

# 三次元 FEM による薄板の深絞り性と張出し性の解析 —薄板の成形性研究への FEM 解析の適用—

## 3D FEM Analysis of Deep-drawability and Stretch-formability of Sheet Metals —Application of FEM Analysis to Research on Sheet Metal Formability—

吉 田 亨<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 橋 本 浩 二<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 白 田 松 男<sup>\*<sup>(3)</sup></sup>  
Tohru YOSHIDA Koji HASHIMOTO Matsuo USUDA

### 抄 録

薄板の最適化成形の基礎段階として、三次元膜理論有限要素法を用いて角筒深絞りりと球頭張出し成形の数値解析を行い、成形性の予測評価法と破断回避技術を検討した。有限要素解析で得られたひずみと理論的成形限界を比較することにより、成形過程の破断危険度を求めた。角筒深絞り成形の解析では、ポンチ肩破断の危険が高い部位の変形経路や破断危険度に及ぼす材料特性や成形条件の影響を調べ、その定量的関係を明らかにした。球頭張出し成形の解析では、矩形素板の板幅を変えると単軸引張変形から平面ひずみ変形まで変形状態が変化することが計算で確認された。また、限界張出し高さに及ぼす板幅の影響を解析し、実験結果と同じ傾向になることを確認した。

### Abstract

As the basic stage for optimizing of sheet forming, numerical simulations of square cup deep drawing and stretch forming with a hemispherical punch were carried out using three dimensional finite element method with membrane theory. Then, prediction and evaluation method of material formability as well as technique to avoid forming failures was studied. The estimation index of breakage into forming processes was predicted by means of comparing calculated strain by FEM with theoretical forming limit diagram. In the analyses of square cup deep drawing, effects of material properties and forming conditions on the strain path and fracture limit at weak portion such as punch radius were investigated, and quantitative relationship between them has been made clear. In the analyses of stretch forming with a hemispherical punch, it has been confirmed by calculation that the forming state changes from uni-axial tension to plain strain as the width of the rectangular sheet changes. In addition, effects of the sheet width on limiting forming height were also analyzed, and it has been confirmed that the analytical results showed same tendency which was observed in the experimental tests.

## 1. 緒 言

鉄鋼メーカーでは、新規に開発した材料の性能評価や材料選択のために成形性評価を行う。その場合、従来は単純形状の小型工具を用いて成形実験を行い、不足のデータには過去の成形実績を参考として用いる方法が採用されてきた。しかし、そうした方法からは定性的な結果しか得られず、正確な材料評価は不可能であった。

一方、近年コンピュータのハード及びソフト技術が目覚ましく進歩し、非線形・大変形問題で境界条件が複雑に変化するためこれまで非常に難解であった板成形の解析が可能になってきた。この数値解析手法の支援によれば、材料特性と成形条件を適切に組み合わせた最適化成形を展開することが可能と思われる。

そうした最適化成形の基礎段階として、三次元膜理論有限要素法を用いて角筒深絞りりと球頭張出し成形の数値解析を行い、成形性の予測評価法と破断回避技術を検討した。角筒深絞り成形では、変形経路に及ぼす材料特性や成形条件の影響を解析して、破断の危険性の予測評価を行った。また球頭張出し成形では、破断部の変形経路と局所くびれ理論から成形限界高さを求め、実験的手法との対応関係を調べた。

## 2. 成形シミュレーションシステムの概要

成形性を予測評価するためには成形過程を忠実にシミュレートするだけでなく、破断などの成形限界を高い精度で予測することが必要で、それを可能とするものは FEM 解析と破断評価を連携させた実

\*<sup>(1)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 研究員

\*<sup>(2)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員

\*<sup>(3)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員  
工博

用的なシミュレーションシステムである。図1に成形シミュレーションシステムの構成例を示す。FEM ソルバーには、2~3種類の板成形解析用 3次元弾塑性プログラムを用いる。その中で、“ROBUST”は膜要素を用いた静的陽解法プログラムで、複雑な接触問題でも発散することなく解が得られるという利点がある。また、積分点が重心1点の3角形膜要素、r-min法による増分制御を用いることにより計算時間の短縮を図っている。材料モデルとしては、Hillの異方性塑性降伏関数(1)式を採用した弾塑性構成式、Swift型の加工硬化式(2)式、Coulomb摩擦則を採用した接触力記述式を導入している。計算に用いる材料特性としては、普通鋼、高強度鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼の引張試験及び摺動試験のデータベースを準備している。

$$f = (G+H)\sigma_x^2 + (G+F)\sigma_y^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + 2N\sigma_{xy}^2 = 2\sigma^2 \quad \dots(1)$$

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad \dots(2)$$

### 3. 解析方法

#### 3.1 成形過程のFEM解析

角筒深絞り成形の工具寸法を図2に示す。ブランクは鋼板の圧延方向がポンチの直辺と平行になるようにセットすることとし、計算

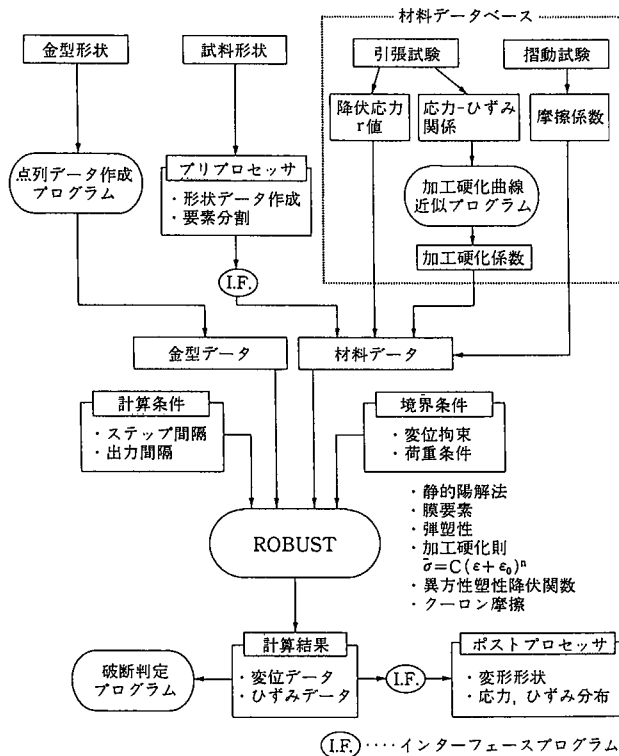


図1 成形シミュレーションシステムの構成

は対称性を考慮して実際の部品形状の4分の1について行った。ブランクは要素数1800、節点数961のメッシュに分割して解析した。しわ押さえ荷重(BHF)は、全体に30kN加わる条件を基準として計算した。解析に用いた材料モデルは、板厚0.8mmの冷延鋼板3グレード(SPCC, SPCE, SPCE-N)とし、材料特性の影響を解析した。また、変形経路及び破断の危険性に及ぼす材料特性値や成形条件の影響を明確にするため、n値・r値・BHF・摩擦係数・ブランク形状・型形状をパラメータとした計算を行った。材料特性値及び成形条件をそれぞれ表1、表2に示す。

球頭張出し成形は、表1のSPCE, SUS304, 5000系Al材について解析を行った。この時の金型寸法を図3に示す。解析は角筒と同様に4分の1の形状で行った。ビードの外側では材料流入がほとんどないことを考慮して、中心からの距離が82.5mm以上の節点を

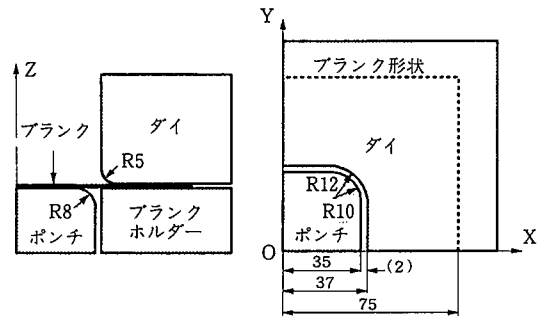


図2 角筒深絞り成形用工具

表2 解析した成形条件(角筒深絞り成形)

記号	しわ押さえ荷重 BHF (kN)	ブランク形状 コーナーカット量 Lc (mm)	型形状 コーナー肩 Rc (mm)
a	19.6	0	10
b	29.4	0	10
c	39.2	0	10
d	29.4	20	10
e	29.4	40	10
f	29.4	0	15

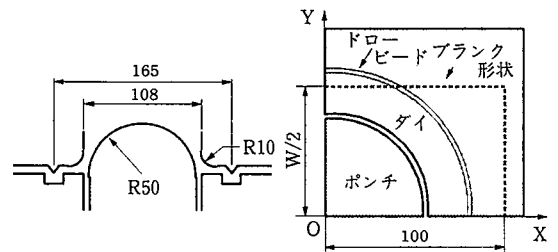


図3 球頭張出し成形用工具

表1 入力した材料特性値

記号	鋼種	YS (MPa)	TS (MPa)	T-EI (%)	E (GPa)	n 値 5-15%	r 値 15%	加工硬化式パラメータ			摩擦係数 μ
								K (MPa)	ε <sub>0</sub>	n*	
A0	SPCC	279	363	41.6	210	0.221	0.99	645	0.0093	0.238	0.130
B0	SPCE	169	318	43.3	210	0.241	1.72	586	0.0078	0.249	0.130
C0	SPCEN	126	276	54.0	210	0.296	2.41	522	0.0012	0.287	0.130
D0	SUS304	299	674	56.0	193	0.353	1.01	1269	0.0720	0.615	0.092
E0	5000系Al	121	261	31.9	70	0.330	0.76	417	0.0096	0.345	0.130

位0として拘束し、フランジ部に与えるしわ押さえ荷重は接触面積から算出した。プランク幅を80~140mmに変えたモデルを作成して計算を行い、変形経路や限界張出し高さに及ぼすプランク形状の影響を検討した。各形状の要素分割数、節点数を表3に示す。

3.2 破断限界の評価法

FEM解析から任意の成形高さにおける各要素の面内最大主ひずみ  $\epsilon_1$  が得られるが、破断限界ひずみ  $\epsilon_1^*$  はひずみ比により異なるため、 $\epsilon_1$  の大きさだけでは破断の危険性を定量的に評価できない。そこで、本解析では Storen-Rice による局所くびれ限界ひずみ値を参考として、以下の指数により各条件の破断危険度の定量的評価を行った。

$$I_b = \epsilon_{1a} / \epsilon_1^* (\beta, n, \psi) \quad \dots(3)$$

ここで、 $I_b$  : 破断評価指数、 $\epsilon_{1a}$  : a部の面内最大主ひずみ、 $\epsilon_1^*$  : Storen-Riceによる局所くびれ限界主ひずみ、 $\beta$  : ひずみ比 ( $= \epsilon_2 / \epsilon_1$ )、 $n$  : 材料の加工硬化指数 (n 値)、 $\psi$  : 面内最大主ひずみ方向とくびれに垂直な方向のなす角度、である。

プレス成形では局所くびれが発生した直後に破断が起こるので、局所くびれ発生条件を基準とすることは成形限界の安全側の評価であると考えられる。しかし、張出し成形のように局所くびれ発生後の延性も含めて考える必要がある場合は、nの値として平面ひずみ変形下での限界ひずみを用いるほうが実際の破断限界に近い。

4. 解析結果と考察

4.1 角筒深絞り成形の解析

4.1.1 ひずみ分布と変形経路

SPCE(B0)の角筒対角方向の主ひずみ分布を図4に示す。ひずみ値はゲージ長さ依存性を持つため、実験ではゲージ長さが解析の要素の長さに近い値となるようにして測定した。この結果から、成形過程のひずみ値がかなり高い精度で予測できることが分かる。図5に変形経路を解析した部位  $P_1 \sim P_2$  の位置を示す。 $P_1$  はポンチ肩破断を起こしやすい部位であり、平面ひずみ変形から2軸変形の範囲で変形が進行する。また、 $P_2$  は側壁でネッキングを起こしやすい部位であり、その変形様式はフランジ上で大きなせん断変形を受けた後、

表3 解析したプランク形状の要素分割(球頭張出し成形)

記号	板幅 W mm	要素数	節点数
I	80.0	1056	578
II	100.0	1320	714
III	140.0	1848	986

ダイ肩から側壁に入り引張変形を受ける。図5からも、 $P_2$ 部が大きなせん断変形を受けている様子が観察される。

4.1.2 変形経路に及ぼす材料特性と成形条件の影響

$P_1$ 及び $P_2$ 部の変形経路に及ぼす材料特性と成形条件の影響を図6~図9に示す。これらから次のことが分かる。1)n値が増加すると $P_1$ 部の面内最小主ひずみ  $\epsilon_2$  が大きくなり、変形様式は等2軸側に変化する。また、 $P_2$ 部の変形経路はほとんど変わらないが、n値が大きいはうが材料の加工硬化により流入が促進されるので  $\epsilon_1$  が大きい。2)r値が増加しても、同一の成形高さにおけるひずみ比  $\beta (= \epsilon_2 / \epsilon_1)$  はほとんど変わらないが、フランジ部の絞り抵抗の低下により流入が進むため、 $\epsilon_1$  の値は大幅に減少する。またフランジ部の流入の増加に伴い、 $P_2$ 部の側壁への移動が早くなり、変形量もやゝ大きくなる。3) $P_1$ 部のひずみに及ぼす摩擦係数の影響は明瞭でない。これは、BHFが低い条件であったことと、摩擦抵抗の影響によりひずみの集中する位置が変化したためと考えられる。 $P_2$ 部では摩擦抵抗の増加によりフ

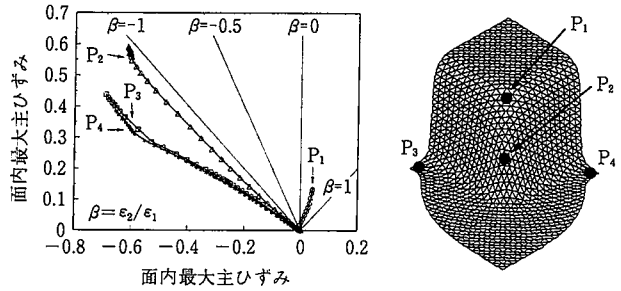


図5 角筒深絞り成形解析における変形形状と変形経路の解析

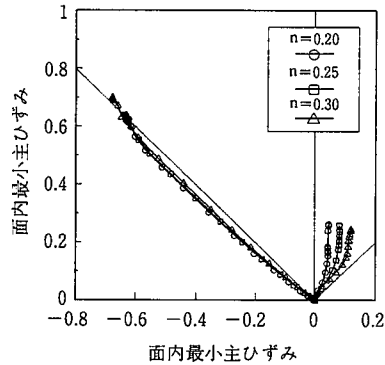


図6 変形経路に及ぼすn値の影響

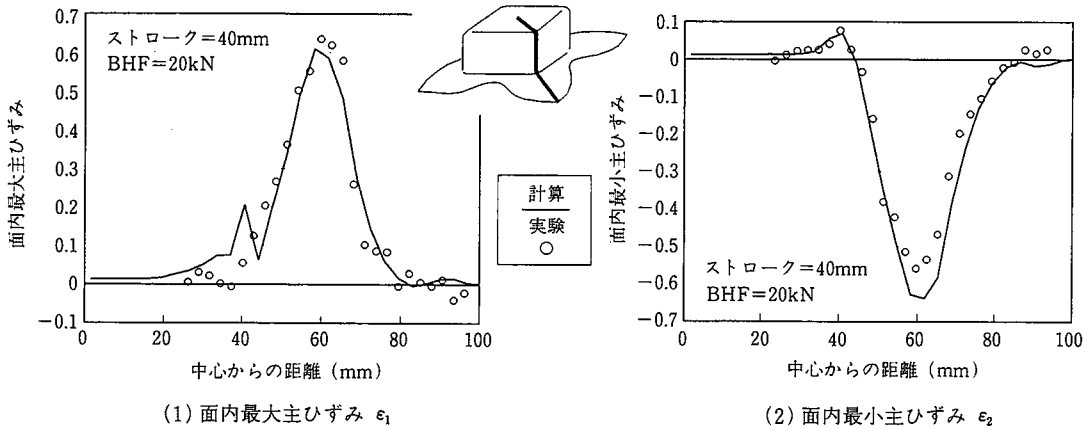


図4 対角方向の面内主ひずみ分布

ランジ端の流入量が減り変形量が増加する。4) BHFの影響はP<sub>1</sub>部で顕著であり、BHFの増加により変形が等2軸側に移るとともにε<sub>1</sub>も大きくなる。

4.1.3 成形限界の評価

角筒深絞り成形における破断は主にポンチ肩部で起こるので、P<sub>1</sub>部の主ひずみを対象に破断危険度の評価を行った。(3)式によれば、成形途中でひずみε<sub>1</sub>が限界ひずみε<sub>1</sub>\*に達したときに破断評価指数I<sub>b</sub>=1となり、破断限界となる。図10はI<sub>b</sub>を用いてポンチストロークに対する破断の危険性を定量化して示したものである。この図より、成形条件が同じでも材料グレードにより成形性が大きく異なることが分かる。また、成形高さ40mmのI<sub>b</sub>に及ぼす諸因子の影響を図11に示す。破断現象に及ぼす各因子の影響を定量化でき、破断回避方法を提示するための汎用データを得るのに有効である。

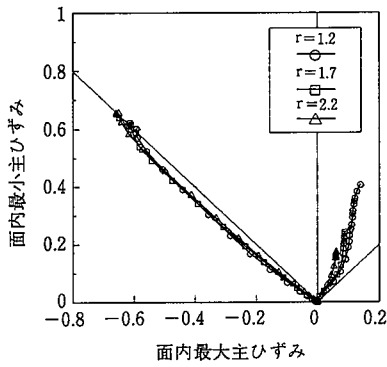


図7 変形経路に及ぼすr値の影響

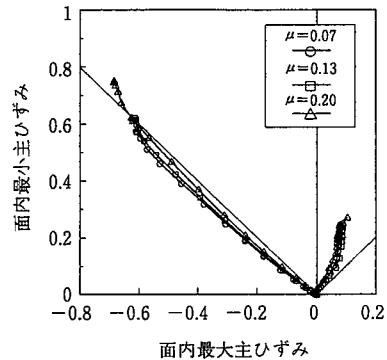


図8 変形経路に及ぼす摩擦係数の影響

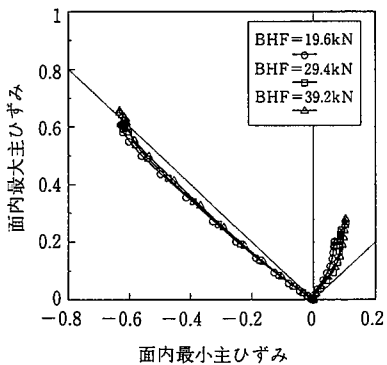


図9 変形経路に及ぼすBHFの影響

4.2 球頭張出し成形の解析

4.2.1 ひずみ分布

SPCE(B0), SUS304(D0), 5000系Al(E0)について、面内の主ひずみ分布の解析値と実験値との比較を図12~図14に示す。ゲージ長さは計算値、測定値とも5mmとした。SPCE, SUS304では全体的な

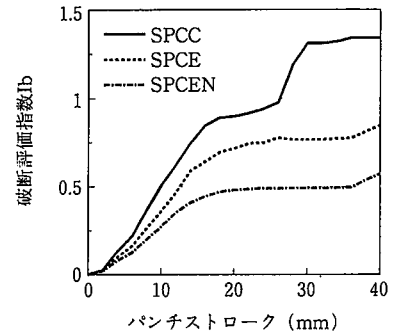


図10 各グレード材の破断評価指数(解析値)

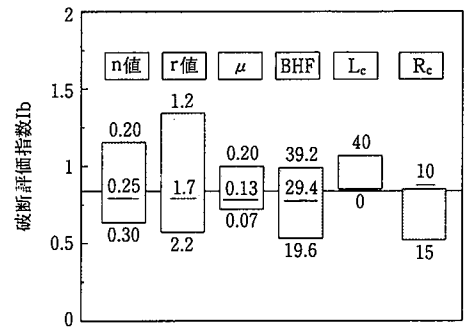


図11 破断評価指数に及ぼす材料特性・成形条件の影響

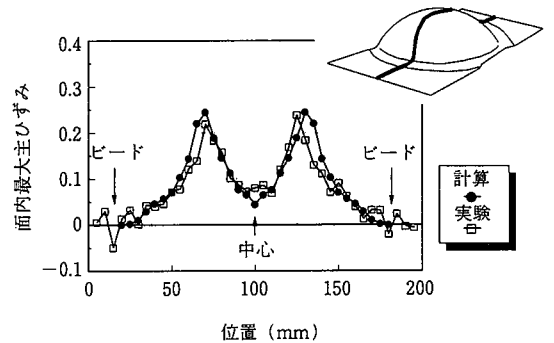


図12 面内最大主ひずみ分布(SPCE材, W=140mm)

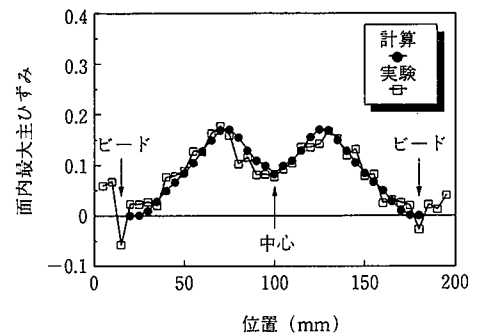


図13 面内最大主ひずみ分布(SUS304材, W=140mm)

ひずみ分布が実験値にほぼ一致しており、摩擦条件を含んだ工具との接触状況や材料特性の影響が、かなり正確に解析されている。しかし、5000系Alでは工具との接触部におけるひずみ分布が正確にはシミュレートされていない。この原因としては、かじりを起こしやすいAl材の摺動特性をCoulomb摩擦では表現できないことや、 $n$ 値

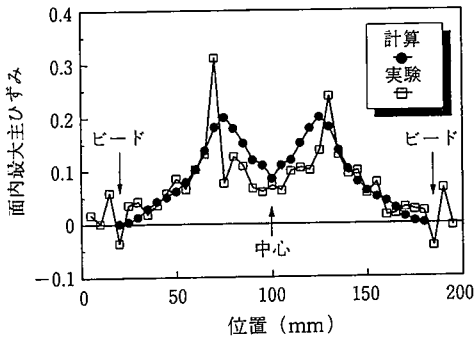


図14 面内最大主ひずみ分布(5000系Al材, W=140mm)

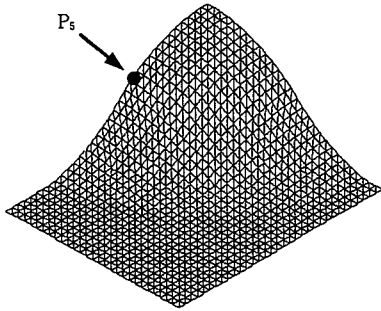


図15 球頭張出し成形解析における変形状と変形経路の解析位置

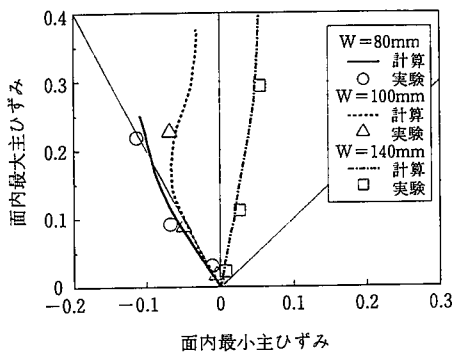


図16 変形経路に及ぼす板幅の影響

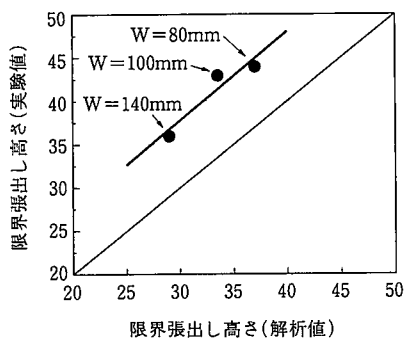


図17 限界張出し高さの解析値と実験値の比較

がひずみとともに低下する特性が解析では考慮されていないことが考えられる。

#### 4.2.2 変形経路に及ぼす板幅の影響

図15の位置  $P_5$  について変形経路を解析により求めた。変形経路に及ぼす板幅の影響の解析結果と実験結果を図16に示す。変形経路は板幅によって大きく変化し、板幅80mmではほぼ単軸引張変形となり、板幅を大きくすると平面ひずみ変形側へ移る。このように、解析により得られた変形経路は実験値と良く一致している。

#### 4.2.3 限界張出し高さの評価

FEMを用いた成形シミュレーション過程において、(3)式の破断危険度が1に達する要素が現れたときの成形高さを限界張出し高さとして仮定した。限界張出し高さに及ぼす板幅の影響を実験値と比較した結果を図17に示す。これより、限界張出し高さは板幅の減少によって増加することが分かる。この理由は、解析の範囲での板幅の減少は破断部の変形経路を平面ひずみに近い変形から単軸引張変形側に変化させ、限界ひずみ  $\epsilon_1^*$  が増加するためと考えられる。この点に関して、解析結果は実験結果と同じ傾向を示した。しかしながら、いずれの板幅の場合も限界張出し高さの計算値は実験値よりも小さくなった。この理由として、解析で用いた限界ひずみは局所くびれ発生を基準としており、くびれ発生後の局部伸びを考慮していないため、実際の破断限界ひずみよりも小さい値になったものと考えられる。

### 5. 結 言

三次元膜理論有限要素法を用いて、成形性予測評価が可能なシステムを構築した。これを用いて深絞り及び張出し成形のシミュレーションを行い、変形経路に及ぼす材料特性や素板形状の影響を検討した。また、単純負荷経路の場合の理論的成形限界曲線と比較することにより、成形過程の破断危険度を予測評価した。角筒深絞り成形の解析では、ポンチ肩破断の危険が高い部位の変形経路や破断危険度に及ぼす材料特性や成形条件の影響を調べ、その定量的関係を明らかにした。球頭張出し成形の解析では、矩形素板の板幅を変えると単純引張変形から平面ひずみ変形まで変形状態が変化することが計算と実験で確認された。また、限界張出し高さに及ぼす板幅の影響を解析し、実験結果と同じ傾向になることを確認した。限界成形高さの予測などについて更に精度の高い評価を行うためには、材料の局部変形特性を厳密に考慮した FLD が必要である。

#### 参考文献

- 1) 大上哲郎 ほか：第42回塑性加工連合講演会論文集、1991、17p
- 2) 吉田亨 ほか：第43回塑性加工連合講演会論文集、1992、73p
- 3) Nakamachi, E. : Proceedings of NUMIFORM '92. 509p (1992)
- 4) Yoshida, T., et al. : Proceedings of NUMISHEET '93. 219p (1993)
- 5) 吉田亨 ほか：第44回塑性加工連合講演会論文集、265p (1993)
- 6) Yoshida, T., et al. : 18th Biennial Congress of IDDRG. 1994, 437p
- 7) Hill, R. : The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford at the Clarendon Press, 1950
- 8) Stören, S., Rice, J.R. : Journal of Mechanical Physics & Solids. 1975, 421p
- 9) 塑性加工学会 FEM シミュレーションシステム分科会, 第1回 FEM セミナー, (1993)
- 10) 後藤學：塑性学. コロナ社, 1982