

## 特集 生産加工CAE技術

研究報告

## 板成形CAE - 薄板成形変形解析の高精度化 -

岩田徳利

## Sheet Metal Forming Analysis – Precision Improvement of the Thin Sheet Metal Forming Analysis

Noritoshi Iwata

## 要 旨

板材の成形不良を高精度に予測することは型設計・製作期間の短縮に大きく寄与する。現在、成形不良予測に成形シミュレーションが採用され、一定の成果をあげている。しかし、成形途中で局所的な変形が集中する場合や、成形後の除荷で発生するスプリングバックの予測については設計で利用できるほど十分な精度とは言い難い。そこで、それらの精度向上のために計算手法と使用する材料モデル化について検討し、局所変形部位のひずみ予測手法とハット曲げ成形におけるスプリングバック予測手法を開発した。局所変形部の

ひずみ予測手法は動的陽解法に静的陰解法を組み合わせる方法で、正四角筒絞りを対象に計算結果を実験結果と比較し、本手法により局所変形部のひずみが実用的な計算時間、精度で予測できることを示した。スプリングバック予測手法は除荷時の特性である、接線弾性係数のひずみ依存性とパウシンガー効果を考慮した計算手法である。本手法をハット曲げ成形に適用し、スプリングバック予測精度が設計段階で使用できるレベルにあることを示した。

## キーワード

プレス成形, 数値解析, 弾塑性有限要素法, ひずみ, スプリングバック, 成形不良, 材料構成式, パウジンガー効果, 接線弾性係数

## Abstract

A numerical method and a material model were examined because of the precision improvement needed for the prediction of the following : (1) the strain prediction when deformation is concentrated on the local part of workpiece from the half way of the forming process. (2) the spring-back prediction.

The strain prediction technique combines the static implicit method with the dynamic explicit method. The square-cup drawing process is numerically analyzed by this method. It was found out that the strain could be predicted within a practical calculation time and precision using this

technique. The most notable feature of this spring-back prediction is that in order to precisely predict the spring-back behavior of the formed sheet, the non-linear property of the sheet material during unloading is taken into consideration. Various results of the present calculation (into which the proposed material model is newly introduced) are compared with the experimental ones, regarding the material strength range, the die shoulder radius, and the blank-holding force. It is confirmed that the proposed method can precisely predict the spring-backed shape.

## Keywords

Sheet metal forming, Springback, Strain prediction, FEM, Secant modulus, Bauschinger effect, Dynamic explicit method, Static implicit method, Formability

## 1. はじめに

自動車業界においては開発車両の早期投入，コスト低減などから，設計から生産までのリードタイム短縮に対する要求が強くなっている。特に，板材のプレス成形では金型の設計から製作までの期間短縮が大命題になっている。これに答える一つの取り組みとして，10年前から板材のプレス成形の数値シミュレーションが数多く研究され<sup>1)</sup>，数年前からは実際の型設計・製作の場で採用され，プレス成形性の評価法として成果をあげている<sup>2)</sup>。ここで用いられているプログラムは3次元の大規模な問題に対しても耐えうる計算コストで，しかも安定して解が得られる動的陽解法である。しかし，この解法によりすべての変形状態の計算はできるものの，その予測精度が不十分な場合も多々みられる。

一方，板材のプレス成形における形状精度不良に対しては相変わらず試行錯誤の繰り返しで，金型の設計から製作までの期間はここ数年来ほとんど変わっていない。特に，形状精度不良の主要因の一つであるスプリングバックの予測は精度的に問題があり，高い予測精度の技術開発が切望されている。今後，車両の軽量化と衝突安全性の要請により，形状凍結性の悪い高強度鋼板やアルミニウム合金板の適用部品もさらに増加する傾向にあることから，精度の良い予測技術が必要になってくる。このスプリングバックは，型から成形体を抜き出した際に材料の弾性回復により形状変化するものである。この予測精度の向上を目的とした材料モデルの研究としては，パウシンガー効果に着目したもの<sup>3, 4)</sup>があり，除荷時の再降伏がスプリングバック量へ影響を与えるという指摘もある。また，弾性係数のひずみ依存性がスプリングバック量へ影響を与えるという指摘<sup>5-7)</sup>もある。これら除荷時の応力 - ひずみ関係はスプリングバック量に直接影響を与えるため非常に重要であるにも関わらず，これまでにFEMで検証が行われた例は少ない。

本研究では，成形性評価の精度が問題となっている局所変形部のひずみ予測とスプリングバック予測について，計算手法と材料のモデル化の面から検討した。

## 2. 計算方法

### 2.1 計算手法

実部品への適用までを視野に入れると，3次元の大規模計算に耐えうるプログラムでなければならない。現状では計算コスト，解の安定性から成形時は動的陽解法，除荷時は静的陰解法を用いるのが最も現実的である。我々もその方法を採用する。また，後述する局所部位のひずみ予測の際の部分計算には精度の高い静

的陰解法を用いた。なお，それぞれの詳細な手法については後述する。

### 2.2 現象モデリング

成形過程に用いる材料モデルとしては，塑性ひずみと応力の異方性を精度高く表す4次降伏関数<sup>8)</sup>を用い，市販のプログラムに導入した。また，成形後の除荷計算には後述する新材料モデルを用いた。

成形時の摩擦状態はクーロン摩擦と仮定し，その摩擦係数は実測値を用いた。

## 3. 局所的なひずみ予測

### 3.1 解析対象

本解析方法による局所的な変形部位のひずみを精度よく予測する技法を一边が150mmの正四角筒絞り成形を対象に例示する。供試材は，Table 1に示す引張り特性値を持つ公称板厚0.7mmの軟鋼板である。

### 3.2 計算手法

動的陽解法を用いて計算した場合の成形深さ34.5mm時の板厚分布を実験結果と比較してFig. 1に示す。計

Table 1 An example of mechanical properties of mild steel sheet (thickness :  $t = 0.7\text{mm}$ ).

Tensile direction $\alpha(^{\circ})$	Yield stress $\sigma_y(\text{MPa})$	Tensile stress $T_s(\text{MPa})$	Total elongation $\delta(\%)$	n-value	r-value
0	158	300	55.6	0.231	2.14
45	172	314	44.6	0.218	1.53
90	168	303	50.2	0.221	2.47
mean	168	308	48.8	0.222	1.92

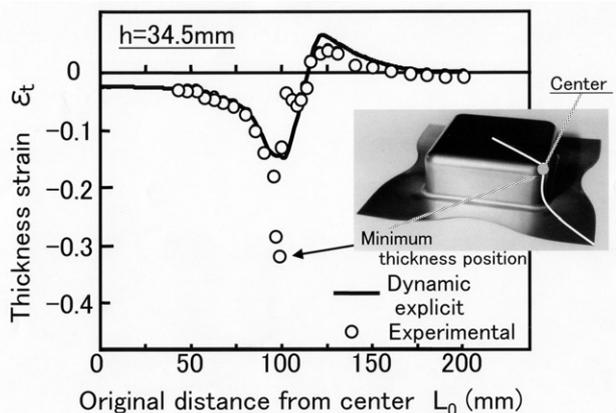


Fig. 1 Thickness strain distribution along diagonal direction in square-cup drawing.

算結果と実験結果の板厚分布は定性的には対応しているが、板厚が最小となる位置（割れが発生する部位）では大きな差がみられる。この板厚が最小となる位置での板厚ひずみの成形に伴う変化をFig. 2に示す。図には静的陰解法による計算結果も併せて示す。動的陽解法による板厚ひずみの計算結果は成形の進行とともに、徐々に大きくなっていくが、実験では成形深さが15mm以上になると板厚ひずみの減少が急激に大きくなっていく。すなわち、成形初期段階では板厚ひずみの計算と実験はよく対応するが、成形深さが増すと、両者の差が大きくなっていく。一方、静的陰解法の計算結果は実験結果と良く対応している。このことは、変形が局所的に集中する場合のひずみを精度よく予測するためには静的陰解法を用いる必要があることを示している。

そこで、大きなモデルに対しても比較的計算時間の短い動的陽解法で全体の成形計算を行い、その結果を基に局所変形部位を特定し、その部位を含む部分領域の成形を、精度の高い静的陰解法を用いてひずみの予測を行う手法を考案した。そのフローチャートをFig. 3に示す。局所変形部位の特定は、局部分岐理論を改良し、割れの可能性の最も高いところと仮定して求めた。その要素をFig. 4の で示す。また、部分解析領域は、この要素を中心として材料流入に沿う曲線と、材料流入に垂直な曲線の内、それらを横切るひずみ勾配がほぼ0となる曲線を境界として決定した（Fig. 5）。この境界には動的陽解法の結果を基に強制変位と荷重を設定し、これを入力データとして部分成形計算を行った。

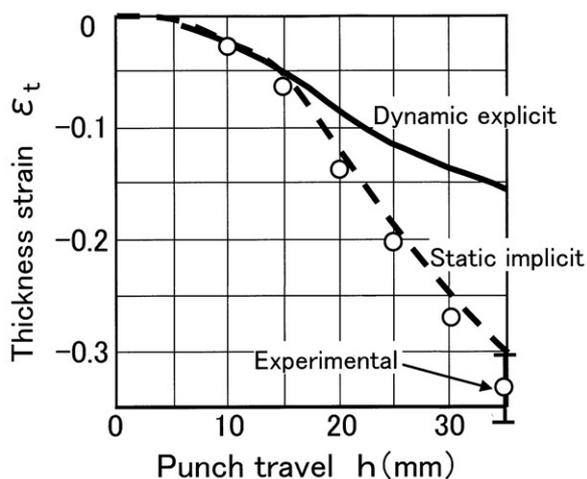


Fig. 2 Relation between minimum thickness strain and punch travel in square-cup drawing.

### 3.3 計算結果

Fig. 5は板厚最小位置，すなわち，局所変形部位での板厚ひずみ変化を示したものである。本手法により実験で見られる成形途中からの板厚の急激な減少，すなわち局所変形部位のひずみ変化が正確にシミュレートできるようになった。

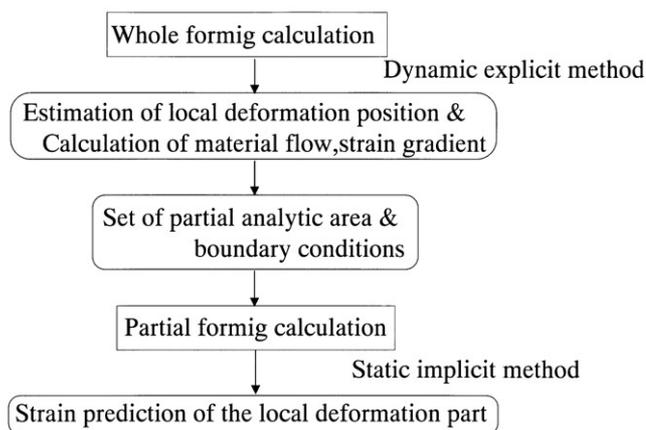


Fig. 3 Flowchart of strain prediction in the local deformation part.

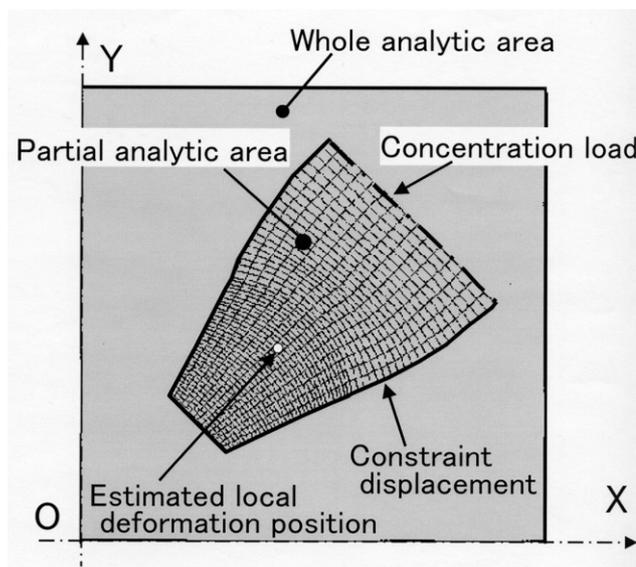


Fig. 4 Partial analytic area and its boundary conditions in square-cup drawing.

また、本手法の計算時間をFig. 6に示す。計算時間は動的陽解法のみで計算した時間に対する比で整理した。本手法の計算時間は動的陽解法の場合の2, 3割アップの計算時間であり、静的陰解法に比べて大幅な計算時間の短縮ができています。

以上、本手法より実用的な計算時間で局所変形部位の精度良いひずみ予測が可能になった。

4. スプリングバック予測

4.1 解析対象

解析対象はハット曲げ成形であり、その型構成をFig. 7に示す。

4.2 計算手法

ハット曲げのスプリングバック量に及ぼす材料モデル、計算条件などを検討した結果、計算に用いる除荷

過程での材料特性の影響が大きいことがわかった。そこで、Fig. 8に示す形状の試験片を引張り、その後、圧縮して除荷時の応力 ひずみ関係を実測した。その結果の一例をFig. 9に示す。数値シミュレーションで広く用いられている等方硬化モデルの応力 ひずみ関係と比較すると圧縮時の応力 ひずみ関係に差がみられる。この差は、除荷が始まったときの曲線の勾配（以降、接線弾性係数と記す）が、引張り時のひずみ（以降、予ひずみと記す）により小さくなり、圧縮域での応力の絶対値（変形抵抗）が低下したことによるものである。後者の現象をパウシンガー効果と呼んでいる。除荷時の接線弾性係数と予ひずみの関係をFig. 10に示す。0.03以上の予ひずみでは接線弾性係数が被加工材の205GPaから約170GPaへと小さくなっている。また、パウシンガー効果の予ひずみ依存性を

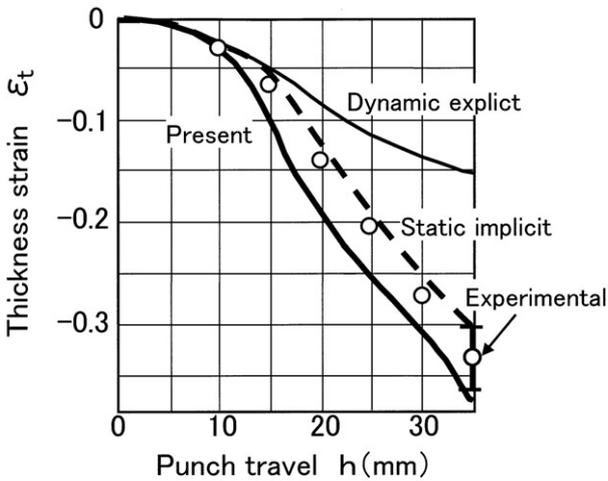


Fig. 5 Relation between minimum thickness strain and punch travel in square-cup drawing.

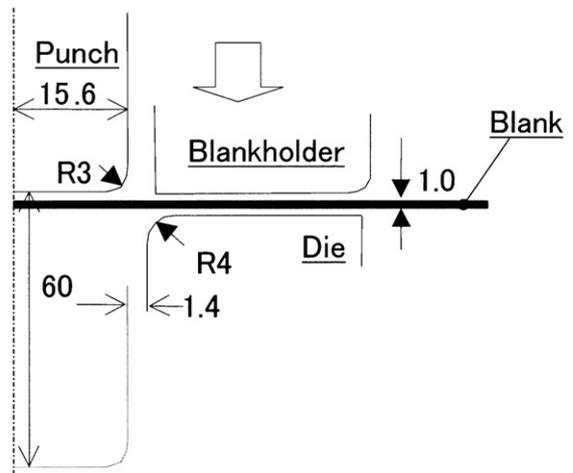


Fig.7 Geometrical condition.

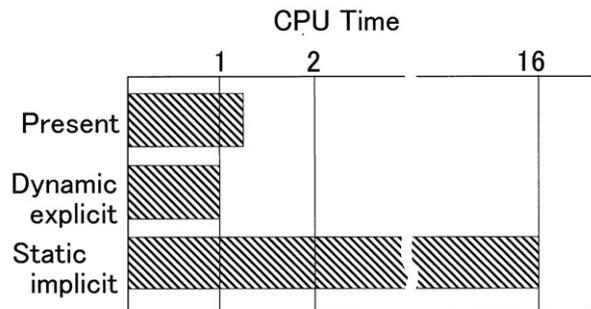


Fig. 6 The ratio of the calculation time toward this answer law.

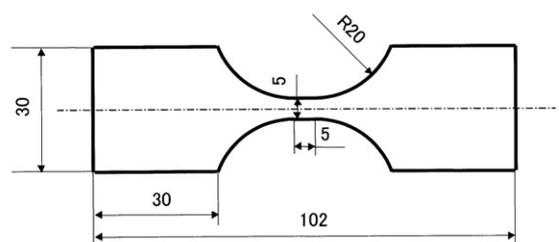


Fig. 8 Dimension of specimen for tensile-unloading-compression test.

Fig. 11に示す。バウシinger効果の程度は圧縮時の降伏応力 $\sigma_c$ と等方硬化則の場合の降伏応力との比 $(\sigma_T + \sigma_c)/(2 \cdot \sigma_T)$ で表現した(この比の値は等方硬化則では1であり、1より小さいほどバウシinger効果の程度が大きいことを示す)。バウシinger効果の程度は予ひずみの増加に伴い大きくなっている。

一方、静的陰解法である市販ソフト‘JOH / NIKE’ではFig. 9に示すように、弾性と塑性のそれぞれ一つの接線係数で表す材料モデルが用意されている。そこで、除荷時に通過すると予想される応力ひずみ曲線の部分のみが実測曲線にフィットするように係数を決定し、また、その係数は成形時の塑性ひずみと供試材の材質に応じて設定するようにした。

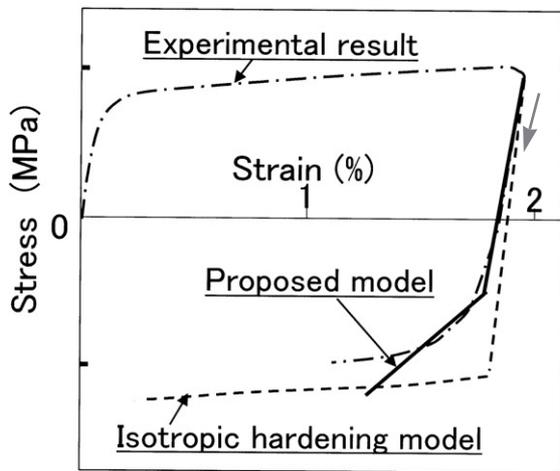


Fig. 9 Stress-strain curve during tension-compression test.

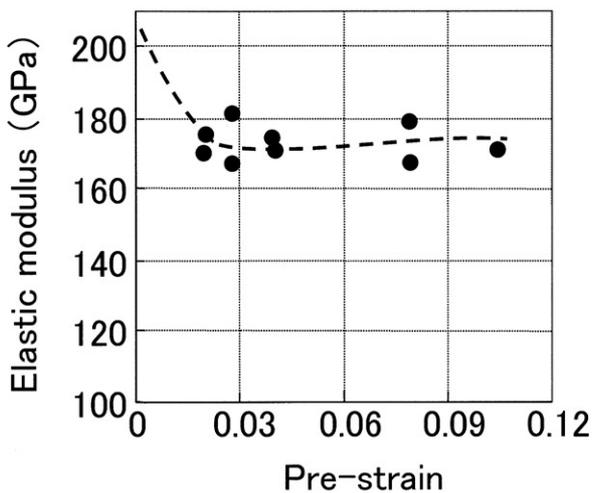


Fig. 10 Change in elastic modulus with pre-strain.

4.3 計算結果

ハット曲げ成形において、単位断面積当たりのポンチ荷重と材料の引張強度の比と、ハット曲げ成形後の開き量 $d$ との関係をFig. 12に示す。前述の除荷時の接線弾性係数の低下とバウシinger効果の特性を考慮し

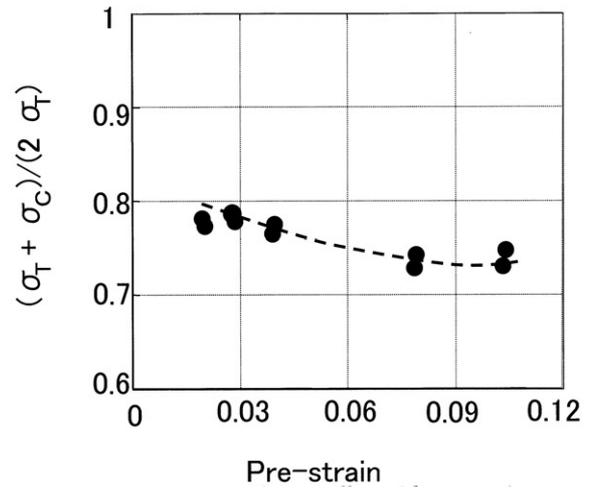


Fig. 11 Change in Bauschinger effect with pre-strain.

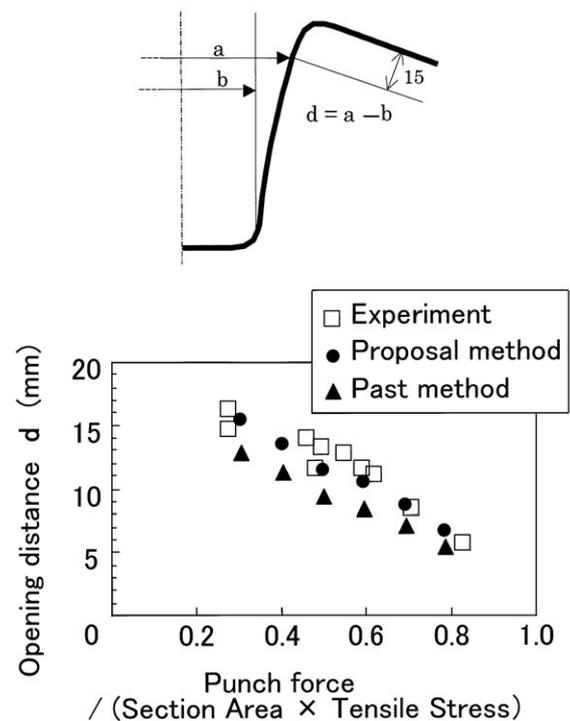


Fig. 12 Comparison of opening distance  $d$ .

ない計算値は実験値より小さくなるが、除荷時の特性を考慮することにより、ポンチ荷重全域で計算結果は実験結果とほぼ一致した。Fig. 12のポンチ荷重比（横軸）が約0.5の場合に成形された形状をFig. 13に示すが、計算結果は実験結果と非常に良く一致している。

以上のように、除荷時の特性を考慮することにより、スプリングバック後の形状が高い精度で予測できるようになった。

## 5. まとめ

数値シミュレーションによるプレス成形の成形不良予測の高精度化のために、計算手法と材料モデルについて検討し、成形途中で局所的な変形が起こる場合のひずみ予測手法と、ハット曲げ成形のスプリングバック予測手法を開発した。

局所変形部のひずみ予測手法は、動的陽解法に静的陰解法を組み合わせる方法であり、実用的な計算時間、精度で局所変形部のひずみ予測が可能となった。スプリングバック予測手法は、除荷時の特性に着目した計算手法であり、この精度はプレス金型の設計段階で使用できるものと評価された。

これらの解析手法の開発により、プレス成形の数値シミュレーションの適用範囲が拡大し、今以上にプレス成形用金型設計で有効に利用され、金型の設計から製作まで期間の短縮に貢献するものと考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり、多大な御協力を頂いたトヨタ自動車(株)第8生技部および(株)豊田自動織機製作所工機事業室に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 例えば、岩田徳利、松居正夫：“薄板プレス成形の高精度変形解析手法と割れ予測”，豊田中央研究所R&Dレビュー，30-1（1997），55
- 2) 例えば、Tang, S. C.：“Trends on simulation of sheet metal forming process.”, ASME Tech. Pap., No.2000-01-1108, (2000)
- 3) 桑原利彦、関則夫、高橋進：“弾塑性ひずみ増分理論に基づく引張曲げ曲げ戻し変形の数値解析と残留曲率計算”，塑性と加, 39-453(1998), 1081
- 4) 上森武、岡田達夫、吉田総仁：平成11年塑性加工春季講演会論文集, (1999), 349.
- 5) Geng, L., Wagoner, R. H.：“Springback Analysis with a Modified Hardening Model.”, SAE Tech. Pap. Ser., No.2000-01-0768, (2000)
- 6) 島進、楊明：“金属板材の知能化V曲げ加工の高精度化に関する研究”, 材料, 44-500(1995), 578
- 7) Yamaguchi, K., et al.：“Effects of Plastic Strain and Strain Path on Young's Modulus of Sheet Metals”, Met. and Mater., 4-3 (1998), 420
- 8) Chakhari, M. L., Jalinier, J. M.：IDDRG 13th Biennial Congr. Proc. (1984), 148

(2000年11月14日原稿受付)

## 著者紹介



岩田徳利 Noritoshi Iwata

生年：1957年。

所属：金属加工研究室。

分野：塑性加工の研究。

学会等：日本塑性加工学会会員。

1998年日本塑性加工学会東海支部賞研究賞。

工学博士。

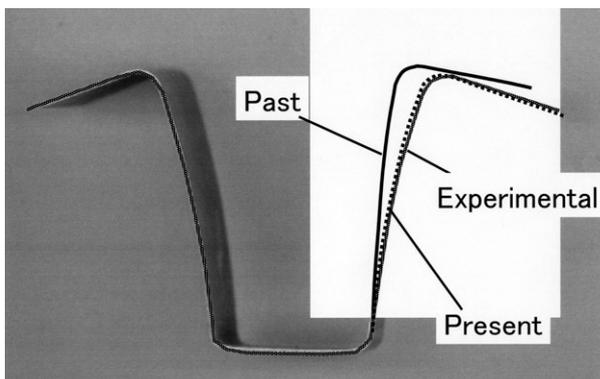


Fig. 13 Geometrical comparison.