

ベベルギヤ鍛造における金型内部応力に及ぼす歯形稜線形状の影響

(株) 鹿児島頭脳センター 牟禮雄二*

Effect of Ridgeline Shape on Elastic Inner Stress of Die in Cold Forging of Bevel Gear

Yuji MURE

Forming simulation has been conducted extensively in the forming process design to achieve successful and optimum metal forming process. Elastic deformation analysis of a cold forging die to form bevel gear were carried out by using the experimental analysis system, by which inner stress of the die could be visualized, developed by the author previously. As a result, quantitative and graphical information concerning the effect of configuration of ridgeline part, which often becomes damage part, on inner stress of the die could be obtained. Those results prepare useful information to accomplish extension of the die life.

Keyword : Experimental Simulation, Cold forging, Bevel gear, Process design

1. 緒言

金属材料の塑性加工プロセス設計は、設計目標に見合う製品寸法形状、使用機能に合致した内部結晶組織、良好な表面性状および製造コストを評価関数としてこれらを最適化するものである。最適化を達成するためには加工手順や加工条件を適切に設定する必要がある。

塑性加工の一種である鍛造加工は、「塑性ひずみが全域にわたる大変形問題である」、「金型の密閉性が高いため工具負荷が大きい」などの特徴を有しており、塑性変形現象の解明は工具と被加工材料の接触など多くの非線形現象を含み難解である。最適な鍛造加工プロセスを決定するためには多くの経験的知識と技術情報が必要である。しかし、生産現場では依然として多くの試行錯誤がなされ、金型の再製作など多大な時間を要し、コストダウン要求への対応が難しい。さらに、鍛造加工に対する高精度化、高付加価値化、その他の工業的ニーズに対応すべく、ベベルギヤなど歯車部品の鍛造化が進められており、これらに対応するためにも加工プロセスの解析的検討に基づく設計が従来にも増して必要である。このため、上記の要求を高水準で効率的に達成するための計算機支援技術として有限要素法に代表される塑性加工シミュレーション^{1),2)}が導入され塑性加工プロセス設計および金型設計に活用されている。

筆者はこれまでに被加工材の塑性変形現象を変形過程の塑性流動、速度ベクトル、ひずみ速度、相当ひずみ速度、相当ひずみなどの各項目で詳細に解析する汎用実験加工シミュレーションシステム³⁾⁻⁵⁾を構築した。当該システムを様々な現場ニーズへ適用し、新規加工法を開発するとともに

に金型の開発と改良を実施してきた⁶⁾。しかし、鍛造加工においては、複雑な非線形現象を呈する材料の塑性変形と金型の弾性変形が同時に起こるため、前述システムのみでは加工プロセス設計に対する総合的な問題解決には不足する側面があった。特に、工具面圧が高い冷間鍛造においては応力集中に起因する金型寿命低下がしばしば問題となる。そのため加工中の金型内部の弾性応力値とその分布を定量的に把握することが金型を設計する上で重要となる。過去に金型表面に圧力センサーを取り付ける研究^{7),8)}は報告されているが、金型全体の弾性応力分布を明らかにすることは行われていなかった。そこで、ひずみセンサーを埋込んだ金型を用い、鍛造加工中の任意時間における金型内部の弾性ひずみの変化量を測定し、各点における弾性応力値を計算し、応力分布をグラフィック表示することを特徴とする金型内部応力可視化技術を確立した⁹⁾。

本研究では上記の可視化技術を援用し、実際の鍛造加工をモデル化したシミュレーション実験（以下、モデル実験と呼ぶ）により、金型破損が問題となっていたベベルギヤの冷間鍛造金型形状を最適化したので報告する。

2. シミュレーションのモデル化

2.1 実験・解析の対象

解析対象は、クロム・モリブデン鋼(以下、SCM20と呼ぶ)を素材とする自動車用ベベルギヤ(歯数10)の冷間鍛造である。ギヤの寸法形状と外観写真をFig. 1に示す。モデル実験では実際の金属における加工を忠実に再現するために円柱素材からプリフォーム成形を経て歯形を成形した。なお、本報では、歯形成プロセスのみを実験・解析の対象とした。実際の冷間鍛造金型の破損部位をFig. 2に示す。

*企画情報部

(本研究は、執筆者が出向中に実施したものである)

2.2.2 金属材料の変形特性

単軸圧縮試験に用いた試験片はSCM20材で、直径10mm、高さ15mmに切削した円柱材である。なお、試験片は完全焼鈍材である。また、潤滑は実際の鍛造と同様にボンデ処理を施した。単軸圧縮試験は加工速度30mm/sで、室温にて実施した。試験の結果をFig. 4に示す。図から明らかなように曲線は加工硬化状態を示している。プラスティシンの応力-ひずみ曲線と比較するとプラスティシンの温度が10あるいは20における加工硬化の傾向と類似している。

2.3 プラスティシンの加工条件の決定

モデル材料の特性を論ずる場合、変形特性の相似性のみならず、加工形状の相似性も大きな問題となる。そこで、材料温度、加工速度の2項目に対し、それぞれプラスティシンの温度を[0, 10, 20]、加工速度を[1, 10, 30] mm/sに設定して歯形成形実験を行い、Fig. 1のベベルギヤ

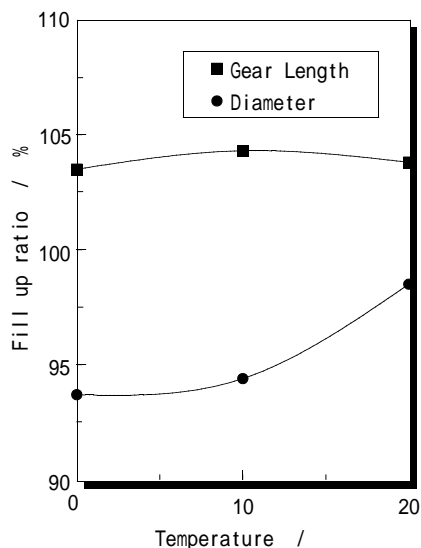


Fig. 5 Effect of the workpiece temperature on fill up ratio of Plasticine

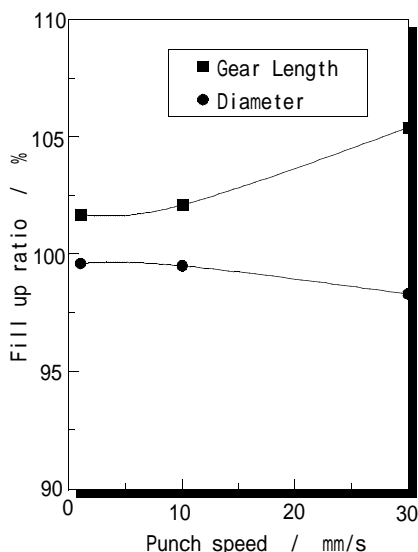


Fig. 6 Effect of punch speed on fill up ratio of Plasticine

形状と比較した。比較項目は、Fill up ratio(歯形への充満度であり、以下FRと呼ぶ)で、Fig. 1のGear length部に関しては、SCM20材の当該寸法をH、プラスティシンの当該寸法をhとし、 $FR=h/H \times 100\%$ で表す。Diameter部に関してはSCM20材の当該寸法をD、プラスティシンの当該寸法をdとし、 $FR=d/D \times 100\%$ で表す。

まず、歯形の充満性に及ぼす材料温度の影響をFig. 5に示す。加工速度は1 mm/sで、潤滑剤として石けん水を使用した。Gear length部では、材料温度による充満性の影響は極めて小さいが、Diameter部については温度の上昇に伴い10を起点に充満性が向上する。なお、Gear length部においてFRが100%を越えているのは、SCM20材のベベルギヤをシリコン樹脂で反転してモデル型を作製したことで当該寸法が実際より大きくなったためである。

次に、歯形の充満性に及ぼす加工速度の影響をFig. 6に示す。材料温度は20である。Gear length部では加工速度が上昇すると充満性が向上するが、Diameter部では10mm/sを起点に加工速度が上昇すると充満性が低下する。1 mm/sが良好と言える。結論として、前述の変形抵抗試験におけるプラスティシン材とSCM20材の応力-ひずみ曲線の相互比較および歯形成形品の形状比較により、プラスティシンにおいては、材料温度：20、加工速度：1 mm/sの条件で実験を行った場合、最も再現性が良かった。

3. モデル実験と解析

3.1 金型内部応力可視化システム

実験と解析に用いた可視化システムは、ひずみセンサーを埋め込んだモデル型を用い、型の弾性変形範囲内で塑性加工の実加工プロセスに準じたモデル実験を行い、加工開始から最終ストロークまでの時系列的なモデル型内部のひずみの変化量を測定し、その結果からモデル型内部の弾性応力分布を可視化する。さらに、モデル型から実金型への応力変換を経て実金型における弾性応力分布を推定する。

システムの外観写真をFig. 7に示す。システムの構成は



Fig. 7 Experimental apparatus of the experimental analysis system to visualize inner stress of a die

および力学的相似性を考えなければならないが、前者は、比較的簡単に満足させることができる。後者は、材質の相違ゆえ多少困難である。しかし、モデル型と実金型には巨視的な変形挙動にはかなり良く似た点が多い。そこで力学的相似条件は、モデル型が等方性の連続体としての特性を示す弾性範囲内において、被加工材が塑性変形中に型と材料が接触する時系列的な状況（摩擦特性）と、結果として得られる最終加工品の形状など変形状況が実際と一致していれば、それに伴うモデル型への時系列的な反力の変化状況も一致すると考えられる。さらにモデル型への反力により発生する型内部の弾性ひずみも実際の金型と相似的な分布を示すものとみなすことができる。

3.3 実験条件と方法

実験に用いたモデル型の構成図と部品の写真をFig. 10に示す。ダイスは、加工中に上方へ動くことが予想されるためバネで圧縮し、加工中は動かないようにした。

実験に用いたプリフォーム（歯形成前の素材）の作製は以下の手順で行った。まず、真空土練機によりプラスチックを混練・脱気後、押し出し器具により円柱素材を作製した。作製した円柱素材は、実験の再現性を確保するために恒温器で40℃で2時間保持後、さらに機械的性質を安定させるため恒温器内に20℃で20時間以上保持した。次に、SCM20材のプリフォームを2液混合型エポキシ樹脂に埋め込み硬化後、それを取り出して作製した反転型を用い、プラスチックの円柱素材からプリフォームを作製した。

歯形成実験は、プレスにセットしたモデル型を用いてプリフォーム作製後に時間を置かずに実施した。この時、インナーを円周方向に回転させ、埋め込んだひずみセンサーの断面をギヤの歯先・歯底・稜線のいずれかに一致させて3回測定し、モデル型全体の内部応力分布を可視化した。加工実験は、材料温度20℃および加工速度1mm/sで実施した。また、潤滑剤として石けん水を素材に一樣に塗布した。なお、加工実験中の弾性ひずみは計測装置により連続記録した。実験は、再現性を確認するために「改良前」と「改良後」の各条件において5回実施した。

3.4 実験・解析結果

3.4.1 外形形状と加工荷重

実験により得られた各逐次段階における外形形状の変化をFig. 11に示す。また、加工荷重 - 変位曲線をFig. 12に示す。なお、外形形状変化の逐次間隔は4mmである。

図から明らかなように歯形の成形プロセスが詳細に確認できる。最終逐次段階における加工品とSCM20材の加工品を比較したところ同様な形状であった。すなわち、モデル実験は現実の鍛造加工現象をよくシミュレートしているものとする。加工荷重は、ストローク初期でなだらかに上昇し、その後、閉塞状態となるストローク終端まで急激に

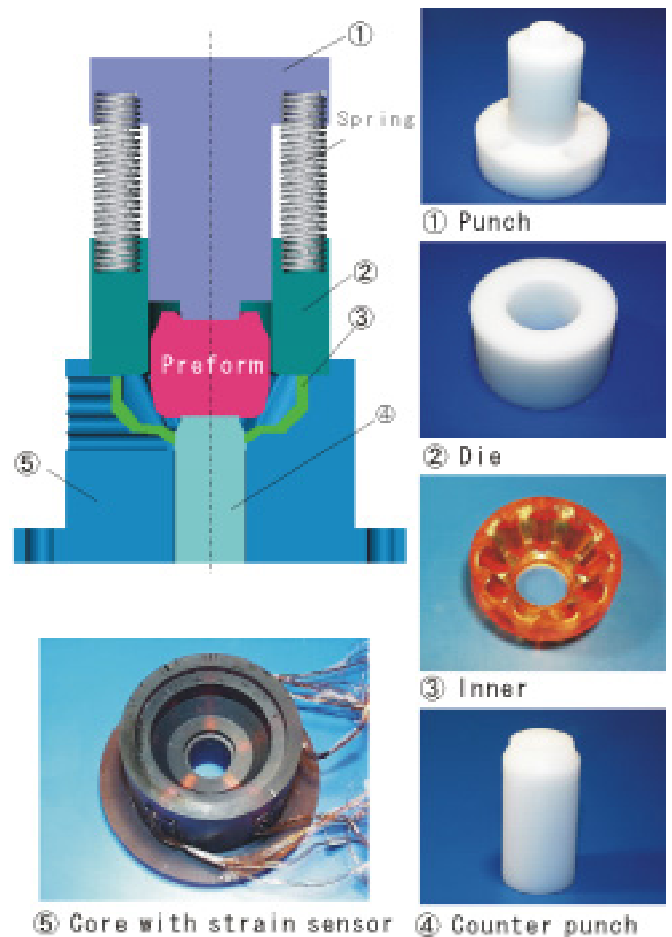


Fig.10 Experimental apparatus for the model simulation

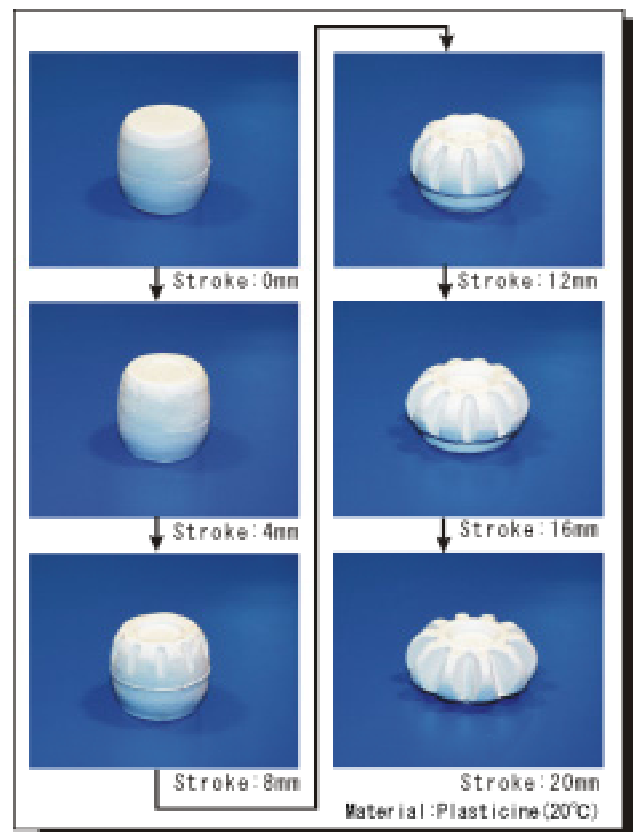


Fig.11 Sequential figures representing shapes obtained by physical forming simulation

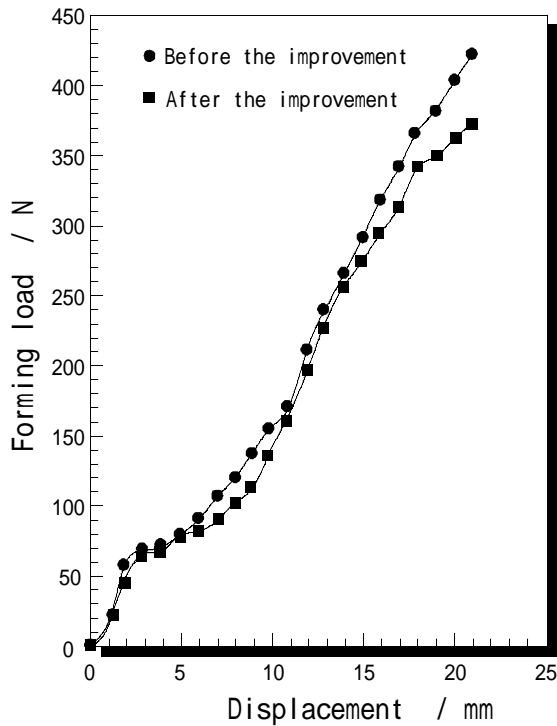


Fig.12 Effect of ridgeline shape on forming load - punch displacement curves

上昇する。外形形状の変化では、パンチの変位が5 mm付近までは単軸圧縮になっており、たる状に成形されている。ストロークが5 mmを過ぎると材料がダイスへ接触し、歯形成が開始されるために加工荷重が急激に上昇する。いずれの逐次段階においても「改良後」の加工荷重は低下しており、ピーク値(最終ストローク)で50Nの差があることで金型寿命の伸長が期待できる。すなわち、金型破損部位である歯形稜線部分において、稜線形状変更の効果が顕著である。

3.4.2 モデル型内部の弾性ひずみ分布

特定の位置で計測された弾性ひずみは、モデル型全体の応力を計算するために線形補間により計算格子点上の値へ変換される。歯形部の3次元表示についてその表示方法をFig.13に示す。歯形部の3次元表示は、ひずみセンサーの計測断面が歯先・歯底・稜線の3ヶ所であるため、それを直線的に結ぶことで表現した。なお、歯先と歯底間の角度は歯数が10であるため 18° となる。また、稜線は歯先と歯底の中間点を測定断面とした。

「改良前」と「改良後」のそれぞれにおける最終ストロークでの方向の弾性ひずみ分布をFig.14に示す。なお、本報で表示している全ての弾性ひずみ・弾性応力結果の断面表示は、右側断面が歯先で、左側断面が歯底で切断し、3次元的に表示した。

歯形上端面の歯先部において、「改良前」で 200μ 以上のひずみ領域が「改良後」にその値が低下し、領域が狭くなっている。歯先断面では、設計変更によりひずみの集中

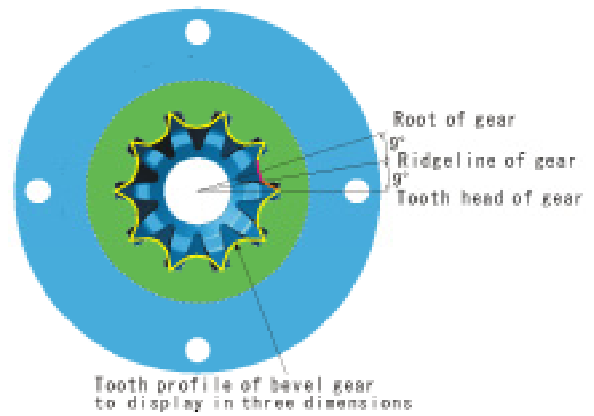


Fig.13 A method to display tooth profile of the bevel gear in three dimensions

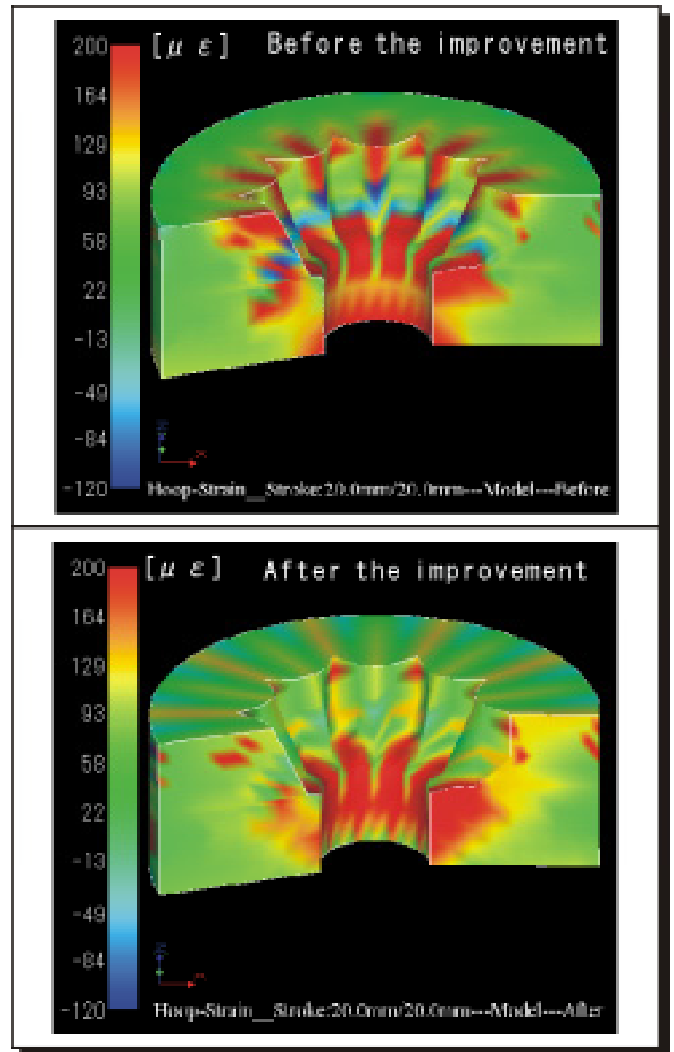


Fig.14 Figures representing elastic strain distributions

状態が緩和されているのがわかる。ここで注意すべきは、「改良前」で歯底部にTensionモードとCompressionモードのひずみが近接していることである。こうしたひずみの急変状態は、少なからず金型寿命低下の原因となり得るものである。この状態が「改良後」には存在せず、同一モードのひずみで分布している。

3.4.3 実金型における応力分布の推定

測定した弾性ひずみから弾性応力値への変換は、フックの法則より、3軸 (r , θ , z) の場合、以下の式となる。

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_r + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\} \quad (3)$$

ここで、

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$: モデル型内のひずみセンサーの測定値

E : モデル型のヤング率 (縦弾性係数) = 0.8GPa

ν : ポアソン比 = 0.3

上記で得られたモデル型の応力分布から各種物理量を以下のように設定し、実金型における応力分布を推定した。

E_R : 実金型 (SKH51) のヤング率 = 221GPa

E_M : モデル型のヤング率 = 0.8GPa

F_R : 被加工材 (SCM20) の実測変形抵抗 (20)

$F_R = 700\text{MPa}$

F_M : プラスティシンの実測変形抵抗 (20)

$F_M = 450\text{kPa} = 0.45\text{MPa}$

P_M : モデル型における実測加工荷重 (20)

$P_M = 421, 373\text{N}$ 【改良前, 改良後】

P_R : 実金型における加工荷重

$P_R = 1961\text{kN}$ (変形抵抗換算による推定値)

a) 塑性加工実験における相似則

被加工材料を等方性とし、幾何学的に相似なモデル型と実金型において、モデル型の加工時の単位面積に作用する力を P_M とすれば、実金型の作用力 P_R は、(4) 式となる。

$$P_R = \frac{P_M}{KX \cdot N^2} = \frac{P_M \cdot Y_R}{Y_M \cdot N^2} \quad (4)$$

ここで、

KX : 変形抵抗比

Y_M : プラスティシンの実測変形抵抗

Y_R : 実金属材料の実測変形抵抗

N : 相似モデルの寸法縮尺 (等倍では $N=1$)

b) モデル型から実金型への応力変換

モデル型の r 方向の応力とひずみの関係式は弾性の範囲で以下ようになる。

$$\sigma_{Mr} = \frac{E_M}{1+\nu_M} \left\{ \varepsilon_{Mr} + \frac{\nu_M}{1-2\nu_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\} \quad (5)$$

ここで、

σ_{Mr} : モデル型の r 方向の弾性応力

E_M : モデル型材料のヤング率

ν_M : モデル型材料のポアソン比

ε_{Mr} : モデル型の r 方向の弾性ひずみ

$\varepsilon_{M\theta}$: モデル型の θ 方向の弾性ひずみ

ε_{Mz} : モデル型の z 方向の弾性ひずみ

実金型の場合は以下ようになる。

$$\sigma_{Rr} = \frac{E_R}{1+\nu_R} \left\{ \varepsilon_{Rr} + \frac{\nu_R}{1-2\nu_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) \right\} \quad (6)$$

ここで、

σ_{Rr} : 実金型の r 方向の弾性応力

E_R : 実金型材料のヤング率

ν_R : 実金型材料のポアソン比

ε_{Rr} : 実金型の r 方向の弾性ひずみ

$\varepsilon_{R\theta}$: 実金型の θ 方向の弾性ひずみ

ε_{Rz} : 実金型の z 方向の弾性ひずみ

モデル型と実金型の任意部位における応力を (4) 式から変形抵抗比で表し、さらに (5) 式と (6) 式の関係から

$$\varepsilon_{Rr} + \frac{\nu_R}{1-2\nu_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) =$$

$$\frac{P_R E_M (1+\nu_R)}{P_M E_R (1+\nu_M)} \left\{ \varepsilon_{Mr} + \frac{\nu_M}{1-2\nu_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

、 z 方向についても同様とし、さらに

$$A = \frac{P_R E_M (1+\nu_R)}{P_M E_R (1+\nu_M)} \left\{ \varepsilon_{Mr} + \frac{\nu_M}{1-2\nu_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

$$B = \frac{P_R E_M (1+\nu_R)}{P_M E_R (1+\nu_M)} \left\{ \varepsilon_{M\theta} + \frac{\nu_M}{1-2\nu_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

$$C = \frac{P_R E_M (1+\nu_R)}{P_M E_R (1+\nu_M)} \left\{ \varepsilon_{Mz} + \frac{\nu_M}{1-2\nu_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

とおくと (A, B, C は既知)、

$$\varepsilon_{Rr} + \frac{\nu_R}{1-2\nu_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) = A \quad (7)$$

$$\varepsilon_{R\theta} + \frac{\nu_R}{1-2\nu_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) = B \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Rz} + \frac{\nu_R}{1-2\nu_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) = C \quad (9)$$

(7), (8), (9) 式を解くと

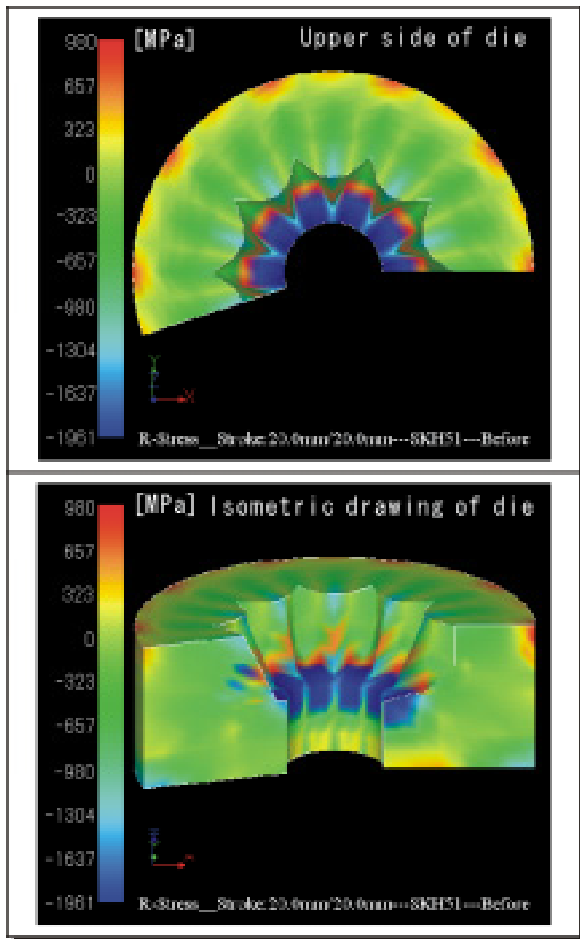


Fig.15 Figures representing elastic R-stress distributions in actual die [SKH51] (Before the improvement)

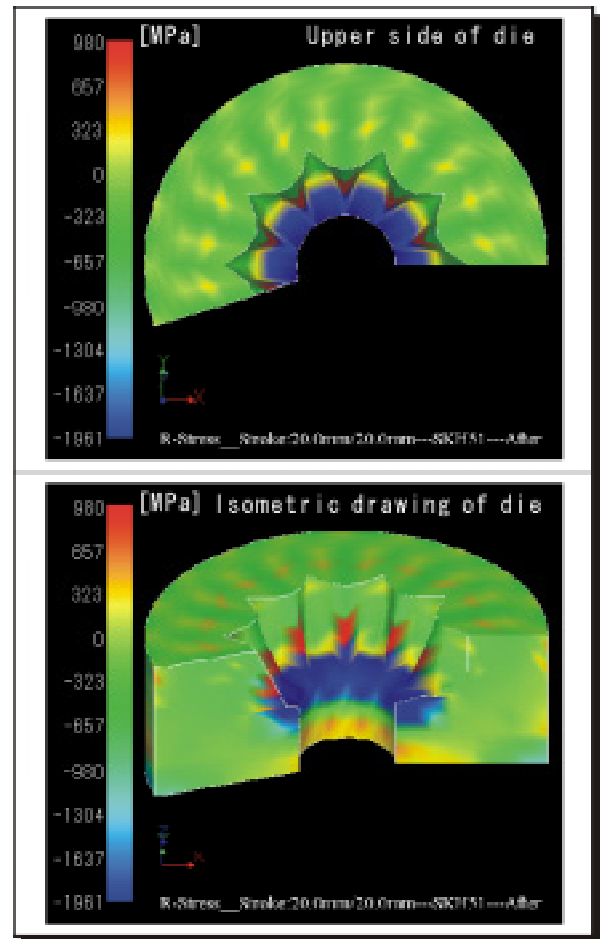


Fig.16 Figures representing elastic R-stress distributions in actual die [SKH51] (After the improvement)

$$\varepsilon_{Rr} = \frac{A - (B + C)v_R}{1 + v_R} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{R\theta} = \frac{B - (A + C)v_R}{1 + v_R} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{Rz} = \frac{C - (A + B)v_R}{1 + v_R} \quad (12)$$

得られたひずみ値を(1)～(3)式へ代入すると実金型における弾性応力が得られる。「改良前」と「改良後」の実金型(SKH51材)の最終ストロークにおけるr方向の弾性応力分布をそれぞれFig.15, Fig.16に示す。歯形稜線部において「改良前」は980MPa以上のTension Stress領域が存在するが、「改良後」はこれが300MPa程度へ低下している。

4. 結 言

本研究では、金型内部応力可視化システムを用いたモデル実験・解析によりクロム・モリブデン鋼SCM20材を素材とするベベルギヤの冷間鍛造における「型の弾性変形」解析を実施した。金型の破損部位である稜線部において、「R0.8」から「R0.8～R2 徐変」へ設計変更した効果が定量

的に解析でき、寿命伸長を達成できた。

謝 辞

研究を進めるに当たり、有益な助言を賜りました鹿児島大学工学部 中西賢二教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 柳本潤：塑性と加工, 43, 316(2002)
- 2) 湯川伸樹：塑性と加工, 43, 322(2002)
- 3) 中西賢二, 牟禮雄二：塑性と加工, 36, 1300(1995)
- 4) K.Nakanishi, Y.Mure: Advanced Technology of Plasticity, 1, 397(1996)
- 5) 牟禮雄二：「塑性加工におけるシミュレーション技術を採用した最適化プロセス設計法」, 学位論文(1997)
- 6) 牟禮雄二：「金型技術高度化パイロット事業技術講演論文集」, 鹿児島県金型技術開発推進協議会(1996)p.23
- 7) 松原茂雄, 工藤英明：塑性と加工, 32, 868(1991)
- 8) 小島之夫：塑性と加工, 37, 951(1996)
- 9) 牟禮雄二：鹿児島県工業技術センター平成13年度研究成果発表会予稿集(2001)p.34