

角型深絞り加工における塑性変形解析

中山 恭秀*・岡野 翔太郎**

FEM Analysis of Plastic Deformation of Sheet Metal at 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 depends on 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 behavior on plastic deformation of aluminum alloy sheet in the deep drawing was evaluated by numerical analysis. As the result of this work, the stress at the punch corner rises as the aspect ratio of rectangular die hole becomes large. The flow of blank at the longer side of rectangular die is remarkable. It is guessed that the efficiency of cup shape deep drawing is influenced by the protruded size of blank from die hole.

1. 緒 言

塑性加工は、現在の生産加工分野において重要な加工法の一つである。1枚の平らな板を型で押してその外周を縮め、底のついた容器状に成形することを絞り加工といい、他の絞り作業と区別するときは深絞りという。一般に、深い容器状の製品を得るには絞り加工によらなければならないが、この場合にも板の一部分、多くは中央部に張り出し変形が起きるのが普通である。現在の塑性加工では、計算機を用いた数値シミュレーションが当然のように行われるようになり、不具合の予測や加工条件の最適化などに大きな効果をあげており、工業製品の製造には欠かせない技術となっている。FEM(有限要素法)シミュレーション[1][2][3]の実用化は、計算機ハードウェアの性能の著しい成長とともに、ソフトウェアが市場ニーズに対して柔軟な対応が出来るようになり、その普及・応用分野が飛躍的に拡大した。塑性加工の分野においても、有限要素法活用技術の発展はめざましいものがあり、各種加工法に適用され、実際の生産現場においてもその有効性が認識されている。代表的な塑性加工のひとつである深絞り加工においても、こうしたFEM解析がさまざまになされている。曲辺部と直辺部で変形の異

なる角筒の深絞り限界については、比較的数多くの研究報告が発表されている[4]–[10]。しかし、その多くは、正四角筒絞りに関するもので、短辺と長辺の比が異なる長方形筒の深絞り限界について取り扱った研究はあまり行われていない。そこで本研究では、汎用有限要素法解析ソフトを用いて短辺と長辺の比が異なる長方形筒断面の深絞り加工工程における塑性変形挙動を解析・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[11]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。

* 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

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。

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

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

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) [12][13] 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 $d\varepsilon^p$ が用いられる。

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

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

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

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

ここで、 $H' = d\bar{\sigma}/d\varepsilon^p$ 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 [14]。

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

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

本研究において、解析対象とした角型深絞り加工の、パンチ・ダイス形状を Fig.1 に、その形状寸法を Table 1 に示す。なお、これらの型は有限要素解析において剛体として扱う。型形状に関して、ダイス穴形状はその面積を 4900mm^2 で一定としたまま、形状比が 1.0, 1.5 と異なるものを用意した。パンチ形状は、ダイスとのクリアランスを一定としたまま、ダイス穴形状の変化に応じてその形状を決定している。変形体 (被加工材) の有限要素モデルを Fig.2 に示す。要素分割数は約 6400 である。

本研究で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として、変形体に塑性加工性と耐食性に優れた 5000 系のアルミニウム合金 (Al-Mg 系) を適用した。応力とひずみの関係は次式で表される。

Table1. Shape of punch and die

| | |
|-----------|---------------------------|
| ダイス穴面積 | $70 \times 70\text{mm}^2$ |
| ダイス肩半径 | 5mm |
| パンチ肩半径 | 8mm |
| クリアランス | 2mm |
| パンチコーナー半径 | R10 |
| ダイスコーナー半径 | R12 |

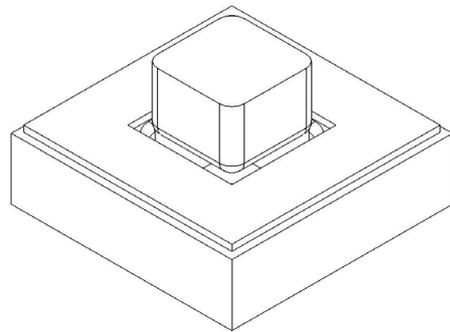


Fig.1 Schematic view of punch and die

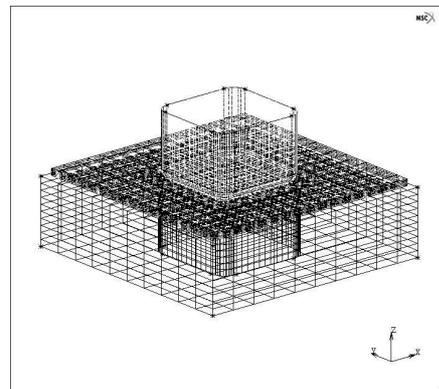


Fig.2 Finite element model

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

なお、ヤング率 $E = 70\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.33$ 、摩擦係数は 0.162 とした。本研究では、しわ押え面圧の違いによる加工工程における変形体に掛かる応力の変化を調べるため、形状比ごとにしわ押え面圧を 0.5MPa 、 1.0MPa 、 1.5MPa 、 2.0MPa と変化させながら、ダイス穴形状比 1.0 および 1.5 のモデルの角型深絞り加工の有限要素法解析を行った。

4. 有限要素法解析結果

4. 1 形状比 1.0 モデル解析結果

Fig.3～6 に形状比 1.0 のモデルにおいて、しわ押え面圧をそれぞれ 0.5MPa 、 1.0MPa 、 1.5MPa 、 2.0MPa とした場合の相当応力分布を示す。しわ押え面圧が 0.5MPa の場合を除いて、素板がくびれダイス穴へ大きく流れこんでおり、加工量も大きくなっている。また、しわ押え面圧が 1.0MPa および 1.5MPa のモデルにおいて、パンチ肩部の応力値が低く、加工条件が良好であることが分かった。

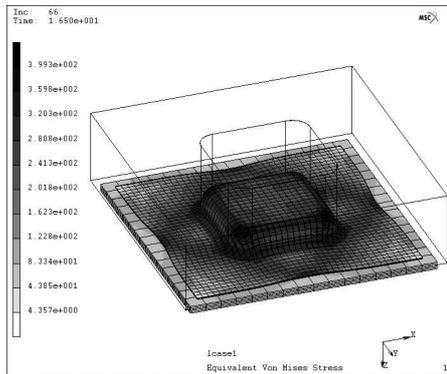


Fig.3 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.0 pressure of blank holder 0.5MPa)

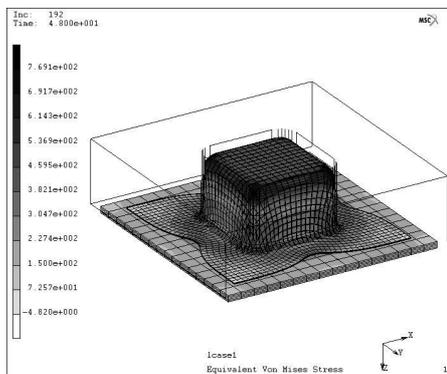


Fig.4 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.0 pressure of blank holder 1.0MPa)

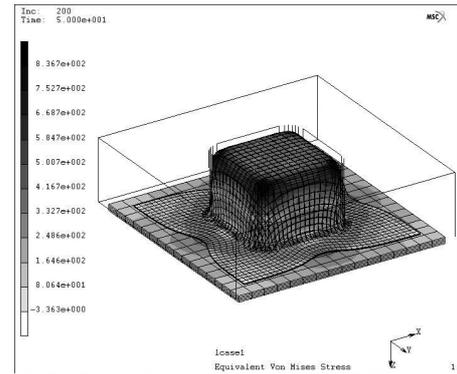


Fig.5 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.0 pressure of blank holder 1.5MPa)

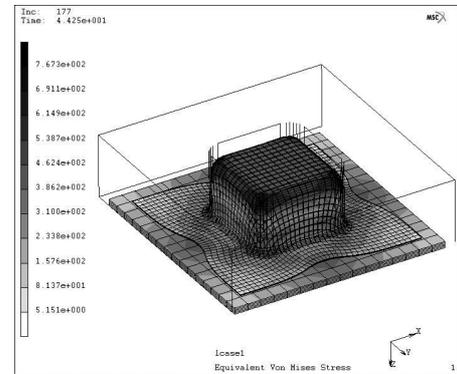


Fig.6 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.0 pressure of blank holder 2.0MPa)

以下の Fig.7 は形状比 1.0 のときのダイス肩部における相当応力とパンチ押し込み量の関係を示しており、Fig.8 はパンチ肩部における相当応力とパンチ押し込み量の関係を表している。

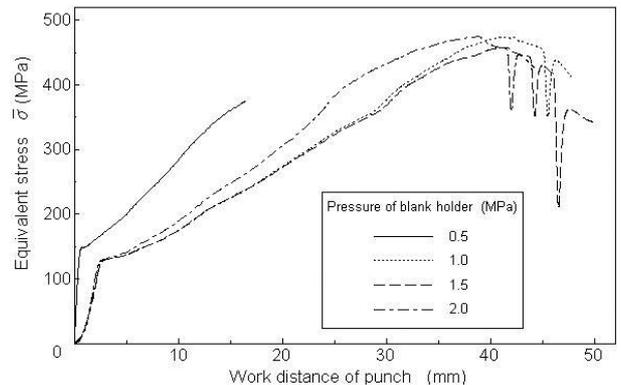


Fig.7 Equivalent stress at die corner vs. work distance of punch (aspect ratio 1.0)

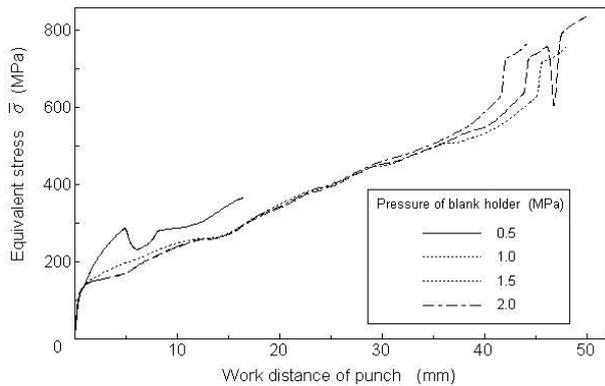


Fig.8 Equivalent stress at punch corner vs. work distance of punch (aspect ratio 1.0)

しわ押え面圧 0.5MPa のモデルでは、ダイス肩部・パンチ肩部のどちらにおいても応力値が高くなっており、加工条件が不良であることが分かる。また、その他のしわ押さえ面圧では、パンチ肩部における応力値にはあまり違いは認められなかった。ダイス肩部において、しわ押え面圧 1.0MPa と 1.5MPa の場合にはあまり応力値に違いはみられないが、面圧 2.0MPa の場合ではその他 2 つの条件よりも応力値が大きくなっており、1.0MPa から 1.5MPa の間において加工条件が良いことがわかる。

4. 2 形状比 1.5 モデル解析結果

形状比 1.5 のモデルについて、しわ押え面圧を 0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPa, 2.0MPa と変化させた場合の相当応力分布を Fig.9 ~ 12 に示す。形状比 1.5 の場合、形状比 1.0 のモデルの場合よりも、加工押し込み限界量が低く、材料のダイス穴への流れ込みも少ないことが分かる。この傾向に対応して、パンチ・ダイス肩部での応力値が形状比 1.0 のモデルの場合よりも高くなっていることが認められた。

Fig.13 に、形状比 1.5 のときのダイス肩部における相当応力とパンチ押し込み量の関係を、Fig.14 にパンチ肩部における相当応力とパンチ押し込み量の関係を示す。形状比 1.0 のモデルの場合とは異なり、パンチ肩部ではしわ押え面圧が変化しても応力値に違いはみられなかった。ダイス肩部での応力は、しわ押え面圧 1.0MPa と 1.5MPa の場合にはあまり差異が認められないが、しわ押さえ面圧 2.0MPa の場合では応力値がその他のモデルの場合よりも高くなっている。したがって、しわ押さえ面圧 2.0MPa は、加工条件として高すぎるものと考えられる。また、形状比が大きくなるにつれ、同じ加工量であっても、パンチ肩部の応力値が高くなっており、これは素板のダイス穴からはみ出し量が関係していると考えられる。特に、ダイス穴長辺側のはみ出し量が加工性に大きな影響を与えている。こうした傾向は、ダイス穴長辺部分は素板の流れ込みや絞りが激しく、加工に伴う板厚の増加が原因と考えられる。

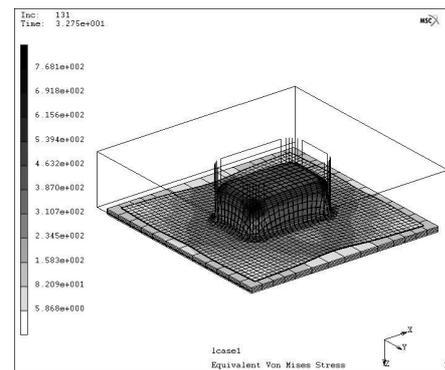


Fig.9 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.5 pressure of blank holder 0.5MPa)

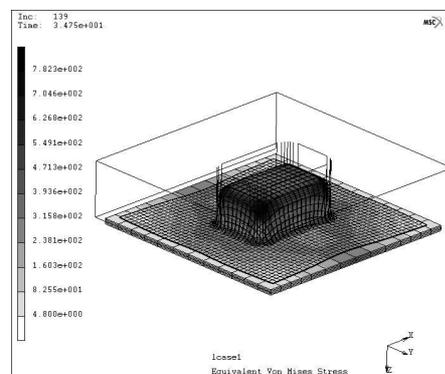


Fig.10 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.5 pressure of blank holder 1.0MPa)

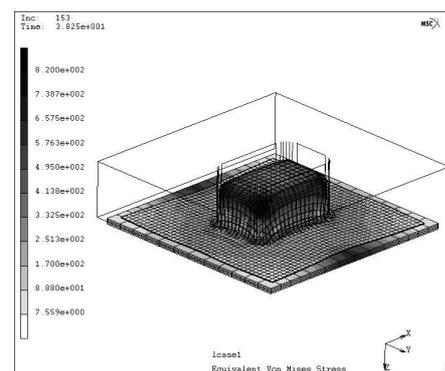


Fig.11 Distribution of equivalent stress (aspect ratio 1.5 pressure of blank holder 1.5MPa)

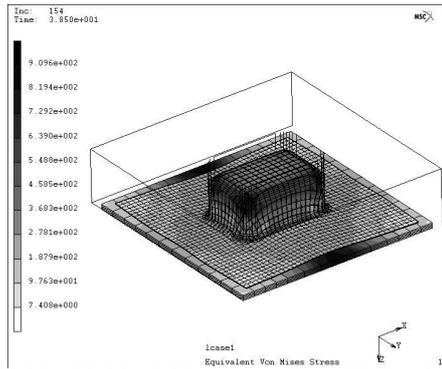


Fig.12 Distribution of equivalent stress
(aspect ratio 1.5 pressure of blank holder 2.0MPa)

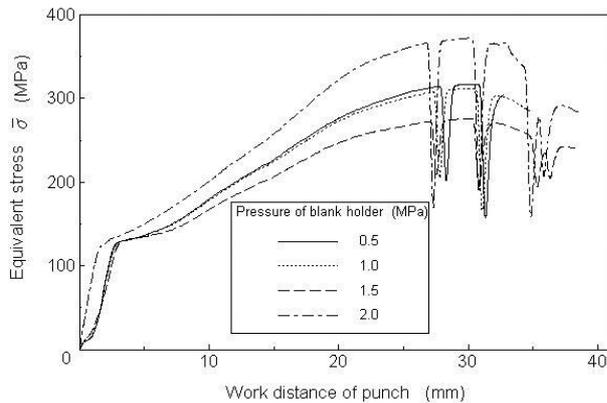


Fig.13 Equivalent stress at die corner
vs. work distance of punch (aspect ratio 1.5)

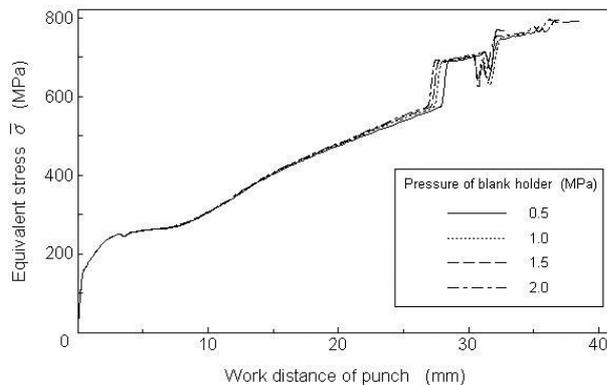


Fig.14 Equivalent stress at punch corner
vs. work distance of punch (aspect ratio 1.5)

5. 結 言

本研究では、塑性加工の代表的な加工方法である深絞り加工の問題に関して、短辺と長辺の比が異なる長方形筒断面の角型深絞り加工工程における塑性変形挙動を、弾塑性有限要素法により解析した。解析モデルは、ダイス穴形状比を1.0, 1.5とした角型深絞りについて、しわ押え面圧を変化させながら、しわ押さえ面圧が加工性に与える影響や、しわ押え面圧の最適条件について検討した。

解析による結果から、しわ押え面圧により、ダイス肩部の応力状態が変化しており、しわ押さえ面圧が低すぎても、高すぎても加工性が低下し、しわ押さえ面圧が1.0MPa～1.5MPaの範囲において、加工が良好に行われており、最適な加工条件であるといえる。

また、形状比が大きくなるにつれ、同じ加工量であっても、パンチ肩部の応力値が高くなっており、これは素板のダイス穴からのみ出し量に関係していると考えられる。特に、ダイス穴長辺側のみ出し量が加工性に大きな影響を与えている。こうした傾向は、ダイス穴長辺部分は素板の流れ込みや絞りが激しく、加工に伴う板厚の増加が原因と考えられる。したがって、ダイス穴形状にあった素板のみ出し量を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 日本材料学会 編, 改訂・初心者のための有限要素法, 日本材料学会 (2001)
- [2] 鷺津久一郎, 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, 培風館 (1981)
- [3] 日本塑性加工学会 編, 非線形有限要素法, コロナ社 (2005)
- [4] 司文華, 桑原利彦, 秀野雅之, 塑性と加工 Vol.38-No.435(1997)pp.354-359
- [5] 水野高爾, Daixin ER, 塑性と加工 Vol.38-No.435(1997)pp.372-376
- [6] 桑原利彦, 塑性と加工 Vol.38-No.436(1997)pp.448-453
- [7] 水野高爾, Daixin ER, 塑性と加工 Vol.38-No.440(1997)pp.844-846
- [8] 中村和彦, 姿晴仁, 塑性と加工 Vol.42-No.491(2001)pp.1228-1232
- [9] 大上哲郎, 藤井秀樹, 菊池正夫, 林照彦, 塑性と加工 Vol.43-No.501(2002)pp.978-982
- [10] 小川秀夫, 勝田洋平, 塑性と加工 Vol.45-No.526(2004)pp.927-931
- [11] 日本材料学会 編, 塑性加工学, 養賢堂 (1977)
- [12] 吉田 総仁, 弾塑性力学の基礎, 共立出版 (1997)
- [13] 平修二, 現代塑性力学, オーム社 (1990)
- [14] 富田佳宏, 数値弾塑性力学, 養賢堂 (1990)