

# 応力低減構造を有する長寿命工具の開発

牟禮雄二\* , 中西賢二\*\*

## Development of Long-Life Forging Tool with Stress Reduction Structure

Yuji MURE and Kenji NAKANISHI

We propose a method of improving the tool life related to the elastic strain energy absorbed by the tool. First, we analyzed the heading tool for forming the M2 pan head screw, which had a structure configuration for reducing stress in the tool, using the finite element method (FEM) code. Second, the dimensions of the structure configuration of the tool with a hollow section were optimized by FEM analysis. Then, the tool life was increased successfully. The tool life of the developed heading tool was increased about 4 times compared with that of a conventional heading tool. Furthermore, We applied the stress reduction structure to a typical forging tool.

**Keyword :** Forging, Cold heading, Tool/die, FEM, fatigue fracture

### 1. 緒 言

十字穴付き小ねじ (M1.0~M2.6) の頭部を成形する冷間圧造では、近年、緩み防止やいたずら防止に伴う頭部形状の複雑化やステンレス鋼など素材の高強度化を要因として、工具寿命の低下が顕在化している。もし、圧造工具の寿命を向上できれば、工具費の低減のみならず工具交換の回数を減らすことで生産性を向上できるなど大きな経済的効果がある。

圧造工程と圧造工具を図1に示す。圧造工程は、M2ねじの場合、図1(a)に示すとおり直径1.67mm、高さ4.5mmの冷間圧造用炭素鋼 (以下、SWCH16A) を素材とし、予備成形でねじ頭部を膨らませた後、ねじ頭部を潰して十字穴を成形 (以下、主成形) する。図1(b)は中実構造の従来型圧造工具 (以下、従来工具) であり、使用を続けると工具先端の十字穴成形用の突起中央部に亀裂が発生する。

冷間圧造では、工具受圧面の繰返し応力による疲労破壊と摩耗が工具寿命の支配的要因となる。工具寿命の向上策として、これまでに工具表面へ緻密な炭化物や窒化物を被覆する硬質皮膜被覆法<sup>1)~3)</sup>、潤滑剤の改良<sup>4)</sup>など、特に、摩耗特性の向上に多くの注目が寄せられてきた。これに対し、疲労破壊については、専ら工具の高強度化<sup>5)~6)</sup>や最適熱処理条件の決定<sup>7)</sup>に主眼が置かれてきた。

筆者らは、圧造時に受ける多大な衝撃応力を分散させて疲労破壊部位に作用する応力を低減する工具構造<sup>8)</sup>を考案し、これにより工具寿命が著しく伸長することを明らかにした。考案した圧造工具は、敢えて工具剛性を低下させた中空構造 (以下、応力低減構造工具) であり、その受圧部

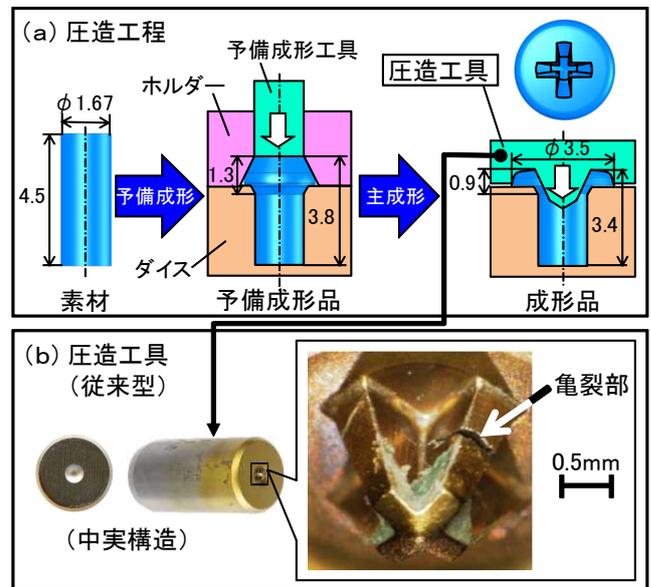


図1 圧造工程と圧造工具

は、微小な弾性変形を許容するバネ効果を有する。これにより受圧部の衝撃エネルギーを弾性ひずみエネルギーとして吸収し、工具の広範囲に応力分散させることができる。なお、過去に、圧造工具の寿命に関する報告<sup>9)~11)</sup>や金型の弾性変形を利用した精密鍛造に関する報告<sup>12)</sup>などはあるが、圧造工具に応力低減構造を設けることで寿命を向上させた報告はない。

本研究では、呼び径2mmの十字穴付きなべ頭小ねじ用の圧造工具を対象とし、有限要素解析により応力低減構造が工具寿命伸長に果たす役割を明らかにするとともに、最適な工具形状を決定し、実機での工具寿命試験により応力低減効果を検証した。さらに、応力低減構造を溝成形用鍛造工具へ横展開した。以上について報告する。

\*生産技術部

\*\*鹿児島大学 (現 鹿児島大学名誉教授)

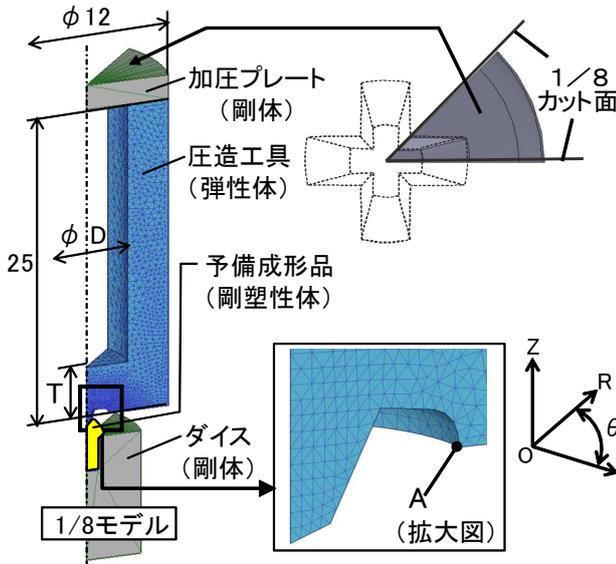


図2 圧造工具の解析モデルと座標系

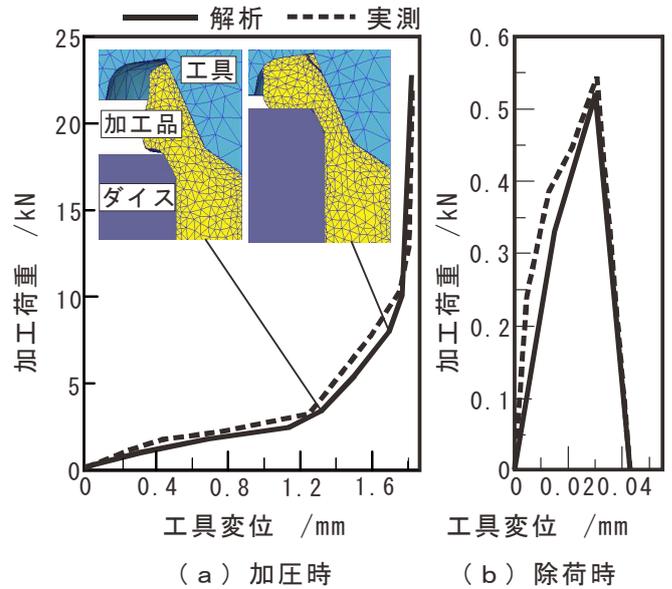


図3 加工荷重—工具変位曲線

2. 応力低減構造を有する圧造工具の有限要素解析

2.1 素材の変形抵抗

素材の変形抵抗は、SWCH16A材を直径5mm、高さ7.5mmに切削加工した円柱試験片を用い、単軸圧縮試験により測定した。単軸圧縮試験は、常温において加圧速度0.01mm/sで実施し、潤滑にはテフロンシートを用いた。試験結果から得られた変形抵抗の近似式  $\sigma = 655.2 \epsilon^{0.18}$  MPaを有限要素解析計算に用いた。

2.2 解析モデルと解析条件

解析には金属成形用ソフト (SFTC社製DEFORM-3D) を用いた。主成形における3次元解析モデルと座標系を図2に示す。解析モデルは、対称性を考慮して1/8モデルとし、圧造工具を弾性体、予備成形品を剛塑性体、加圧プレートとダイスを剛体として定義した。なお、応力低減構造工具の内部空間は円柱形とした。圧造工具の材質は、SKH59を仮定してヤング率228GPa、ポアソン比0.28とした。予備成形品形状は、図1に示す予備成形工具とホルダー (共に剛体) を用いて、後述する解析条件による剛塑性有限要素解析計算で定めた。

加圧時の解析は、圧造工具上端に設置した加圧プレートをZ軸のマイナス方向に加圧速度60mm/sで強制変位させ、拡大図のA部とダイスとの距離が0.1mmになったところで終了させた。除荷時の解析は、加圧終了時点の計算結果を初期値とし、加圧プレートと圧造工具を分離しない条件のもとで加圧プレートを加圧時とは逆方向に加圧速度60mm/sで強制変位させ、加圧プレートの負荷がゼロになるまで解析を実行した。工具と材料間の摩擦条件は、計算で得る成形品形状が実加工品の形状と同様となるクーロン摩擦係数  $\mu = 0.1$  を仮定した。

応力低減構造工具の空間寸法は、内径Dを1, 2, 4,

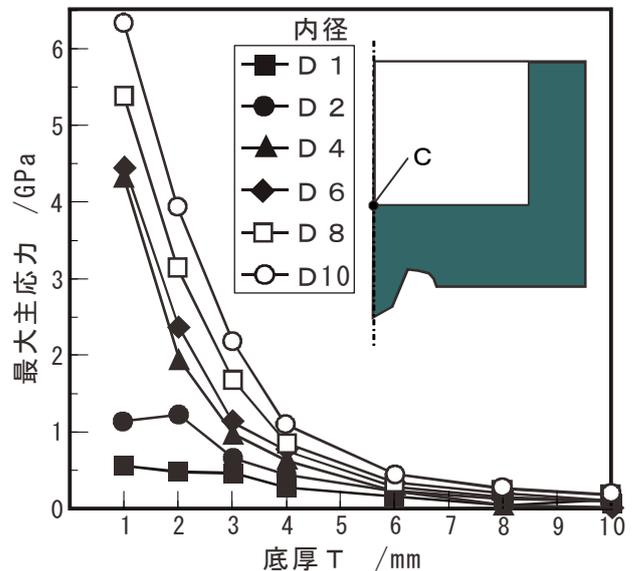


図4 加圧終了時の最大主応力に及ぼす底厚の影響

6, 8, 10mmの6条件, 底厚Tを1, 2, 3, 4, 6, 8, 10mmの7条件および空間無しの全43条件とした。これ以降の空間寸法は、例えばD=1mm, T=1mmをそれぞれD1, T1のように表記する。

2.3 解析結果と考察

2.3.1 加工荷重—工具変位曲線と外径形状

従来工具を用いた場合の加圧時および除荷時の加工荷重—工具変位曲線と各変位における外形形状を図3に示す。なお、図の破線は実機で得られた実測値である。

加圧時の加工荷重は、十字穴の穿孔過程の変位1.3mm付近まで漸増し、その後は頭部の据込みにより密閉状態となり、急激に上昇している。除荷時の加工荷重の最大値は、解析値では529N、実測値では543Nとなった。解析結果と実測値を比較すると、ほぼ同様の傾向を示しているため解析結果の信頼性は高いと言える。

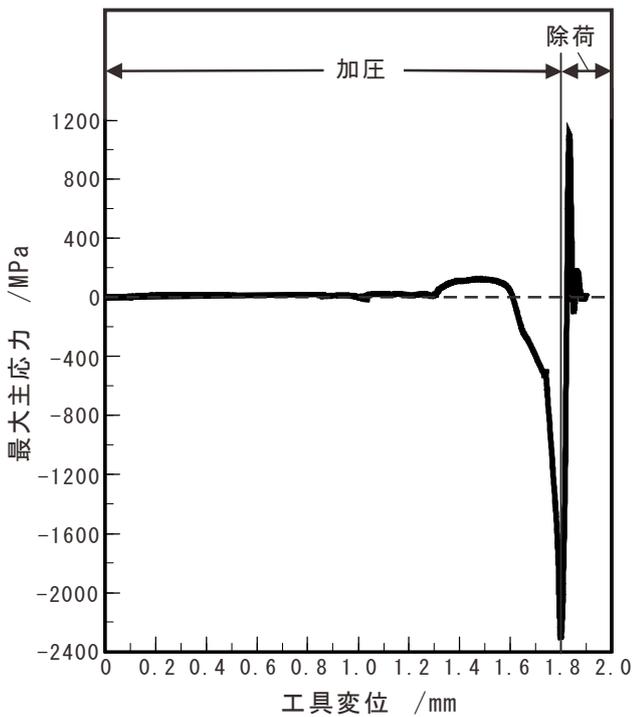


図5 破壊点での最大主応力-工具変位曲線

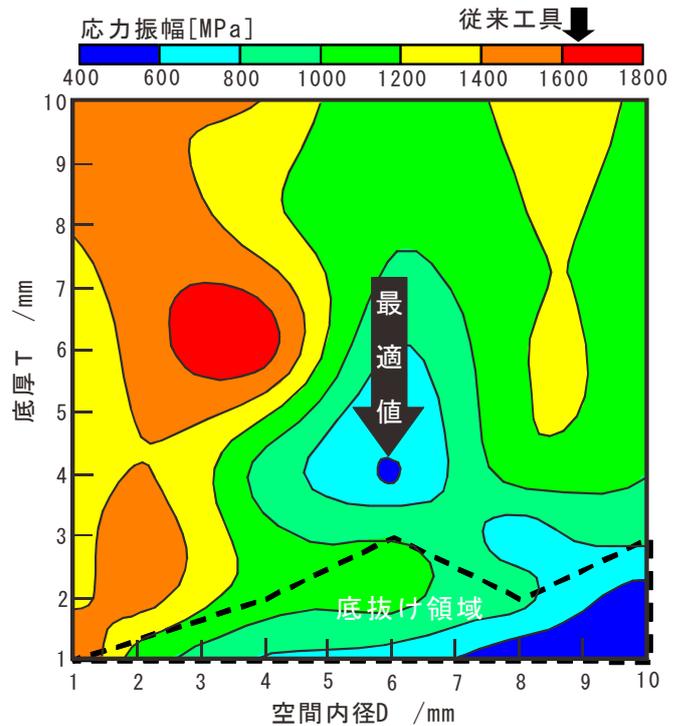


図6 破壊点での応力振幅に及ぼす底厚と空間内径の影響

### 2. 3. 2 工具空間の底部中央における最大主応力

応力低減構造工具の底部中央における加圧終了時の最大主応力に及ぼす底厚 $T$ の影響を図4に示す。対象は図中のC点である。C点の最大主応力は引張応力であり、いずれの内径 $D$ においても底厚 $T$ が6mm以上では0.5GPa以下であるが、底厚 $T$ が小さくなると増加し、6GPa以上となる場合もある。従って、加圧時に底抜けが推察されるため空間寸法の最適化には注意を要する。

### 2. 3. 3 空間寸法の最適化

従来工具を用いた場合の加圧および除荷時の工具破壊点における最大主応力-工具変位曲線を図5に示す。加圧時の最大主応力は工具変位1.3mm付近まではゼロ付近で推移するが、工具変位1.3~1.6mmでは加圧されているにもかかわらず、最大123MPaの引張応力となる。工具変位1.6mm以降は頭部の据込みにより圧縮応力となり、加圧終了時には2270MPaに達している。逆に除荷時は、引張応力が発生し、最大1080MPaとなった。除荷時の引張応力は、除荷開始後の弾性回復に伴う加工品と工具間の挟み込みによるものと考えられる。

加圧および除荷時の工具破壊点における最大主応力を基準とした応力振幅に及ぼす底厚 $T$ および空間内径 $D$ の影響を図6に示す。応力振幅は、応力低減構造工具の空間寸法が $D=6$ ,  $T=4$ の条件で最小となることがわかる。 $T=1\sim T=2$ において、応力振幅が600MPa以下となる条件があるが、いずれも図4のC点での最大主応力が1000MPa以上となり加圧時に底抜けが推察されるため破線内の領域は除外すべきである。これは、本研究で使用した高速度鋼の疲れ強さ

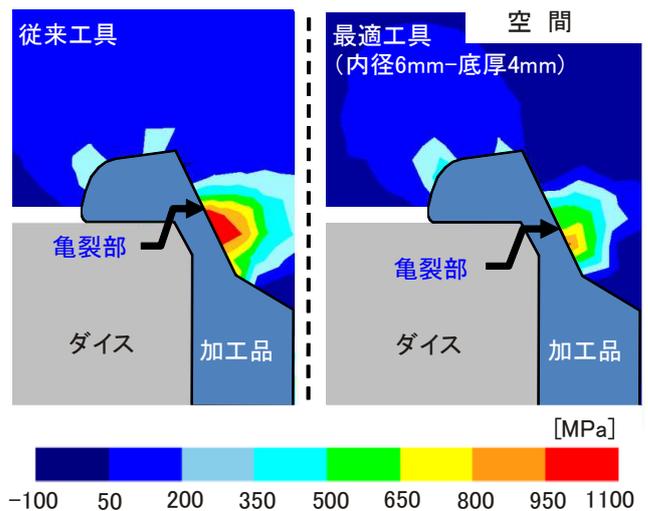


図7 除荷時における工具先端の最大主応力分布

が繰り返し回数 $10^4$ で約1000MPa<sup>1.3)</sup>であることを根拠とした除外条件である。

以上の考察に基づき、応力低減構造の空間寸法の最適値を応力振幅が最低値となる内径 $D=6$ mm、底厚 $T=4$ mmと定めた。従来工具と最適寸法 ( $D=6$ mm,  $T=4$ mm) の内部空間を有する応力低減構造工具を用いた除荷時における工具先端の最大主応力分布を図7に示す。従来工具と比較して応力低減構造工具の工具先端の十字穴成形部における最大主応力レベルは950MPa以上の領域がほとんど消滅するとともに、応力伝播範囲が縮小していることから応力低減効果を確認できた。さらに実機比較で、亀裂部が下方へ移動することも分った。

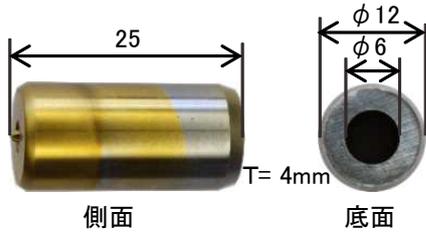


図8 寿命試験に用いた応力低減構造工具

### 2. 4 実機による圧造工具寿命の検証

有限要素解析結果に基づいて工具破壊点の応力振幅低減に有効な内径D=6 mm、底厚T=4 mmの内部空間を有する応力低減構造の工具を試作し、実機により成形品の十字穴ゲージへの喰付き確認、寸法確認および外観確認に基づき工具寿命を検証した。製作した工具の写真を図8に示す。寿命試験に供した工具本数は20本で、SWCH16Aコイル材を用いて加工速度60mm/sで寿命試験を実施した。試験の結果、従来工具の平均寿命2万4千個ショットに対し、応力低減構造工具では平均9万ショットであり、約4倍の工具寿命伸長を達成した。なお、寿命試験においては従来工具と変わりなく工具交換でき、規格どおりの加工品が得られた。

### 3. 応力低減構造の横展開

前章までに圧造工具に対して、敢えて剛性を低下させる応力低減構造を付与することによって工具寿命が伸長することを実証した。本章では、同構造の汎用性を確認するため、一般的な鍛造工具へ横展開した結果を以下に示す。

#### 3. 1 適用対象

自動車部品、電気機器部品あるいは建機部品を製造する多段の鍛造工程中の1工程を対象とする。適用対象の一例を図9に示す。当該工程において、プレス装置で溝成形用鍛造工具を強制変位させ、被加工品に底付きの溝などの凹部を成形する時、被加工品の上端面形状を崩さないようにするため、溝成形用鍛造工具が挿入される閉空間を有するホルダーで押さえ付ける場合がある。この場合、溝成形用鍛造工具は加圧軸方向へ圧縮され、同時に体積一定の制約から加圧軸と直交する方向へは膨張することになる。この作用によりホルダーの閉空間の出口付近で円周方向の引張応力が原因で溝成形時にクラックが発生しやすい。

#### 3. 2 溝成形用鍛造工具における応力低減構造

クラックの発生を抑制するには、溝成形用鍛造工具の押圧時における撓み方向の制御を行えばよい。そこで筆者は図10に示すとおりホルダーに作用する円周方向の引張応力を低減する溝成形用鍛造工具<sup>14)</sup>を考案した。すなわち、押圧時における溝成形用鍛造工具の加圧軸方向の微小な弾性変形(収縮)を促進し、同時に加圧軸と直交する方向の微小な弾性変形(膨張)を抑制させるための窪みを鍛造工

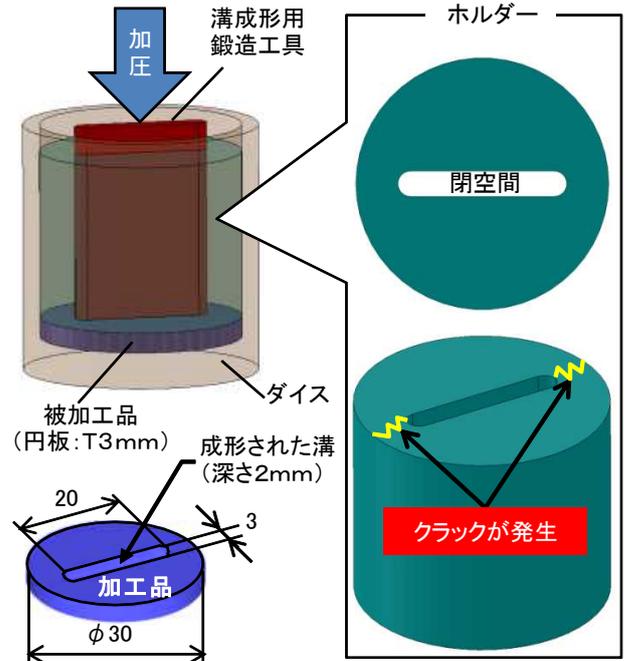


図9 溝成形用鍛造

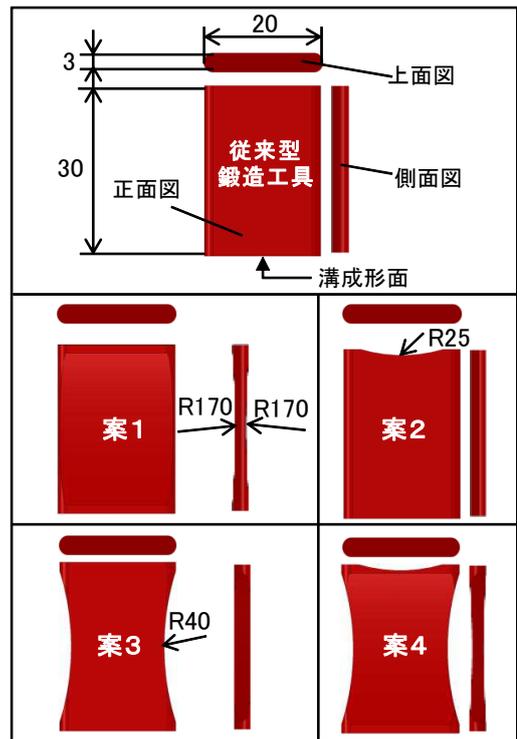


図10 溝成形用鍛造工具の応力低減構造

具自身に形成する。撓み制御を容易にするため、窪みを形成することで溝成形用鍛造工具の剛性を敢えて低下させている。溝成形用鍛造工具は、長方形の厚板状であり被加工品と接触しない部分が平面である場合は、少なくとも1つの面の端から端まで曲面となる窪みを有している。すなわち、案1では厚み方向の両側面に、案2では加圧軸方向で被加工品との接触部とは反対側の端面に、案3では幅方向の両側面にそれぞれ窪みを形成し、案4では案1～3で付与した全ての窪みを形成している。

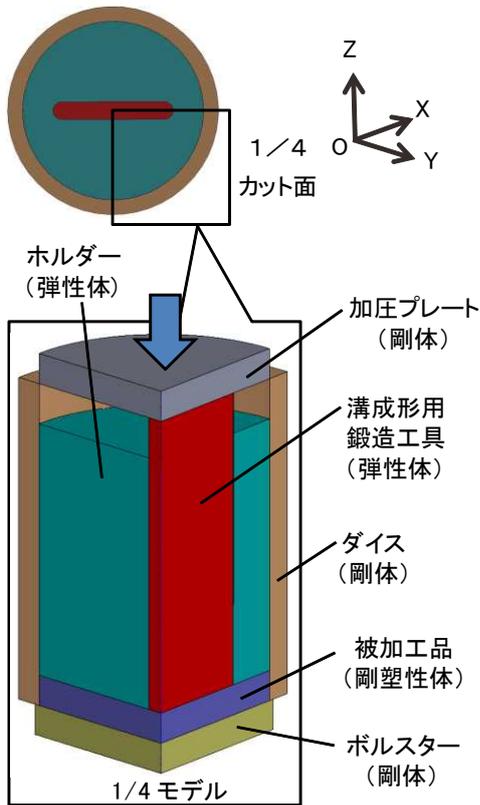


図11 溝成形用鍛造工具の解析モデルと座標系

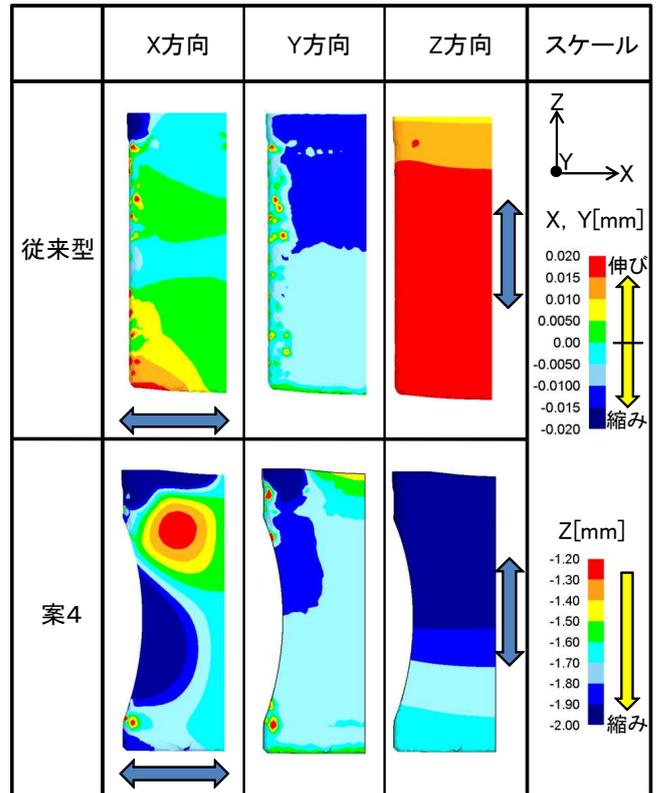


図12 溝成形用鍛造工具の変形量分布

### 3. 3 解析モデルと解析条件

溝成形用鍛造工具に対する応力低減構造（窪み付与）による応力低減効果を確認するため、溝成形の鍛造加工に対する有限要素解析を実施した。3次元解析モデルと座標系を図11に示す。

解析モデルは、対称性を考慮して1/4モデルとし、溝成形用鍛造工具とホルダーを弾性体、被加工品（炭素鋼S35Cを想定）を剛塑性体、加圧プレート、ダイスおよびボルスターを剛体として定義した。なお、被加工品の変形抵抗は金属成形用ソフト（既出のSFTC社製DEFORM-3D）に付属の標準データ  $\sigma = 813.6 \epsilon^{0.1}$  MPaで近似し、有限要素解析計算に用いた。なお、溝成形用鍛造工具の形状は、従来型を含め図10の5条件とした。

解析は、鍛造工具上端に設置した加圧プレートをZ軸のマイナス方向に20mm/sで強制変位させた。ホルダーは変位拘束せず、加圧軸方向への動作を許容した。しかし、加圧に伴い、溝成形用鍛造工具が加圧軸と直角する方向に広がる様に弾性変形するため、溝成形用鍛造工具とダイスとの間で徐々に拘束され、加圧軸方向への動きが抑制される。そのため、加圧中に被加工品の上端面は拘束されることになる。被加工品と接触する各モデルの摩擦条件は、せん断摩擦係数  $m = 0.1$ 、被加工品と接触しない各モデル間には、クーロン摩擦係数  $\mu = 0.3$  を仮定した。溝成形用鍛造工具の下端とボルスターとの距離が1mmになったところで解析を停止した。

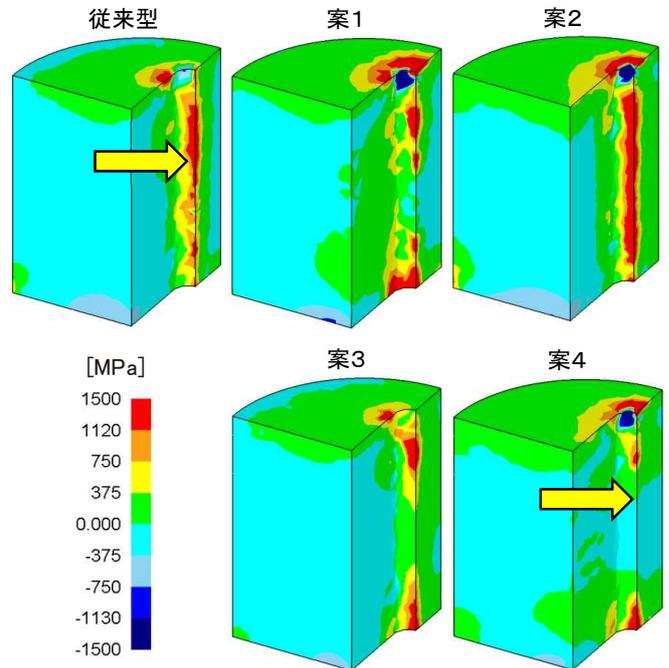


図13 ホルダーの最大主応力分布

### 3. 4 解析結果と考察

成形終了時（プレス下死点）における溝成形用鍛造工具の各軸方向の変形量に対するコンター表示を図12に示す。なお結果は、従来型と撓み制御効果が顕著であった案4を示している。

従来型のX（横幅）方向においては、ホルダーにクラックが発生する左端部において伸び（微小に膨張）が顕著で、

Y (厚み) 方向も左端部で伸び (微小に膨張) の大きい領域が発生している。これらの伸びによりホルダーの閉空間の内形が拡張され、クラックが発生する。これに対して、Z (加圧) 方向の縮み (微小に収縮) 量は抑制されている。

一方、案4では、X (横幅) 方向へは左端部において縮み (微小に収縮) が顕著で、Y (厚み) 方向も同様である。さらに、Z (加圧) 方向の縮み (微小に収縮) 量が従来型と比較して顕著である。以上から、溝成形鍛造工具自身に窪みを適切に形成することで撓み方向を制御できることが裏付けられた。

成形終了時 (プレス下死点) におけるホルダーの最大主応力分布を図13に示す。従来型の場合、ホルダーの端部分 (矢印) に応力集中部が発生している。これに対し、案1および案3では中央部で応力が低減し、案2ではかえって応力が增大することがわかる。案4では矢印部 (従来型の矢印と同位置) において応力低減効果が著しく、金型寿命の伸長が期待される。以上より、溝成形用鍛造工具の応力低減を行う際は、窪みの形成部位とその形状を適切に設定する必要があると言える。

#### 4. 結 言

応力低減構造を適用したねじ用圧造工具について、有限要素解析により最適な内部空間寸法を定めた。また、応力低減構造を一般的な鍛造工具へ横展開し、応力低減効果を確認した。本研究で得た主要事象を以下に記す。

- (1) 応力低減構造工具の底部中央では、最大主応力は引張応力となり、いずれの空間内径でも底厚  $T = 6 \text{ mm}$  以上では最大主応力が  $0.5 \text{ GPa}$  以下であり、底厚が小さくなると最大主応力は増大し、 $6 \text{ GPa}$  以上となる場合がある。
- (2) 応力低減構造工具の内部空間寸法を内径  $D = 6 \text{ mm}$ 、底厚  $T = 4 \text{ mm}$  に設定すると工具破壊点における最大主応力を基準とした応力振幅が最低値となる。本研究では同条件を最適値とした。

(3) 内径  $D = 6 \text{ mm}$ 、底厚  $T = 4 \text{ mm}$  の応力低減構造工具では従来工具と比較して工具先端の除荷時の最大主応力レベルが低下し、応力伝播範囲が縮小した。

(4) 内径  $D = 6 \text{ mm}$ 、底厚  $T = 4 \text{ mm}$  の応力低減構造工具を試作し、実機により工具寿命を検証した結果、約4倍の工具寿命伸長を達成した。

(5) 応力低減構造を一般的な鍛造工具へ適用する場合、厚み方向の両側面、加圧軸方向で被加工品との接触部とは反対側の端面および両側面に窪みを形成した場合、最も応力低減効果が顕著となる。

#### 謝 辞

ねじ圧造工具の試作実験についてご協力を頂いた (株) ユニオン精密殿に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 寺門一佳：塑性と加工，**45**，167-171(2004)
- 2) 土屋能成：塑性と加工，**46**，823-827(2005)
- 3) 森敏彦：塑性と加工，**48**，91-95(2007)
- 4) 北村憲彦，大森俊英：塑性と加工，**38**，991-995(1997)
- 5) 松田幸紀：塑性と加工，**42**，3-7(2001)
- 6) 横井大円：塑性と加工，**48**，85-90(2007)
- 7) 井上幸一郎：塑性と加工，**49**，501-505(2008)
- 8) 牟禮雄二ら：特許 第4428581号 (2009)
- 9) 石原康正，楠兼敬，大西利美，鈴木隆充：塑性と加工，**5**，167-171(2004)
- 10) 益田亮：塑性と加工，**8**，519-527(1967)
- 11) 田村清，富田正一，安藤美明，勝又武敏：塑性と加工，**13**，291-297(1972)
- 12) 石田均：塑性と加工，**44**，85-88(2003)
- 13) 村川義行：塑性と加工，**36**，906-910(1995)
- 14) 牟禮雄二：特開2012-258447号 (2012)