

# 順送金型における深絞り用スリット形状の最適化

岐阜工業高等専門学校 機械工学科

教授 加藤浩三

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007022)

キーワード：順送金型、深絞り加工

## 1. 緒言

順送金型による加工は、その高い生産性から多く利用されている<sup>1)~2)</sup>。順送金型を用いた塑性加工の際に必要な帯板のスリット形状は、経験に基づく試行錯誤によって決められており、体系的な検討結果によるものではない。効率的な製造工程構築のためにはスリット形状の体系的な設計技術が必要である。本研究では、順送金型用の帯板について適切なスリット形状の設計手法を開発することを目的としている。本研究では、市販の 3 次元剛塑性有限要素法ソフトウェア DEFORM-3D を用いて、スリット形状が深絞り成形性に及ぼす影響を評価する。

## 2. 検討方法

### 2.1 順送金型深絞り加工におけるスリットの位置づけ

深絞り加工は、円盤形状の素板から容器形状の製品を塑性成形する加工方法である。この変形の主要な部分はフランジ部の縮み変形であり、フランジ部では円周方向への収縮と半径方向内側への材料流入が生じている。これに伴い、円盤形状素材の外縁部は半径方向の内側へ引き込まれる。

順送金型とトランスファー金型のブランクを比較すると、順送金型では、一枚の帯板から多数の同一製品を成形するタイプの加工であり、成形中には複数の部品が連なったままである。成形が完了する最終ステージ近くで、各個別の製品に分離される。一方、トランスファー金型ではブランクは工程当初から分割されており、各単体のブランクは各成形ステージ間を搬送されながら次第に目標形状の製品へと成形される。

深絞り加工では、先に述べたように材料外縁部が半径方向内側に流入される必要がある。このため、順送金型で深絞り加工を実現するには、複数の材料が連なったままの状態、深絞り加工のフランジ部の材料流入を実現させることが必要であり、素材の帯板にスリットと称する「切れ目」を設けることが必要になる。

### 2.2 検討対象の加工工程の概要

図 1 は本研究の対象を示したものであり、順送金型の深絞り加工部品をモデル的に示したものである。矩形的のブランクには深絞り加工の実現に必要なスリットが設けられている。本研究では、剛塑性有限要素法によりスリットの形状の検討を行うが、検討に先立って、剛塑性有限要素法のモデル化の妥当性を検討するための成形実験を実施した。

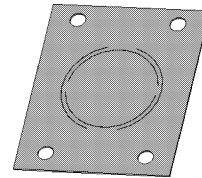


図 1 検討対象の 3 次元モデル

図 2 は成形実験に供したブランクの概要図であり、スリットを設けるためのせん断工程と深絞り工程の二つから構成されている。これら二つの工程は図 3 に示す能力 250kN の油圧プレスに設置された金型セットにより実現される。試験材料には、板厚が 0.5mm で、有効絞り直径 29mm の A1050-H と A1050-O の二種類を用いた。また、工具は直径 18mm で肩半径が 5mm のパンチと、内径が 19mm で肩半径が 2mm のダイを用いた。これらの実験条件をまとめて表 1 に示す。

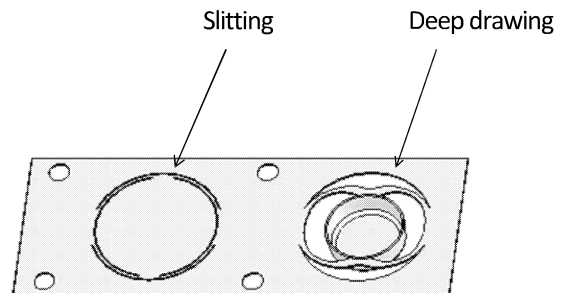


図 2 順送金型により成形するブランクの概要

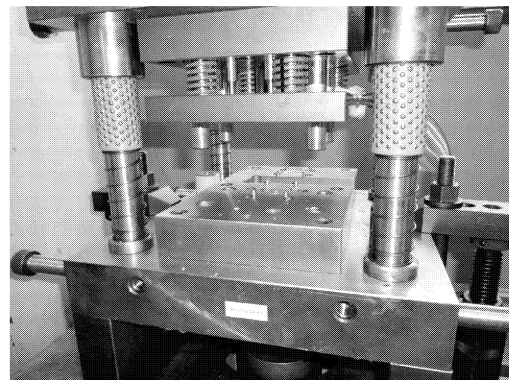


図 3 金型セットの概観写真

表1 実験条件

試験片	材料	A1050-H
		A1050-O
	板厚	0.5mm
	有効絞り直径	29mm
	実験装置	能力250kN 油圧プレス
	潤滑剤	牛脂
	パンチ条件	パンチ直径 Φ18, パンチ肩半径 R5
	ダイ条件	ダイ内径 Φ19, ダイ肩半径 R2
	絞り比	1.62

### 2.3 剛塑性有限要素法ソフトウェア「DEFORM」の概要

「DEFORM」は、剛塑性有限要素法を用いた3次元塑性加工シミュレーションソフトである。複雑な形状を持つ3次元形状において、素材の変形推移を解析でき、実加工では観察が困難な変形途中の形状も確認することができる。本研究では、「DEFORM 3D Ver. 10」を用いた。

「DEFORM」は、通常の有限要素法ソフトウェアと同様にプリ処理、メイン処理、およびポスト処理の3つの処理から構成されている。プリ処理は、解析の準備をする処理である。材料条件、境界条件、および要素分割などの様々なパラメータの設定をこの処理で行い、解析用のデータベースファイルに出力する。解析対象となる3次元モデル及び工具は、Solid Works を用いて作成することができ、作成された拡張子「.stl」のファイルをプリ処理で取り込むことができる。ポスト処理は、計算が完了したデータベースファイルの結果を評価する処理である。成形途中の解析対象を多様な観点から評価することができ、任意の断面における変形の推移を観察することができる。また、応力、ひずみ及び変位などの変数の分布を、ラインコンター、シェードコンター及びソリッドコンターなどの表示タイプで表示させることができる。表示させることができる変数は多様であり、応力、ひずみ、ひずみ速度及び変位などのパラメータが用意されている。また、各パラメータについて、例えば、ひずみであれば相当ひずみ、平均ひずみ及び最大主ひずみなどといったような、多様なタイプが用意されている。本研究においては、ソリッドコンターを用いて相当ひずみ分布を表示させ、成形性の評価を行った。

### 2.4 スリットのモデル化方法とその妥当性

順送金型用の帯板ブランクには、2.1 節でも述べたようにスリットと称される「切れ目」が必要となる。このスリットは、実加工ではせん断加工によって成形される。実際の成形においては、材料を打ち抜いて溝を作るのではなく、単に切れ目を作るのみであるので、スリットは図4 (a)に示す、すきまのない分離面になっている。けれども、剛塑性有限要素法ソフトウェア DEFORM で解析を行う際には、すきまがないと変形体の表面を認識することができないため、3次元モデルのスリットについては、図4 (b)に示す幅が 0.05mm の狭い溝をすきまのない分離面と近似的にみなすことにした。このモデル化の妥当性は、3.2 節にて検証を行う。

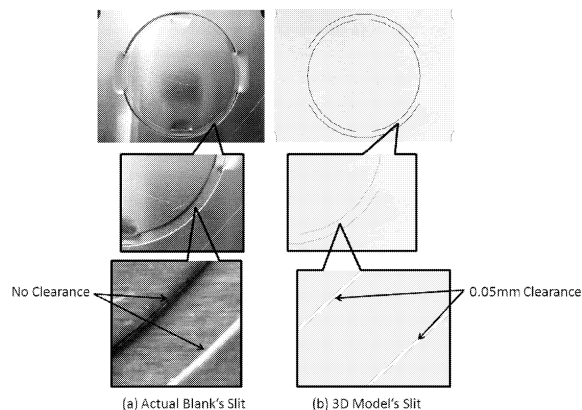


図4 スリットの比較

### 2.5 加工条件

図5は、解析の際の3次元モデルのスリット形状を示したものであり、形状パラメータとして角度 $\theta_1$ 及び $\theta_2$ と定義した。図6は採用した $\theta_1$ と $\theta_2$ についての角度条件の組み合わせを2次元の平面上に示したものであり、図中のドット●が本検で採用した角度条件である。各角度条件についてこれらが成形性に及ぼす影響を評価する。

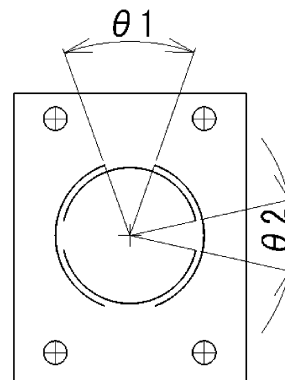


図5 スリット寸法の定義

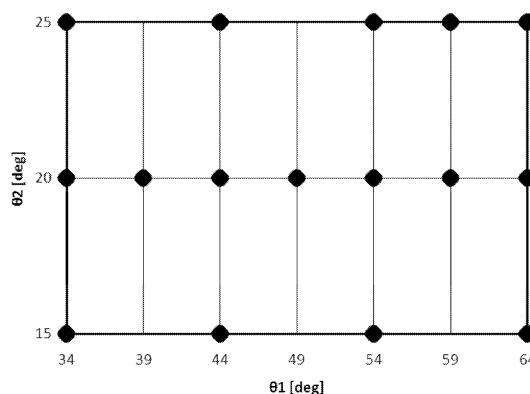


図6 角度条件の配置

表2は、シミュレーションに使用した「DEFORM」の設定条件等をまとめたものである。材料は、n乗硬化則に従うものとし、F値及びn値を設定した。解析対象は、アルミニウムを想定しており、F値は130MPa、n値は0.29としている。要素分割は、要素数を60000と設定した。工具とブランク間の

摩擦条件は、クーロン摩擦の仮定を利用した。摩擦係数は0.02としている。計算ステップ条件は、全ステップを100ステップとし、1ステップあたりにパンチが0.1mm移動するように設定した。パンチの全ストロークは10mmである。工具は、2.2節で述べた成形実験に使用したものと同一ものをSolid Worksにより3次元モデルにより準備した。ブランクの有効絞り直径は、29mmとした。有効絞り直径とパンチ直径から計算される絞り比は、約1.62である。工具とブランクのオブジェクトタイプは、それぞれ工具を剛体とし、ブランクを剛塑性体とした。

表2 シミュレーション条件

素材	材料特性	加工硬化材料 F 値 130MPa n 値 0.29
	板厚	0.5mm
	有効絞り直径	29mm
	スリット幅	0.05mm
要素	4 節点ソリッド要素 要素数 60000	
摩擦の仮定	クーロン摩擦の仮定 摩擦係数 $\mu = 0.02$	
計算条件	ステップの増分	0.1mm/step
	全ステップ数	100
	全ストローク	10mm
パンチ条件	$\Phi 18$ , パンチ肩半径 R5	
ダイ条件	$\Phi 19$ , ダイ肩半径 R2	
絞り比	1.62	

### 3. 結果と考察

#### 3.1 成形実験の結果と考察

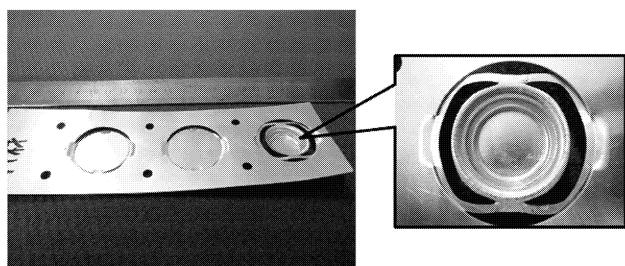


図7 成形実験結果の一例

図7は成形実験結果の一例であり、工業用純アルミニウムA1050-H材を用いて成形した結果である。一枚の帯板内にせん断工程で設けられたスリット部と、深絞り工程で成形された容器部が認められる。特に深絞り工程を拡大して示しているが、スリットを設けたことによる「つなぎ部」が当初の予定通り成形されている。以上の結果から採用した順送金型工具セットにより、所定の深絞り成形を実現することが可能であることが確認された。次節では、剛塑性有限要素法のスリットモデルの妥当性の検証のために本実験によるテストピースを適用する。

実験に際しては、A1050の硬質材(H材)の他に、焼きなまし材(O材)についての成形実験も実施した。図8は前述のH材とO材を比較したものである。O材では材料が柔らかく、剛

性が不十分なためにスリット成形のためのせん断工程段階で、成形後の材料の工具からの取り外しが困難である。そのため帯板全体の平坦度が損なわれているのみならず、深絞り成形対象部の成形前の平坦度が著しく損なわれている。そのため、後続工程の深絞り工程においても、芯合わせをうまく行うことができず、深絞り成形後の容器の真円度も損なわれている。

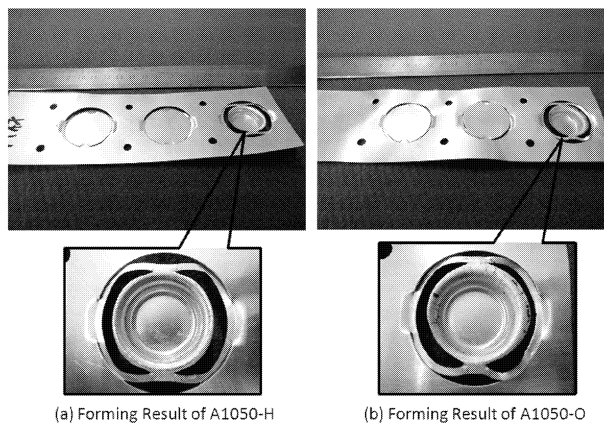


図8 H材とO材の成形結果の比較

#### 3.2 成形実験と剛塑性有限要素法の比較

本節では、スリットの3次元モデルの妥当性を検証する。図9(a)は、成形実験によって成形された帯板ブランクであり、(b)は剛塑性有限要素法ソフト「DEFORM」を用いて成形シミュレーションを実施した結果である。(a)と(b)を比較すると、スリット間の素材の形状の違いはあるものの、成形対象部の形状はほとんど同じである。以上の結果から、狭い溝によるスリットのモデル化は妥当であると判断した。

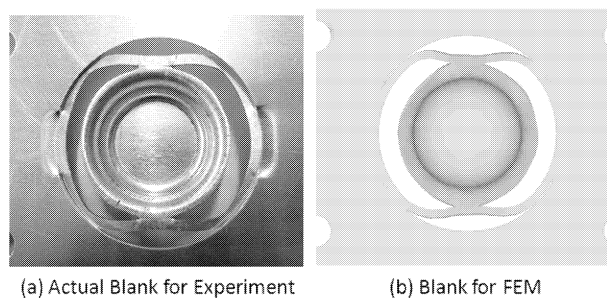
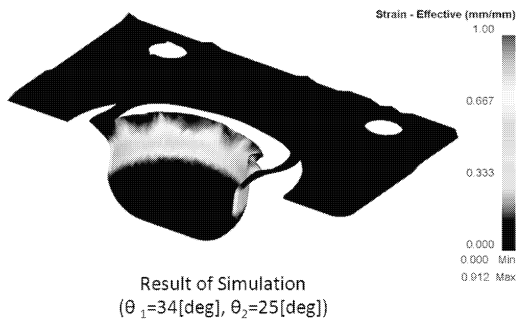


図9 実験結果とシミュレーションの比較

#### 3.3 剛塑性有限要素法によるスリット形状の検討

図10は、シミュレーション結果の一例を示したものである。シミュレーションに際しては、ブランクの対称性から1/2モデルを使用した。図10に示されるように、相当ひずみの進展はダイ肩部に集中している。図11はシミュレーション結果について、成形の良否を判断する代表値を計算する方法を示すための図である。先に述べたように本成形では相当ひずみの進展はダイ肩部に集中していることから、この部分の相当ひずみを円周方向にサンプリングし、この相加平均値を該当シミュレーション条件の代表値とし、この平均値の小さいスリット条件ほど良好なスリット形状であるとみなすことにした。



Result of Simulation  
( $\theta_1=34[\text{deg}]$ ,  $\theta_2=25[\text{deg}]$ )

図 10 解析結果の一例

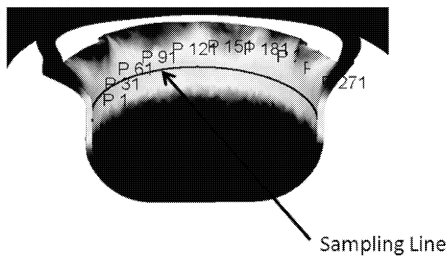


図 11 相当ひずみ値のサンプリングポイント

図 12 は、各角度条件の相当ひずみの平均値と標準偏差を示したものである。縦軸は相当ひずみの平均値で、横軸は条件番号である。また、標準偏差を縦軸方向の幅で示している。条件番号は角度条件を表しており例えば「 $\theta_1=34^\circ$  及び  $\theta_2=25^\circ$ 」の角度条件であれば、「3425」と表わしている。図中で、顕著に小さい相当ひずみの平均値を示したのは、条件番号 3920, 4420, 4425, 4920, 5920, 6420 及び 6425 の 7 つである。これらの条件に共通するのは、 $\theta_2$  が  $20^\circ$  以上であることであり、特に、7 つの条件のうち 5 つは  $\theta_2$  が  $20^\circ$  である。すなわち、 $\theta_2$  が  $20^\circ$  の条件のほとんどで相当ひずみの平均値

は小さい。

次に、図 12 について相当ひずみの標準偏差に着目すると、角度条件により差異がある。例えば、「3425」と「6420」とを比較すると、「3425」では標準偏差の幅が大きく、相当ひずみの値が比較的集中している結果になっている。図 13 はこの標準偏差の傾向を考察するためのものである。(a)は、相当ひずみの標準偏差が大きい条件の  $\theta_1=34^\circ$  及び  $\theta_2=25^\circ$  の結果であり、ダイ肩部で、相当ひずみの生じている部分の幅が狭く、ダイ肩部周辺に相当ひずみの進展が集中している。一方、(b)は相当ひずみの標準偏差が小さい条件の  $\theta_1=64^\circ$  及び  $\theta_2=20^\circ$  の結果であり、ダイ肩部から容器の端までほぼ同様であり、相当ひずみの生じている部分の幅が広がっており、ダイ肩部から容器の端にかけて相当ひずみの進展が分散している。以上のように相当ひずみの標準偏差が大きい角度条件では、ダイ肩部の相当ひずみが集中しており、また、相当ひずみの標準偏差が小さい角度条件では、ダイ肩部のひずみが幅広く分散していることが確認された。なお、同様の結果は他の角度条件についても確認することができた。

#### 4. 結言

本研究では、順送金型用帯板に必要なスリット形状について、この適切な設計手法の開発を目的として、ブランクのスリット形状が成形性に及ぼす影響を剛塑性有限要素法のシミュレーションにより検討した。シミュレーションに使用した 3次元モデルでは、スリットを幅の狭い溝としてモデル化しており、スリットがすきまのない分離面である実際の帯板とは違いがある。そこで、順送金型セットを用いて成形実験を行い、スリットの 3次元モデル化の妥当性を検証した。また、解析されたブランクの相当ひずみに着目し、ダイ肩部における相当ひずみの平均値、及び相当ひずみ分布を評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

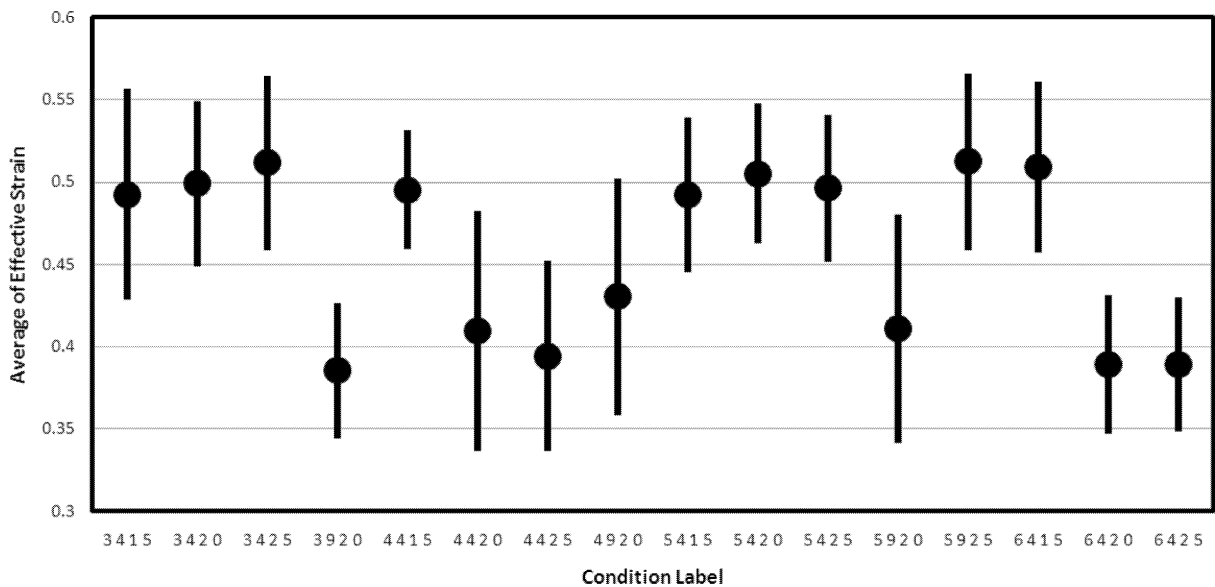
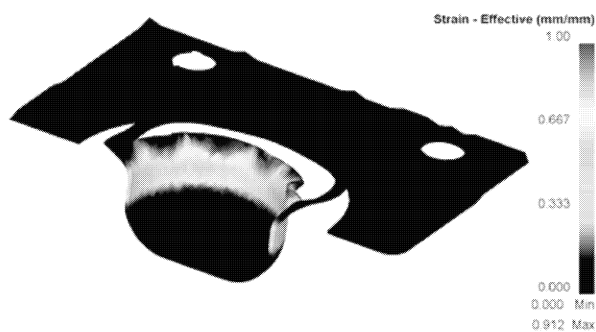
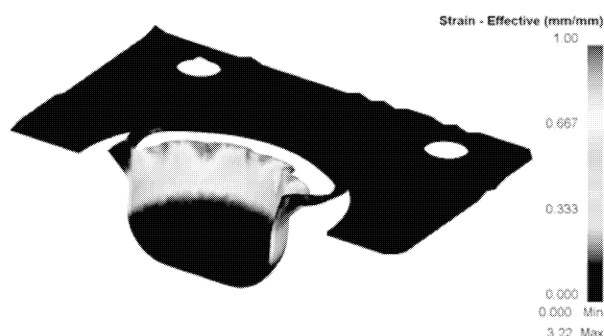


図 12 角度条件別の相当ひずみの平均値及び標準偏差



(a) Result of Simulation  
 $(\theta_1=34[\text{deg}], \theta_2=25[\text{deg}])$



(b) Result of Simulation  
 $(\theta_1=64[\text{deg}], \theta_2=20[\text{deg}])$

図13 解析結果の比較

- (1) 剛塑性有限要素法によるシミュレーションに先立って行われた成形実験では、採用した金型セットにより所定の深絞り成形を実現することが可能であることが確認された。
- (2) 剛塑性有限要素法に使用される帯板ブランクの3次元モデルのスリットは、スリットが隙間のない分離面である実際の帯板とは違い、幅の狭い溝をスリットとしてモデル化した。成形実験によって成形された帯板と、シミュレーションにより成形された3次元モデルの比較によりこの妥当性を検証した結果、ほぼ同様の形状を得られたため妥当であると判断した。
- (3) 解析されたブランクのダイ肩部の相当ひずみの平均値、及び標準偏差を求め、角度条件がこれらの評価尺度に及ぼす影響を比較したところ、 $\theta_2=20^\circ$  の条件において比較的低い相当ひずみの値が得られた。
- (4) 相当ひずみの標準偏差が大きい角度条件では、ダイ肩部の相当ひずみが集中しており、また、相当ひずみの標準偏差が小さい角度条件では、ダイ肩部のひずみが幅広く

分散していることが確認された。

#### 謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団平成19年度研究開発助成の御支援の下に遂行されました。本研究の遂行にあたり、多大なご支援を賜りました天田金属加工機械技術振興財団様に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 山口文雄ほか、「基本プレス金型実習テキスト」, 日刊工業新聞社(1993), pp. 142-144.
- 2) 山口文雄, 「小物プレス金型設計」, 日刊工業新聞社(1992), pp. 67-70.