

プレス成形の加工プロセスと型設計に関する研究 — 回転ノブおよびフライホイールの成形加工 —

松田 豪彦* 中西 賢二** 上谷 俊平**

Experimental Study on Forming Process and Die Design in Press Forming — Forming of a Knob and a Flywheel —

Takehiko MATSUDA, Kenji NAKANISHI and Shunpei KAMITANI

The flywheel, roller and knob can be formed directly from the cylindrical work-piece by cold axisymmetric upsetting with lateral extrusion. Lack of material filling was observed at the rim part of an extruded product, when an ordinal die was used. Then, the forming process and die was designed to achieve effective material flow to fulfill the lack portion of an extruded product. The product formed by the proposed forming process and die has the circular concave plane at the disk surface. When that concave plane is related to the base plane of an ornament plate in a knob and to the lightweight design of a product in a flywheel, the net shape forming can be achieved in the proposed forming process and die.

Keywords : flywheel, knob, closed die forging, tool/die design

1. 緒言

回転ノブ、フライホイールなど、軸付き円板状部品がカメラ、アンプ、チューナーおよび計測機器などの多くの精密小型機器に使われている。すなわち、回転ノブは機器の機能を調整する部品として、フライホイールは回転動作を滑らかにする部品として使われる。回転ノブとフライホイールを図-1に示す。図(A)は軸を回転する際の指によるグリップ

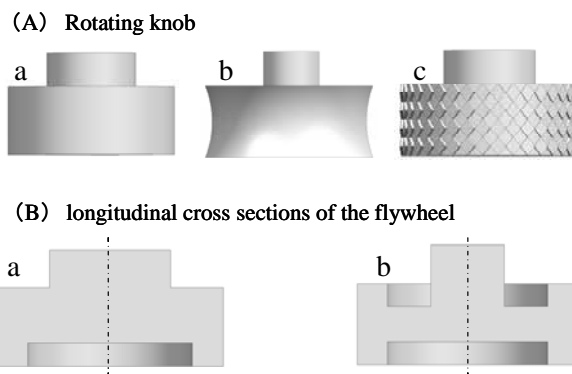


図-1 回転ノブおよびフライホイール

2006年8月31日受理

* 博士後期課程物質生産工学専攻

** 機械工学科

感と回し易さが要求される回転ノブの外形形状を表して、ノブの側面は a が平面、b が湾曲面、

さらにcがロレット模様を表す。また、図(B)は外側面近傍の質量を大きくし軸中心近傍の質量を小さく設計¹⁾することで、(回転慣性力/質量)比を大きくすることが要求されるフライホイール断面形状を表す。上記の軸付円板状部品は、冷間側方押し鍛造加工によって円柱状素材から直接成形加工できる。また、ノブ側面の形状および軸中心近傍の窪み形状の成形加工は金型内面の幾何学的形状を製品表面と逆にすることにより可能となる。

ただし、冷間側方押し鍛造加工の場合、加工終了前の塑性流れが型内部で閉塞状態に陥り、結果として加工品外周角部(外縁部)に素材の充填不足(欠肉)が発生し易い。従って、同加工法を実用化するには上記問題点を解決する必要がある。

このことに関して、筆者らは先に格子線解析法^{2),3)}を適用した一連の冷間平面ひずみ側方押し鍛造加工実験を行って、型の内部に段差空間を設ける型構造とすることにより低いパンチ荷重で外周角部への素材充填を確実にする塑性流れが得られることを見いだした⁴⁾。

軸対称側方押し鍛造加工に、上述の型構造を適用した場合、段差空間は型底面縁部の環状溝となることから成形品底面中央部に円形窪み面が成形されることになる。この窪み面は回転ノブの場合はオーナメント(文字などを刻印した飾り板)などの取り付け面に相応させ、フライホイールの場合は、同製品の軽量化を目的として軸中心部に設ける窪み面に相応させることで(成形品と型の連携設計による)ネットシェイプ加工(設計図通りの成形品を得る加工)が実現できる。

以上の観点に基づいて、本研究では一連の成形加工実験シミュレーションを行い、加工品外縁部分の形状転写能を向上させた冷間軸対称側方押し鍛造加工の加工プロセスと同プロセスを実現する型設計を行った。

2. 成形加工実験シミュレーションの成形品・実験装置・実験条件・実験方法

2.1 成形品

図-2の(A)に素材と成形加工品の3次元形状を表す。成形加工品の寸法・形状の許容値の範囲内で回転ノブとしての最適値あるいはフライホイールとしての最適値を設定すると、前述のように成形品と型の連携設計によるネットシェイプ加工が実現できる。

2.2 実験装置、実験条件および実験方法

実験装置を図-2の(B)に示す。本装置の特徴として、型内部底面(半径R)には、製品外周縁部の形状転写能を向上させる機能を持つ段差空間(e、f)を形成する円板形状プレート(半径Rb、厚さHb)を設置することができる。なお、この段差空間は、型底面縁部に設ける環状溝に相当する。また、側方押し部空間の高さHは10.4mm、半径Rは15mmである。図(C)にパンチの押し込みに伴う素材成形過程の模式図を表す。

実験条件は、段差空間の深さを形成する円板形状プレートの厚さHbをHb=3mmに固定して、同プレートの半径RbをRb=10.3mm(0.667)、10.9mm(0.586)、11.5mm(0.5)、13.2mm(0.257)および15mm(0:段差空間無しとなる)の5種類に変化させた。ここで、()内の数値は張出し部分の半径方向長さ7mmに対する段差溝空間の半径方向幅Rwの割合を表す。さらに、実験条件にプレート無し(Hb=0mm)の条件を加えた。

上記の各段差空間設置条件およびプレート無しの条件下で、円柱素材を型内に装填しパンチ(g)を設置後、同実験装置を油圧プレス(30tf複動油圧プレス)の工具台上に移して成形加工実験を行った。実験に用いた素材は、市販工業用純アルミニウムA1050の焼鈍材(焼鈍後の硬さHV=21)である。鍛造加工過程のパンチ荷重は工具台に設置した荷

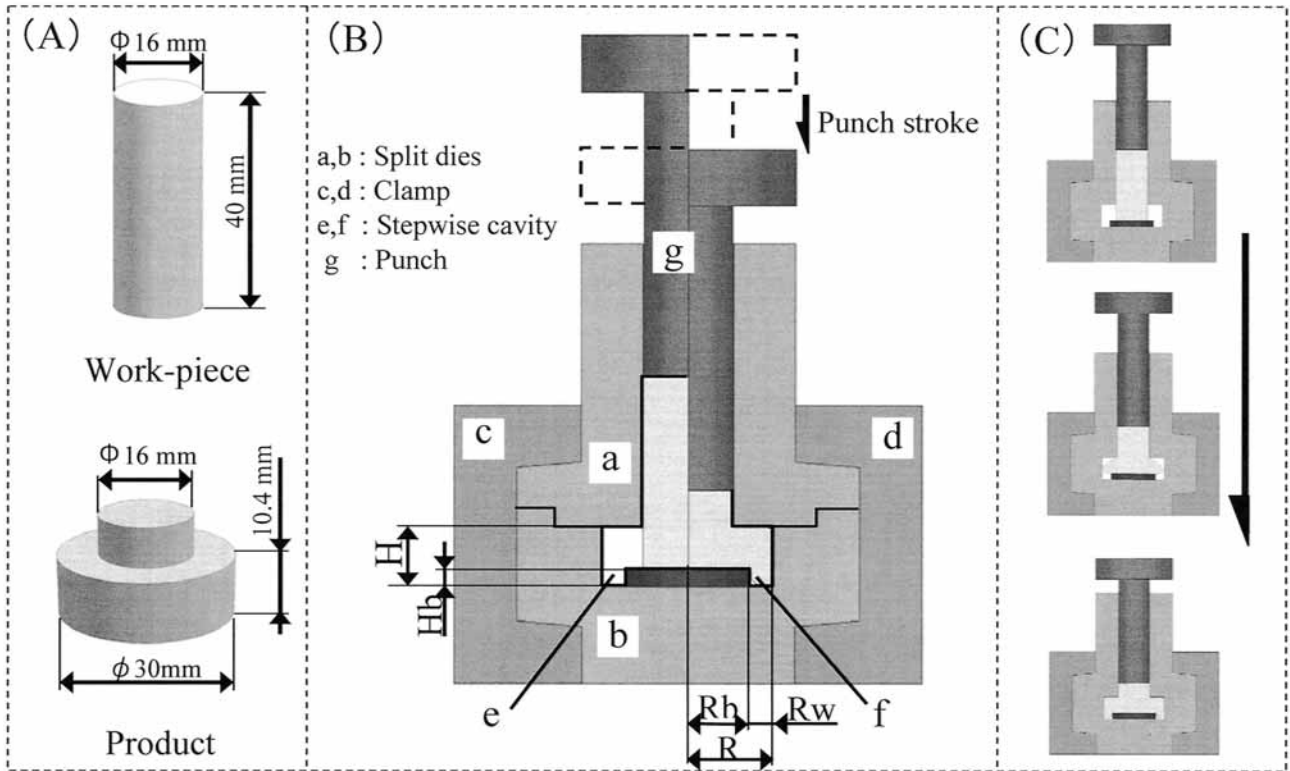


図-2 実験装置、素材および成形加工品の概略図

重変換器により計測し、パンチ移動量はプレスラムの動きに連動する変位変換器により計測した。パンチ荷重とパンチ移動量の計測値はデータレコーダを用いて加工時間の推移に対応させて連続的に記録した。なお、各実験条件下における最大パンチ荷重を同一にした場合の成形状態を相互に比較するため、予備実験を行った上で最大パンチ荷重を105kNに設定した。パンチ移動量を最大パンチ荷重値まで連続して移動させた実験および加工開始位置から終了位置までの間で5段階に変えた実験(逐次変形実験)の両方を行った。逐次変形実験では、成形の進行に伴った素材外形形状の変化を測定した。

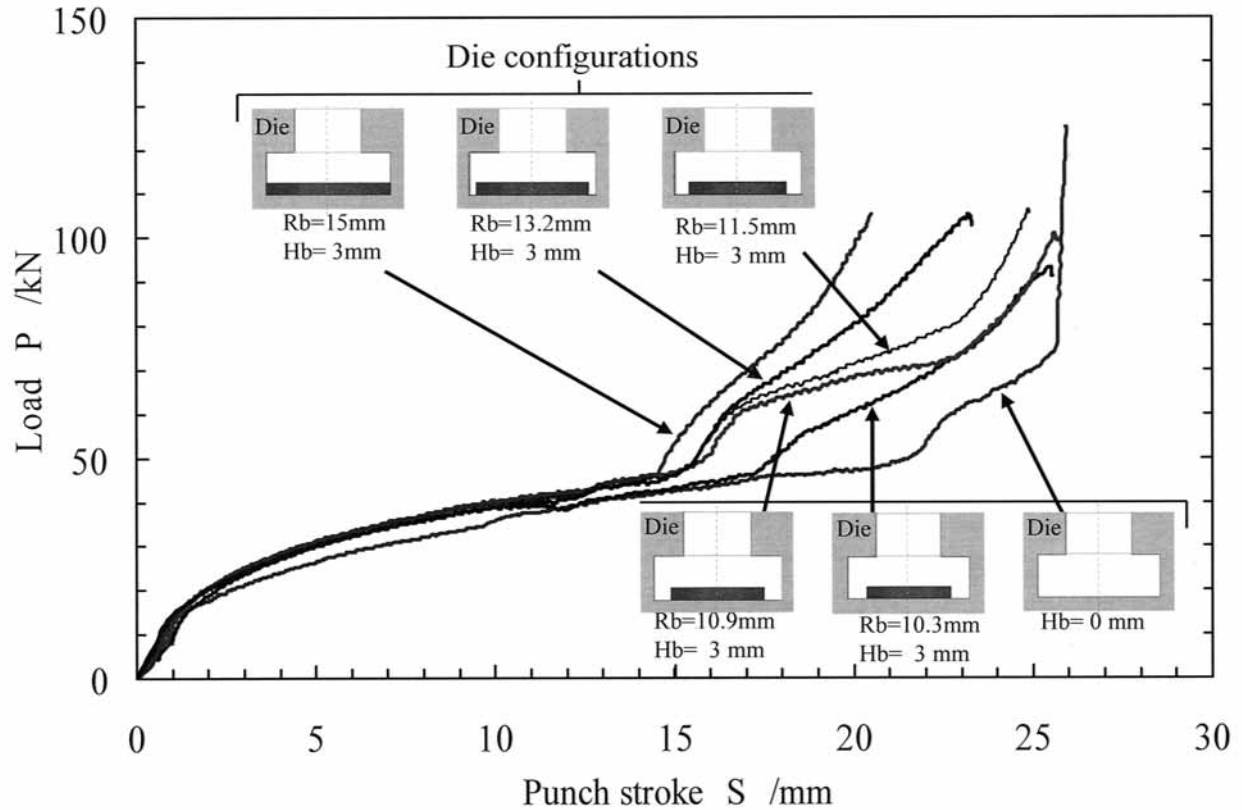
3. 実験結果および考察

各種段差空間を設置した型および段差空間を設

けない型を用いた鍛造加工過程のパンチ荷重とパンチストロークの測定結果および成形品外形を図-3に示す。同図中の型の模式図は成形加工に使用した型の内部形状を表す。図(A)のパンチ荷重-パンチストローク曲線は素材が側方に押出される過程におけるパンチ荷重のなだらかな増加過程と、素材の側方押し出し部分先端が型側壁に到達した後に型空間へ充填する過程におけるパンチ荷重の顕著な増加過程を表す。また、型空間へ充填する過程におけるパンチ荷重のパンチストロークに対する増加割合は、型内部底面に設けた段差空間の幅の影響を受けることがわかる。

段差空間を設けない型 ($H_b=0$ mm) を用いた成形加工実験では、パンチストロークが26mm付近で閉塞状態となり、このときのパンチ荷重は75kNであった。さらに加圧しても塑性流れは止まったままであった。図(B)において、成形品外形と押出

(A) Punch load-stroke curves



(B) Product photographs

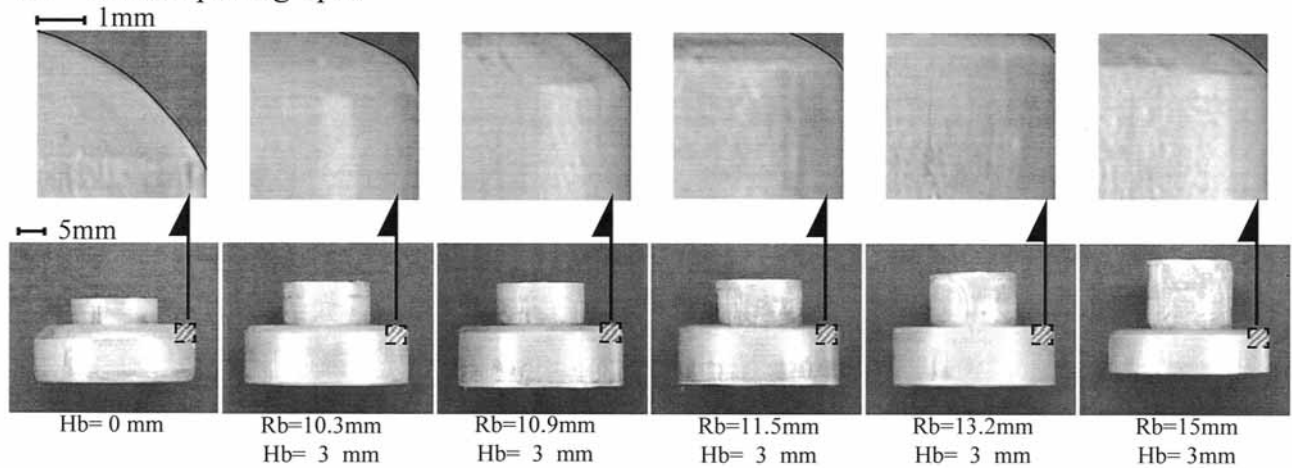


図-3 パンチ荷重-ストローク曲線および成形加工品外形形状の相互比較

し成形部の外周側面上角部にある素材未充填箇所の拡大図を示す。上部では、素材の充填状態が段差空間を設けることにより改善され、また、充填状態が段差空間の幅にも依存して変わることが分か

る。一方、下角部では、段差空間を設けない場合（Hb=0mm）に素材の未充填が認められるが、段差空間を設けた場合（Hb=3mm）は、段差空間の幅にかかわらず素材が完全に充填している。段差空間の

設置条件と上角部への素材充填状態の関係を図-4に示す。縦軸の充填率 η は、上角部を平面に投影した図に設定した一辺 3.5 mm の正方形空間枠内において、充填された素材の占有面積 A が占める割合、($\eta = A / \text{上角部空間枠の全面積} (3.5^2)$) の百分率表示で表した。横軸は段差空間を設けるために型底部に設置する円板形状プレート半径 (Fig. 2 の R_b) および段差空間の溝幅 (Fig. 2 の R_w) を表す。同図から型内の底面に $R_w=1.8$ mm ($R_b=13.2$ mm、 $H_b=3$ mm) の段差空間を設けた場合に、型空間への素材充填が最も良好となり、充填率 $\eta=98\%$ に達することが分かる。溝幅 $R_w=1.5\sim 3$ mm 程度の範囲で $\eta=97\%$ 以上の高充填率が維持されることが分かる。さらに溝幅 R_w を 4mm まで広げても、充填率 $\eta=95\%$ 程度の充填率が得られることが分かる。

未充填箇所の平面投影図において、その横幅を x 、縦幅を y としたときの型底面のプレート半径 R_b と

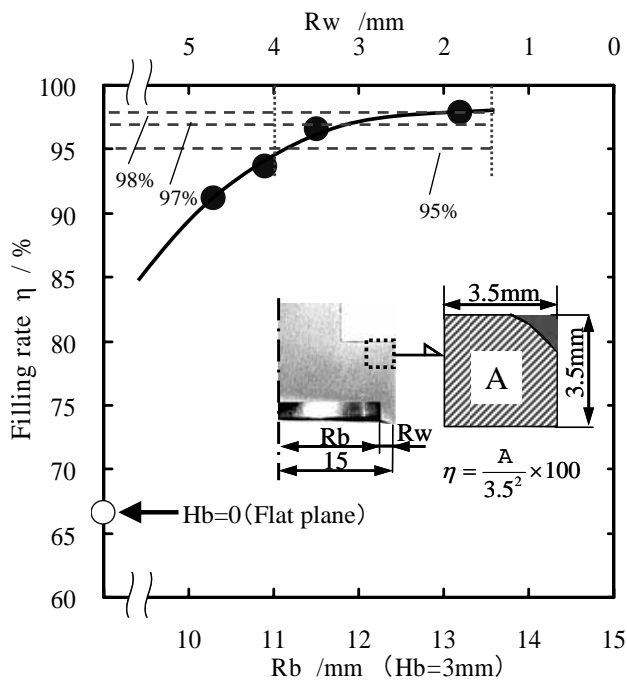


図-4 金型の上角部 3.5mm 平方空間に投影して計算したダイス空間への素材の充填率

の関係を図-5に示し、 x 、 y と充填率 η との関係を図-6に示す。この関係から横幅 x の方が縦幅 y よりも大きいことがわかる。また、充填率から角部の面取りに換算した関係を図-7に示す。充填率 $\eta=96\%$ に達すると、上角部を直交面に表示した場合の $C=1$ の面取りに相当する値になることが分かる。充填率 $\eta=98\%$ の場合は $C=0.7$ 程度の面取りに相当する。なお、実際の角部形状は、材料の塑性流れに依存した自由曲面になっているため、型角部からの距離で見るとさらに面取り寸法は小さくなる。充填率 $\eta=98\%$ での型角部からの距離は0.37mmとなり、面取りに相当させると $C=0.5$ 程度になる。

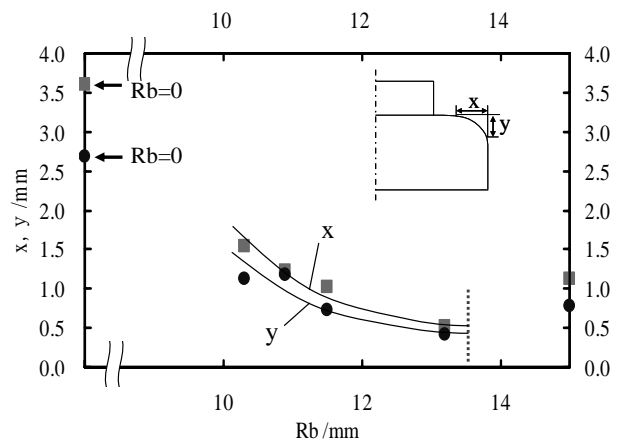


図-5 $x, y - R_b$ の関係

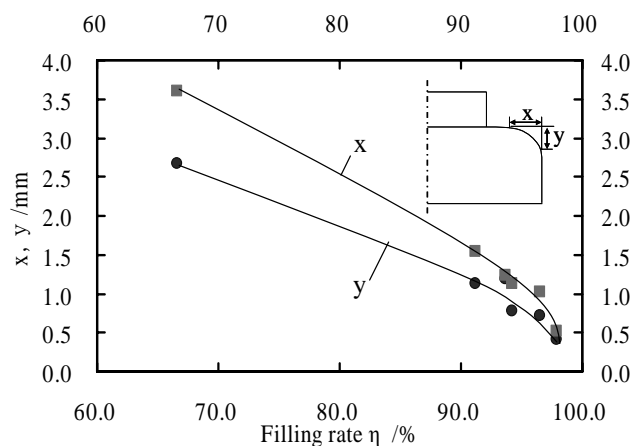


図-6 $x, y - \eta$ の関係

型に設ける段差空間の幾何学的特徴は押し部分成形品横断面積 S_c (図-2において、 $S_c = \pi R^2$)と

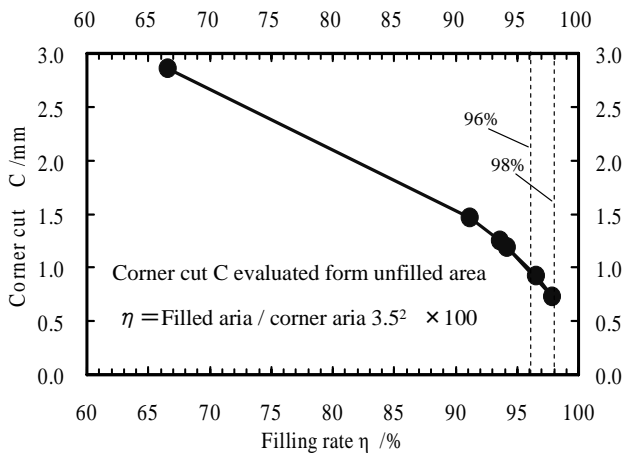


図-7 充填率 η に関連付けた面取りCの値

段差空間開口部面積 S_b (図-2において、 $S_b = \pi(R^2 - Rb^2)$)の比(すなわち段差空間の押し比) S_c/S_b で表すことができる。最も良好な型の形状転写能が得られた段差空間の押し比は、($R=15$ mmおよび $Rb=13.2$ mmより) $S_c/S_b=4.43$ となる。なお、上記段差空間の押し比 S_c/S_b の値は、平面ひずみ側方押し鍛造加工⁴⁾において最も良好な型の形状転写能が得られる S_c/S_b の値とほとんど同一値である。

最も良好な形状転写能を得た段差空間を型底面に設けた場合および段差空間の無い場合の双方について、側方押し鍛造加工過程におけるパンチストロークの推移に伴う型内部素材の形状変化およびパンチ荷重とパンチストロークの関係を図-8に示す。型底面に段差空間を設けた型の場合(図

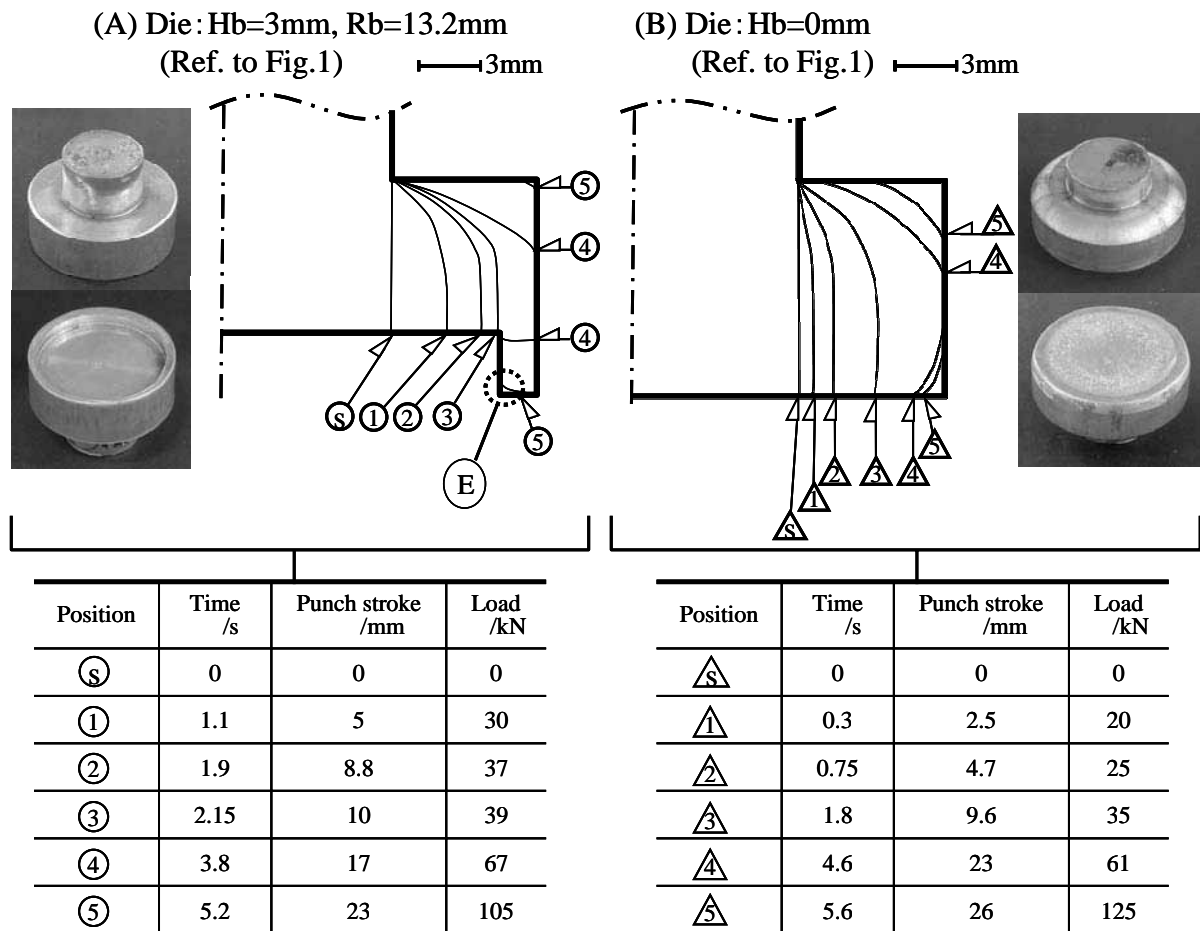


図-8 成形加工過程における素材の外形状の連続変化(実測データ)

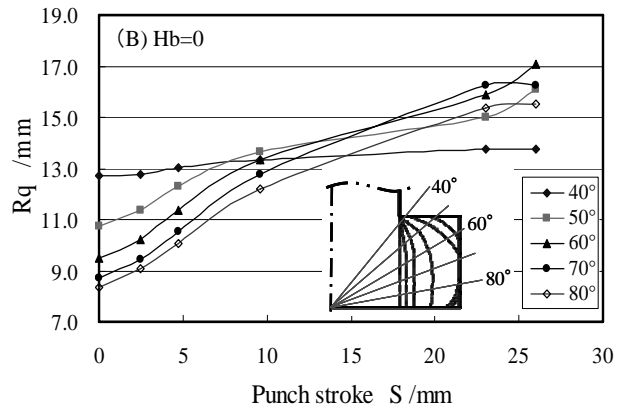
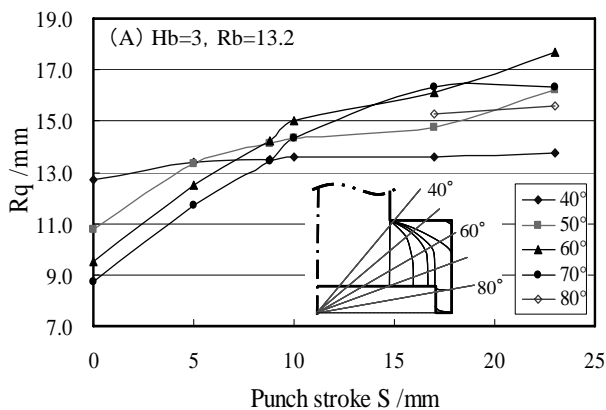


図-9 パンチストロークに関連付けた素材の外形形状の変化

(A)、パンチストロークが④から⑤に移動する段階で素材は段差空間と角部空間にほとんど同時に完全に塑性流入することが分かる。また、段差空間への素材の塑性流動は素材が型側壁に到達後開始するが、素材は型壁面に到達してから上下2方向へと流れが分かれて充填することが分かる。段差空間に素材が充填する段階で、段差空間の内壁面と素材の間に残るわずかな空隙(図(A)に示す⑥)が塑性流れの閉塞状態を防ぐ役割を果たすと言える。この部分の成形品外形は、型による拘束を受けない自由な塑性流れで形成される極小曲面となる。同曲面は円板中央部の窪み面と円板外周部底面を結ぶ曲面であり、特に後加工によるトリミングは不要と考える。

なお、段差空間の深さHbは本実験では3mmに設定したが、押出し比 $S_c/S_b=4.43$ の段差空間を設けた型(Rb=13.2mm、溝幅Rw=1.8mm)を用いた実験結果から、素材が段差空間内へ2mm塑性流動した状態で製品上角部は面取りC=1.0に相当する良好な形状となる事が分かった。

一方、型底面に段差空間を設けない型の場合(図(B))、パンチストロークが三角マーク5の位置で素材の塑性流れがほとんど停止して、側方押し型側壁の上下角部が欠肉状態のまま閉塞状態となり、パンチ荷重だけが増加し続けることが分かる。

型底面に段差空間を設けた場合と設けない場合における成形品の外形形状の相違点を定量的に表示するために、型底面の中心位置で傾き角を 10° ずつ変えた直線を用いて同中心点から測った素材側面の交点までの距離Rqとパンチストロークの関係を求めた。結果を図-9に示す。図中(A)の段差空間を設けた場合の方が、図中(B)の段差空間を設けない場合に比べてRqの値が大きくなることがわかる。すなわち、側方部上方向への材料の流れが大きいことがわかる。

4. 結言

本研究では冷間軸対称側方押し鍛造加工において、型による加工品外縁部の形状転写能を著しく向上させることができる型内部底面に設ける段差空間(環状溝)の設置要件を実験シミュレーションにより明らかにした。研究成果を以下に概括する。

- (1) 型内部底面縁部分に適切な段差空間(実験に用いた型の場合、段差空間の溝幅Rw=1.5~4mm、溝深さHb=3mmの環状段差空間)を設けた型を用いた成形加工では、素材の充填状態が著しく向上し、パンチ荷重が105kNで型への充填がほとんど完了する。特に溝幅Rw=1.8mmでは、型空間への素材充填が最も良好となる。平面投影図でみると、型

角部からの距離は0.37mmとなりC=0.5の面取りに相当する優れた充填状態が得られた。一方、段差空間を設けない型を用いた成形加工では、パンチストロークが26mm付近で閉塞状態となり、パンチ荷重(最大値)を約125kNまで増しても塑性流れは停止状態であった。

- (2)最も良好な外縁部形状転写が得られた段差空間($R_w=1.8\text{mm}$)を設けた型を用いた成形加工において、この段差空間形状の特徴を側方押し部横断面積 S_c と段差空間部横断面積 S_b の比(S_c/S_b)で表記すると、 $S_c/S_b=4.43$ となる。この値は、平面ひずみ側方押し鍛造加工における最優良形状転写能を得た段差空間形状を同様に表記した $S_c/S_b=4.43$ と一致した。
- (3)型角部への素材の塑性流動は、素材が型側面に到達してから開始し、上下方向へ流れが分かれて充填する。段差空間を設けた場合、側方部上方向への材料流れが大きくなる。また、未充填部分の幅は縦幅より半径方向幅が大きい。
- (4)段差空間の溝幅を $R_w=1.8\text{mm}$ ($S_c/S_b=4.43$)に設定して、溝深さを $H_b=2\text{mm}$ とした場合でも、型の

形状転写能が著しく向上することがわかった。

- (5)型底面縁部に段差空間を設けた型を適用した場合、成形品底面中央部に窪み面が成形されることになる。この窪み面を回転ノブやフライホイールの設計形状に相応させると、(成形品と型の連携設計による)ネットシェイプ加工が実現できる。

謝辞

本研究の遂行において、本学中央実験工場の技術職員の方々に型の製作段階で種々のご協力を頂きました。研究成果のまとめに際して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 井澤實：機械要素の設計解析、山海堂、p.265(1967)
- 2) 中西賢二、牟禮雄二：塑性と加工、36-418, pp.1300-1306(1995)
- 3) 中西賢二、大重稿二、上谷俊平：日本機械学会論文集 A 編、63-616, pp.203-208(1997)
- 4) 植村眞一郎、中西賢二、上谷俊平、山下康平：塑性と加工、46-532, pp. 402-406 (2005)