

# 板鍛造による高張力鋼板製 フランジ付き有底カップの成形法の開発

東海国立大学機構 岐阜大学工学部機械工学科  
教授 王 志剛  
(平成 29 年度 重点研究開発助成 B AF-2017004)

キーワード：塑性加工，板鍛造，荷重低減

## 1. 研究の背景と目的

板鍛造技術は中厚板材に深絞りなどの板成形工法と据込みや押しなどの冷間鍛造工法を併用し、切削仕上げと同程度の形状および肉厚精度をもつ製品の製造技術として、国内では広く使われており、海外のキャッチアップも活発である<sup>1)</sup>。国際冷間鍛造グループの年次大会 ICFG2014、ICFG2016 および ICFG2017 では板鍛造が中心的なトピックスとして扱われ、欧州や中国からの論文の数が増えている<sup>2)4)</sup>。

板鍛造に適した製品形状は、シャープエッジ、半抜き部位をもつ平面形状、絞り品をベースとするカップ形状などを挙げられ、精密せん断品を除けば、ほとんどカップ形状である<sup>5)</sup>。複雑な形状を成形しようとする時、大きな材料流動を発生させる必要があり、工具圧力が過大となりやすい<sup>6)</sup>。このため、板鍛造は現状では、複雑形状、直径と板厚比の大きい形状および高強度材の成形が困難である。

板鍛造の適用範囲を広げるためには、低い加工圧力で被加工材を流動させる成形原理の開発が不可欠である。精密鍛造の加工終期では、被加工材は広範な領域において金型と接触し、複雑な変形が引き起こされ、工具圧力が極端に大きくなる。

単純な変形モードで加工の目的を実現する加工法として、図 1(a)に示すせん断加工がある。せん断加工では 2 つの工具の刃先間の線上 AB でせん断変形が生成され、塑性ひずみの蓄積によって最終的に分離が実現される。同様のせん断変形モードは、金属の切削加工にも見られる。図 1(b)に示すように、切りくずは A 点と B 点の間のせん断変形によって生成されるが、変形後の材料はせん断変形領域 AB から移動するため塑性変形の蓄積はなく、被削材の材質と切削条件によっては連続した切りくずが生成される。

本研究では、鍛造荷重と工具圧力を低減させるために、金属切削の変形モードを鍛造加工に適用することを試みる。適用例として、絞り—しごきで作製したカップの一部を動かし、断面が H 型のダブルカップやフランジ付き有底カップの成形について調べる。

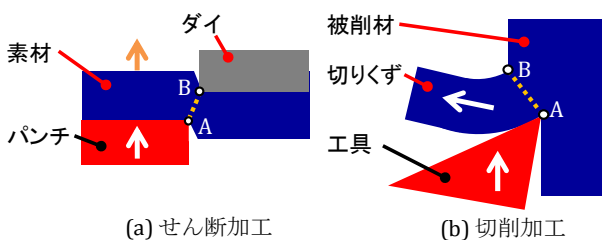


図 1 せん断加工と切削加工の比較<sup>7)</sup>

## 2. 切削モードによる鍛造の基本概念と力学

切削モードを用いる鍛造方法（以降、切削鍛造と呼ぶ）の概念を、図 2(a)に示す軸対称モデルを用いて説明する。上端が固定された被加工材を下側パンチが速度  $V$  で上方に移動して切削する。切削除去された材料は切りくずと同様にウェブに流れ込む。せん断断面 AB 上でせん断変形を生じ、図 2(a)の速度線図からせん断による相当ひずみ  $\varepsilon$  は次式によって算出される。

$$\varepsilon = (\tan \varphi + \cot \varphi) / \sqrt{3}$$

被加工材のせん断変形抵抗を  $k$ 、切込み深さを  $t_0$ 、切りくず厚さを  $t_c$ 、パンチの直径を  $d$  とすると、加工に必要なエネルギーからパンチ圧力  $p$  は次のようになる<sup>7)</sup>。

$$\frac{p}{2k} = \frac{4t_c(\tan \varphi + 0.5 \cos^{-2} \varphi)}{d(1 - \mu \tan \varphi)} = 4t_c/d f(\varphi)$$

通常、 $\tan \varphi$  は 0.1-1.0、 $\mu$  は 0.1-0.3 の範囲内にあり、 $p/2k = (3 \sim 12)t_c/d$  となる。さらに、 $t_c/d$  の常用範囲は 0.01-0.1 であり、 $p/2k$  は 1.0 より小さい。

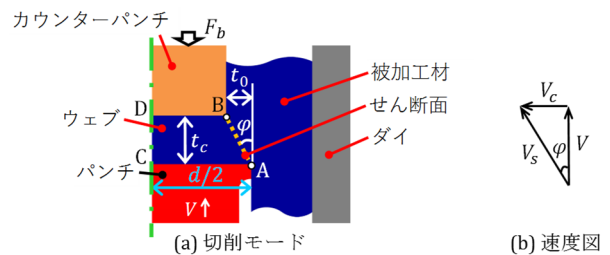


図 2 切削鍛造の力学<sup>7)</sup>

## 3. シミュレーションによる成形方法の検討

### 3. 1 シミュレーションの条件

切削鍛造が可能な範囲を図 3 の軸対称モデルのシミュレーションで調べた。被加工材は SPCC 軟鋼板とし、変形抵抗曲線を  $\sigma = C\varepsilon^n$  で近似し、 $C = 501 \text{MPa}$ 、 $n = 0.24$  とした。 $C$  を変形抵抗の代表値とする。背圧を  $p/dC = 0.005 \sim 0.05$ 、摩擦係数を 0.1-0.5 の範囲で変化させた。

### 3. 2 工具圧力

カウンターパンチにより  $p/dC = 0.005$  の背圧を加えて切削鍛造するときの H 字型ダブルカップの成形工程を図 4(a), (b) に示し、加工中のパンチ圧力の変動を(c)に示す。図 4(a)における点 A、B および C は、図 4(c)の同じ記号の位置に対応する。上下パンチの角の間のせん断変形によ

てカップ状素材の底部は上方に動かされてウェブになる。ウェブはほぼ平坦に保たれ、シミュレーションの条件内でバルジ変形は発生しない。図4(b)のようにウェブ厚さはカウンターパンチの角でわずかに薄くなり、ウェブの厚さが薄い領域はパンチストロークの増加とともにカップ中心に向かって広がる。

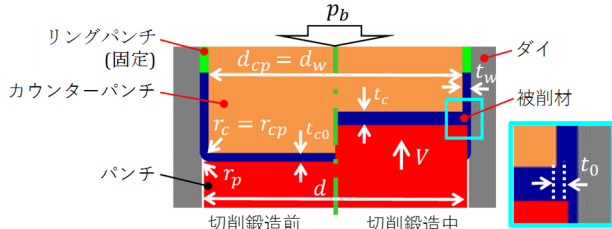


図3 絞りカップの底面を移動する模式図<sup>7)</sup>

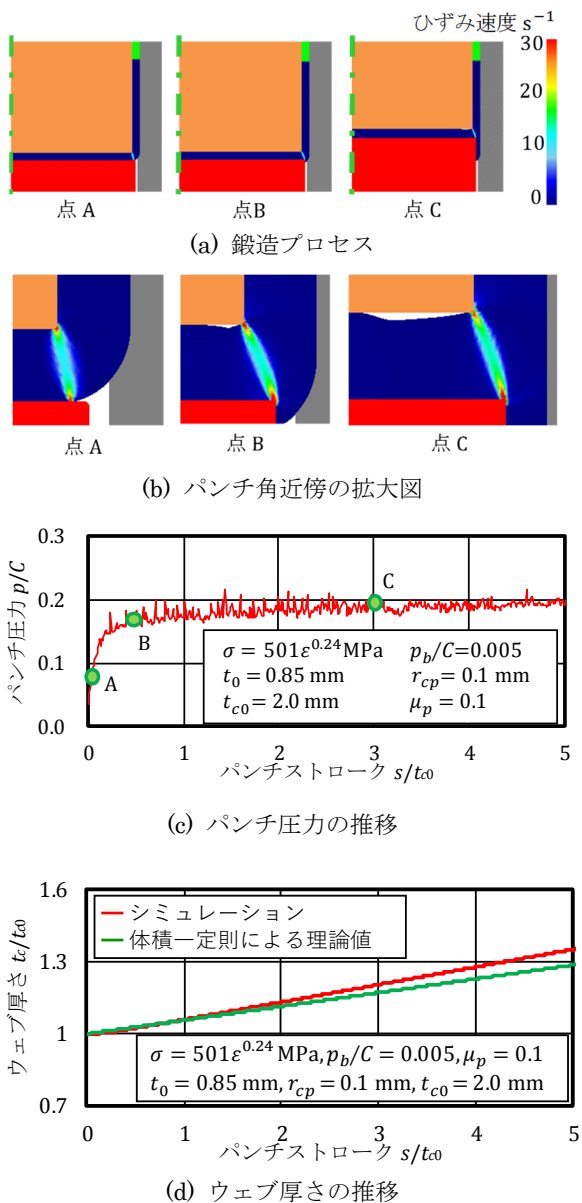


図4 切削鍛造の成形過程<sup>7)</sup>

図4(c)のようにパンチ圧力は初期に急激に上がる。パンチストロークが大きくなるとせん断領域がパンチの縁に達するB点からは圧力上昇は緩やかになる。図4(d)に示すように、ウェブの厚さは直線的に増加し、カウンターパンチの角部のウェブの厚さが中心付近よりも小さいため、体積一定と仮定した予測結果よりもわずかに大きくなる。

図4の条件では、 $\tan\phi$ は0.425、せん断変形による相当ひずみ $\epsilon$ は1.6、せん断変形抵抗 $k$ は323.8MPaで、式(2)から $p = 90.7$  MPa、 $p + p_b = 94.2$  MPaと予測される。この値は、図4(c)のシミュレーション結果である94.5 MPa ( $p/C = 0.19$ )とほぼ同じ大きさである。

図5にウェブ形状に及ぼすカウンターパンチによる背圧の効果を示す。背圧が10倍変化しても製品形状の変化はほとんど認められない。

図6に示すように、切込み深さ $t_0$ が増すとパンチ圧力が高くなるが、切込み深さ $t_0$ が $0.5t_{c0}$ であってもパンチ圧力 $p/C$ は0.3以下である。

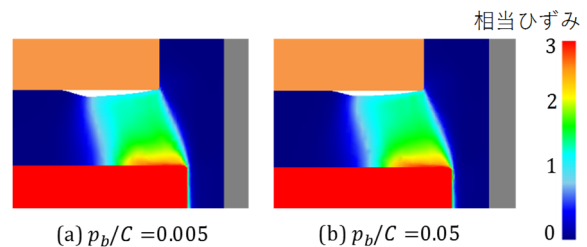


図5 ウェブ形状に及ぼす背圧の影響<sup>7)</sup>

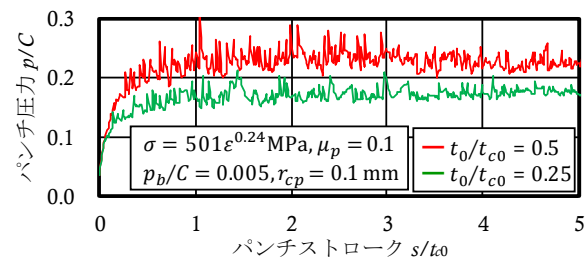


図6 パンチ圧力に及ぼす切込み深さの影響 (シミュレーション)<sup>7)</sup>

### 3. 3 材料の動き

鍛造中の材料流れを調べるために、被加工材の内壁面、底面の下面、パンチの移動経路上の数点をトレースする。図7に示すように、鍛造の進行に伴い、被加工材の内壁面上の点はウェブの上面に移動し、パンチの移動経路上の点はウェブの下面にシフトする。大きな塑性ひずみが、ウェブの材料に残されている。切削による加工硬化は、ウェブの耐圧性などの製品強度に影響を与える可能性がある。

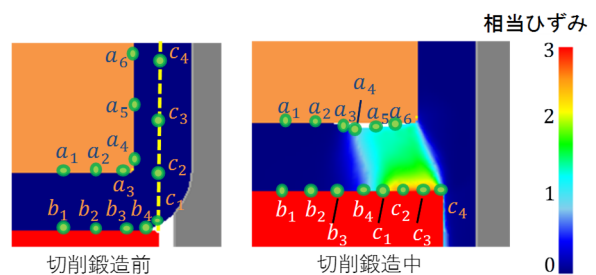


図7 切削鍛造中の材料の動き<sup>7)</sup>

### 3. 4 ひけ欠陥

図4に示すように、カウンターパンチの角でウェブの厚さが小さくなり、この挙動がひけ欠陥を生じさせる。図8は、ひけ欠陥の成長過程を示す。カウンターパンチの角半径が大きい場合、切削開始時にカウンターパンチの角付近で材料不足が発生する。初期せん断開始点の図中のaは変形の進行とともに上パンチから離れて沈み込む。最大ひけ深さは約0.2mmで、ウェブ厚さは約1/10である。ひけ欠陥を防ぐために、切込み $t_0$ の深さは図9のように十分に大きくする必要がある。ひけ欠陥を防ぐための最小の切込み深さは次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} t_0/t_{c0} &= 0.068r_{cp} + 0.22 & \text{for } r_{cp} < 3.2 \\ t_0/t_{c0} &= 1.6r_{cp} - 4.7 & \text{for } r_{cp} \geq 3.2 \end{aligned} \right\}$$

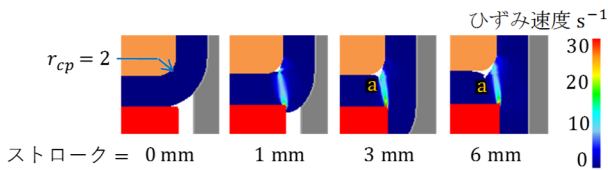


図8 ひけ欠陥の成長過程<sup>7)</sup>

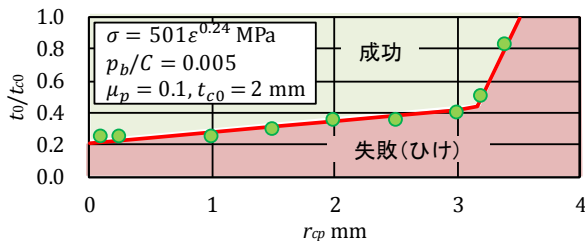


図9 ひけ発生の臨界条件<sup>7)</sup>

### 4. 実験結果

実験には低炭素鋼(SPCC)の冷延板材を用いた。この材料の変形抵抗曲線は $\sigma = 501\epsilon^{0.24}$ MPaである。図10は、絞り-しごきカップの切削鍛造後の垂直断面の形状である。絞りカップの内側の角半径は、しごき加工により0.1mmに整形されている。

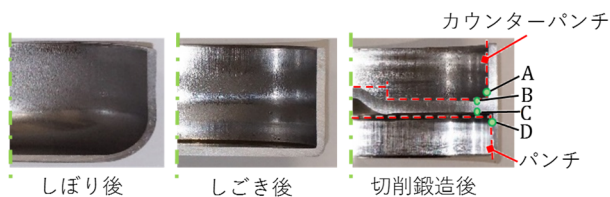


図10 各成形段階後の被加工材垂直断面形状<sup>7)</sup>

図11は、パンチストロークによるパンチ圧力の変化である。FEMシミュレーションの摩擦係数が0.17の場合、測定されたパンチ圧力はシミュレートされたパンチ圧力と同じ大きさである。

図12は、せん断変形領域におけるファイバーフローを示す。せん断変形は、パンチの刃先とカウンターパンチの角部間の線上で生じていることが分かる。せん断変形領域とウェブ形状は、図5に示すシミュレーション結果に似ている。

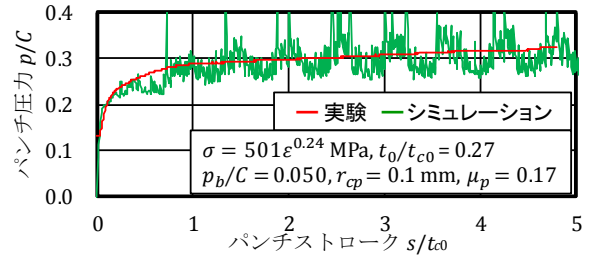


図11 パンチ圧力の解析値と実測値の比較<sup>7)</sup>



図12 せん断変形領域の鍛造線( $t_0/t_{c0} = 0.55$ )

図13は、せん断変形領域周辺のビッカース硬さの分布である。せん断された部分の硬さはカップの壁の2倍以上である。

図14は、鍛造品の表面性状を示す。図14のA, B, C, Dは、図10に示す位置に対応している。ウェブの上面は溝状の構造であり、ウェブの下面は鏡面で、切削加工の切りくず表面と似ている。内壁面Dはパンチで強く平滑化されているが、焼付きは生じていない。



図13 せん断変形領域周辺のビッカース硬さ分布<sup>7)</sup>

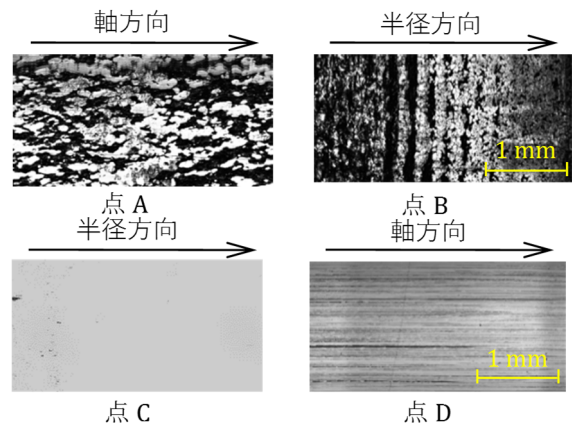


図14 切削鍛造品の表面状態 ( $t_0/t_{c0} = 0.55$ )<sup>7)</sup>

## 5. 切削鍛造によるフランジ付き有底カップの成形法

上述したように、絞りしごきカップの底面は切削鍛造によって自由に移動することができる。同様に切削鍛造を

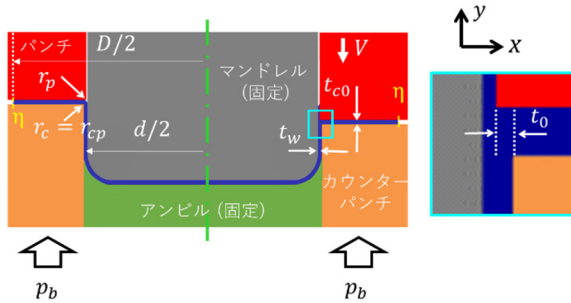


図 15 フランジ付き有底カップの成形解析モデル

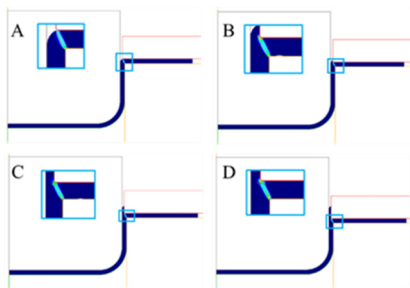
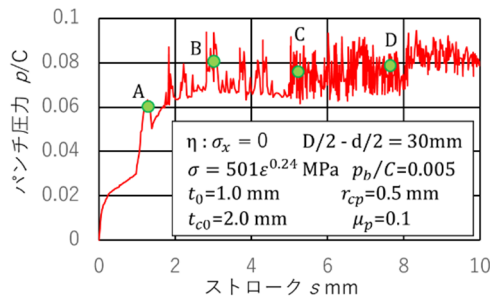


図 16 フランジ側面が自由の場合の解析結果

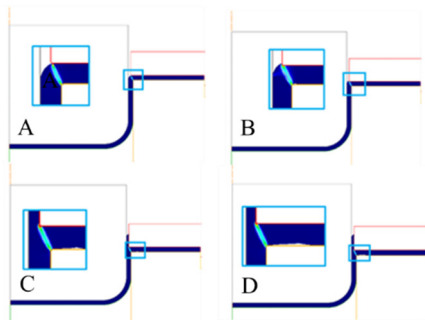
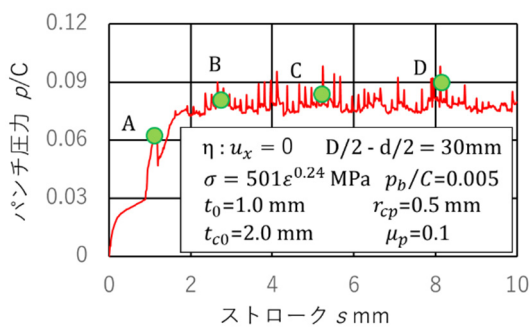


図 17 フランジ側面が固定された場合の解析結果

用いて、絞りしごきカップの外壁にフランジを成形することができる。図 15 に FEM シミュレーションモデルを示す。被加工材は絞りしごき加工で作製することができる。シミュレーションはフランジの側面が自由( $\eta: \sigma_x = 0$ )と固定( $\eta: u_x = 0$ )の 2 条件で行った。

図 16 はフランジ側面が自由の場合の解析結果である。カップ外面のフランジはパンチとカウンターパンチ間で形成されたせん断変形によって移動される。パンチ圧力は十分に小さく、フランジの厚さは均一でほぼ初期板厚のままである。

一方、図 17 のように、フランジ側面が固定された場合においても、フランジは小さなパンチ圧力で移動される。この場合、フランジの厚さはカウンターパンチの角部付近で少し小さくなっている。

## 6. 結言

鍛造荷重と工具圧力を下げるために「切削鍛造」と呼ばれる新しい鍛造方法を提案し、絞りしごきで作製された鋼カップから断面が H 字型のダブルカップの成形に適用した。

- (1) 切削鍛造の工具圧力は、被加工材料の変形抵抗の 1/2 以下と非常に低い。
- (2) 切削鍛造により、深絞りしごきカップの底面をカップの高さ方向に自由に移動できることを示した。
- (3) ウェブの角のひけ欠陥を防ぐために、深絞りしごきカップの底部厚さに対する切込み深さの比率は、しごきカップの角半径により決まる限界値よりも大きくする必要がある。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の平成 29 年度重点研究開発助成 B をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。また、実験の遂行に岐阜大学助教箱山智之氏、岐阜大学大学院修士課程生遠藤氏、日本学術振興会外国人特別研究員の董文正氏の協力をいただいた。さらに実験結果の討議を通して、大阪大学の小坂田宏造名誉教授、静岡大学の中村保名誉教授に数多くの助言をいただいた。

## 参考文献

- 1) 西野創一郎ほか：プレス加工による板鍛造成形技術，塑性と加工，51-594(2010)，642-646.
- 2) M. Merklein, et. al.: Plastic flow and its control in sheet-bulk metal forming of thin-walled functional components, Annals of the CIRP, 64(2015), 245-248.
- 3) T. Schiemann, et. al.: Mechanisms of fold formation during flange upsetting of tubular parts, AIP conference Proceedings, 1532(2013), 284-290.
- 4) X.Y. Wang, et. al.: Stamping-forging hybrid forming of double layer cup with different wall thicknesses, Materials research innovations, 15(2011), S435-S438.
- 5) 中野隆志：板成形と鍛造の複合技術，塑性と加工，42-484(2001)，388-392.
- 6) 王志剛：板鍛造の技術要点，精密工学会誌，80-12 (2014)，1049-1052.
- 7) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, 68 (2019), 273-276.