

有限要素法・離散化最適化法による板成形最適設計システムの開発

仲町英治*

1. 緒言

プレス成形は塑性加工の代表的な加工法であり、一對の金型を用いて行う大量生産が主流である。しかし、消費者ニーズの多様化によって、プレス成形においても、大量生産から多品種少量生産への変遷が迫られている。そのためにフレキシブルかつ高能率の生産システムを実現することが必要である。また最近、非線形FEMによる塑性加工の解析用プログラムが実際の生産加工のシミュレーションに利用されるようになってきた。そのため実際にプレス成形を行わずに仮想的に成形を行うことが可能になった。このような状況の中、金型コストの削減や試作期間の短縮を図ることを目的とした最適加工設計システムの開発が必要とされてきた。

著者らは、有限要素法による成形シミュレーションと最適化手法を用いた最適加工設計システムを開発してきた²⁾。この最適加工設計システムは、成形改善に有効な加工因子を設計変数とし、定量的に成形評価が行える目的関数を定めることにより、最適加工設計問題を数理的な最適化問題として定式化し、最適化手法によりその最適解の探索を行うシステムである。そして、この最適加工設計システムを2設計変数の絞り成形に対して適用したところ、効率良く最適解を探索することができた。しかし実際の絞り成形では、影響を与える諸因子は多種多様であり、多設計変数を持つ絞り成形に対しても、効率良く最適解を探索することが必要である。しかし、最適化手法として用いたS.S.法は領域全体を隈無く探索を行うため、設計変数が多くなると計算回数的大幅な増加がみられる。そのため、システムの効率化が必要である。

そこで、本研究は、多設計変数の場合でも、効率良く最適解を探索するため、ハイブリッド法を適用し、システムの効率化を検討した。そして、実際の成形品に、このシステムを適用し得られた最適解について、実験との比較によりシステムの有効性を検討した。

2. ハイブリッド法

2.1 ハイブリッド法の概要

従来のシステム²⁾は、有限要素法を用いた数値解析とS.S.法を用いた最適化手法から構成されている。この最適化手法のS.S.法は、シンプレックス法⁴⁾では局所解に陥りやすく最適解の保証が得れないため、設計変数の領

域内の最適解の保証を得るため用いた手法であった。今回、最適解の保証を得る手法に、容易に設計変数の領域全体の概形が把握できる格子探索法を用い、最適解をより細かく効率よく探索するシンプレックス法とを組み合わせたハイブリッド手法を開発した。

まず格子探索法により、設計変数の全領域を粗いピッチで探索を行う。これにより最適解近傍、即ち目的関数値の最も低い領域を求める。そして、その最適解近傍に初期シンプレックスを設定し、更新アルゴリズムに従ってシンプレックスを更新し収束させる手法とした。本手法では、粗いピッチで探索を行うため、目的関数値の最も低い値より5つを選択し、その5つの位置に初期シンプレックスを設定し細部探索を行う。

このハイブリッド法では、格子探索法の格子探索ピッチPとシンプレックス法の初期シンプレックスサイズLが、探索効率(計算回数)に大きく影響すると考えられる。このため格子探索ピッチPと初期シンプレックスサイズLの検討が必要である。

2.2 テスト関数の最小化

格子探索ピッチPと初期シンプレックスサイズLの妥当な値を定めるために、板成形最適化の評価関数と同程度の複雑さを持つと思われる4つの局所解を持つ次式をテスト関数として用い最小解の探索を試みた。

$$f = 15(X_1 - 16.5)^2 + \frac{1}{8}\{(X_2 - 1.5)^4 + (X_3 - 1.5)^4\} - \frac{37}{6}\{(X_2 - 1.5)^3 + (X_3 - 1.5)^3\} + 100\{(X_2 - 1.5)^2 + (X_3 - 1.5)^2\} - 600\{(X_2 - 1.5) + (X_3 - 1.5)\} + 4125 \quad (1)$$

X1, X2, X3には次の制約条件を設けた。

$$0 \leq X_1 \leq 25 \quad 0 \leq X_2 \leq 25 \quad 0 \leq X_3 \leq 25 \quad (2)$$

このテスト関数fは、F1(16.5, 21.5, 21.5), F2(16.5, 6.5, 21.5), F3(16.5, 21.5, 6.5), F4(16.5, 6.5, 6.5)の4つの局所解を持つ。そして、最小解はF1(16.5, 21.5, 21.5)である。

2.3 格子探索ピッチの検討

格子探索の格子探索ピッチPを設計変数領域の50, 30, 25, 20, 15, 10%として探索を行った。この場合の初期シンプレックスサイズは格子探索ピッチ巾と同じにし

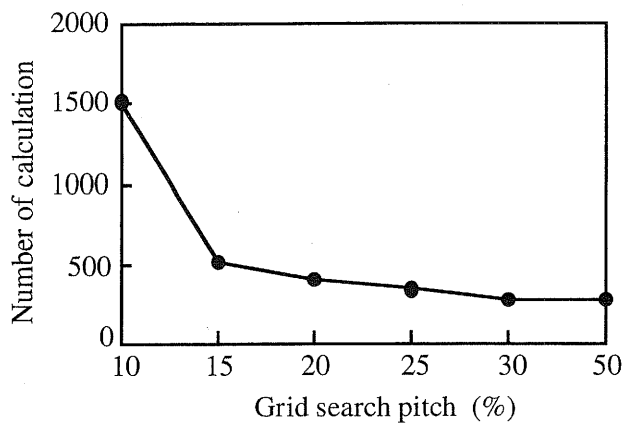


Fig. 1 Relationship between number of calculation and grid search pitch

た。Fig.1に各格子探索ピッチでの、探索に要した計算回数を示す。図より、ピッチが細くなると計算回数が多くなり15%以下では、特に多くなる。また、30%付近ではほぼ一定となることが分かる。

次にシプレックスの収束位置について調べ、その結果をFig.2に示す。図は、収束分布率Cdを示し、次式のように定義した。

$$Cd = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\frac{0.25 - CF1}{0.25} \right)^2 + \left(\frac{0.25 - CF2}{0.25} \right)^2 + \left(\frac{0.25 - CF3}{0.25} \right)^2 + \left(\frac{0.25 - CF4}{0.25} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

ここで、CF1, CF2, CF3, CF4 は各局所解 F1, F2, F3, F4 に収束する確率を示す。Cd=1 は収束が1カ所に集中し、Cd=0 は各局所解に均等に収束することを意味する。

図より格子探索ピッチ P=10%では、Cd=0.75であり最も大きく、収束位置に大きな偏りを示している。このように、格子探索ピッチが細かい場合1つの局所解へ集

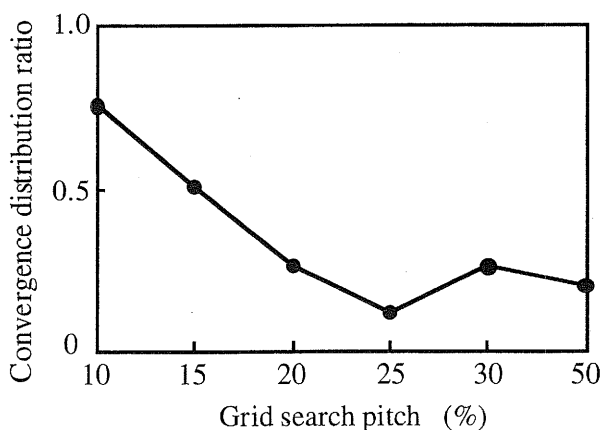


Fig. 2 Relationship between convergence distribution ratio and grid search pitch

中する傾向がみられる。これに対し、格子探索ピッチ P=25%では、Cd=0.12であり最も小さく、収束位置が均等に分散していることがわかる。実際の加工では、明確な最小解が1つ存在するケースは少なく、局所解が複数個存在するケースが多くあると考えられる。そのため、収束位置が均等に分散する必要であり、格子探索ピッチはP=25%前後が妥当であると思われる。

2.4 初期シプレックスサイズの検討

次に初期シプレックスサイズの影響を調べた。格子探索の格子探索ピッチはP=25%とした。Fig.3に初期シプレックスサイズと収束までの計算回数の関係を示す。ここでの初期シプレックスサイズは格子探索の格子探索ピッチに対する割合である。

初期シプレックスサイズが小さくなると計算回数が減少し、早く収束することが分かる。そして、L=25%の時に最も計算回数が少なくなっている。また、初期シプレックスサイズが小さすぎると収束点に至るまでに回数がかかり、計算回数が反対に多くなる。このことにより、初期シプレックスサイズ L=25%が妥当であると思われる。

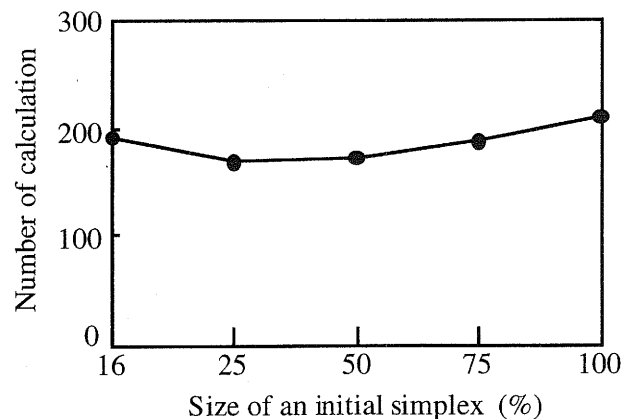


Fig. 3 Relationship between number of calculation and size of an initial simplex

2.5 テスト関数の最小化の結果

格子探索の格子探索ピッチ P=25%、初期シプレックスサイズ L=25%とし、式(1)のテスト関数fの最小解の探索を行った。その探索結果をFig.4に示す。Fig.4(a)は格子探索により求めたX3毎の目的関数曲面である。○は目的関数値の低い値の5点であり、シプレックス開始点を示す。Fig.4(b)はそれを基にしたシプレックスの探索過程を示す。図よりテスト関数fの各局所解へ収束し最小解を求めていることが確認できた。

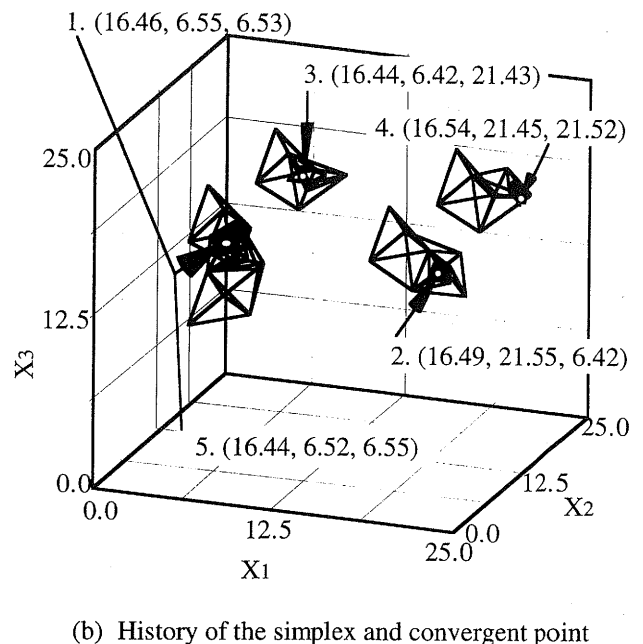
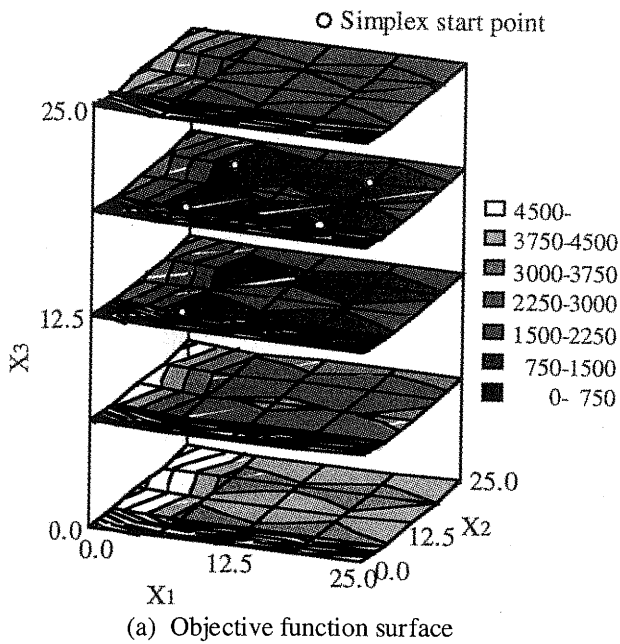


Fig.4 The result of the hybrid method (test function)

3. 絞り成形の加工設計

本システムを板絞り成形に適用する. 対象とする成型品を Fig.5 に示す. このような複雑な形状は, くびれや破断が生じやすくなる. そこで, 加工によるひずみの局所化を防ぎ, 板厚の均一化のため, ここでは工程を多工程にすることにより改善できると考え, 2 工程成形とした.

第 1 工程は Fig.6 に示すパンチを用いダイ内部への材料流入を促進させ, 第 2 工程 (最終工程) で Fig.5 に示す成型品と同形状のパンチ・ダイを用い成形を行った. この時の加工の設計変数を Fig.6 に示す第 1 工程時のパンチストローク $H1$, $H2$, およびパンチ肩半径 Rp の 3 つとした. この 3 設計変数を変化させて, 最も良い成形条件を探索した. 目的関数には, 板厚一様化を目的とし, 平均板厚からの偏差量を採用し, その関数を次のように定義した.

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - t_{ave})^2} \quad (4)$$

ここで, N は要素数, t_i は各有限要素の板厚, t_{ave} は平均板厚である. 以上より, この最適化問題は次のように定式化できる.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f \\ &\text{subject to} && 0 \leq H1 \leq 20 \\ & && 0 \leq H2 \leq 15 \\ & && 5 \leq Rp \leq 10 \end{aligned} \quad (5)$$

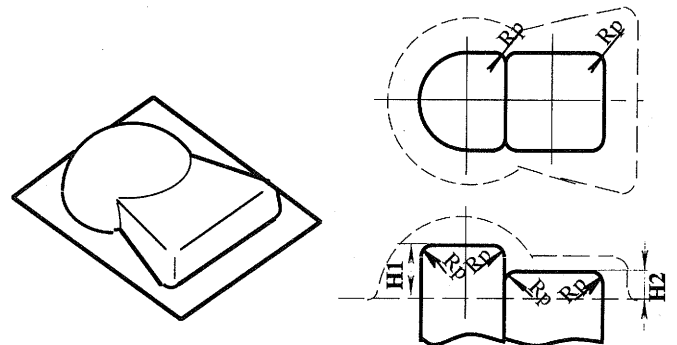


Fig.5 Product

Fig.6 Design variable

また, 成形シミュレーションの数値解析には, 静的陽解法, 弾塑性材料モデル, 膜一般体近似要素, 運動学記述による非線形接触モデルを採用した 3 次元有限要素法 (ロバスト)⁹⁾を用いる. この有限要素解析に用いた材料特性値を Table 1 に示す. 成型品の対称性を考慮し 1/2 領域について解析を行い, 要素数は 1368 要素とした.

Table 1. Material constants used in FEM analysis

Young's modulus	69×10^3 (MPa)
r-value	0.77
Yield stress	28.1 (MPa)
Constitutive relation	$\sigma = 152(0.003 + \epsilon_p)^{0.293}$ (MPa)
friction coefficient	0.10

3.1 従来のシステムとの比較

従来のS.S.法を用いたシステムによる最適解の探索過程におけるシプレックスの軌跡および収束点をFig.7に示す。図に示すように各局所解にそれぞれ収束し、許容領域全体を隈無く探索していることがわかる。その結果、最適解(H1,H2,Rp)=(5.4,3.0,5.3)が求められた。その時の目的関数値は $f=0.0389$ であった。そして探索に要した計算回数は792回であった。

今回のハイブリッド法を用いたシステムによる最適解の探索結果をFig.8に示す。格子探索法による格子探索

ピッチは、H1,H2を5mm, Rpを1mmとした。Fig.8(a)は、Rp毎のH1,H2の目的関数曲面図であり、○は選択したシプレックス開始点を示す。図より、H1,H2が大きい場合、目的関数値が大きく、H1=5~10mm, H2=0~10mm付近で、目的関数値が小さくなる傾向がみられる。その傾向の中、複数の局所解が存在することがわかる。Fig.8(b)は、シプレックス開始点に初期シプレックスを設定し探索を行った結果を示す。図より各シプレックスはより細かく探索し、局所解に収束していることが分かる。探索した最適解は(H1,H2,Rp)=

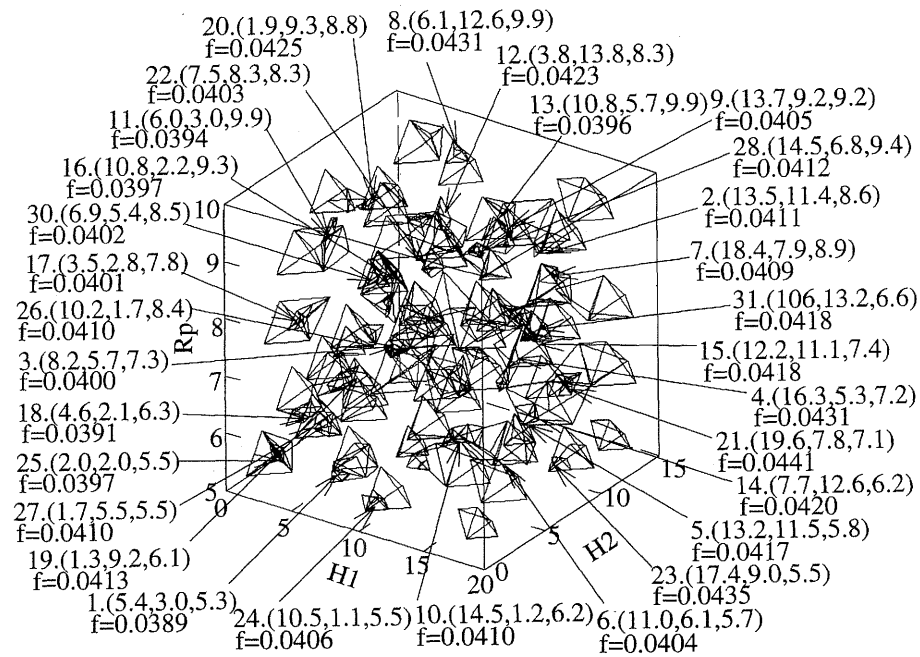
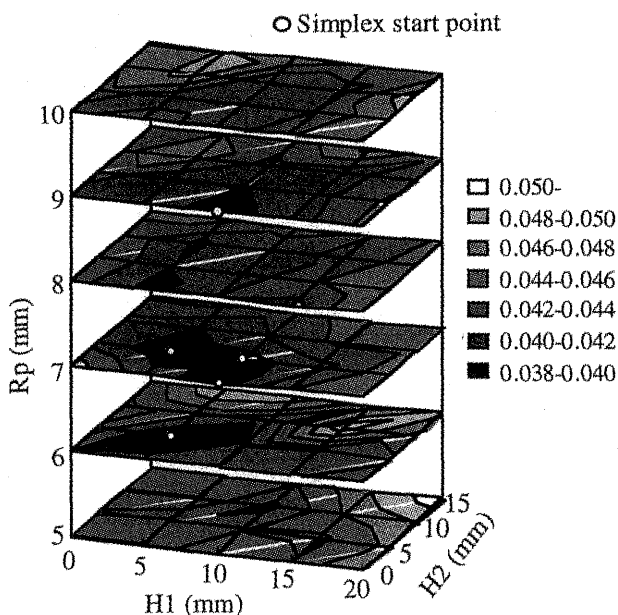
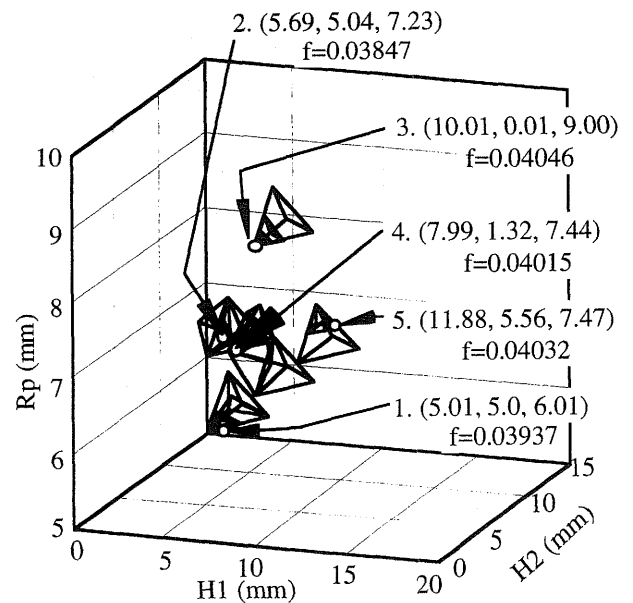


Fig.7 The result of S.S. method.



(a) Objective function surface



(b) History of the simplex and convergent point

Fig.8 The result of the hybrid method (simulation)

(5.69,5.05,7.23)で $f=0.0385$ であった。これは目的関数値が二番目に低いシプレックス開始点から探索し、得られた解である。最も低い目的関数値であったシプレックス開始点から探索し、得られた局所解は0.0393であり、一番低いシプレックス開始点が必ずしも最適解には成らず、本システムのシプレックス法を用いた細部探索が有効であることを示している。また、探索に要した計算回数は217回で、その内、格子探索法による計算回数は120回であり、1つのシプレックスが収束するまでの計算回数は約20回であった。

以上より、本システムは、従来のS.S.法を用いたシステムに比べ、さらに良い最適解を求めることができ、計算回数も大幅に減少することができた。また、シプレックス開始点を少なく設定することにより計算回数を減少させ、探索効率を高めることができる。また、細部探索のためのシプレックス開始点を複数個設定することにより、広い範囲を探索し、最適解の信頼性をより高めることが可能である。

3.2 実験結果との比較

上述の結果について、実験結果との比較を行い、解析手法の妥当性について検討した。Fig.9は実験によって得られた目的関数曲面である。成形条件はFig.8(a)と同様に $H1, H2$ は5mm間隔で、 Rp は1mm間隔で成形を行なった。図より $H1, H2$ が大きい曲面の隅点では、目的関数値が大きくなる傾向があり、 $H1, H2=5 \sim 10$ 付近で目的関数値が小さくなり、 $H1, H2, Rp$ の適度な組合せにより改善がみられる。これは、数値解析より求めた目的関数曲面Fig.8(a)と同様な傾向であり、類似した特徴を示している。また、本システムにより求めた最適解 $(H1, H2, Rp)=(5.69, 5.05, 7.23)$ に、最も近い実験条件は、

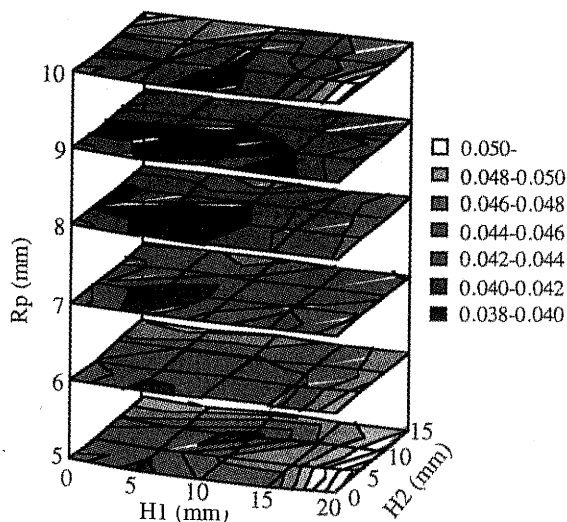
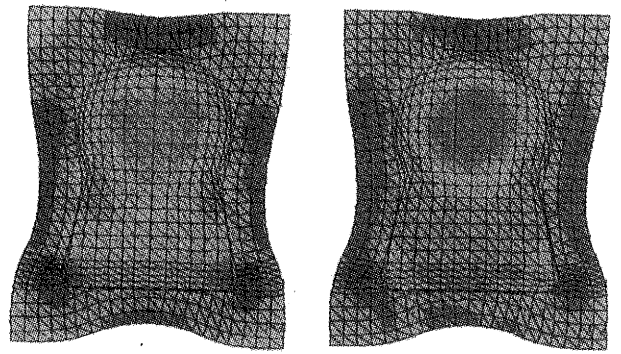


Fig.9 Objective function surface (experiment)



(a) Optimum condition (b) One stage forming

Fig.10 Thickness strain distribution (experiment)

$(H1, H2, Rp)=(5, 5, 7)$ であり、この実験条件の目的関数値は、4番目に低い値であった。このように実験においても最適解に十分近い値であることが確認できた。また、この時の成形品の板厚ひずみ分布をFig.10(a)に、1工程成形による成形品の板厚ひずみ分布をFig.10(b)に示す。図より、本システムにより求めた最適条件では、半球頂部でのひずみの緩和がみられている。

以上のことから、数値解析および本手法の妥当性を確認することができた。

4. 結 言

最適化手法に格子探索法とシプレックス法を組み合わせたハイブリッド法を用いた最適加工設計システムの開発を行った。

- (1) 本システムの探索効率向上のため、複数個の局所解を持つテスト関数を適用し、最適な探索条件を見出し、その条件により効率的に最小解を探索できることを確認した。
- (2) 本システムを絞り成形の加工設計に適用した結果、従来のシステムに比べ、より良い最適解を求めることができ、計算回数も大幅に減少し探索効率を高めることができた。
- (3) 本システムを用いて得られた最適解について実験との比較によりその妥当性を確認した。

参考文献

- 1) eds.A. Makinouti, E. Nakamati, E. Onate, Proc. of NUMISHEET'93,(1993)
- 2) 大畑富相, 中村康範, 片山博生, 仲町英治, 中野建史: 機論A, 63-612 (1997) 208-213
- 3) T.Ohata, Y.Nakamura, T.Katayama, E.Nakamati, J. Mater.Process. Technol. 80-81 (1998) 635-641
- 4) J.A.Nelder, et. al. Computer Journal. 7 (1965) 308-313
- 5) E. Nakamati, Int.J.Num.Methods in Engng. 25 (1988) 283