、その技術的な調査研究が行われている⁷⁾。その際、被加工材の変形抵抗の増加に伴う工具への負荷の増大が型寿命の低下に繋がらないか懸念されており、被加工材の温度と型負荷の関係を解明することは重要である。そこでFig.2のギア用素形材の熱間型鍛造工程¹⁾において被加工材の温度を種々変化させた場合の工具負荷について検討した。

解析方法をTable 1に、解析条件をTable 2に示す。即ち、温度を800°C~1200°Cの範囲で4条件、ひずみ速度を1s⁻¹~100s⁻¹の範囲で3条件変化させてその影響を検討した。変形抵抗として熱間据込み試験により求めたSCM420のデータ⁷⁾を用いた。

2・2 精密冷間軸絞り性の検討

軸付き部品の鍛造で最も基本的な加工である軸絞りについては密閉押しほどの知見がなく、型設計や素材選択は現場の経験と技能に委ねられている場合が多い。軸絞りでは、軸部を延伸させ、できるだけ大きな断面減少率を得ることが望まれるが、ダイの入り側で材料が膨らんで成形できない場合がある。山本[®]は軸絞りの加工性を決定する要

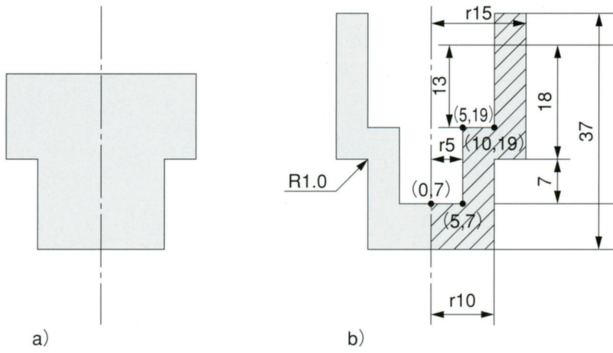


Fig. 4. Cup forging process.

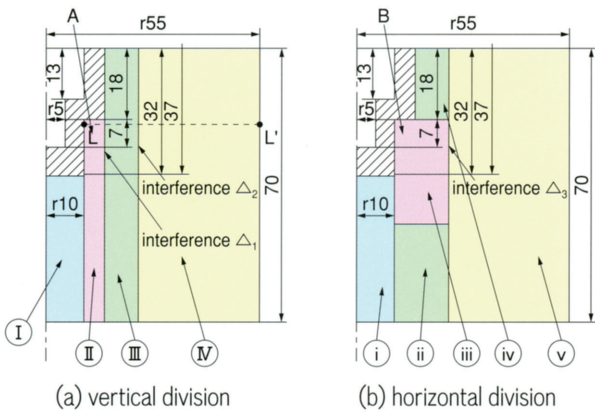


Fig. 5. Segmental dies for cup forging.

Table4. Calculating conditions for cup forging.

(1) Deformation analysis of material	
Method	Axially symmetrical rigid plastic FEM (RIPLS-FORGE [®])
Element type	4 - node isoparametric square element
Flow stress	$\sigma = k \epsilon^n$, $k=95$ (MPa), $n=0.22$
Initial number of element	185
(2) Stress analysis of tools	
Method	Axially symmetrical elastic FEM (Interference is considered as initial strain)
Element type	3-node isoparametric triangle element
Poisson's ratio	0
Element number	458

Table5. Discussed parameters in cup forging.

Tool division	Vertical (Fig.5 (a)), Horizontal (Fig.5 (b))
Young's modulus of nib part E_1 (MPa)	210000, 320000, 420000
Young's modulus of ring part E_2 (MPa)	210000
Interference in vertical division Δ_1 (mm)	0, 0.1
Δ_2 (mm)	0, 0.1
horizontal division Δ_3 (mm)	0, 0.1, 0.2

因として座屈，材料ふくれ，潤滑，型形状，そして材料特性を挙げている。加工性と材料特性との関連性については



Fig. 6. Metal flow of forged gear blank obtained from plasticine simulation (left side) and from CAE analysis (right side).

守時ら⁹⁾が据込み変形での素材n値の影響を示しているが、軸絞りについては定量的に調査された例はほとんどない。

そこで本事例では素材n値の他に摩擦係数，型形状（ダイス半角，断面減少率）をパラメータとして2次元軸対称CAE解析を行い，被加工材の変形形状，ひずみ・応力分布および軸絞りにおける成形限界について検討した。

Table 3に解析条件，Fig.3に有限要素分割の一例と工具形状を示す。以下，摩擦係数を μ ，素材の加工硬化指数n値を n ，ダイス半角を θ [deg]，断面減少率を R [%]として表す。

2・3 精密冷間鍛造の分割型の応力解析

ギアやスプライン付きの軸物などの冷間精密鍛造工程では，型の転写性を向上させるために型への負荷が高くなる場合が多く，応力集中し易い型形状とあいまって型の割れによる破壊が生じ易い。そこで，型の破壊を防止するために，被加工材が直接接触するニブの部分，補強リング（以下リングと呼称）により周囲から締め付けることにより加工時にニブに発生する引張応力を緩和する対策が古くからなされている。特に，最近ではき裂が発生する部分の型を予め分割することや，補強リングを複数用いるなどの方法により高い引張応力の発生を防止する設計が適用されている。型の分割の様式は縦分割と横分割に大別され，主に設計者の好みにより適宜選択されているようである。近年，各方式で発生する型の応力分布の特徴をCAE解析により調査することも実用化されつつある¹⁰⁾。

そこで，今回Fig.4に示すカップ状部品の成形工程に対して，Fig.5に示す縦分割と横分割の場合の応力解析を実施した。解析方法をTable 4に，解析条件をTable 5に示す。即ち，型の各部位毎に材料の物性を指定するとともに，ニブとリングの締め代を初期ひずみとして考慮した。また，締め代およびニブの材料のヤング率を変化させて解析を実施した。

3. 結果と考察

3・1 ギア用素形材の垂熱間型鍛造における型負荷の検討

Fig.6はギア用素形材の型充填時のメタルフローを，中心軸より左側のプラスチック試験結果と右側のCAE解析結果とを比較したものである。両者が比較的良く一致することから解析結果の妥当性が示された。ギアの歯元となる外

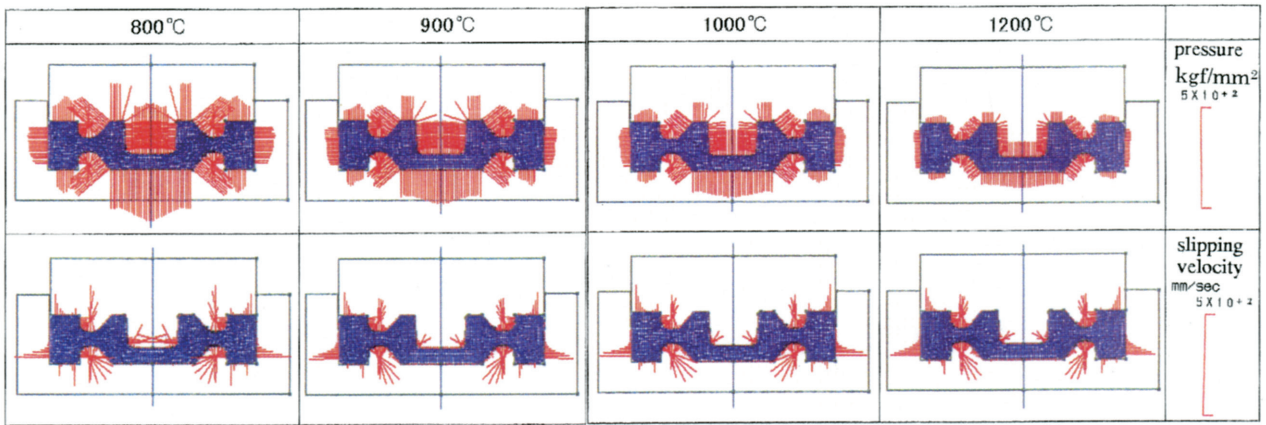


Fig. 7. Slipping velocity and pressure on tool surface under different temperature (strain rate $\epsilon=10s^{-1}$).

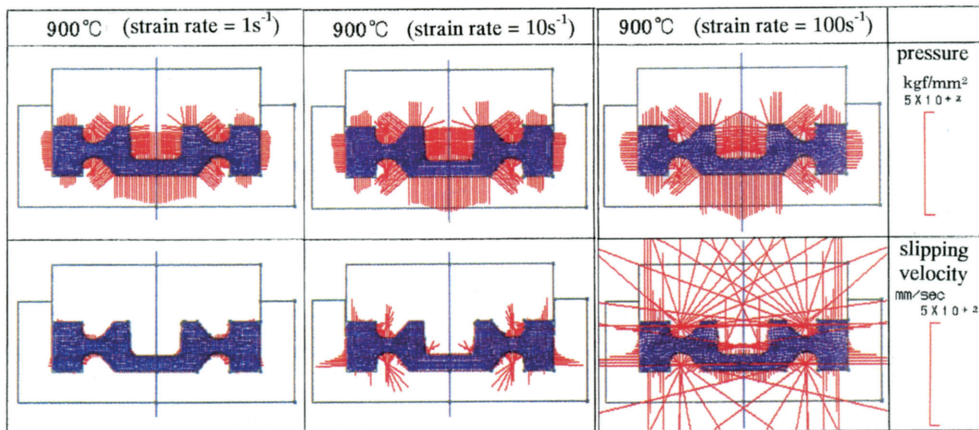


Fig. 8. Slipping velocity and pressure on tool surface under different strain rate (temperature $T=900^{\circ}C$).

周部で鍛流線が曲げ応力に耐える方向になっており、ファイバーが切断される切削加工に対する鍛造加工の特徴といえる。

Fig.7にひずみ速度を $10s^{-1}$ と仮定した場合に、被加工材の温度を種々変化させた場合の工具表面の面圧と滑り速度を示す。すべり速度分布は温度にはあまり依存せずほぼ同じと見なすことができる。上下平面にある1対の円周溝底部のひずみ速度が大であり、実際には温度が高くなる下側の溝底部に対応する工具の突起部にヒートチェックによるき裂が発生して型寿命となる。

面圧は鍛造温度が低下するに従って増加する。これは変形抵抗式の温度依存性に直接起因するものであり、Table 1のアレニウス近似に従って変化することが分かる。

Fig.8に被加工材の温度を $900^{\circ}C$ 均一と仮定した場合に、ひずみ速度を種々変化させた場合の工具表面の面圧と滑り速度を示す。面圧はひずみ速度が増加すると増加する傾向にあり、その程度はひずみ速度が100倍に増加しても50%程度の増加である。一方、すべり速度分布のパターン（滑り速度をその最大値で除して無次元化した分布）は加工速度（代表値としてひずみ速度）にほとんど影響を受けないが、その絶対値はひずみ速度に比例する。

n		0.0			0.1			0.2			0.3				
R		15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25		
μ	0.0	θ	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
			20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●
	0.1	θ	5	○	○	○	○	○	△	○	×	×	●	×	×
			10	○	○	○	○	○	●	○	○	×	△	×	×
			15	○	●	●	●	●	△	●	●	×	△	×	×
			20	△	△	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×
	0.2	θ	5	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
			10	●	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
			15	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
			20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○● Possible × Impossible
 △ Possible but difficult (expansion ratio > 1.05)
 n : Work hardening exponent
 R : Reduction of area
 μ : Coefficient of coulomb friction
 θ : Die half angle

Fig. 9. Forming limit of axial reduction.

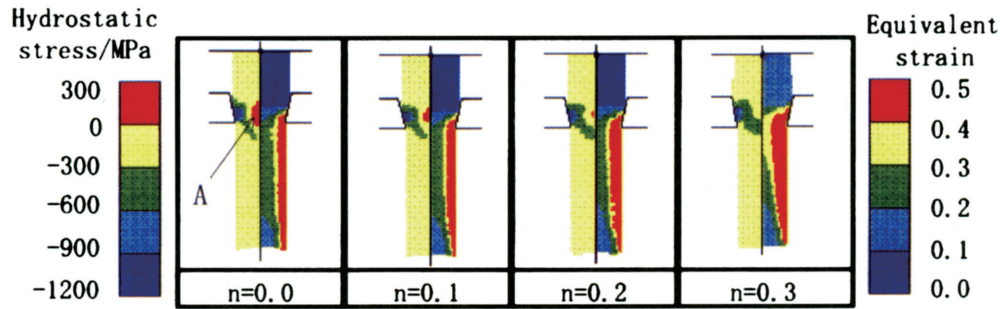


Fig. 10. Distributions of hydrostatic stress (left side) and equivalent strain (right side) ($\mu = 0.1, R = 15\%, \theta = 15^\circ$).

既報告の本鍛造工程における型寿命と型負荷の関係の調査結果¹⁾から、被加工材の温度が同じである場合は工具表面の面圧Pと滑り速度Vの積（即ちPV値）が大きい程工具へのダメージが大であるという知見が得られている。任意の工具表面に作用する工具面圧×摩擦係数×相対すべり速度を考えると、これは材料が工具表面で摩擦摺動により生じる仕事率に相当することから、工具のダメージを代表するパラメータとしてPV値を用いることは妥当と考えられる。摩擦係数が一定の条件であれば、前記のPV値が工具の局部負荷の有効な指標であることが理解できる。

亜熱間鍛造の工具のダメージも基本的にはPV値を用いて評価できると考えられる。但し、被加工材の温度が変化するとこれと直接接触する工具の表面の温度も変化するので、工具の熱応力や高温軟化などの影響も考慮する必要がある。

SCM420を用いた調査結果から亜熱間鍛造工程では被加工材の温度を1050℃以下にできれば自然放冷により必要な組織が得られる可能性がある¹⁾。その際の被加工材の温度の下限値を整理する際にPV値が重要なパラメータとなると考えられる。

3・2 精密冷間軸絞り性の検討

Fig.9は成形限界を調査したもので、材料を連続的に押出すことができる場合（○,●）、ダイの入り口で材料が膨らんで連続的に成形できない場合（×）、設定した圧下量に対し、ダイ入口で材料が詰まらずに押し出せるが、膨らみ率（=ダイ入り側での膨らんだ材料径/元の材料径）が1.05を超える場合（△）に分け、各パラメータについてまとめた。またTable 6において●を成形限界としておよその目安として成形限界式を導出した。以下にその式を示す。

$$1071\mu + 323n + 10\theta + 4R - 365 = 0 \quad \text{--- (1)}$$

Fig.10に $\mu = 0.1, R = 15\%, \theta = 15^\circ$ とし素材n値を変化させた場合の相当ひずみ分布と静水圧分布を示す。相当ひずみは軸部表面で高く、n値が増加すると内部まで加工が進み、

相当ひずみが高くなる事が分かった。また解析結果から膨らみ率が1.05を越える場合は頭部の相当ひずみは0.08以上となるため、本条件より圧下量を増加させた場合には成形困難となる可能性があると判断する。また摩擦係数、断面減少率、ダイス半角が増加するほど相当ひずみは大きくなる事が分かった。

被加工材と工具との接触部付近では高い圧縮の静水圧が働き、その断面中央付近（Fig.10のA部）では引張りの静水圧となる。この引張りの静水圧はくぼみ量と関連があり、Fig.10に示すように、素材n値が増加するのに伴い、引張りの静水圧の大きさと分布範囲は減少し、同時にくぼみ量も減少する傾向がある。これはn値が低いと軸部表面付近のみ延伸され、内部は表面に引っ張られて変形するためと推定される。また摩擦係数、断面減少率が低く、ダイス半角が大きい程、工具と被加工材の接触部断面中央では引張応力は高く、広い範囲に分布する。

これらの知見はシェブロンクラックなど加工欠陥発生防止に活用できると考えられる。

Fig.11に素材の変形解析により得られた型表面の面圧を境界条件にして求めた工具の相当応力分布を示す。ダイス部分に応力が集中するので、この部分に必要な型材の強度を容易に知ることができる。この機能を活用して顧客の工程に最適な工具鋼を提供できるシステムを目指している。

3・3 精密冷間鍛造の分割型の応力解析

Fig.12はカップ状部品の成形工程における型充满時のパンチおよび型表面の面圧分布を示す図である。赤線は面圧の応力ベクトルであり、線の長さで圧縮応力の強度、線の方向で荷重の方向を示す。カップ底に近い外周面の表面圧力が3000MPa程度と大である。

Fig.13は縦分割でニブおよびリングのヤング率が400000MPaおよび210000MPaの場合に、Fig.5 (a) に示す部品③および④の締め代 Δ_1, Δ_2 を3種類に変化させてFig.5 (a) の線分L-L'に沿う半径方向の応力 σ_r の分布を調べた図である。L点は2000MPa弱と大きな表面圧力が作用しており、L'点は自由表面のため σ_r は0となる。本解析で

は要素の中心点の応力を求めており、解析結果を結ぶ線は両境界の設定値に滑らかに延長できる。また、 $r=15\text{mm}$ および 24mm は型を構成する部品の界面に相当し、この部分で応力 σ_r の連続性が保たれていることから本解析では境界条件を概ね満足していることが分かる。一方、L点近傍で大きな応力勾配が観察されるが、L点で σ_r の境界条件が一律に規定されているので σ_r に対する型締め代の影響はあまり顕著でない。

Fig.14はFig.13の縦分割と同じ条件で周方向の垂直応力 σ_θ の分布を調べた図である。赤線は型締めを行っていない場合であり、 $r=24\text{mm}$ 近傍を除けば比較的滑らかな分布が観察された。 $r=24\text{mm}$ 点近傍の応力勾配の変化は型材のヤング率の不連続のために、本質的な変化である。図中の青線は $r=24\text{mm}$ の境界で締め代を 0.1mm 付与した場合であり、境

界を挟んで内側の部分は応力が低下し、外側の部分は応力が増加する傾向が観察された。図中の黄線は $r=15\text{mm}$ および 24mm の境界で各 0.1mm の締め代を付与した場合である。これは青線の条件に更に $r=15\text{mm}$ 位置での締め代を付与した場合と見なすことが出来、青線が黄線に変化する量が大きいことから、 $r=15\text{mm}$ の締め代の影響はかなり大きい。

Fig.15は縦分割で締め代が $\Delta_1=0\text{mm}$ 、 $\Delta_2=0.1\text{mm}$ の場合に、ニブのヤング率を変化させてFig.5 (a) のA点（角の要素の中心点）の周方向垂直応力 σ_θ への影響を調べた図である。赤線は被加工材からの負荷が最大の型充滿時、青線は被加工材の負荷が皆無の加工前を示す。型充滿時にはヤング率に対して単調増加傾向であるが、加工前では僅かに単調減少傾向が観察された。即ち、A点が受ける応力幅はニブのヤング率が高いほど増加する傾向にある。

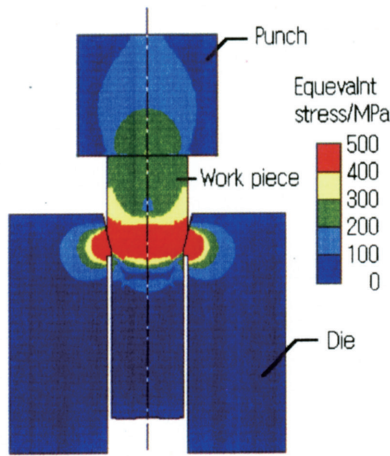


Fig. 11. Distribution of equivalent flow stress in the work piece and the tools.

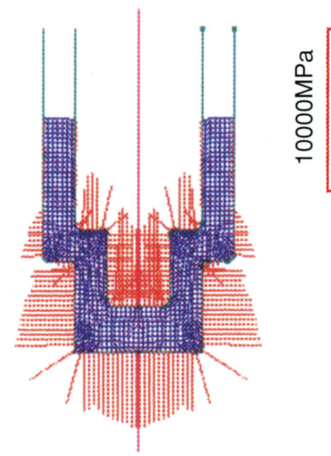


Fig. 12. Distributions of pressure.

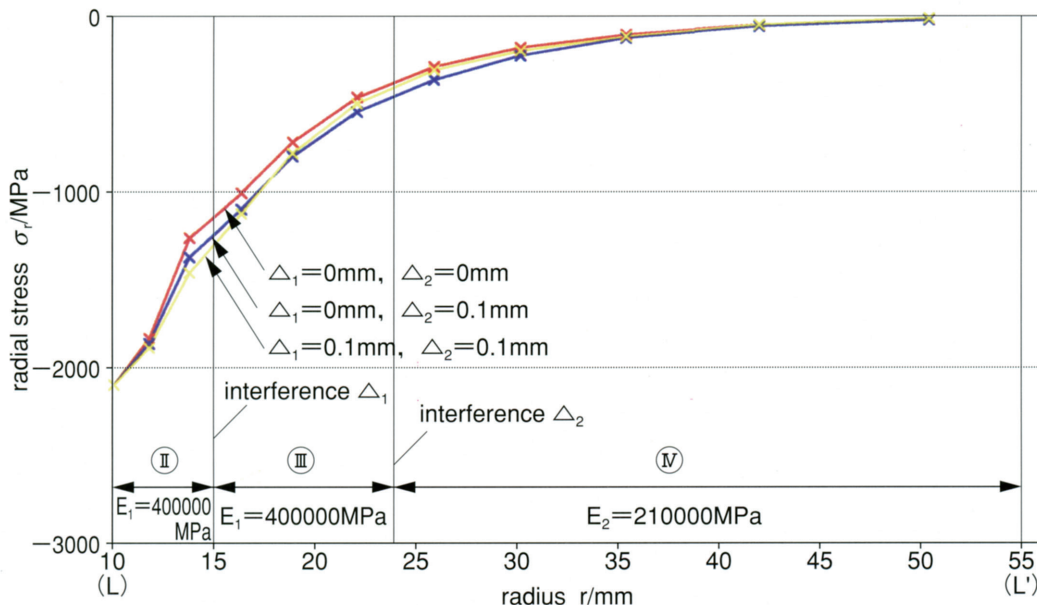


Fig. 13. Influence of interference on radial stress in vertical division. (Distributions of σ_r along LL' - line in Fig.5 (a)).

Fig.16は横分割で締め代が $\Delta_3=0.1\text{mm}$ の場合に、Fig.15と同様Fig.5 (b) のB点の応力に対するニブのヤング率の影響を調べた図であり、横分割と同様の傾向が見られた。

Fig.17は縦分割でニブおよびリングのヤング率を400000MPaおよび210000MPaとして締め代をFig.13と同様に3種類に変化させた際にFig.5 (a) のA点の周方向垂直応力 σ_θ への影響を調べた図である。締め代が増加するにつれて型充填時および加工前の何れの場合も応力が低下する。

Fig.18は横分割型でFig.17と同様に型締め代を変化させた

際にFig.5 (b) のB点の周方向垂直応力 σ_θ への影響を調べた図である。本条件でも締め代が増加するにつれて型充填時および加工前の応力が低下する。

以上のように、型に発生する応力をCAE解析で予測することにより実機型による試行錯誤の回数を低減してコスト低減および納期の短縮を図る可能性がある。

4. 結論

本報告では顧客の鍛造工程における工具負荷の予測と低

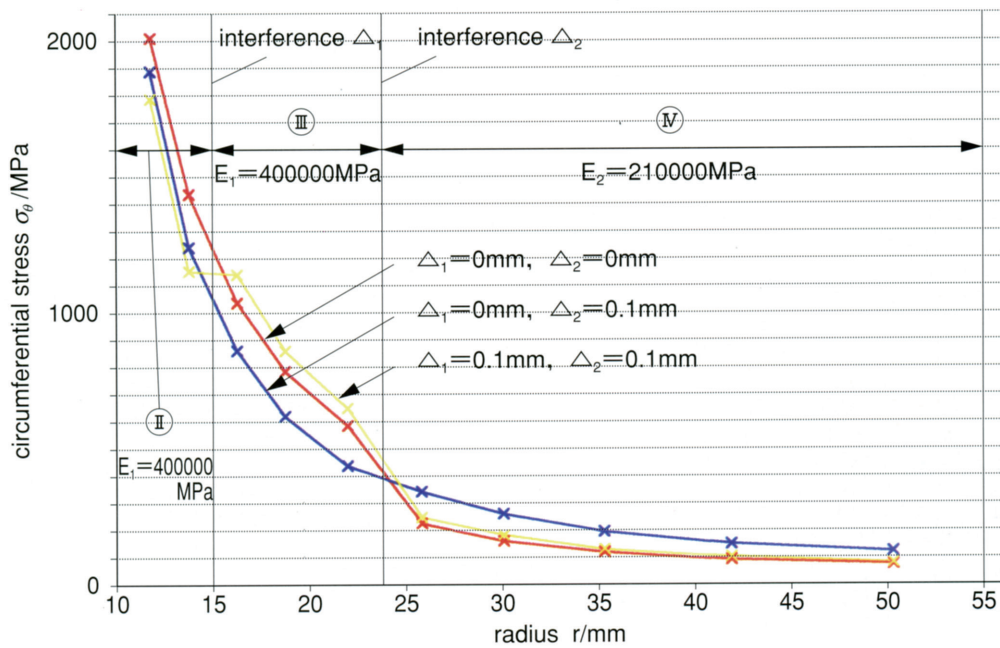


Fig. 14. Influence of interference on circumferential stress in vertical division. (Distributions of σ_θ along LL' - line in Fig.5 (a)).

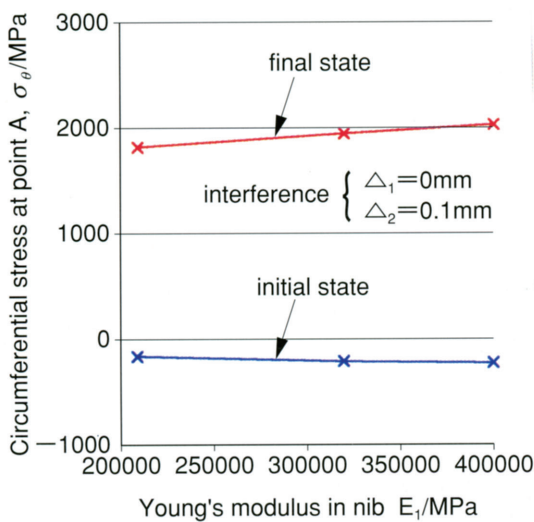


Fig. 15. Influence of Young's modulus in nib part on circumferential stress in vertical division.

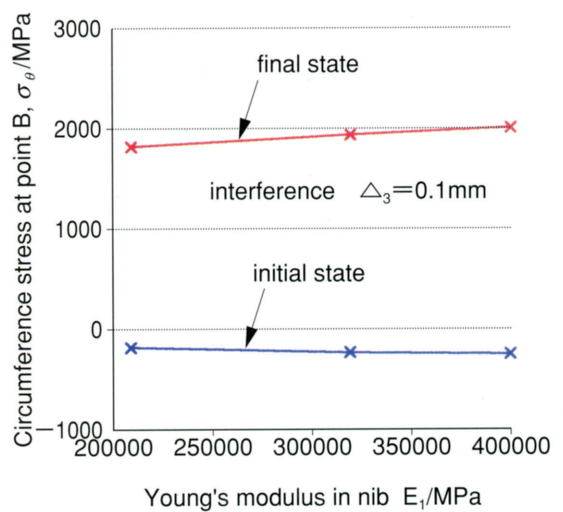


Fig. 16. Influence of Young's modulus in nib part on circumferential stress in horizontal division.

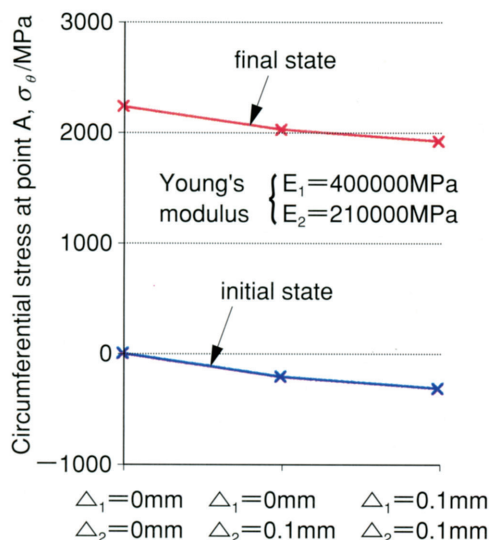


Fig. 17. Influence of interference on circumferential stress in vertical division.

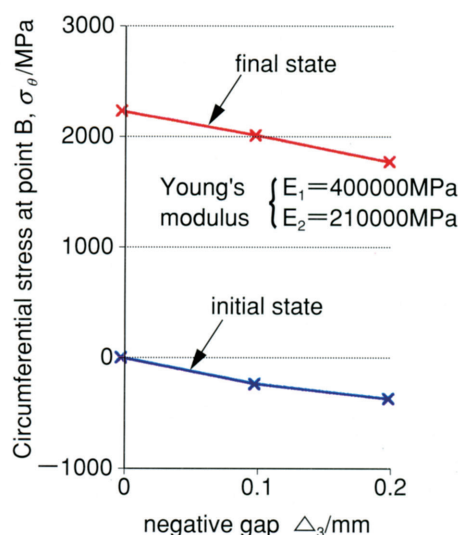


Fig. 18. Influence of interference on circumferential stress in horizontal division.

減に着目したシミュレーション技術の開発を図り、以下の知見を得た。

- 1) ギア素形材の亜熱間鍛造工程において、加工温度を下げていく事で工具面上での滑り速度 (V) の分布のパターンは変わらないが、変形抵抗増大に伴う工具面圧 (P) が増大し、型負荷即ちPV値が大きくなる。
- 2) 精密冷間鍛造の軸絞り工程における成形限界と工程条件の関係を明確にし、次に示す成形限界式を得た。

$$1071 \mu + 323n + 10 \theta + 4R - 365 = 0$$

ここで、 μ ：摩擦係数， n ：材料の加工硬化指数， θ ：ダイス半角， R ：減面率，である。

- 3) 精密冷間鍛造の型応力分布におよぼす型の分割様式（縦分割，横分割）の影響は少なく，締め代や型のヤング率の影響の方が大きい。

以上のように、当初目的とした塑性加工CAEシステムの実用化が可能となった。

謝辞

本解析では、大阪大学の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」を使用させて頂きました。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，笠原義夫：山陽特殊製鋼技報，3(1996)，25。
- 2) 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。
- 3) 尾崎勝彦，吉田忠継，矢野正和，笠井貴之，濱野利幸，中崎盛彦，瀬川冬樹：山陽特殊製鋼技報，5(1998)，32。
- 4) Kurt Lange：鋼の型鍛造，鍛造技術研究所，(1983)。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 鍛造技術研究所編：素形材センター研究調査報告，(1998)，514。
- 8) 山本博一：冷間鍛造，日本経営コンサルタンツ，東京，(1969)，118。
- 9) 守時一，熊谷一男，西村信三：秋田大学鉱山学部研究報告，10(1989)，87。
- 10) 角南不二夫：日本塑性加工学会鍛造分科会第26回鍛造実務講座テキスト，(1999)，55。
- 11) 鍛造技術研究所編：素形材センター研究調査報告（投稿中），(1999)。