

座面にセレーションを有する極小ねじの圧造プロセスに関する研究 第1報 - 基本要素の組合せによる予備成形パンチ形状の最適化 -

牟禮雄二*, 小中浩志**, 東 俊浩**, 馬見新宗徳**, 杉山一雄**

A Study of Heading Process of Minimum Screw with Serration at Bearing Surface - Optimization of Preforming Punch Shape by Combining Basic Elements -

Yuji MURE, Hiroshi KONAKA, Toshihiro HIGASHI, Munenori MAMISHIN and Kazuo SUGIYAMA

The problem of the minimum screw which loosens by dynamic loading has been unsolved. It is very effective to attach serration to a bearing surface of a screw head in order to solve the slack of a screw. However, various problems have occurred by complicated metal flow. Therefore, it is necessary to improve the preform and the die configuration in conventional heading process. In this paper, preforming punch shape was optimized by using FEM analysis. We concluded that the preforming punch shape which performed piercing and upsetting simultaneously was the optimal.

Keyword : Rigid plastic FEM analysis, Heading, Cold forging, Process planning, Evaluation function

1. 緒 言

構造物の組付け時に使用されるねじは、脱着の容易さや低価格なことから運輸・精密・家電機器など極めて使用頻度が高い機械要素部品であり、標準化¹⁾がなされている。しかし、振動や衝撃が作用する環境下で使用されるねじ締結の緩みの問題は未だに存在し、緩みに起因する事故は後を絶たない。そのため、ねじ緩みの原因解明は工学的に解決すべき重要な研究課題²⁾³⁾となっている。ねじの緩み対策として、緩み防止部品の開発、ねじ山への接着剤の塗布、ねじ山の形状を緩みにくい機構とする研究⁴⁾、ねじ頭部の座面へセレーションを付与するなど様々な取り組みがなされている。

大量生産が必要な極小ねじは、製造コストや生産性を考慮し、冷間圧造^{5)~7)}と転造により製造されている。また、緩み防止のため、ねじ頭部の座面へセレーションなど異形要素が付与される傾向がある。しかし、異形要素の成形に起因して複雑な塑性流動が生じることで、成形ダイスやパンチの金型寿命低下が大きな問題となっている。そこで、従来の圧造プロセスにおけるプリフォーム形状や金型構造を見直す必要が生じている。圧造プロセスを最適化するためにはFEMに代表される計算機シミュレーション技術⁸⁾⁹⁾や実験シミュレーション技術¹⁰⁾が有用である。

本研究では、計算機シミュレーション技術として広範に利用されている剛塑性有限要素解析ソフトを利用して、1ダイ2ブロー方式の冷間圧造プロセスを最適化するにあたり、プリフォーム形状の見直しに主眼を置いた。すなわち

プリフォームを成形するための予備成形パンチを数種類の傾斜角を有する円錐体の基本要素でモデル化し、予備成形パンチ設計を基本要素の組み合わせ最適化問題と定義した。最適化のための評価関数として被加工材の成形性（加工荷重、塑性ひずみ、欠陥の有無等）および金型内部応力を考慮した。本報では、成形性を評価関数として、予備成形パンチの形状を最適化した結果について報告する。

2. 圧造プロセスの検討

2.1 対象形状

現状の圧造プロセスをFig. 1に示す。圧造プロセスは、冷間圧造用炭素鋼（SWCH16A）のコイル材から円柱ブランクを切断し、頭部の予備成形後、頭部に十字穴及び座面に緩み防止用のセレーション（歯数16）を有するフランジをHeading成形（以下、主成形と言う）する。最終形状は変更できないため、プリフォーム形状を変更することで、圧造プロセスを最適化する必要がある。なお、本研究では工程数の短縮を期待し、1工程プロセスも比較検討した。

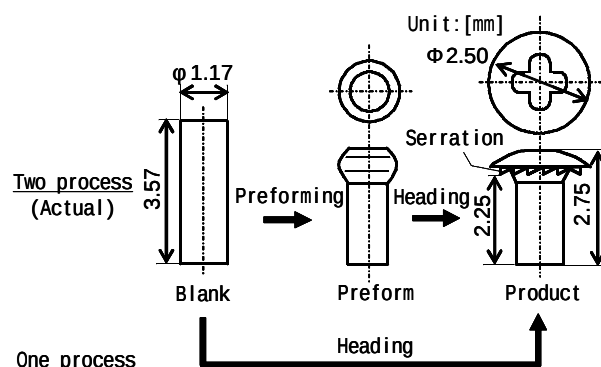


Fig. 1 Heading process of screw with serration

* 機械技術部

** (株)ユニオン精密

2.2 予備成形パンチの基本要素と最適化手法

現状の予備成形の金型構造と予備成形パンチの基本要素の軸対称半断面図をFig. 2に示す。現状の予備成形パンチは、円弧とテーパより構成される凹型の円錐体であるが、形状を最適化する場合、設計の自由度が高いため、一意的に決定することができない。そのため、予備成形パンチの形状を最適化するにあたり、形状を単純化し、ある傾斜角を有する円錐体（平板を含む）の基本要素としてパンチ形状を定義した。基本要素は、図の中心線と基本要素が成す角度を α° （以下、パンチ角と言う）として樽形のプリフォーム成形を目的とした凹型（ $40^\circ \sim 80^\circ$ まで3条件）、主成形時のフランジの十字部の成形を容易にするための穿孔を目的とした凸型（ $100^\circ \sim 140^\circ$ まで3条件）および中間のFlat型（ 90° ）の計7条件とした。

最適化は、次の2段階で実施した。まず、基本要素ごとにねじ頭部の予備成形シミュレーションを実施した。その結果を用いて、金型寿命の伸長を目的に、加工荷重の低減効果が大きい基本要素を組合せた新たな予備成形パンチをいくつか設計し、再度、予備成形シミュレーションを実施した。

次に、予備成形シミュレーションで得られたプリフォームを入力条件として十字穴及び座面にセレーションを形成する主成形シミュレーションを実施した。シミュレーション結果に対して、成形性を評価関数として、評価関数が最小となる予備成形パンチを最適とした。

3. 解析方法

各種予備成形パンチを用いた予備成形解析とその解析結果から得られるプリフォームを入力条件とした主成形解析について3次元塑性変形解析を実施した。なお、本報では、大変形が取り扱える剛塑性有限要素解析ソフトDEFORM-3D Ver6.0（SFTC社製）を解析ソルバーとして用いた。材料の変形解析モデルの一例をFig. 3に、解析条件をTable 1に示す。解析対象はその対称性を利用し、素材および金型全体の1/4を解析モデルとした。金型と素材間のせん断摩擦係数は、摩擦係数を変更してFEM解析を実施し、実験結果と一致する条件（ $m=0.12$ ）とした。また、金型は、変形を生じない剛体として定義した。被加工材は冷間圧造用炭素鋼（SWCH16A）で、素材の形状は、 $\phi 1.12 \times 3.57\text{mm}$ である。解析結果を検証するため、実際に製作した金型で検証実験を行い、実験と解析との結果を比較検討し、圧造シミュレーションの妥当性を検証した。また、変形速度は、実機ヘッダーより60mm/sとし、速度一定として変形解析を実施した。素材の変形抵抗は圧縮試験から求め、1ステップあたりの圧縮量を0.0065mmで計算し、要素の潰れにより解析不能となった時点で要素再分割を行った。

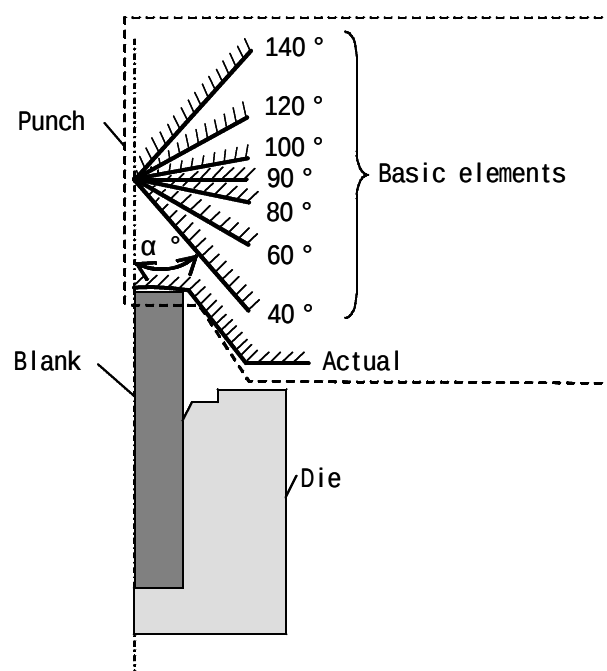


Fig. 2 Schematic illustration of die configuration and basic elements used as preforming punch

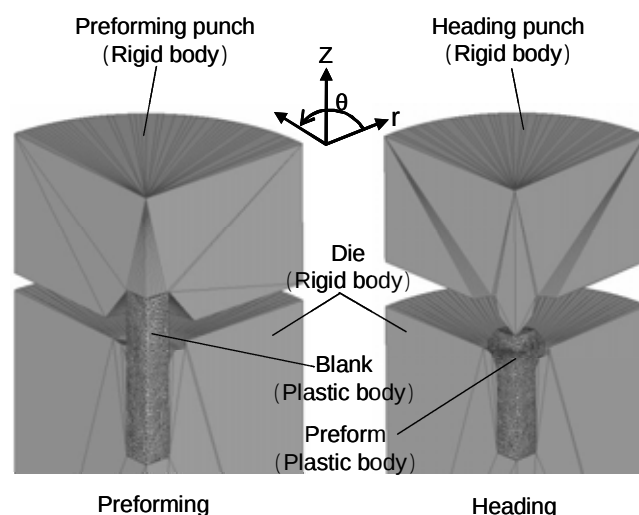


Fig. 3 FEM model for plastic deformation analysis

Table 1 Analysis conditions

Material	SWCH16A
Blank dimension	$\phi 1.12 \times 3.57\text{mm}$
Temperature	20
Punch speed	60 mm/s
Shear friction coefficient	$m=0.12$
Number of mesh	10414

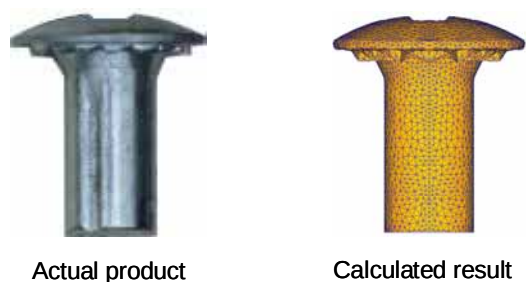


Fig. 4 Figures representing shapes obtained by actual heading and FEM analysis

4. 解析結果及び考察

4.1 成形品形状

実際の圧造実験で得られた成形品形状とFEM解析結果との比較をFig. 4に示す。頭部形状およびセレーションの形状などの全体的な形状は実験結果に比較的良好に一致しており、FEM解析の妥当性が裏付けられた。

4.2 加工荷重に及ぼすパンチ角の影響

FEM解析から得られた予備成形における加工荷重 - パンチストローク曲線をFig. 5に示す。加工荷重は、いずれのパンチ角においても加工の進行と共に増加し、最終ストロークにおいて最大加工荷重となることが確認できる。加工荷重は、凸型(100°～140°)の予備成形パンチでは、最終ストロークまで漸次増加しているが、凹型(40°～80°)の予備成形パンチでは、パンチストローク0.45mm付近で急激に増大している。また、いずれのパンチ角においても、現状プロセスよりも最大加工荷重が減少し、特に、パンチ角140°においては、現状プロセスの1/5となっている。

予備成形時の最大加工荷重を現状プロセスの最大加工荷重で除した荷重[$P_{max}/P_{max(a)}$](以下、比荷重と言う)とパンチ角の関係をFig. 6に示す。比荷重は、パンチ角の増加と共に減少している。減少率は、パンチ角90°を境に凸型と凹型で大きな差があることが分かる。予備成形において、現状と比較するといずれのパンチ角でも加工荷重が減少することから金型寿命の伸長が期待できることを示唆している。

予備成形パンチにより予備成形したプリフォームを素材として主成形シミュレーションした結果について、比荷重とパンチ角の関係をFig. 7に示す。図から比荷重は、パンチ角100°を起点に、パンチ角100°以下ではパンチ角の増大とともに増加するが、パンチ角100°以上ではパンチ角の増大と共に減少することが分かる。パンチ角140°では現状とほぼ同等であるが、パンチ角40°では0.99となり現状と比較して良好な結果となっている。主成形においては、現状と比較してパンチ角40°の予備成形パンチを用いると最大加工荷重の低減効果が得られ、金型寿命の伸長が期待できることを示唆している。

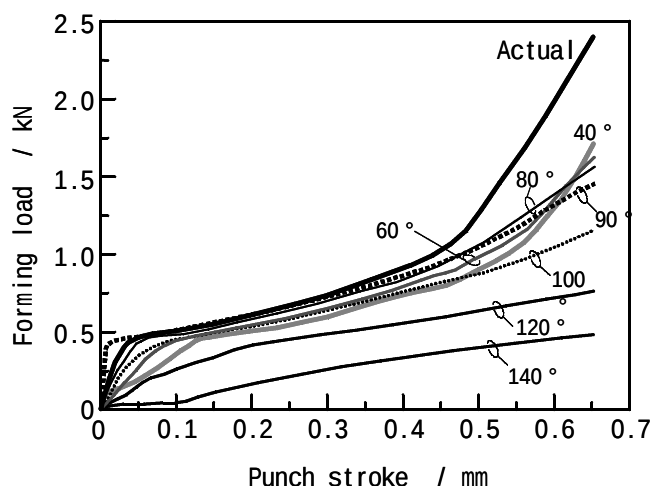


Fig. 5 Forming load - punch stroke curve calculated by FEM analysis in preforming

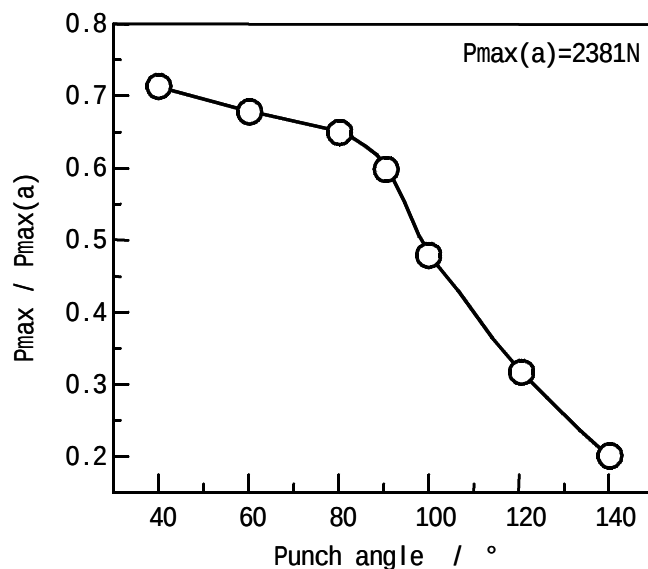


Fig. 6 Effect of punch angle on $P_{max}/P_{max(a)}$ in preforming

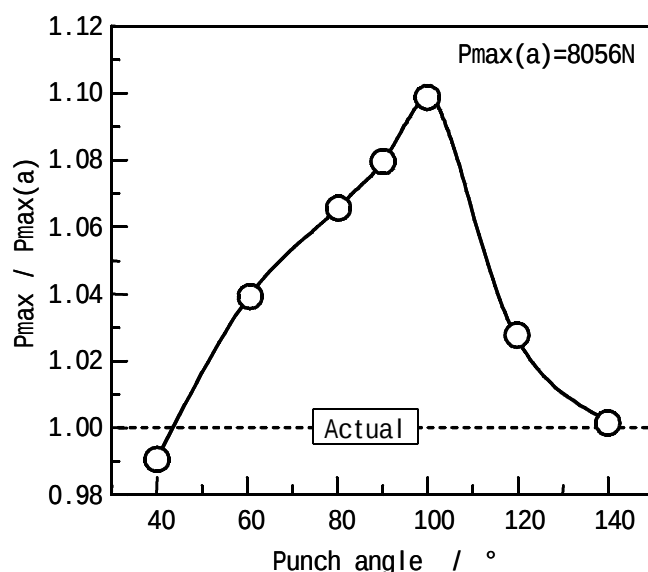


Fig. 7 Effect of punch angle on $P_{max}/P_{max(a)}$ in heading

5. 予備成形パンチの最適化

5.1 基本要素の組合せによる予備成形パンチ設計

前章で得られた結果から、予備成形および主成形において最大加工荷重の低減効果が期待できる基本要素は、予備成形に対してはパンチ角 140° であり、主成形に対してはパンチ角 40° であることが分かった。そこで、最良条件の組合せで予備成形パンチを設計することとした。設計した3種類の予備成形パンチ形状および金型構造をFig. 8に示す。なお、図の ~ は、素材との接触面である。

各条件の 部は、予備成形時の加工荷重を低減させる目的でいずれの条件も 140° とした。 部は、Type-Aでは主成形時の加工荷重の低減を目的に 40° とし、Type-Bでは、パンチ製作の容易性およびType-Aにおける 部 - 部間の鋭角部における圧造加工時の応力集中を回避する目的で、Type-Aの 部と 部を平面で接続する形状とした。Type-Cでは、Type-Bの 部を除いた形状とした。なお、比較のために現状工程の予備成形パンチと主成形パンチのみを使用する1工程プロセスにても比較解析を実施した。解析方法は、前述のとおりである。

5.2 比荷重

新たに設計した3種類の予備成形パンチ（以下、新パンチと呼ぶ）および現状の予備成形パンチを用いた2工程プロセスと主成形パンチのみの1工程プロセスについて、材料変形のFEM解析により得られた予備成形時のパンチ形状と比荷重 $[P_{\max}/P_{\max(a)}]$ との関係を図9に示す。なお1工程プロセスの比荷重は、現状工程の最終加工ストロークと同ストロークの最大加工荷重により算出した。

比荷重は、いずれの予備成形パンチにおいても現状工程より小さくなっている。新パンチ中ではType-BおよびType-Cが現状工程の65%~67%減となり、金型寿命の伸長が期待できることを示唆している。また、1工程プロセスにおいては、現状工程の73%減となり、最も加工荷重の低減効果があり、金型寿命の伸長効果があることを示唆している。

上述で予備成形されたプリフォームを素材として主成形シミュレーションした結果について、それぞれの予備成形パンチ形状と比荷重 $[P_{\max}/P_{\max(a)}]$ との関係を図10に示す。なお、1工程プロセスでは、主成形パンチのみを使用し、他の条件で使用した主成形パンチは、1工程プロセスで使用したパンチと同一である。

比荷重は、新パンチ中ではType-Bが現状工程と比較して比荷重が低減されており、その低減率は、約0.05%である。最も加工荷重の低減効果が期待されるのは1工程プロセスであり、低減率は約0.08%である。1回の加工における加工荷重の低減効果は小さいが、数百万個を生産する主成形パンチにとっては、疲労破壊を遅延させる効果としては大きいと考える。

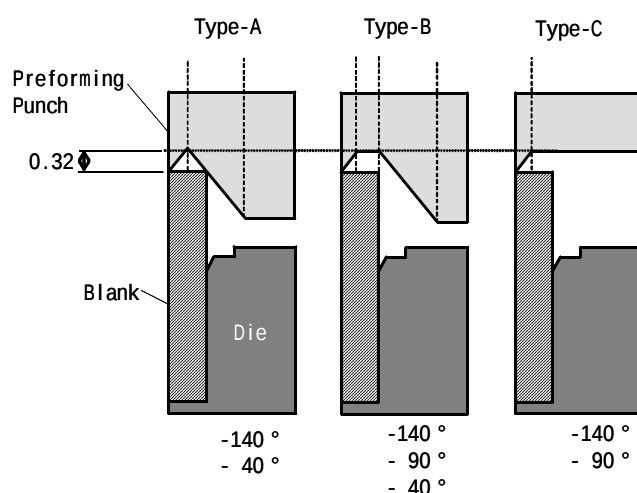


Fig. 8 Schematic illustration explaining new punch model used for FEM analysis in preforming

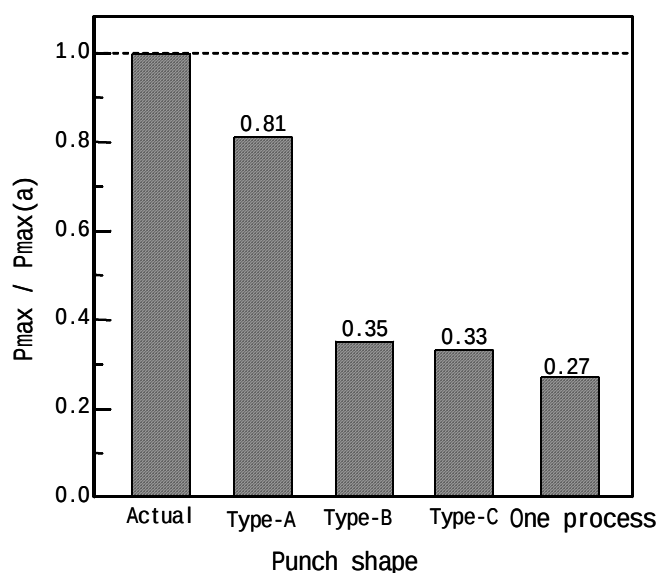


Fig. 9 Effect of punch shape on $P_{\max}/P_{\max(a)}$ in preforming

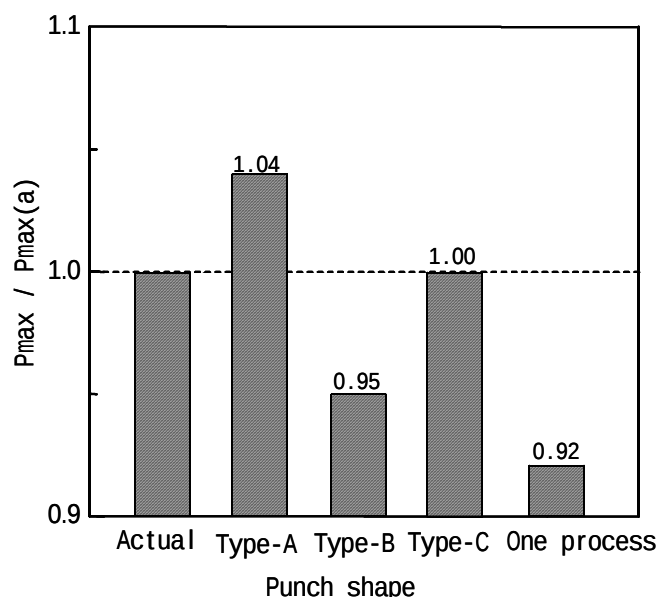


Fig. 10 Effect of punch shape on $P_{\max}/P_{\max(a)}$ in heading

5.3 速度分布

新パンチで予備成形シミュレーションした結果（プリフォーム）を用いて、主成形シミュレーションした時の加工終了時の速度分布をFig.11に示す。いずれの図も頭部フランジを上方向から表示した図である。また、1工程プロセスでは、成形性を評価するために頭部フランジの外形状も同時に示している。

Type-Aでは、外周部において左右の2カ所に300mm/sの高速領域が出現している。すなわち、当該領域と他の領域の速度差により円形フランジが不均一に変形する傾向が強いことを示している。

Type-Bでは、Type-Aと比較して高速領域が小さくなり速度分布が均一となっている。このことは、良好な成形性が期待できることを示唆している。

Type-Cでは、フランジ外周部で高速領域が広がっているが、同心円状に分布している。しかし、十字部において速度差が出現している。

現状工程では、Type-Aとほぼ同様な速度分布となっている。また、1工程プロセスでは、Type-Cと同様な速度分布となっているが、速度と不均一さが増し、図の波線の速度分布が特に大きい。また、1工程プロセスにおけるフランジ外周の理想形状とFEM解析結果を比較すると、速度分布で予想されたとおりに高速領域で外形が外側に張り出し、四角形状の不均一変形になっていることが確認できる。

以上の結果から判断すると、設計した3案の中でType-Bの成形性が良好であると結論付けられる。

5.4 相当ひずみ分布

材料変形のFEM解析から得られた予備成形および主成形における頭部フランジ付近の相当ひずみ分布をFig.12に示す。なお、予備成形における1工程プロセスの相当ひずみ分布は、現状工程における最終加工ストロークと同ストロークにおける相当ひずみ分布を示している。

予備成形においては、現状工程および1工程プロセスで相当ひずみ1.2の高ひずみ領域が出現しているのに対し、新パンチでは、約0.8以下となっている。Type-Aは、頭部フランジに未変形部が残存しているが、他案と比較して中心部の相当ひずみ値が大きく、高ひずみと低ひずみが近接している。Type-BおよびType-Cは、Type-Aより相当ひずみ分布が均一となっており、成形性は良好である。

主成形については、相当ひずみ2.4の高ひずみ領域の割合が最も低くなっているのはType-Bおよび1工程プロセスであり、現状工程と比較して改善効果が見られ、良好な品質が示唆される。現状工程は、相当ひずみ2.4の高ひずみ領域が最上部から下方への広がりが最も顕著である。また、現状工程と比較してType-AとType-Cは、改善効果は見られない。

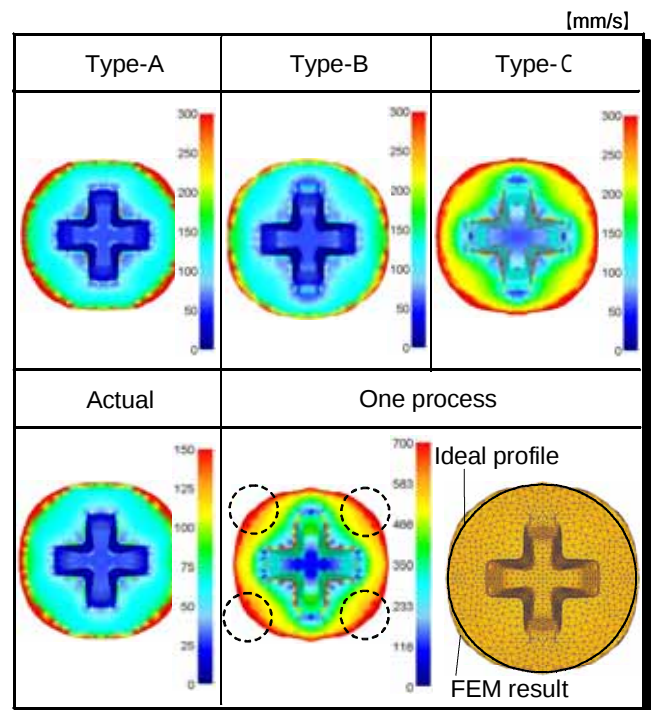


Fig.11 Effect of punch shape on velocity distribution in heading

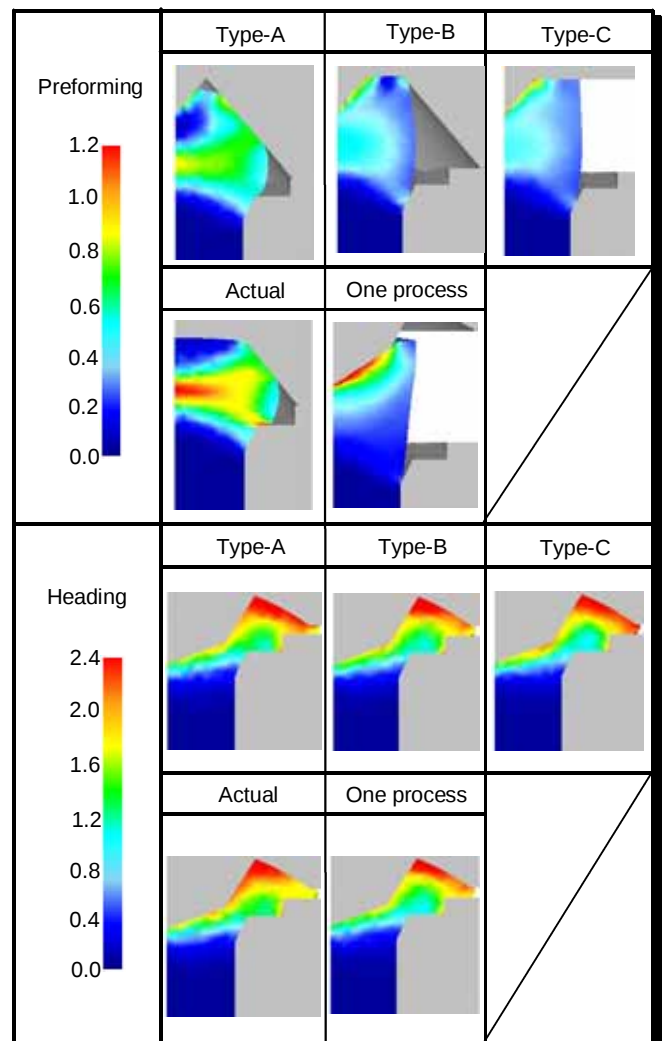


Fig.12 Effect of punch shape on effective strain distribution in preforming and heading

Table 2 Evaluation value and weight

Evaluation Item No.		1	2	3	4	5
		Max. Load-1	Max. Load2	Ef. Strain	Velocity	Outer Profile
1	Actual	5	3	3	2	1
2	Type-A	4	5	4	5	5
3	Type-B	3	2	1	1	1
4	Type-C	2	3	5	3	1
5	One process	1	1	2	4	5
Weight		3	4	2	1	5

Load-1:Preforming Load-2:Heading

5.5 評価関数による予備成形パンチ形状の最適化

設計問題では、複数の設計案が想定され、案の良否が評価される。的確な評価は、設計の成功や不成功を左右することになる。的確な評価を行うためには、有効な評価関数が必要である。評価項目が $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ など多数の場合、評価関数 E を式(1)とすると、

$$E = f(e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_i) \quad \dots \dots (1)$$

E をいかに定めればよいかと言う問題に帰着する。評価項目を e_1 : 予備成形時の最大加工荷重, e_2 : 主成形時の最大加工荷重, e_3 : 加工品の相当ひずみ分布, e_4 : 加工品の速度分布, e_5 : 外形形状とし、それぞれに重み w_i をかけて加重すると次の式で表される。

$$E = \sum_i w_i e_i \quad \dots \dots (2)$$

各設計案および現状プロセスと1工程プロセスの評価値 e と重み w をTable 2に示す。本研究では、式(2)が最小となる設計案を最適設計案とする。

評価値 e については、外形形状以外はそれぞれ5区分とし、最大加工荷重では最小値を1、最大値を5とした。また、相当ひずみ値は、相当ひずみ分布が均一化したものを最小値1とし、高ひずみ領域が広いほど大きい値とした。速度分布では、頭部フランジの外周部付近で、速度分布がより均一化したものを最小値1とし、不均一化の傾向が強いほど大きい値とした。外形形状では、理想形状どおりの場合は1とし、欠陥品の場合は5の2区分とした。

重み w については5区分とし、加工品の欠陥、金型寿命低下など重要度の高い順番に外形形状を5、主成形および予備成形の最大加工荷重をそれぞれ4、3および相当ひずみ分布を2とした。

次に、式(2)を用い設計案を総合評価した結果をFig. 13に示す。図から予備成形で穿孔と平面および傾斜面での据込みを同時成形するType-Bを最適設計案と結論付ける。

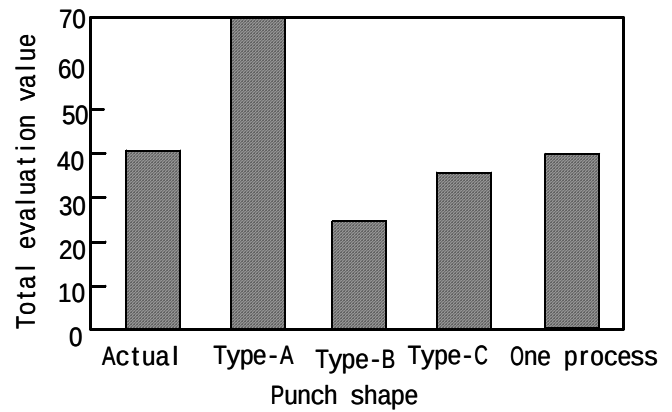


Fig.13 Result of optimization

6. 結 言

座面に緩み防止用セレーションを有する極小ねじの冷間圧造プロセスに関して、プリフォーム形状を最適化するために予備成形パンチ形状を変更し、FEMによる成形シミュレーションを実施した。予備成形パンチとしてある傾斜角を有する円錐体の基本要素を用いて成形シミュレーションした結果、予備成形では予備成形パンチ角 140° 、主成形では予備成形パンチ角 40° を用いた場合が加工荷重が最小となった。また、シミュレーションで得られた結果から基本要素を組合せた予備成形パンチを3案設計し、成形シミュレーションを実施した結果、予備成形で穿孔と平面および傾斜面での据込みを同時成形する予備成形パンチ形状が最適解であると結論付けられた。

本報で最適化された予備成形パンチ形状に対して、さらなる設計案の評価として金型内部応力と金型破壊を関連付けた考察が必要である。

参 考 文 献

- 1) 吉本勇: “ねじ締結体設計のポイント”, 日本規格協会, (1992)p.13
- 2) 泉聡ら: 機論A, 72-717, 780-786(2006)
- 3) 泉聡, 横山喬, 岩崎篤, 酒井伸介: 機論A, 71-702, 204-212(2005)
- 4) 竹増光家ら: 塑性と加工, 47-540, 44-48(2006)
- 5) 益田亮: 塑性と加工, 8-81, 519-527(1967)
- 6) 田村清, 富田正一, 安藤美明, 勝又武敏: 塑性と加工, 13-135, 291-297(1972)
- 7) 小川淑勝: 塑性と加工, 28-320, 931-936(1987)
- 8) 久保田智, 山本忠司, 山中雅仁: 塑性と加工, 47-542, 190-194(2006)
- 9) 小島久義, 藤川真一郎, 上野完治, 池内淳, 加藤直樹: 塑性と加工, 41-477, 1041-1045(2006)
- 10) 中西賢二, 牟禮雄二: 塑性と加工, 36-542, 1300-1304(1995)