

ベベルギヤの冷間鍛造における非定常塑性変形解析

(株)鹿児島頭脳センター 松田豪彦*, 牟禮雄二**

Non-steady State Plastic Deformation Analysis in Cold-forging of Bevel Gear

Takehiko MATSUDA and Yuji MURE

鍛造加工の最適な加工プロセス設計を行うには、実現象に即した加工現象の解明が必要である。そのため、実験をもとに境界条件や変形特性等を考慮して解析を行う汎用実験加工シミュレーションシステムを用い、ベベルギヤ（傘歯車）の鍛造加工現象の解析を行った。その結果、塑性流れ、相当ひずみ分布等の項目でベベルギヤの鍛造加工現象を明らかにすることができた。

Keyword : 鍛造, ベベルギヤ, モデル実験, 実験シミュレーション

1. 緒 言

塑性加工品の寸法、形状および内部組織に対する要求は年々高くなる傾向にある。この要求に応えるために、加工中の塑性変形現象を明らかにし、型・プリフォーム設計や加工条件（加工温度、加工速度、潤滑）を最適化した加工プロセス設計を確立する必要がある。

塑性加工の中でも鍛造によって造られた製品は、強度が高く衝撃や繰り返し応力に耐えることができ、信頼性が高いという特徴がある。直角動力伝達部品として自動車のFF縦置きエンジン等に広く使われているベベルギヤは、鍛造加工により生産されている。ベベルギヤの歯形はJISに規定されているため精密鍛造に分類される。当該鍛造加工では閉塞的に鍛造するため金型寿命の低下がしばしば問題になっており、加工プロセス設計が非常に重要である。

現在、鍛造加工の加工プロセス設計を効率的に達成するため、数学モデルによる計算機シミュレーション（主に有限要素法）が用いられてきている^{1)~3)}。しかし、鍛造加工はひずみ速度が変動する非定常変形であることや、摩擦条件あるいは材料の変形特性を実状に反映させた定式化が難しいため、計算機シミュレーションの条件設定がしばしば問題になっている。そのため、実現象と解析結果を近似させるために何度もシミュレーションを繰り返しているという現状がある。

これらの問題に応えるため塑性加工における被加工材の変形過程を塑性流れ、速度ベクトル、相当ひずみ速度および相当ひずみ等の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を構築した^{4)~6)}。同システムは加工過程実験および同結果を基礎データとして数値計算を行い鍛造加工現象を解明するため、実現象に即した解析が可能

である。特に一様でない摩擦分布あるいは温度分布を伴った加工においても、その影響を受けた実験・解析結果が得られるため高い信頼性が期待できる。

本研究では、汎用実験加工シミュレーションシステムを用いて、モデル実験・解析により、ベベルギヤの冷間鍛造における非定常塑性変形現象を明らかにした。

2. シミュレーション実験のモデル化

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、SCM415Hと言う）を素材とするベベルギヤ（歯数16）の冷間鍛造である。ギヤの外観を図1に示す。加工素材のモデル材として塑性変形挙動が金属材料と類似しているプラスティシン（油粘土材料）を用いた。また、実験は等倍モデルで行った。

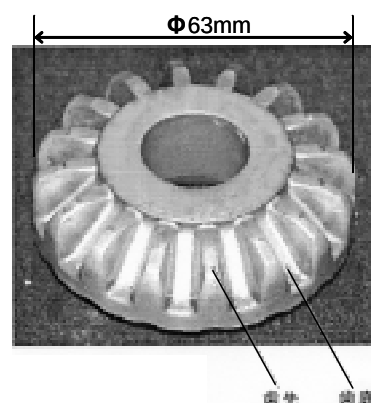


図1 ベベルギヤの外観

2.2 変形特性

プラスティシンを鍛造加工のモデル材として使用するには、変形特性を実金属材料SCM415Hに合わせる必要がある。そのため、SCM415Hおよびプラスティシンの変形抵抗試験を行い、それぞれの真応力-真ひずみ曲線を作成した。な

*素材開発部, **企画情報部
(本研究は執筆者らが出向中に実施したものである)

お、SCM415Hの試験片は750℃で30分間加熱し、焼鈍したものを使用した。SCM415Hの応力-ひずみ曲線と0℃、10℃、20℃および40℃におけるプラスチックの真応力-真ひずみ曲線を図2に示す。SCM415Hとプラスチックでは、真応力値が1000倍もの開きがあるため、両者の比較には同じ真ひずみ値区間「0.3～0.55」において(1)式による平均応力増加率を用いて相对比较を行った。

$$D_{ab} = (\sigma_b - \sigma_a) / \sigma_b \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

(D_{ab} : ab区間の平均応力増加率)

プラスチックの各温度条件における平均応力増加率を図3に示す。SCM415Hの応力増加率5.96%に対し、プラスチックは加工温度0℃で5.97%、10℃では7.26%、20℃では6.98%、40℃では0%であった。これより、プラスチックの加工温度0℃の条件とSCM415H常温における加工硬化の傾向が類似していると判断した。

2.3 摩擦特性

摩擦特性は、成形形状や加工荷重に大きく影響するためシミュレーション実験における考慮すべき重要な因子である。一般に圧縮加工においては、圧力が低い場合には摩擦応力が法線方向に比例する(クーロン摩擦)が、鍛造加工のように非常に高い圧力領域では、すべての摩擦面領域で摩擦応力は一定であり、その大きさはせん断抵抗に比例する。

$$|\tau_f| = m k, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (2)$$

(τ_f : 摩擦せん断応力, k : せん断変形抵抗)

本解析で取り扱う摩擦係数は、 m 値(せん断摩擦係数)であり、加工圧力の測定を必要とせず、試験片の寸法測定のみでせん断摩擦係数が得られるリング圧縮試験により摩擦特性の評価を行った。SCM415Hとプラスチックにおける摩擦係数 m を図4に示す。なお、SCM415Hでは潤滑処理法としてボンデ処理を、プラスチックの場合は潤滑剤として石けん水を用いた。両者ともほぼ $m=0.1$ 付近で近似していることがわかった。

また、潤滑剤に石けん水を用いてプラスチックの温度条件を0℃、10℃、20℃および40℃にして成形実験を行った。外形写真を図5に示す。現物形状と比較した結果、0℃における歯形の成形状態が最も現物に近かった。

以上により、SCM415Hの変形特性を再現するプラスチックのモデル実験における温度条件は0℃とし、潤滑剤は石けん水を使用した。

3. モデル実験と解析

3.1 モデル型とプリフォーム素材

実験用モデル型とモデル実験の概略図を図6に示す。実験用モデル型はギヤが形成されたダイスとパンチから構成され、いずれも2液混合型エポキシ樹脂により作製した。

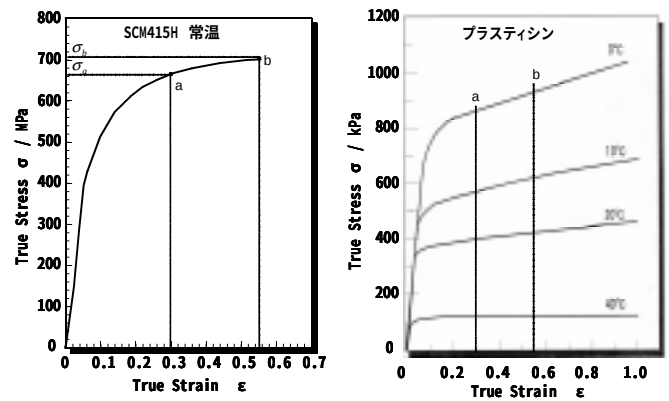


図2 真応力-真ひずみ曲線(SCM415Hとプラスチック)

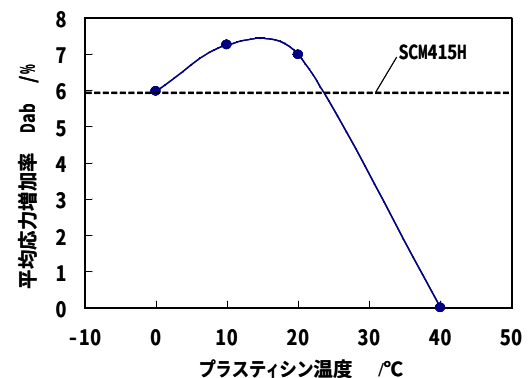


図3 プラスチックにおける平均応力増加率

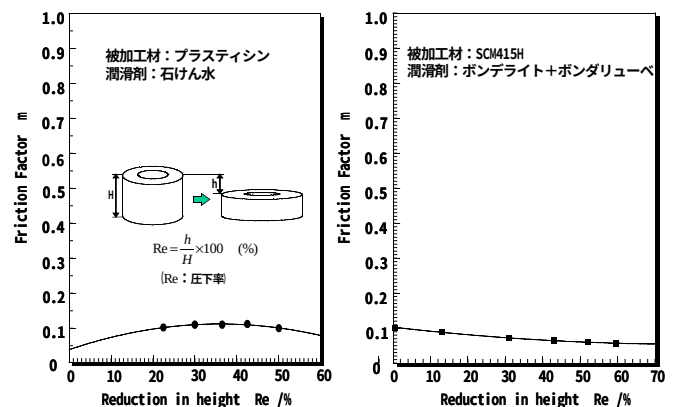


図4 摩擦係数(SCM415Hとプラスチック)

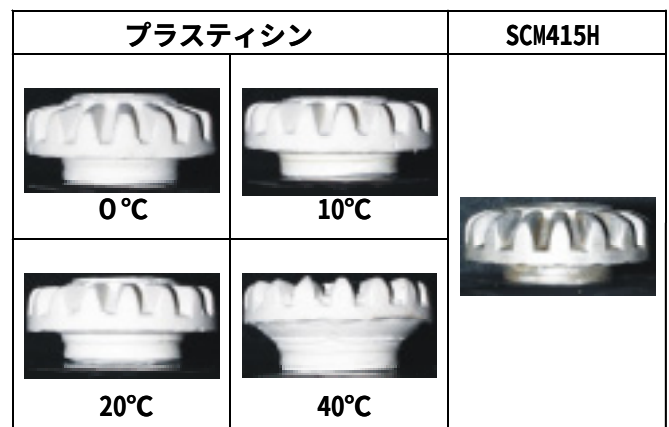


図5 プラスチックの各温度における加工品形状

プリフォーム素材（以下、プリフォームと言う）の作製手順を図7に示す。プリフォームは、真空土錬機でプラスチックを混錬・脱気後、成形治具により円筒物成形を経て実験前形状へ成形する。さらに中心軸を通過する面で半分分割し、一方の分割面に2mm間隔で格子模様を押印後、2体を合わせてプリフォームとした。格子模様を押印したプリフォームは、機械的性質を安定させるため40℃で2時間保持し、さらに恒温器内に20℃で20時間以上保持した。

3.2 実験条件と方法

実験装置と実験手順の概略図を図8に示す。油圧プレスにセットしたモデル型内に作製したプリフォームを入れ、逐次加工実験を実施する。逐次加工実験とは、実際の加工を数段階に分け、段階ごとに加工し、その都度、格子模様の変化を観察する実験である。プリフォームの半分分割面を歯先あるいは歯底に一致するようにモデル型内に入れることで、歯先あるいは歯底の内部塑性流動を可視化する。また、逐次段階は加工前を含め9段階に分け、潤滑剤として石けん水を型および素材に一様に塗布し、素材温度0℃、加工ストローク14mmおよび加工速度20mm/sで実験した。さらに再現性を確認するため3回の繰り返し実験を行った。なお、逐次加工実験中は、ロードセル、動ひずみ計、変位計及びレコーダで加工力、パンチ変位量および加工時間を連続記録した。実験後、逐次加工の各段階における格子点座標をデジタイザによりパソコンへ取り込んだ。

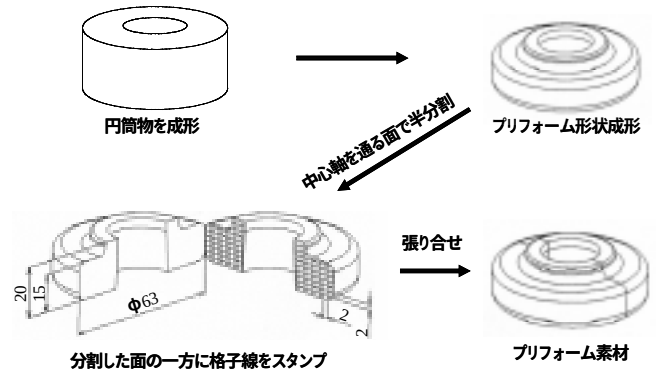


図7 プリフォーム素材の作製手順

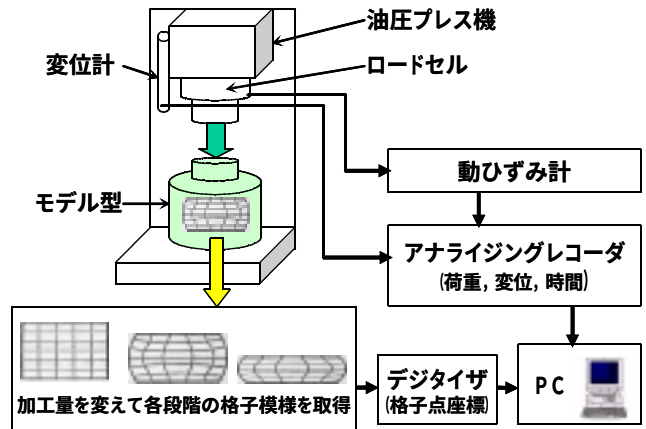


図8 実験装置と実験手順の概略図

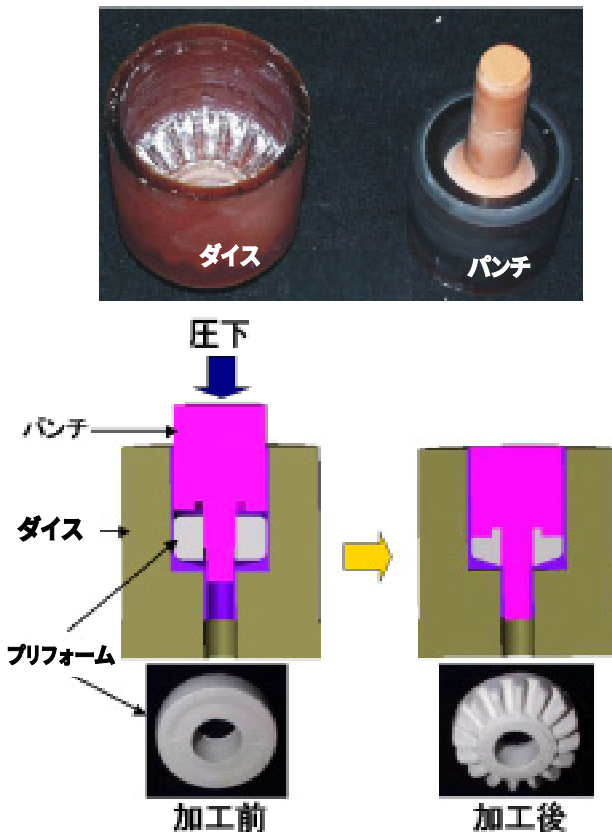


図6 実験用モデル型とモデル実験加工概略図

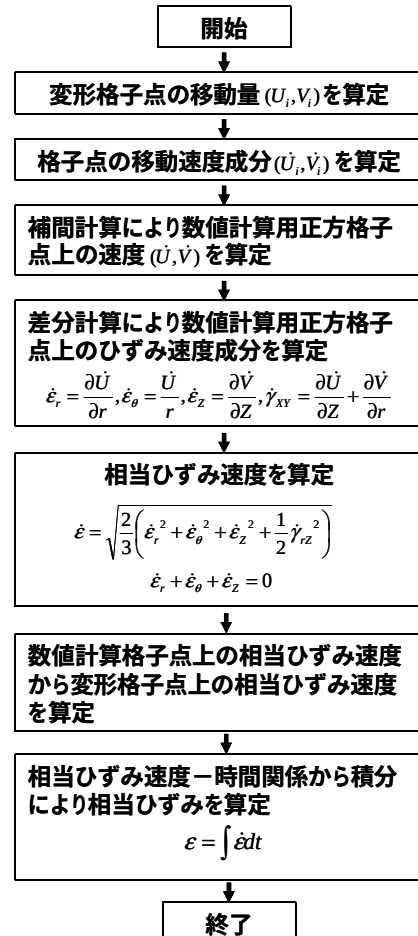


図9 数値計算のフローチャート

3.3 塑性変形解析方法

パソコンに取り込んだ格子点座標データから格子線解析法を用いて軸対称条件で数値計算した。データ処理に用いたプログラムのフローチャートを図9に示す。はじめに逐次変形で得たゆがんだ格子線上の格子点の移動距離を時間で微分（差分計算による）して、同格子点上の速度成分を算定した。次に、ひずみ速度を数値計算するために、観測面上に正方格子線（数値計算用正方格子線）を置いて速度成分を補間し、これを利用して差分計算によるひずみ速度成分および相当ひずみ速度の計算を行った。また、相当ひずみ値を相当ひずみ速度の時間積分により算定した。

4. 実験・解析結果

実験より得た各逐次段階における外形形状の変化を図10に、また、各逐次段階における半分断面の格子模様の変化を図11に示す。歯底、歯先ともに格子模様の変化から明らかに、プリフォーム外径部はモデル型と接触し拘束されているため、ストローク8.75mmあたりまでは材料のパ

ンチ側への変形が促進され、そこが拘束されるとストローク10.50mmあたりからボス部への変形へと塑性流動していることがわかる。また、ギヤ歯底部は著しく変形している。

計算に使用した格子模様と計算による速度ベクトル、相当ひずみ速度分布、相当ひずみ分布を図12に示す（加工前と内部変化が顕著な加工最終ストローク付近の結果を掲載した）。速度ベクトルから中心側への流動が確認できる。また、最終ストロークでギヤ部とボス部とで塑性流動方向が大きく変化することがわかる。相当ひずみと相当ひずみ速度分布は、歯底断面では歯底付近に集中しており、最終ストロークでは内部にも広がっている。歯先断面では相当ひずみが外径部に集中していることがわかる。

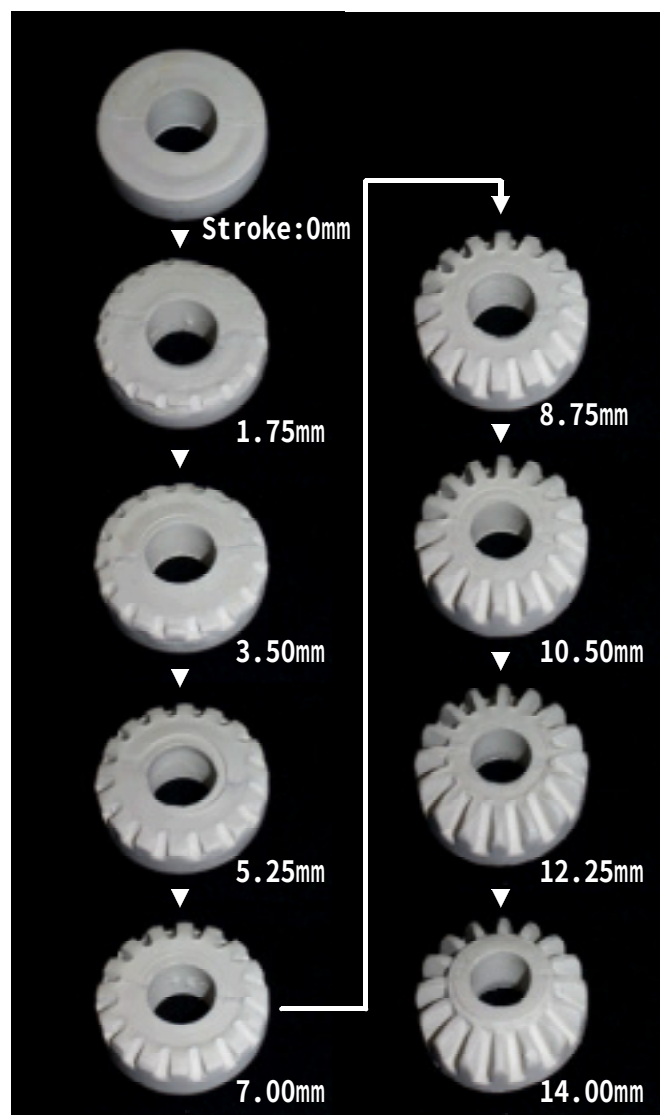
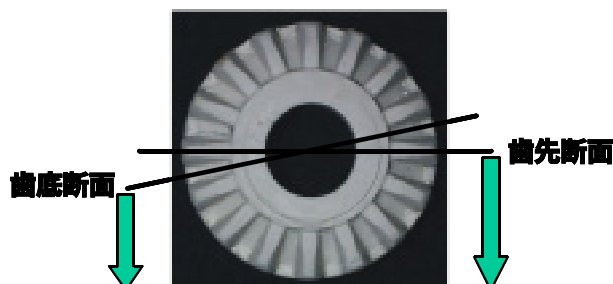


図10 各逐次段階における外形形状の変化

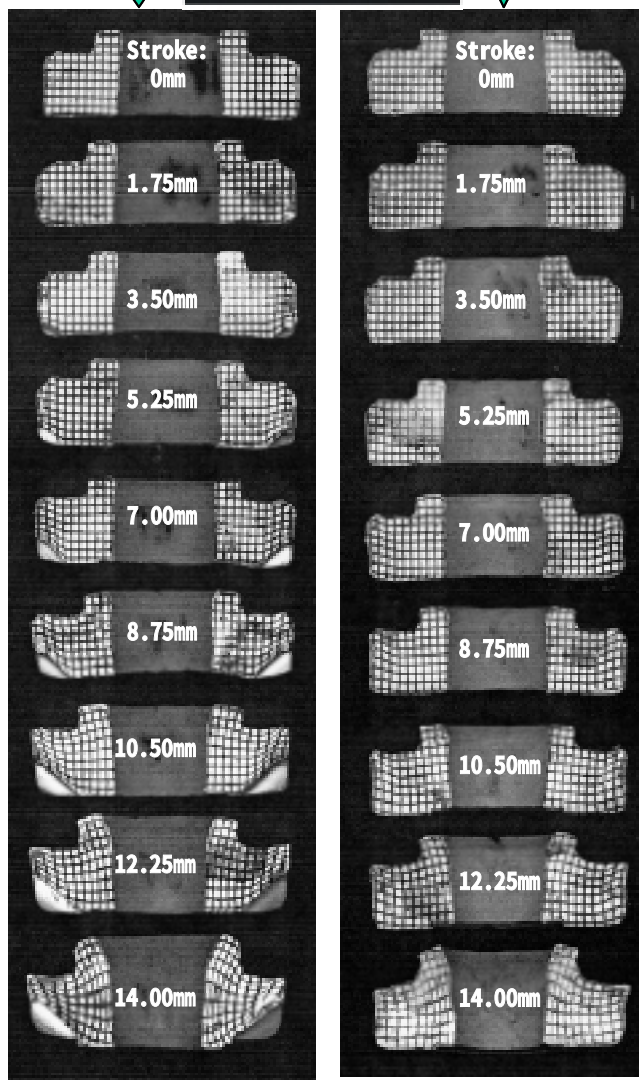


図11 各逐次段階における格子模様変化

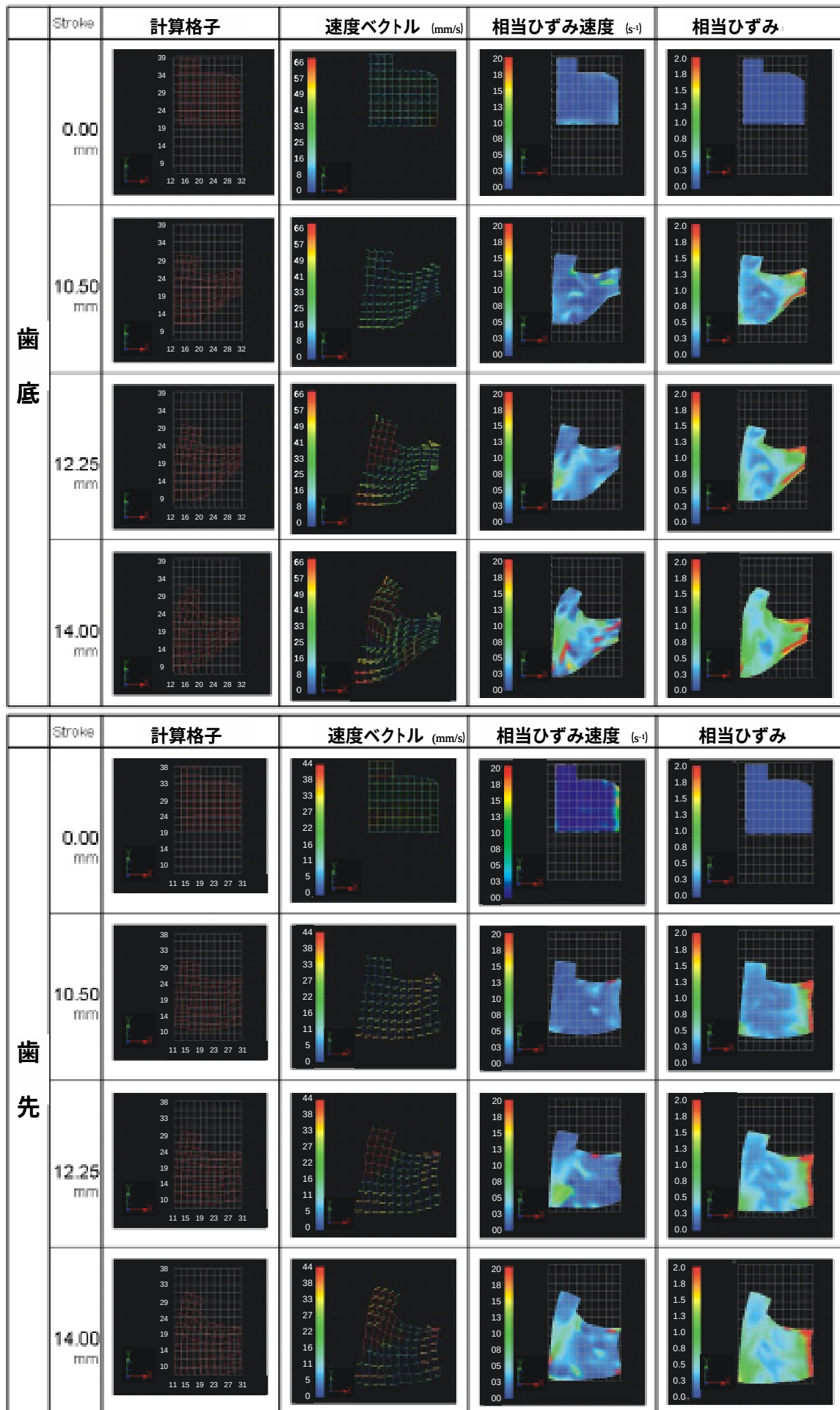


図12 歯底、歯先部の解析結果

5. 結 言

ベベルギヤの冷間鍛造について汎用実験加工シミュレーションシステムを用いた解析を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) 材料の塑性流れは、ストローク8.75mm/14.00mmあたりまではパンチ側へ変形し、それ以降はボス部への変形が進む。また、ギヤ歯底部は著しく変形する。
- (2) 最終ストローク付近の速度ベクトルは、中心側への流動方向を示し、最終ストローク時にギヤ部とボス部とで流動方向が大きく変化する。
- (3) 相当ひずみと相当ひずみ速度分布は、歯底断面では歯底付近に集中し、最終ストローク時には内部にも拡がる。歯先断面では外径部に相当ひずみが集中する。

本解析手法は塑性加工現象を容易に精度よく明らかにできるため、製品開発や改良に必要な型・プリフォーム設計や加工条件といった加工プロセスの最適化設計に非常に有

効である。

謝 辞

研究を行うに当たり、御協力を頂きました鹿児島大学工学部 中西賢二教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 金炫琪, 山中雅仁: 塑性と加工, **40**, 424 (1999)
- 2) 大橋隆弘, 本村貢: 日本機械学会論文集 (C編), **64**, 4485 (1998)
- 3) 加田修, 三木武司, 戸田正弘, 小坂田宏造: 日本機械学会論文集 (C編), **64**, 4914 (1998)
- 4) 牟禮雄二, 中西賢二: 特許 第3345662号 (2002)
- 5) 中西賢二, 牟禮雄二: 塑性と加工, **36**, 1300 (1995)
- 6) K.Nakanishi, Y.Mure: Advanced Technology of Plasticity, **1**, 397 (1996)