# 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 configulation 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<sup>1),2)</sup>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<sup>3 >- 5 )</sup>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

に金型の開発と改良を実施してきた<sup>6</sup>、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<sup>7),8)</sup>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<sup>9</sup>)。

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,歯形成形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。

<sup>(</sup>本研究は,執筆者が出向中に実施したものである)



Fig. 1 Dimensions and photograph of bevel gear



(a) Before the improvement





破損部位は,(a)の太線の内,楕円で示す歯形稜線部分であ る。歯形稜線部分の形状を(a)ではR0.8(以下,「改良前」 と呼ぶ)と(b)ではR0.8~R2まで滑らかに変化(以下,「改 良後」と呼ぶ)の2条件に設定し,金型内部応力に及ぼす 歯形稜線形状の影響を定量的に明らかにした。

2.2 モデル材料

モデル実験では, 鍛造加工の被加工材料として油粘土で あるプラスティシンを使用した。プラスティシンは, 塑性 加工過程における素材内部の塑性流れを実験的に再現する のに有用なモデル材料である。ただし, プラスティシンを 用いて塑性加工のモデル実験を行う場合は, プラスティシ



Fig. 3 Flow curves measured by uniaxial compression test of Plasticine



Fig. 4 Flow curve measured by uniaxial compression test of SCM20

ンの変形特性を検討対象とする金属材料の変形特性に類似 させる必要がある。

2.2.1 プラスティシンの変形特性

変形特性は単軸圧縮試験により求めた。圧縮試験片は, プラスティシンを真空土練機で混練・脱気後,円柱状に押 出し成形し,直径30mm,高さ30mmに切断したものである。 潤滑剤としてワセリンを使用した。単軸圧縮試験は,サブ プレス化した圧縮試験装置を油圧プレスで加圧した。加工 速度は20mm/sである。プラスティシンの温度が0,10,10, 20,40の場合の応力-ひずみ曲線をFig.3に示す。図 から明らかなようにプラスティシンの温度が0,10では, 加工硬化状態の応力-ひずみ曲線を示す。また,20では 緩やかな加工硬化状態を示し,40では定常変形状態(加 工硬化率 0)の応力-ひずみ曲線となる。

#### 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×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×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1mm/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。1mm/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:1mm/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

モデル型と内蔵ケース, ひずみ計測装置(リモートスキャ ナー,コントローラ)およびデータ集計・解析装置として のPCで構成される。測定速度は,300点/秒である。ひずみ 計測とデータ処理の流れは,まず,加圧装置(プレス等) により鍛造加工を開始する。次に,モデル型内に埋め込ま れたひずみセンサーがモデル材料の塑性変形に伴う型への 反力を感知し,電気信号としてリモートスキャナーへ伝達 される。ここでメモリされた測定結果はテキストファイル として記録メディアへ保存され,同時にデータ集計・解析 装置としてのPCへ転送される。その後,処理ソフトにより 弾性ひずみ分布の計算を経て最終的にモデル型内部の3次 元的な弾性応力分布が定量的に可視化される。

3.2 モデル型の概要

金型の弾性変形実験に用いたモデル型により,型の一部 あるいは全体のr, ,Z方向の弾性応力分布を時系列的に 可視化する。モデル型の内部には弾性ひずみを検知するた めにひずみセンサーを埋め込んだ。

3.2.1 モデル型の作製とセンサーの埋め込み

歯形成形用のモデル型(以下,コアと呼ぶ)へのひずみ センサー埋め込みの概要図をFig.8に示す。粗形状のコア は,予め作製しておいた型枠へ2液混合型エポキシ樹脂を 注型し,硬化させることで得られる。樹脂の硬化後に型枠 から粗形状のコアを取り出し,コアの上下端面・外周面・ 内周面を切削にて仕上げた後,ひずみセンサー埋め込み用 の穴を穿孔する。続いて,同一樹脂で予め作製しておいた 板チップにひずみセンサーを貼り付けてコアの穴部に差し 込む。板状チップと穴部の隙間にはコアと同種の2液混合 型エポキシ樹脂を流し込み,硬化させることで板状チップ を確実に固定する。以上により同一材質の樹脂により均質 モデルを作製することが可能で,コア内部に空隙が存在し なくなる。以上の作製方法により連続体としてのモデル型 が得られる。1つの測定断面におけるひずみセンサーの配 置図をFig.9に示す。コアの弾性ひずみ測定部は上下方向 に7層とした。また,r方向, 方向,Z方向の弾性ひずみ を測定するためにひずみセンサーを各方向にそれぞれ30点 埋め込んだ。コア全体の測定点は90点である。

可視化システムにおいては任意の位置にひずみセンサー の埋め込みが可能である。そのため,応力集中部位や型の 破損部位および特に計測したい部位を指定することができ る。もちろんモデル型全体の応力分布を把握したい場合は 全体的にひずみセンサーを配置することで対応可能である が,軸対称問題の場合は,中心軸を通る切断面への埋め込 みのみで全体的な応力分布を把握することができる。特定 位置で計測された弾性ひずみは,モデル型全体の応力分布 を計算するために線形補間により3次元表示のための格子 点上のひずみ値へ変換される。



Fig. 8 Schematic illustration explaining how to insert strain sensors into the die



Fig. 9 A figure representing arrangement of strain sensors in one measurement section

## 3.2.2 モデル型と実金型との相似性

鍛造の加工現象は大変複雑である。加工現象の可視化は 複雑な現象を分解して個々の現象を解明し,相互の関係を 明確にするものである。樹脂製のモデル型を用いたモデル 実験は,少ない費用で多数の基礎データが得られるので大 きなメリットがある反面,モデル実験から得られた結果を 実際の加工プロセスに適応する場合は,相似性が問題とな る。モデル型は,理想的には実際の金型と完全に相似した ものであることが望ましいが,現実的には厳密に一致する モデル型は得られない。上述の相似性としては,幾何学的 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(歯形成形前の素材)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テ ィシンを混練・脱気後,押出し冶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 ラスティシンの円柱素材からプリフォームを作製した。

歯形成形実験は、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様に塗 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 のと考える。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







⑤ Core with strain sensor ④ Counter punch Fig.10 Experimental apparatus for the model simulation



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



上昇する。外形形状の変化では,パンチの変位が5mm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5mmを過ぎると材料がダイスへ接触し,歯形 成形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, ,Z)の場合,以下の式となる。

$$\sigma_{r} = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{r} + \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{z}) \right\}$$
(1)

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

$$\sigma_{z} = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_{z} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{r} + \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{z}) \right\}$$
(3)

ここで,

- $\mathcal{E}_r, \mathcal{E}_{\theta}, \mathcal{E}_z$ :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

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。

ER:実金型 (SKH51)のヤング率 = 221GPa

Em: モデル型のヤング率 = 0.8GPa

- FR: 被加工材(SCM20)の実測変形抵抗(20)  $F_R = 700MPa$
- Fm:プラスティシンの実測変形抵抗(20)  $F_{m} = 450 kPa = 0.45 MPa$
- Pm:モデル型における実測加工荷重(20) Pm= 421,373N 【改良前,改良後】
- Pr: 実金型における加工荷重 PR= 1961kN (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 ,乙方向についても同様とし,さらに 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<sub>M</sub>とすれば,実金型の作用力 P<sub>R</sub>は,(4)式となる。

$$P_{R} = \frac{P_{M}}{KX \cdot N^{2}} = \frac{P_{M} \cdot Y_{R}}{Y_{M} \cdot N^{2}}$$
(4)

ここで,

- K X : 变形抵抗比
- *Y<sub>M</sub>*: プラスティシンの実測変形抵抗
- Y<sub>R</sub>: 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 で以下のようになる。

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

ここで,

- *G*<sub>M</sub>: : 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
- *V<sub>M</sub>*:モデル型材料のポアソン比
- $\varepsilon_{Mr}$ :モデル型のr方向の弾性ひずみ
- $\varepsilon_{M\theta}$ :モデル型の $\theta$ 方向の弾性ひずみ

 $\mathcal{E}_{MZ}$ :モデル型のz方向の弾性ひずみ 実金型の場合は以下のようになる。

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

ここで,

- $\sigma_{Rr}$ :実金型のr方向の弾性応力
- *E<sub>R</sub>*:実金型材料のヤング率
- *V<sub>R</sub>*:実金型材料のポアソン比
- $\mathcal{E}_{Rr}$ :実金型のr方向の弾性ひずみ
- $\varepsilon_{R\theta}$ :実金型の $\theta$ 方向の弾性ひずみ
- $\mathcal{E}_{RZ}$ :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

$$\varepsilon_{Rr} + \frac{V_R}{1 - 2V_R} (\varepsilon_{Rr} + \varepsilon_{R\theta} + \varepsilon_{Rz}) = \frac{P_R E_M (1 + V_R)}{P_M E_E (1 + V_M)} \left\{ \varepsilon_{Mr} + \frac{V_M}{1 - 2V_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

$$A = \frac{P_R E_M (1 + v_R)}{P_M E_R (1 + v_M)} \left\{ \varepsilon_{Mr} + \frac{v_{Mr}}{1 - 2v_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$
$$B = \frac{P_R E_M (1 + v_R)}{P_M E_R (1 + v_M)} \left\{ \varepsilon_{M\theta} + \frac{v_{Mr}}{1 - 2v_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$
$$C = \frac{P_R E_M (1 + v_R)}{P_M E_R (1 + v_M)} \left\{ \varepsilon_{Mz} + \frac{v_{Mr}}{1 - 2v_M} (\varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{M\theta} + \varepsilon_{Mz}) \right\}$$

とおくと(A, B, Cは既知),

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

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

$$\mathcal{E}_{Rz} + \frac{\mathcal{V}_R}{1 - 2\mathcal{V}_R} (\mathcal{E}_{Rr} + \mathcal{E}_{R\theta} + \mathcal{E}_{Rz}) = C \qquad (9)$$

(7),(8),(9)式を解くと



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

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

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

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

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



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

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 援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