

角筒深絞り加工におけるパンチ形状と成形性との関係

中山 恭秀*・岡野 翔太郎**

Relation between Punch Shape and Processability in Rectangular Cup Deep Drawing

Yasuhide Nakayama*, Shotaro Okano**

Abstract

The plastic forming is most important process in industrial production. The deep drawing, in particular, is indispensable for forming of various products. The forming efficiency of deep drawing is depend how various factors are controlled so that the decision of forming conditions becomes complicated. Therefore, numerical analysis is effective to estimate the optimum conditions of processing in deep drawing. In the present paper, the process of rectangular cup deep drawing has been treated. The relation between the punch shape and the plastic deformation of an aluminum alloy sheet in the deep drawing was evaluated by the numerical analysis. As the result of this work, it is shown that a mutual relationship between blank size and punch shape decides the plastic flow of a sheet and has an influence on the processability of the deep drawing.

1. 緒 言

金属材料の塑性加工により、多くの工業製品が成形されており、工業製品の生産において今や必要不可欠な技術となっている。また、塑性加工では材料の性質を変化させることもでき、材質の調整・制御といったことも非常に重要である。種々ある塑性加工法のなかで、深絞り加工は重要な加工法のひとつである。深絞り加工によって成形されるものには、自動車の車体や電気製品などをはじめ、鍋、ジュース等の缶、流し台、など身近な品がある^[1]。深絞り加工は、その加工工程において材料の塑性変形挙動が非常に複雑であり、いかに加工限界を向上させるか、材料損失を少なくするかといった研究がなされている。こうした背景のもと、塑性加工の加工工程の分析において、有限要素法^[2, 3, 4]による数値シミュレーションが、幅広く適用されるようになり、こうした技術が加工不良の発生予測や、試作工程の削減などに役立っている。先に述べた深絞り加工において、薄板の深絞り限界は、成形品形状、素板形状、工具寸法、しわ押え力など様々な要因に左右される。特に、角筒深絞り加工においては、加工条件の最適設定が非常に困難であり、有限要素法による解析が有効であると考えられる。

そこで本研究では、深絞り加工において、有限要

素法解析による塑性変形解析を行う。特に、曲辺部と直辺部における変形が異なる角筒深絞り成形加工に注目し、長方形角筒パンチによる角型深絞り加工の工程において、パンチ形状および素板形状が材料の塑性変形挙動に及ぼす影響について解析・検討する。

2. 深絞り加工

パンチを用いて素板をダイス穴内に押し込み、素板の外形を縮めて容器状の製品を成形する加工を深絞り加工^[1]という。深絞り加工によって成形されるものには、自動車の車体や電気製品などをはじめ、鍋、灰皿、弁当箱、ジュースやビール缶、流し台、浴槽など身近な品がある。この方法では、しわの発生あるいは破断によって加工限界が定まる。したがって、成形技術上最も重要な問題は、しわや破断を防ぎながら、どのようにして素板に大きな絞り変形を与えるかということである。角筒容器の深絞り加工^{[5]~[11]}を行う場合、成形限界は成形初期のパンチ肩破断もしくは成形後期のコーナー部壁割れで制約される。コーナーカット量を大きくし過ぎると壁割れが生じてしまう。

本研究では、上記のような点を考慮しながら、角型長方形筒断面の深絞り加工工程における形状比や

* 弓削商船高等専門学校電子機械工学科

** 弓削商船高等専門学校専攻科生産システム工学専攻

しわ押さえ力と成形性の関係や加工工程中の塑性変形挙動について検討する。

3. 有限要素法

3.1 構成式

大変形を扱う塑性問題では、応力-ひずみ関係が非線形であり、増分的な扱いをする必要がある。塑性変形においては、塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ と偏差応力 s_{ij} との間に、以下のような関係があるとして表現される[12]。

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda s_{ij} \quad (1)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \right) \quad (2)$$

ここで、 $d\lambda$ は変形量によって異なる係数で、ひずみの進行度合いによって変化する。この構成式は、ひずみ増分理論(流れ理論)といわれる。また、塑性変形は負荷経路に依存するため、塑性加工のような多軸応力状態におかれる問題では、応力状態を評価する必要がある。そこで、次式で表される相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当塑性ひずみ増分 $d\bar{\varepsilon}^p$ が用いられる。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (3)$$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (4)$$

上式(3)、(4)を用いると、 $d\lambda$ は以下のようにかける。

$$d\lambda = \frac{3d\bar{\varepsilon}^p}{2\bar{\sigma}} = \frac{3d\bar{\sigma}}{2H'\bar{\sigma}} \quad (5)$$

ここで、 $H' = d\bar{\sigma}/d\bar{\varepsilon}^p$ は瞬間硬化係数である。

本研究では、汎用有限要素法プログラムにより弾塑性変形解析を行う。この解析においても、流れ理論に基づいた応力増分-ひずみ増分の構成関係が用いられるが、応力速度、ひずみ速度の形で定式化される。この応力速度の定式化には、Cauchy応力のJaumann速度を用いるが、Cauchy応力のJaumann速度 $\overset{\nabla}{\sigma}_{ij}$ は次式で表される[13]。

$$\overset{\nabla}{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (6)$$

ここで D_{ijkl} は、相当応力 $\bar{\sigma}$ 、偏差応力 s_{ij} 、横弾性係数 G 、ポアソン比 ν 、瞬間硬化係数 H' を用いて次式のように表される。

$$D_{ijkl} = G \left\{ \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} + \frac{2\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right\} - \alpha \frac{3G s_{ij} s_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (H'/3G + 1)} \quad (7)$$

ここで、 α は応力点が弾性域であるとき $\alpha=0$ 、応力点が降伏曲面上にあり応力速度が外向きのとき $\alpha=1$ の値をとる。

3.2 解析モデル

本研究では、長方形角筒断面の深絞り加工において、パンチと素板の対辺距離の比が加工状態に及ぼす影響について解析・検討を行う。パンチ形状比 pl/ps が1.5と2.0のモデルについて解析を行った。解析を行ったパンチ・ダイスのモデル形状を以下のTable1に、モデル図をFig.1に示す。実際の解析は、モデルの対称性を考慮し、1/4モデルで行った。解析対象となるモデル材料については、深絞り加工によって形成される角筒容器の一般的なモデルを想定し、変形体には塑性加工性と耐食性に優れる5000系のアルミニウム合金を設定した。材料特性値は、ヤング率 $E=70GPa$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ 、塑性変形に関する応力-ひずみ関係は次式のスウィフト型の構成式 $\bar{\sigma} = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n$ で表される。

$$\bar{\sigma} = 576(0.015 + \bar{\varepsilon}_p)^{0.359} \quad (8)$$

この材料については、破断に至る応力レベルは、単軸引張り応力値に換算して360MPa程度と推定される。また、加工条件として、ダイス・パンチ・素板の摩擦はないものとした。素板形状は板厚0.8mmと

Table 1 ダイス・パンチの形状データ

パンチ面積	10000 mm ²
ダイス肩半径	10 mm
パンチ肩半径	10 mm
クリアランス	2 mm
パンチコーナー半径	R10
ダイスコーナー半径	R12

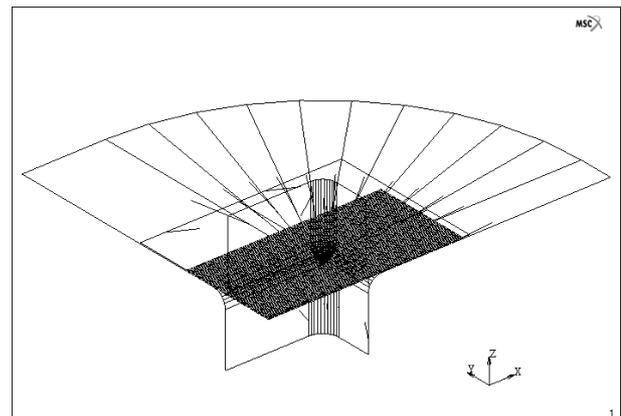


Fig.1 有限要素モデル

し、パンチと素板の長辺と短辺をFig.2に示すように、それぞれ pl と ps 、 bl と bs としたとき、パンチ-素板長辺比 bl/pl を1.5, 1.6, 1.8, 2.0, パンチ-素板短辺比 bs/ps を2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0と種々変化させ、解析を行った。

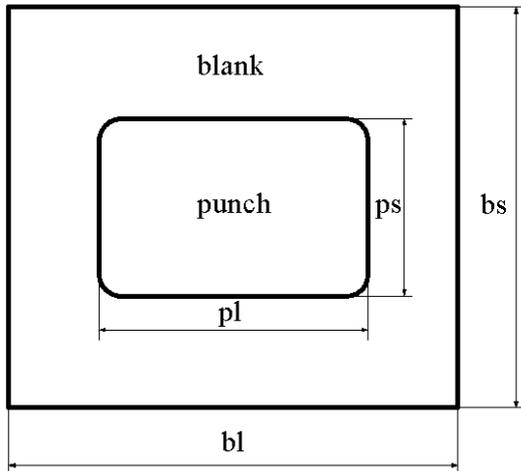


Fig.2 パンチ・素板形状

$$\frac{pl}{ps} = \text{パンチ形状比}$$

$$\frac{bl}{pl} = \text{パンチ-素板長辺比}$$

$$\frac{bs}{ps} = \text{パンチ-素板短辺比}$$

4. 解析結果および考察

4.1 パンチ形状比 $pl/ps=1.5$ モデル

パンチ形状比 $pl/ps=1.5$ のモデルについて、それぞれ素板形状を変化させた場合の解析結果を示す。Fig.3はパンチ-素板長辺比 $bl/pl=2.0$ のモデルについて、最大相当応力が約360MPaに達した段階における各パンチ-素板短辺比 bs/ps ごとの相当応力分布である。どのモデルの場合においても、素板右上角部の相当応力は低く、材料があまり絞り込まれていない。パンチ-素板短辺比 bs/ps が大きくなるにつれ、パンチ長辺側の絞り込みが小さくなり、かわりにパンチ短辺側の絞り込みが大きくなることがわかった。また、パンチ-素板短辺比 bs/ps が大きくなるにつれ、ダイス肩部の高応力領域がパンチ長辺側からパンチ短辺側へと移動していていることがわかる。この傾向は、本研究解析で行ったどの解析モデルにおいても認められた。そこで、応力値の変化を素板中心端の応力で比べることとする。Fig.4に示す

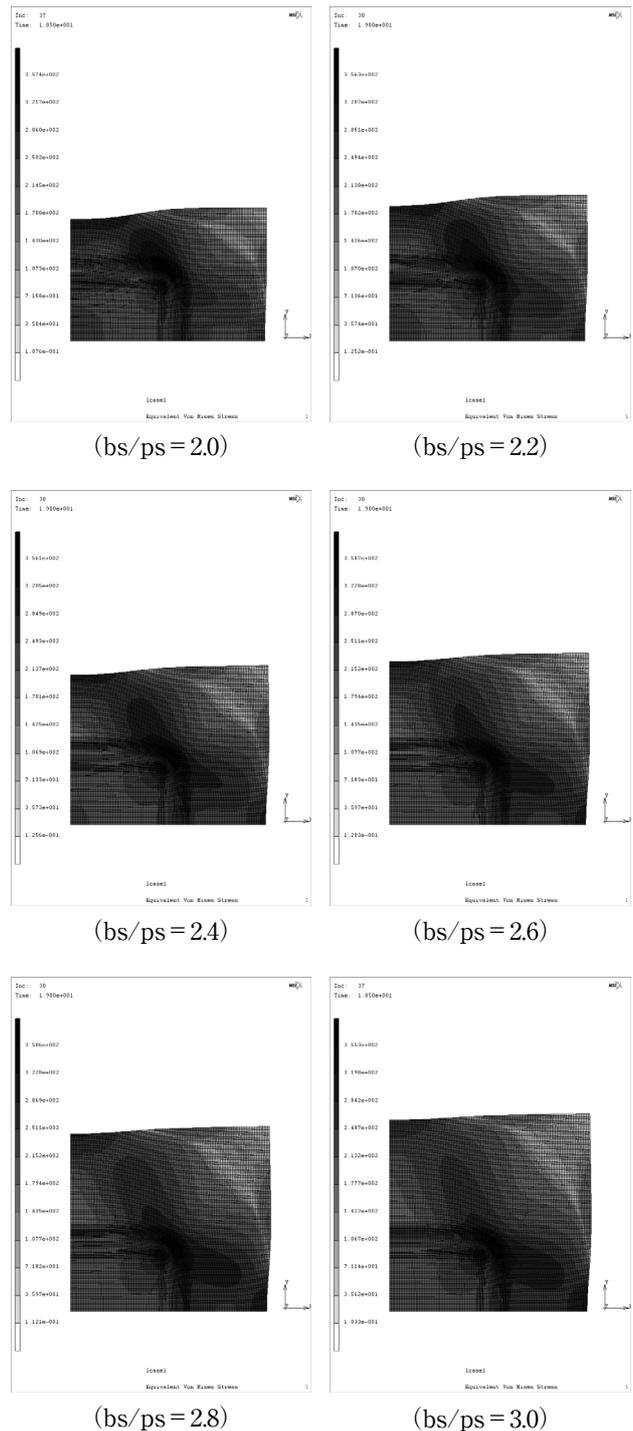


Fig.3 相当応力分布 ($pl/ps=1.5$, $bl/pl=2.0$)

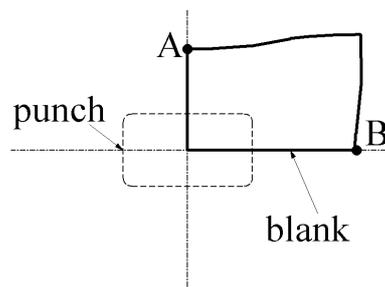
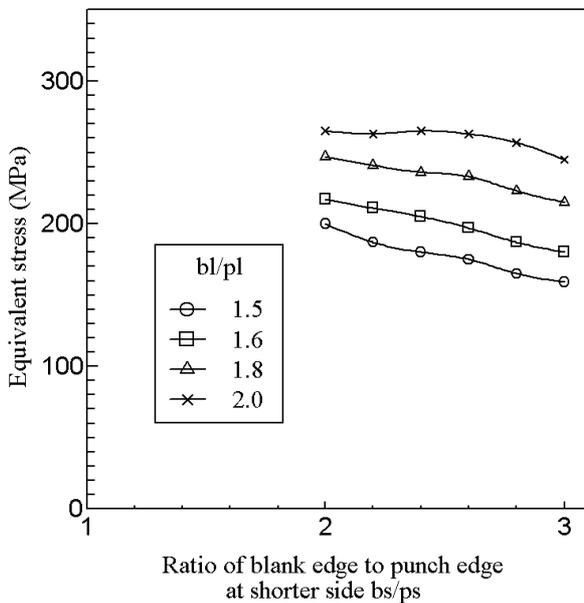


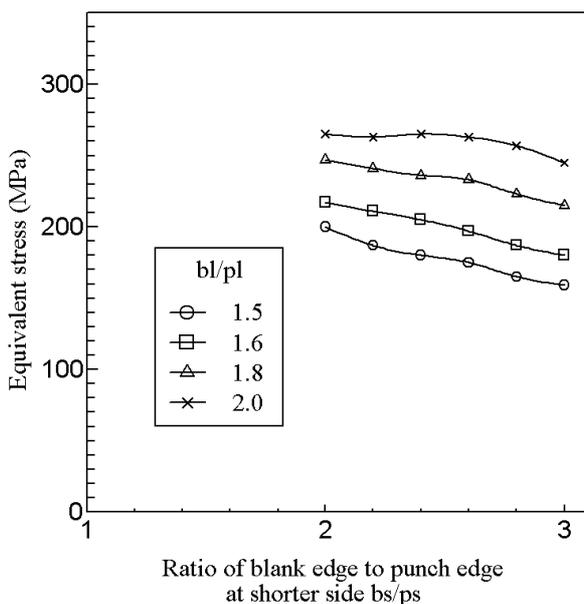
Fig.4 素板中心端における応力測定点

ように、パンチ長辺側の素板中心端をA点、パンチ短辺側の素板中心端をB点とし、Fig.3のひずみ段階での各点の応力を各素板形状ごとに調べた結果をFig.5に示す。パンチ-素板短辺比 bs/ps の増加にともない、A点の相当応力値は減少し、B点の相当応力値は増加する結果が得られた。

次に、パンチ形状比 $pl/ps=1.5$ の各モデルについて、板材の最大相当応力値が約 360MPa に達した段階での、パンチ-素板短辺比 bs/ps とパンチ押し込み量の関係をFig.6に示す。パンチ-素板長辺比 bl/pl が大きい



(パンチ長辺側 (A点))



(パンチ長辺側 (B点))

Fig.5 素板中心端の相当応力とパンチ素板短辺比の関係 ($pl/ps=1.5$)

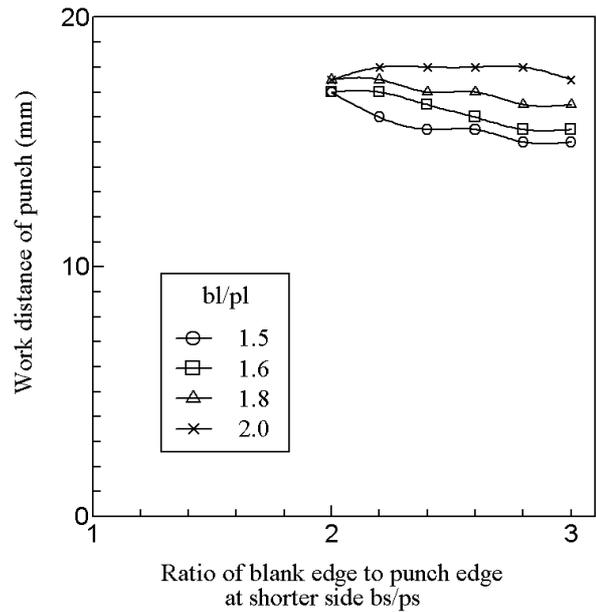


Fig.6 パンチ押し込み量とパンチ素板短辺比の関係 (最大相当応力 360MPa 時 $pl/ps=1.5$)

ものほど素板の押し込み量が大きくなっている。また、パンチ-素板長辺比 $bl/pl=2.0$ モデルを除いて、パンチ-素板短辺比 bs/ps が大きくなるにつれて押し込み量が小さくなることがわかった。

パンチ-素板短辺比 bs/ps の増大は、パンチ長辺側フランジ部の板材面積を大きくし、パンチ長辺側での加工抵抗を増加させ、板材の流れ込みを低下させる。したがって、パンチ長辺側での板材の流れ込みが低下することで、板材のしぼり込みも減少し、A点での応力値低下をもたらす結果になると考えられる。一方で、パンチ短辺側での板材の流れ込みが相対的に増大することになり、B点での応力増大を招いていると考えられる。また、パンチ押し込み量についても、パンチ長辺側での加工抵抗増加の影響により、低下しているものと考えられる。

4. 2 パンチ形状比 $pl/ps=2.0$ モデル

パンチ形状比 $pl/ps=2.0$ のモデルについて、それぞれ素板形状を変化させた場合の解析結果を示す。Fig.7はパンチ-素板長辺比 $pl/pl=2.0$ のモデルについて、最大相当応力が約 360MPa に達した段階における、各パンチ-素板短辺比 bs/ps ごとの相当応力分布である。パンチ-素板短辺比 $bs/ps=2.0$ のモデルでは、パンチ長辺側ばかりが絞り込まれ、パンチ短辺側はほとんど絞り込まれておらず、素板B点の応力値も低いことがわかる。

パンチ形状比 $pl/ps=1.5$ のモデルと同様、パンチ形状比 $pl/ps=2.0$ の場合における、素板中心端の相当応力値の変化をFig.8に示す。パンチ形状比 $pl/ps=1.5$ の場合と同様に、パンチ-素板短辺比 bs/ps が増加する

につれて、A点の相当応力は減少し、B点の相当応力は増加していることがわかる。特に、パンチ-素板短辺比 bs/ps が2.0から2.4においては、A点の応力値低下が顕著であった。

一方、板材B点での応力値については、パンチ-素板長辺比 bl/pl が大きいほど、パンチ-素板短辺比 bs/ps の増加とともに、応力値が急激に増加する傾向が認められた。パンチ-素板長辺比 $bl/pl=2.0$ 、パ

ンチ-素板短辺比 $bs/ps=2.0$ のモデルは、解析を行ったモデルのなかで素板の長辺-短辺比 bl/bs が最も大きいことを考えると、パンチ長辺側とパンチ短辺側における板材の流れ込みに大きな差があることが、こうした傾向の要因であると考えられる。

次に、パンチ形状比 $pl/ps=2.0$ の各モデルについて、最大相当応力が約360MPaに達した段階での、パンチ-素板短辺比 bs/ps とパンチ押し込み量の関係をFig.9に示す。パンチ-素板長辺比 bl/pl が1.8および2.0のモデルでは、パンチ-素板短辺比 bs/ps によるパンチ押

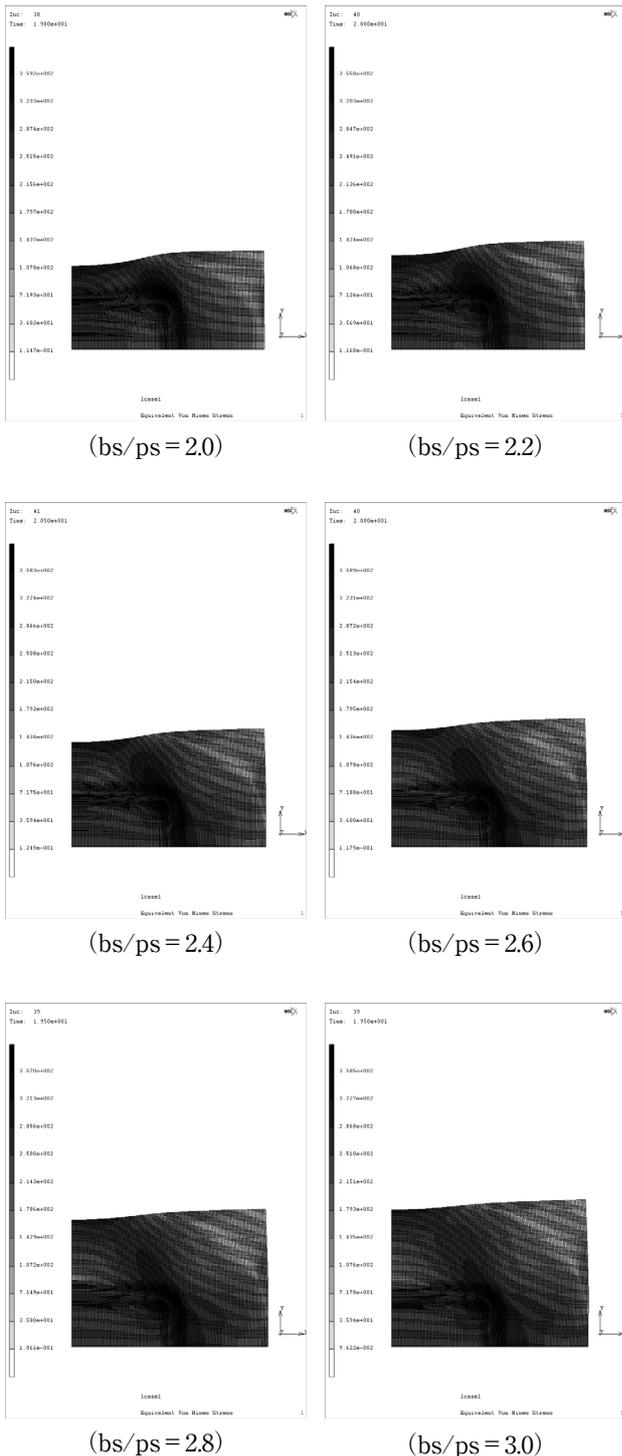


Fig.7 相当応力分布 ($pl/ps=2.0$, $bl/pl=2.0$)

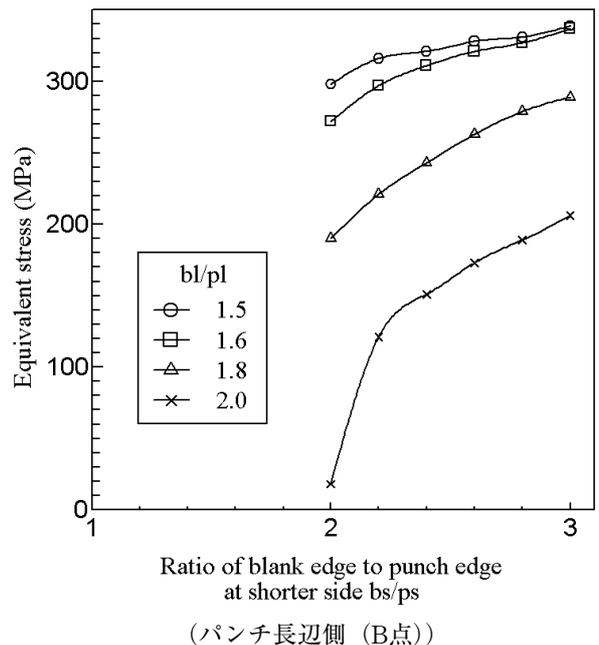
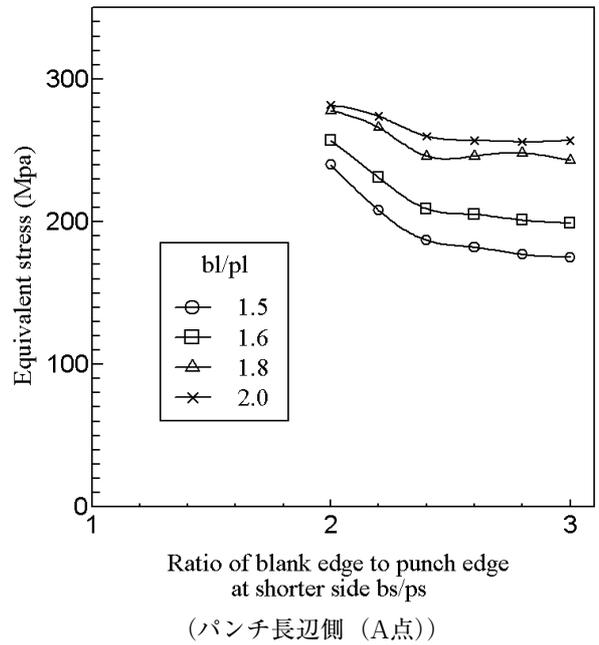


Fig.8 素板中心端の相当応力とパンチ素板短辺比の関係 ($pl/ps=2.0$)

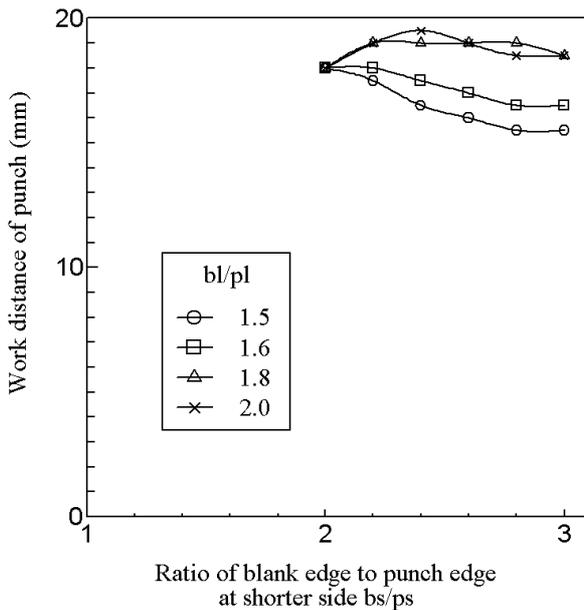


Fig.9 パンチ押し込み量とパンチ素板短辺比の関係
(最大相当応力 360MPa時 $pl/ps=2.0$)

し込み量の変化はあまり認められず、両者のモデルの差もあまり現れなかった。一方、パンチ-素板長辺比 bl/pl が1.5および1.6のモデルでは、パンチ-素板短辺比 bs/ps の増加にともなってパンチ押し込み量が低下することが認められ、パンチ-素板長辺比 bl/pl の大小により、加工状態に関する傾向がはっきり分かれた。パンチ長辺側フランジ部と短辺側フランジ部における板材の面積が、パンチ長辺側と短辺側の加工抵抗に直接的に影響することを考えると、パンチ-素板長辺比 bl/pl が小さいモデルの場合、パンチ-素板短辺比 bs/ps の増加にともなって、パンチ長辺側と短辺側の加工抵抗の比が非常に大きくなったことが、板材の成形性を低下させた要因と考えられる。特に、パンチ形状比が大きく、板材の流れ込みにおいて、パンチの長辺側と短辺側に大きな差異がある場合、パンチ-素板短辺比 bs/ps の成形性に与える影響が大きく現れるものと考えられる。

5. 結 言

工業製品の生産において重要な加工法のひとつである深絞り加工は、成形品形状、素板形状、工具寸法、しわ押え力など様々な要因に加工状態が左右される。特に、角筒深絞り加工においては、加工条件の最適設定が非常に困難である。そこで本研究では、長方形角筒パンチによる角型深絞り加工の工程において、パンチ形状比と素板形状比が板材の塑性変形挙動に及ぼす影響について有限要素法解析を行った。

本研究における解析結果から、以下の結論が得ら

れた。

- パンチおよび素板の形状比を変えることで、板材の流れ込み方も変化し、それに合わせて高応力領域も移動する。
- 高応力領域はパンチ長辺側に素板を広げれば素板のパンチ短辺側に移動し、パンチ短辺側に素板を広げれば素板のパンチ長辺側に移動する。
- こうした応力分布の変動は主にダイス肩部周辺に顕著にみられたが、素板端部にまで及ぶ。
- このような応力状態の変動の原因として、パンチ-素板短辺比 bs/ps の増大が、パンチ長辺側フランジ部の板材面積を大きくし、パンチ長辺側での加工抵抗を増加させることに要因があると考えられる。すなわち、加工抵抗の増加が板材の流れ込みを低下させ、板材のしぼり込みの減少を招き、応力値低下をもたらすものと考えられる。
- パンチ形状比が大きく、パンチ長辺側のとパンチ短辺側における板材の流れ込みに大きな差がある場合、パンチ-素板短辺比 bs/ps が加工に与える影響は非常に大きく、パンチ-素板短辺比 bs/ps の変化にともなうパンチ長辺側フランジ部の加工抵抗の増減が加工状態を左右すると考えられる。

以上のように、長方形角筒パンチによる角型深絞り加工において、パンチの形状比だけで成形性が決まるのではなく、素板形状とパンチ形状との相互関係が、板材の流れ込みとフランジ部の加工抵抗を決定し、加工における板材の応力状態や成形性に大きく影響することがわかった。

参考文献

- [1] 日本材料学会編：塑性加工学，(1997)，養賢堂。
- [2] 日本材料学会編：改訂・初心者のための有限要素法，(2001)，日本材料学会。
- [3] 鷲津久一郎・宮本博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦：有限要素法ハンドブック I．基礎編，(1981)，培風館。
- [4] 日本塑性加工学会編：非線形有限要素法，(2005)，コロナ社。
- [5] 司文華・桑原利彦・秀野雅之：塑性と加工，Vol.38-No.435 (1997)，pp.354-359。
- [6] 水野高爾・Daixin, ER.: 塑性と加工，Vol.38-No.435 (1997)，pp.372-376。
- [7] 桑原利彦：塑性と加工，Vol.38-No.436 (1997)，pp.448-453。
- [8] 水野高爾・Daixin, ER.: 塑性と加工，Vol.38-No.440 (1997)，pp.844-846。

- [9] 中村和彦・姿 晴仁：塑性と加工，Vol.42-No.491 (2001)，pp.1228-1232.
- [10] 大上哲郎・藤井秀樹・菊池正夫・林照彦：塑性と加工，Vol.43-No.501 (2001)，pp.978-982.
- [11] 小川秀夫・勝田洋平：塑性と加工，Vol.45-No.526 (2004)，pp.927-931.
- [12] 吉田 総仁：弾塑性力学の基礎，(1997)，共立出版.
- [13] 富田佳宏：数値弾塑性力学，(1990)，養賢堂.

