

二次元 FEM による板成形部品の成形性簡易評価手法の開発

渡辺憲一・岩谷二郎・岡野洋一郎

加古川製鉄所・技術研究センター

Development of a Simple Formability Evaluation Method of Sheet Forming Parts using 2D FEM

Kenichi Watanabe・Jiro Iwaya・Yoichiro Okano

In order to develop a simple formability evaluation method for sheet press forming parts, the evaluation model using 2D FEM of 3 dimensional parts was developed. The model was made up of axisymmetric and plane strain elements connected by spring elements. The propriety of this model was tested using a square cup deep drawing in strain distribution and fracture height aspect. It was shown that this model could describe the formability of sheet forming parts in the shortest time.

まえがき = 自動車メーカーでは、新車開発の期間短縮、コストダウンを目的として、薄鋼板をもちいたパネル部品の設計、試作、量産用金型の調整など各段階で成形シミュレーションの実用化を検討している。近年のコンピュータはもちろんのこと、FEM ソフトの進歩により実パネル成形品の成形シミュレーションはかなり実用化に近づいてきている¹⁾²⁾。FEM には二次元および三次元を対象とするソフトがあり、一般に知られているように第1図に示すような長所・短所をかかえているのが実情である。すなわち、三次元 FEM は、実際の部品形状での解析が可能であるが、入力データの作成および計算に長時間を必要とする問題が残されている。いっぽう、二次元 FEM は、入力データの作成、計算時間が短時間である特長を有しているが、円筒深絞り成形³⁾、曲げ成形⁴⁾などの単純な形状の成形しか解析できないという問題があり、従来の手法では複雑な形状への対応が困難となっている。

本研究では、実パネル成形品の成形性評価を短時間に簡易におこなう手法の開発を目的として、二次元 FEM をもちいた三次元形状部品の解析モデルを考案するとともに、その妥当性の検討を、通常二次元 FEM では解析することのできない四角筒成形を対象としておこなった。

1. 四角筒成形の変形の特徴

四角筒成形を二次元 FEM でモデル化するためには、その変形の特徴を把握する必要がある。これまで四角筒

成形に関して多くの検討がなされているが⁵⁾、ここでは、第2図に示す工具形状をもちいて、 $\phi 5\text{mm}$ の格子状のエッチングを施した $\phi 220\text{mm}$ の薄鋼板の成形をおこない、その成形品を観察した。

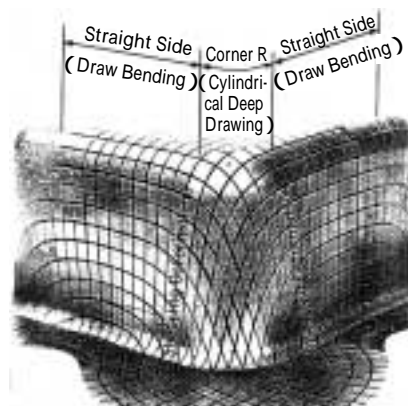
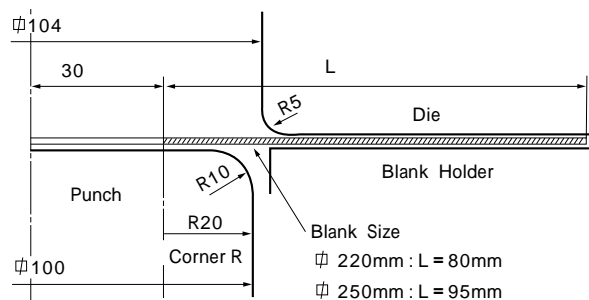


写真1 四角筒成形の変形の特徴

Photo.1 Characteristics of deformation of square cup deep drawing



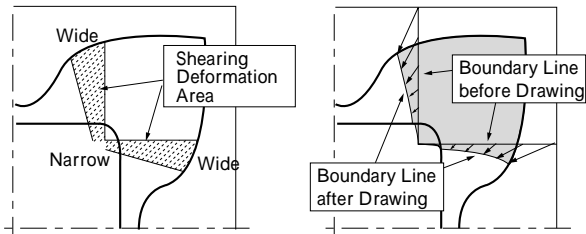
第2図 四角筒成形の工具条件

Fig. 2 Tool dimensions of square cup drawing

第1図 二次元および三次元 FEM の長所と短所

Fig. 1 Merits and Demerits of 2D and 3D FEM

	2 D FEM	3 D FEM
Merit	Short calculation time Easy to make tool shape data	Possible to analyze complicated shape models
Demerit	Impossible to analyze complicated shape models	Long calculation time Difficult to make tool shape data
Example		



第3図 四角筒成形の変形の特徴（成形前後の上面図）
Fig. 3 Characteristics of deformation of square cup deep drawing (Upper View before and after drawing)

四角筒成形の変形の特徴を以下にまとめる。

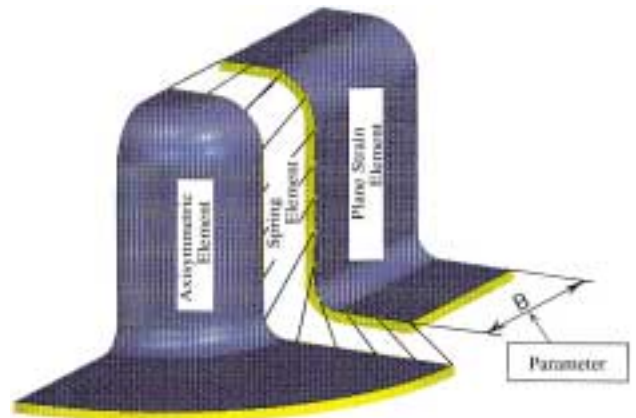
- (1) 四角筒成形は、基本的にはコーナーR部（円筒深絞り）と直辺部（ハット曲げ）の変形にわけて考えることができる⁵⁾（写真1）。
- (2) 四角筒成形は、材料の流入速度の速い直辺部が、コーナーR部と直辺部の間に存在するせん断変形部のせん断力を介して、流入速度の遅いコーナーR部の絞り変形の流入を助けている⁵⁾（写真1）。
- (3) せん断変形部の幅はフランジ部外側ほど拡大していく（第3図）。
- (4) 成形前、コーナーR部のフランジ部外側に存在した鋼板が、成形中に直辺部側に流出しており、その結果、コーナーR部フランジ側ではパンチコーナー半径（コーナーR）を半径とする円筒深絞りの場合より縮みフランジ変形の度合いが小さくなっている（第3図）。

2. 二次元FEMによるモデル化

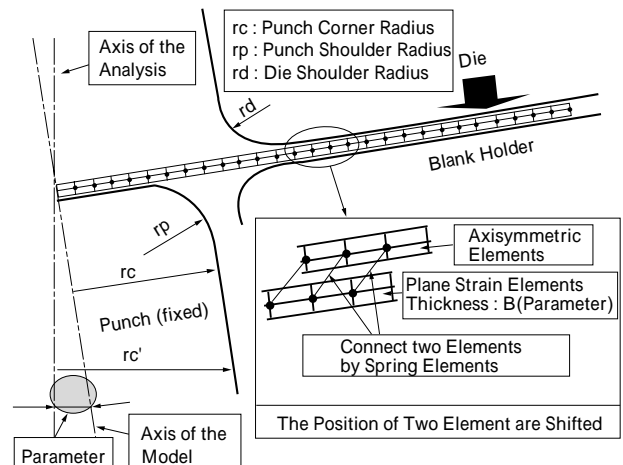
上記の四角筒成形に代表される三次元的な変形状態の成形に対し、コーナーR部や直辺部のように二次元形状として考慮できる領域を抽出し、両領域の成形中の相互作用を考慮しながらすべてを同時に二次元FEMで解析するモデルを考案した。その解析モデルを三次元的に表示した概念図を第4図に、要素分割、工具形状を第5図に示す。

前述の変形の特徴(1)をモデル化するため、コーナーR部と直辺部の鋼板断面をそれぞれ軸対称要素と平面歪み要素という二次元FEMで扱うことのできる要素とした。ここで、第4図中に示すパラメータBは、平面歪み要素の厚さで、直辺部の長さに関連する値である。

次に、変形の特徴(2)をモデル化するため、軸対称要素



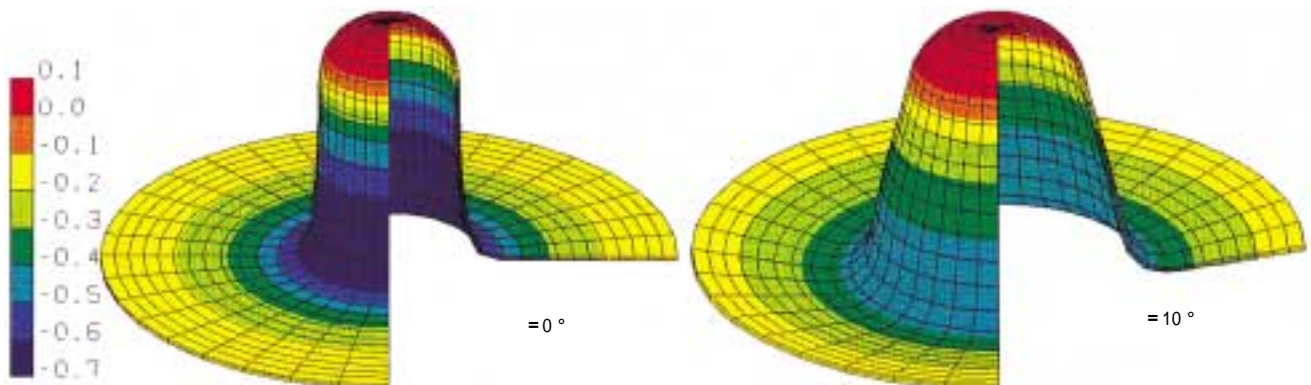
第4図 解析モデルの概念図（成形後）
Fig. 4 Concept figure of FEM model (after drawing)



第5図 解析モデル
Fig. 5 FEM model

と平面歪み要素の間に存在するせん断変形部、および、そこに作用するせん断力を、非線形バネ要素でモデル化した。この非線形バネ要素は、設定した二つの節点間の距離の変化に応じて節点間に反力を発生させる要素とし、そのバネ剛性は、鋼板の機械的特性、および成形品から測定したせん断変形部の幅の変化（変形の特徴(3)）を考慮して設定した。

さらに、変形の特徴(4)をモデル化するため、第5図に示したように解析モデルを角度 θ 傾ける方法を考案した。このことより、解析時におけるパンチの半径（ r_c ）



第6図 軸対称要素の変形状態に及ぼす θ の影響（周方向歪み分布を三次元的に表示）
Fig. 6 Effect of parameter θ on deformation of axisymmetric elements (3 dimensional indication of circumferential strain distribution)

は、パンチ下方ほど大きくなり、軸対称要素の場合、円錐台成形に近い変形状態となる。このため、通常の円筒深絞りの場合より、パンチ下方ほど縮みフランジ変形の度合いを小さくすることができる。ここで角度 θ は、工具形状に依存するパラメータである。いっぽう、平面歪み要素の変形状態は、絞り曲げ変形であるのでモデルの中心軸を傾けても変化せずしたがって、 θ には依存しない。

本解析モデルの解析範囲は、四角筒パンチのコーナー R 中心軸からフランジ部外側として、鋼板断面を要素分割した(第5図)。このとき、軸対称要素と平面歪み要素からなる二つの同一形状の FEM メッシュが同一位置に重なって存在している。そして、バネ要素は二つの FEM メッシュの鋼板断面の板厚方向中央の同位置にある節点同士を繋ぐように設定した。これにより、解析中に二つの FEM メッシュ間に流入量の差が生じた場合にバネ反力が発生することになる。

本解析ではパンチを固定し、鋼板をダイとブランクホルダの間にクリアランス一定(板厚+0.1 mm)で挟み、ダイをモデルの中心軸に沿って押し下げる方法で成形のシミュレーションをおこなった。

第6図に θ による軸対称要素の変形状態および円周方向歪みの変化を三次元的に表示した例を示す。モデルの中心軸を傾けた場合 ($\theta = 10^\circ$)、変形状態は前述のように円錐台成形に近くなっている。このため、縦壁部の縮みフランジ変形の度合いが、中心軸を傾けない場合 ($\theta = 0^\circ$) より小さくなり、変形の特徴(4)をモデル化することを可能としている。

このように、 θ と前述のパラメータ B との二つのパラメータを工具形状に応じて設定することで四角筒成形品の成形性評価が可能になると考えられる。

3. モデルの妥当性の検討

3.1 パラメータの設定

本解析モデルでは、パラメータ B、 θ の設定方法が重要であるが、その明確な指針はえられていない。そこで、写真1の四角筒成形品の観察から 10° 前後の値を目安とし、パラメータ B は、軸対称要素は 360 (パンチコーナー 4ヶ所分)の鋼板が存在するとして計算されるため、直辺部長さの最大 4 倍の値を目安として解析を実施した。

3.2 実験、解析条件

第2図に示す工具形状の四角筒成形を例にとり、コーナー R 部の歪み分布と破断限界について実験と解析結果を比較し、本解析モデルの妥当性を検討した。

歪み分布評価の妥当性の検討は、写真1に示す成形品(ブランクサイズ: $\square 220\text{mm}$)をもちい、成形高さ 60mm でのコーナー R 部の歪み分布を比較した。このとき鋼板は、第1表の 材を使用した。

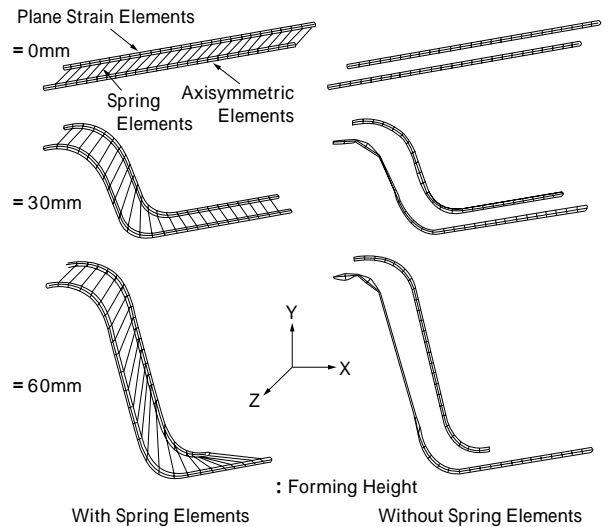
破断限界評価の妥当性の検討は、ブランクサイズ: $\square 250\text{mm}$ の鋼板をもちい成形をおこない、破断するまでの成形高さを測定した。鋼板の機械的特性の影響を検討するため、第1表の 材の 2 種類をもちいた。

解析は、実験と同様の機械的特性を使用し、工具条件は、パンチを固定し、ダイをモデル中心軸に沿って下方

第1表 供試材の機械的性質

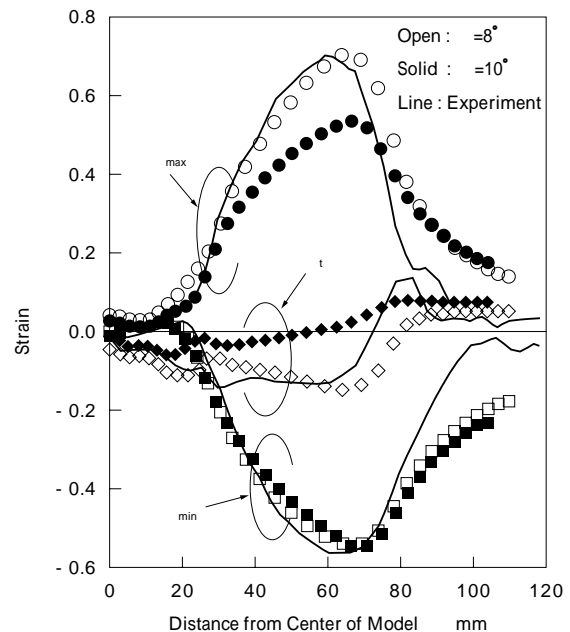
Table 1 Mechanical properties of steel sheets

Thickness	Yield Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Elongation %	r-value
0.7	136	270	55	2.67
0.7	139	305	49	1.71



第7図 解析モデルの変形状態の比較 ($\theta = 10^\circ$)

Fig. 7 Comparison of deformation of FEM model ($\theta = 10^\circ$)



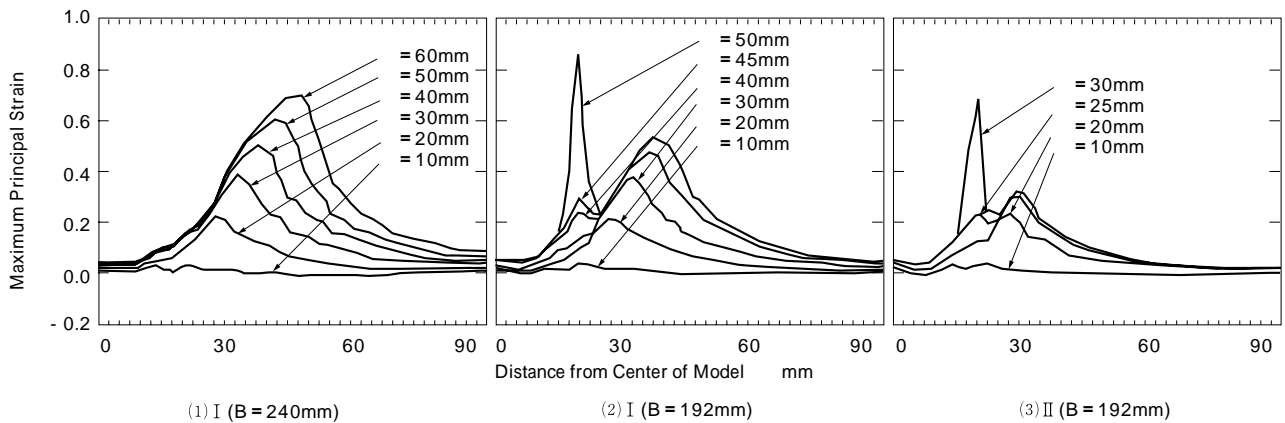
第8図 コーナ R 部の歪み分布の比較 ($\square 220\text{mm}$)

Fig. 8 Comparison of strain distribution of corner R area ($\square 220\text{mm}$)

に移動させた。ブランクホルダとのクリアランスは一定とした。また、工具の摩擦係数 μ は 0.1 とした。なお、解析には静的陰解法をもちいた汎用構造解析用 FEM プログラム ABAQUS-Standard を使用した。

3.3 結果

第7図にブランクサイズ $\square 220\text{mm}$ の場合の各要素の変形状態の例を示す。比較のため、バネ要素をもちいないで軸対称要素と平面歪み要素を各々単独で解析した場合の結果も示す。バネ要素をもちいた本解析モデルでは、写真1の四角筒成形品と同様に、コーナー R 部の変形をモデル化した軸対称要素は、直辺部の変形をモデル化した平面歪み要素より流入量が小さくなっており、さらに、



第9図 コーナR部の最大主歪み分布の比較 (φ250mm)
 Fig. 9 Comparison of maximum principal strain distribution of corner R area (φ220mm)

軸対称要素は、ネッキングを生じることなく通常の円筒深絞り成形では成形できない大きな絞り比（絞り比=4.0）で成形が完了している。これに対し、パネ要素をもちいない場合は、平面歪み要素は流入しているが、軸対称要素は、成形途中にネッキングが生じており、実験とは異なった結果となっている。

このように、本解析モデルは、四角筒成形コーナR部の変形状態を定性的に表現できると考えられる。

第8図にblankサイズφ220mmの場合のコーナR部の歪み分布（ ϵ_{max} ：最大主歪み， ϵ_{min} ：最小主歪み， ϵ_t ：板厚歪み）の実験結果と解析結果の比較を示す。

の変化により歪み分布は変化しており、当初目安として設定した $\theta = 10^\circ$ の場合では、最大主歪みが実験より低い結果となっている。そこで、 $\theta = 8^\circ$ とすることで歪み分布は変化し、実験と同様な歪み分布がえられた。このとき B は 240mm（直辺部の長さ×4倍）で一定値とした。

写真2にblankサイズφ250mmの場合の破断時の成形品の外観写真を示す。破断時の成形高さは、材が50.5mm、材が28.5mmとなっている。また、パラメータ B は破断時の成形高さに大きく影響を与えられ、第9図に、材のコーナR部の最大主歪み分布の解析結果を示す。このときの θ は、φ220mmの場合の解析結果より $\theta = 8.0^\circ$ とした。

材の場合、φ220mmの場合と同様に B=240mm とすると、パンチ変位 = 60mm においてもネッキングを生じず、実験とは異なった結果となっている。そこで、B を変化させて解析をおこなった結果、B=192mm（直辺部長さの4倍の80%）とすると、実験と同様な成形高さ（50mm）でネッキングを生じる結果がえられた。このとき、材の場合は θ = 約30mm でネッキングが生じており、この場合も実験とほぼ同様な成形高さを与えることができた。なお、これらの解析モデルは、エンジニアリングワークステーション：IBM RS/6000-595 をもちい、約3分で計算可能である。

このように、これらの結果は、本解析モデルで、パラメータ θ 、B を適切に選択することで四角筒成形品コーナ部の歪み分布および破断限界を短時間に定量的に評価



(1) material ($t = 50.5\text{mm}$)



(2) material ($t = 28.5\text{mm}$)

写真2 破断後の四角筒成形品の外観写真
 Photo.2 Deep drawing square cup after fracture

できる可能性があることを示している。

むすび=実パネル成形品の成形性評価を短時間に簡易におこなう手法の開発を目的として、軸対称要素と平面歪み要素をパネ要素で繋ぐ二次元FEMによる解析モデルを考案した結果、短時間に四角筒成形の変形状態を表現できることが明らかになった。今後、工具形状などの条件変化によるパラメータ設定の考え方を明確にしておくことで、成形性評価の有効な手段になりうるものと考えられる。

参考文献

- 1) A. Makinouchi et al : Proc . NUMISHEET , 93 (1993) .
- 2) El Khaldi : SAE Tech . Pap . Ser . 960594 (1996) , p.16 .
- 3) 宅田裕彦ほか：第45回塑加連講論，(1994)，p.311 .
- 4) 渡辺憲一ほか：第40回塑加連講論，(1989)，p.449 .
- 5) たとえば，中川威雄ほか：薄板のプレス加工，(1977)，実教出版(株) .