

**薄板成形工程における
最適パラメータ設計への応用**

Kim Se Ho

(韓国科学技術院工学部機械工学科)

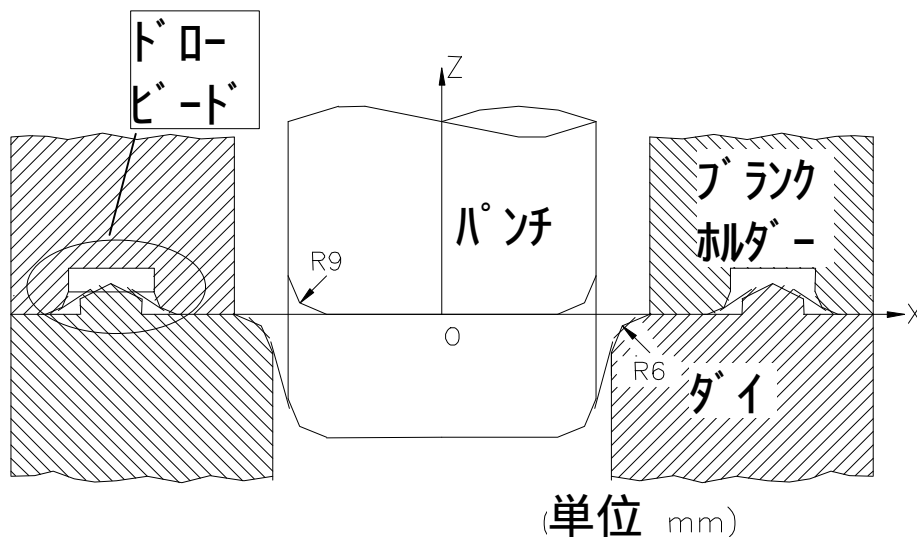
手塚 明

(通産省工業技術院機械技術研究所)

February, 1999

薄板成形

- ・家電品，自動車部品等に良く使われる加工法
- ・プロセス中の皺や割れの防止策
ブランクやドロースキムにより皺押さえ力を発生
- ・プロセスパラメータ設計
ブランク形状やドロースキムの位置と形状等の決定



- ・本研究
最適ドロースキム力の設計
剛塑性有限要素解析（修正薄板要素）
最適値探索手法（AMDESS）
深絞り加工にて検証

1 はじめに

薄板成形における変形
接触問題 + 幾何学・材料非線型問題

最適パラメータ設計

・順問題（有限要素解析）

変形形状，歪み応力分布，鍛造力，割れ等の情報を供給

・逆問題（最適設計）

製品仕様を満足するようなブランク形状，皺押さえ力，ビード力，摩擦力等のパラメータの設計

従来の方法

・経験と勘により何度も実験を行う方法

・プロセスパラメータを変更し有限要素解析により試行錯誤で決定する方法

本研究

・平面応力下の Hill の平面非等方性二次降伏関数及び平面非等方性曲げエネルギー項を考慮した，剛塑性有限要素法

・最適設計法として曲面近似応答法（response surface methodology）

・指定された最終形状の歪み分布に対する評価関数を満足する最適ビード力の決定

・少量の繰り返し計算で安定して最適値探索

2 剛塑性有限要素法

- ・スプリングバック等を考慮すると弾塑性有限要素法が理想的
- ・計算効率との兼ね合いで剛塑性有限要素法による簡易的处理を採用

仮想仕事の原理

時間 t_0 の外形・相当歪み分布から時間 $t_0 + \Delta t$ の応力状態は、

$${}^t dW = \int_V {}^t s_{ij} de_{ij} dV \quad (1)$$

σ_{ij} は第2種 Piola-Kirchhoff 応力テンソル

ε_{ij} はラグランジアン記述の歪みテンソル

板曲げ成形での歪みテンソルは

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^b \quad (2)$$

ここで ε_{ij}^m は膜歪み、 ε_{ij}^b は曲げ歪み

曲げ歪みは曲率変化ゆえ内部エネルギーは

$${}^\tau \delta W = \int_A {}^\tau \sigma_{ij}^m \delta \varepsilon_{ij}^m dA + \int_A {}^\tau M^{ij} \delta \kappa_{ij} dA \quad (3)$$

${}^\tau M_{ij}$ は曲げモーメント、 κ_{ij} は曲率半径である。

HiII の二次降伏関数

$$2f = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (4)$$

x, y, z は直交座標, $F-H, L-N$ は非等方性パラメータ

有限要素形式

$$\mathbf{Q}^m(\mathbf{U}) + \mathbf{Q}^b(\mathbf{U}) = \mathbf{F} \quad (5)$$

薄膜エネルギー項

$$\int_A \tau \sigma_{ij}^m \delta \varepsilon_{ij}^{m0} t dA = \int_A \tau \bar{\sigma} \delta(\Delta \bar{\varepsilon})^0 t dA = \delta \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{Q}^m(\bar{\mathbf{U}})$$

曲げエネルギー項

$$\delta W^b = \int_{A^o} M_1 \delta(\Delta \kappa_1) dA + \int_{A^o} M_2 \delta(\Delta \kappa_2) dA = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{Q}^b(\bar{\mathbf{U}})$$

where:

$$\mathbf{Q}^b(\bar{\mathbf{U}}) = \sum_{el}^N \int_{A_v^{0(el)}} \mathbf{C} \mathbf{B}_4^T \mathbf{B}_4 \mathbf{U} dA$$

\mathbf{U} : 変位

N : 領域全体での要素境界線の総数

A_v : 仮想曲げ要素の面積

\mathbf{C} : 曲げに対する剛性係数

3 プロセスパラメータ設計手法 最適値探索問題

$$\min. \Phi(\mathbf{s}(\mathbf{u}(\mathbf{p}), \mathbf{X}(\mathbf{p})), \mathbf{p}) = \int_{\Omega_{opt}} (\mathbf{s} - \tilde{\mathbf{s}})^2 d\Omega \quad \text{at } t = t_f \quad (6a)$$

$$\text{subject to } \mathbf{p} \geq \mathbf{0} \quad (6b)$$

$$\mathbf{s} \leq \mathbf{s}_c \text{ in } \Omega_c \quad (6c)$$

\mathbf{s} : 解析値 (例えば歪み), $\tilde{\mathbf{s}}$: 目標値, \mathbf{u} : 変位,
 \mathbf{X} : 節点位置, \mathbf{p} : プロセスパラメータ (設計変数)

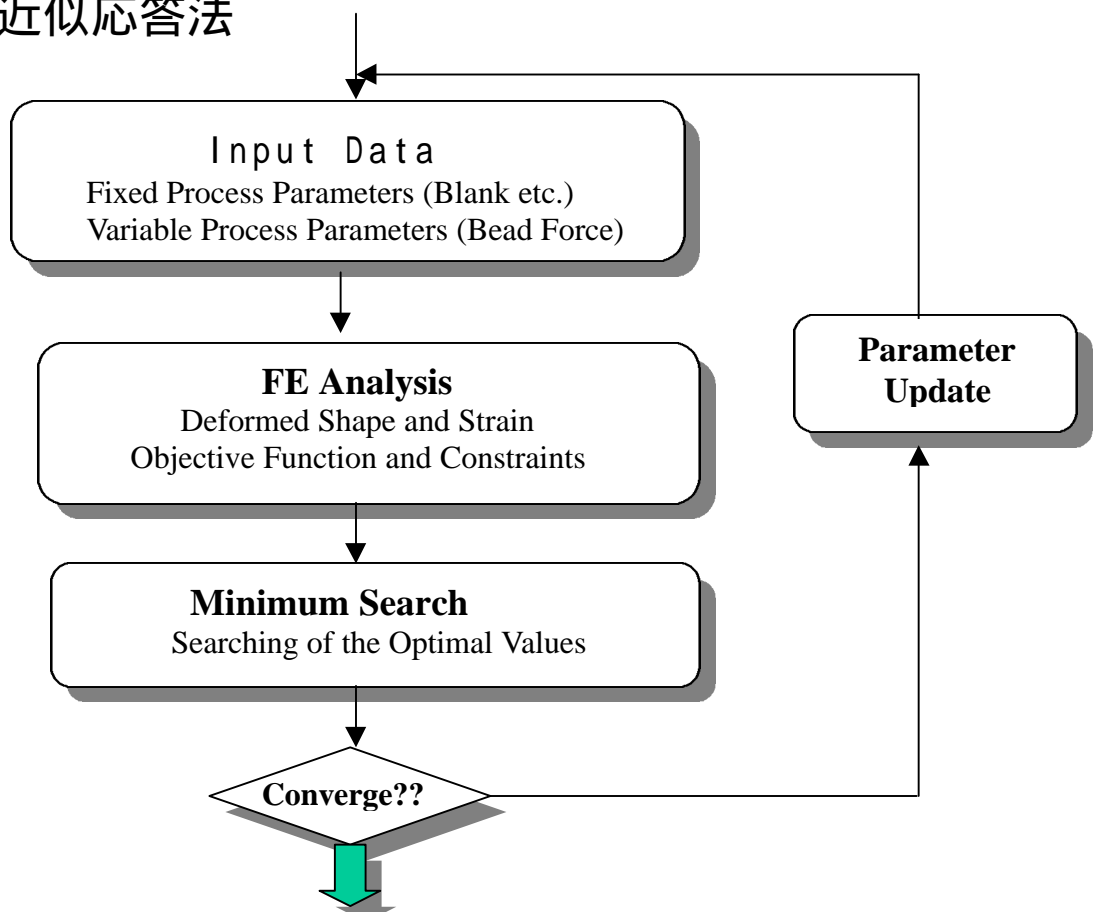
最適値探索手法

(1) 系の感度による方法 (SQP, BFGS 等)

- ・差分による感度
- ・直接微分による感度

(2) 系の応答による方法

- ・GA による方法
- ・曲面近似応答法



$$\min. \Phi(\mathbf{s}(\mathbf{u}(\mathbf{p}), \mathbf{X}(\mathbf{p}), \mathbf{p})) = \int_{\Omega_{\text{opt}}} (\mathbf{s} - \tilde{\mathbf{s}})^2 d\Omega \quad \text{at } t = t_f \quad (6a)$$

$$\text{subject to } \mathbf{p} \geq \mathbf{0} \quad (6b)$$

$$\mathbf{s} \leq \mathbf{s}_c \quad \text{in } \Omega_c \quad (6c)$$

\mathbf{s} : 解析値 (例えば歪み), $\tilde{\mathbf{s}}$: 目標値, \mathbf{U} : 変位,
 \mathbf{X} : 節点位置, \mathbf{p} : プロセスパラメータ (設計変数)

差分による感度

n 個の設計変数の感度計算には $2n+1$ 回の FEA

$$\frac{\partial f}{\partial p_i} = \frac{f(\mathbf{p} + \Delta p_i) - f(\mathbf{p} - \Delta p_i)}{2\Delta p_i}$$

直接微分による感度

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q}^m + \mathbf{Q}^b - \mathbf{F} = 0 \rightarrow \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{p}} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{U}} \frac{d\mathbf{U}}{d\mathbf{p}} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{X}} \frac{d\mathbf{X}}{d\mathbf{p}} = 0$$

感度法の問題点

- (1) 局所的最小値への収束
- (2) 設計変数の増大による収束の悪化
- (3) 差分法は計算効率が悪い
- (4) 直接微分法は問題毎にインプリが必要

GA の問題点

多設計変数時の計算時間・収束の悪化

曲面近似応答法

- ・変数に対する系の応答履歴を大域的近似関数で表現し，その近似関数について最適値の探索を行う手法
- ・系の感度計算が不可能・困難な場合に特に有効
- ・過去の解析結果も探索情報に加味する事が可能
- ・応答履歴は大域的に近似されるため，局所的最適値に陥る危険性は少
- ・インプリ，導入が簡単
- ・近似手法と言えども，工学的には十分な場合多し

目的関数の設定

- 目的関数：成形品の質
- 拘束条件：割れや皺発生防止
- 状態変数：主歪み場
- 設計変数：プロセスパラメータ

4. 数値解析例

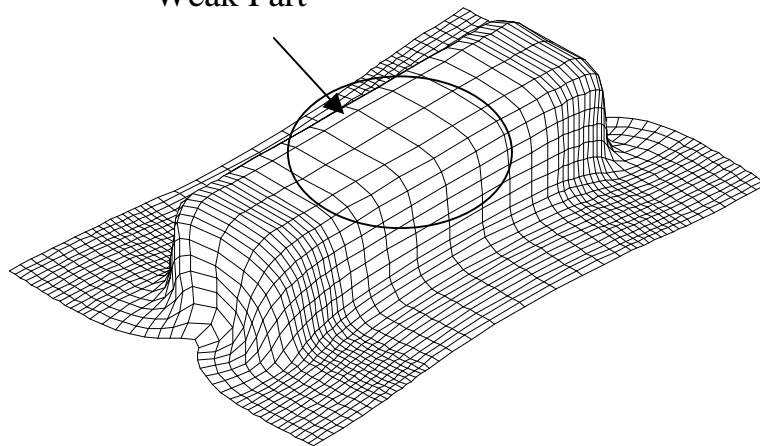
ビード力最適設計(四角カップ絞り加工)

・仮定

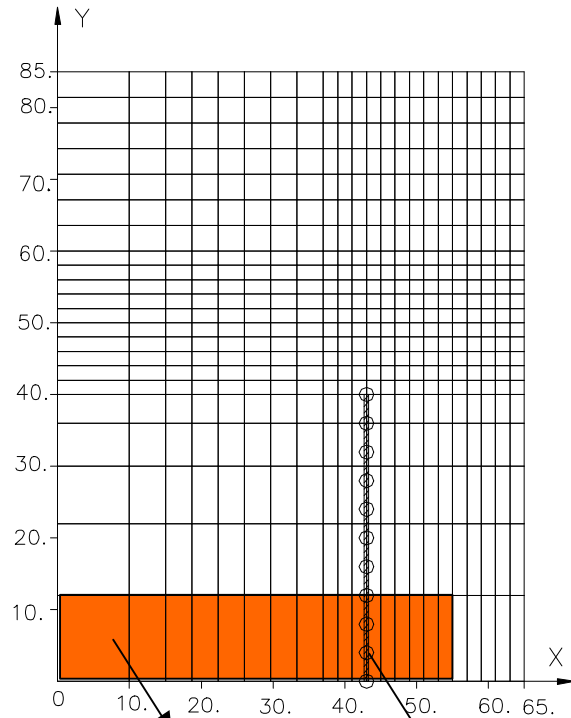
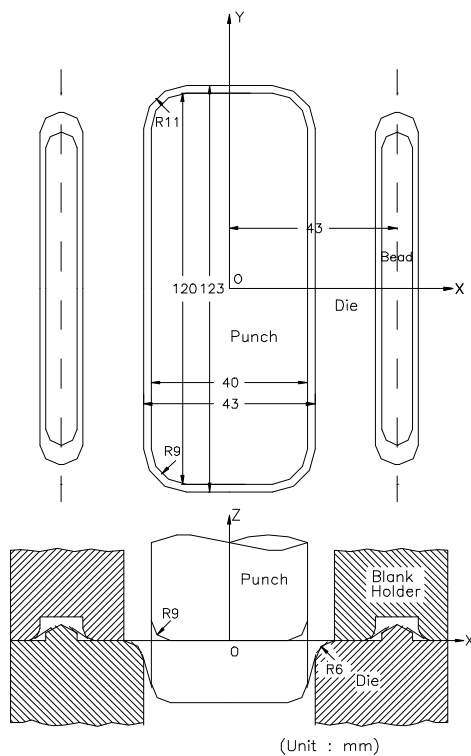
ドロ-ビード力は押し込み量に対して一定。

・最適化の目的

Weak Part



問題点



Optimization Region

Draw-bead

モデル図

材料

応力歪み関係 $\bar{\sigma} = 576(0.0009 + \bar{\epsilon})^{0.274}$ Mpa

Lankford 係数 $(r_0, r_{45}, r_{90}) = (1.833, 1.434, 2.016)$

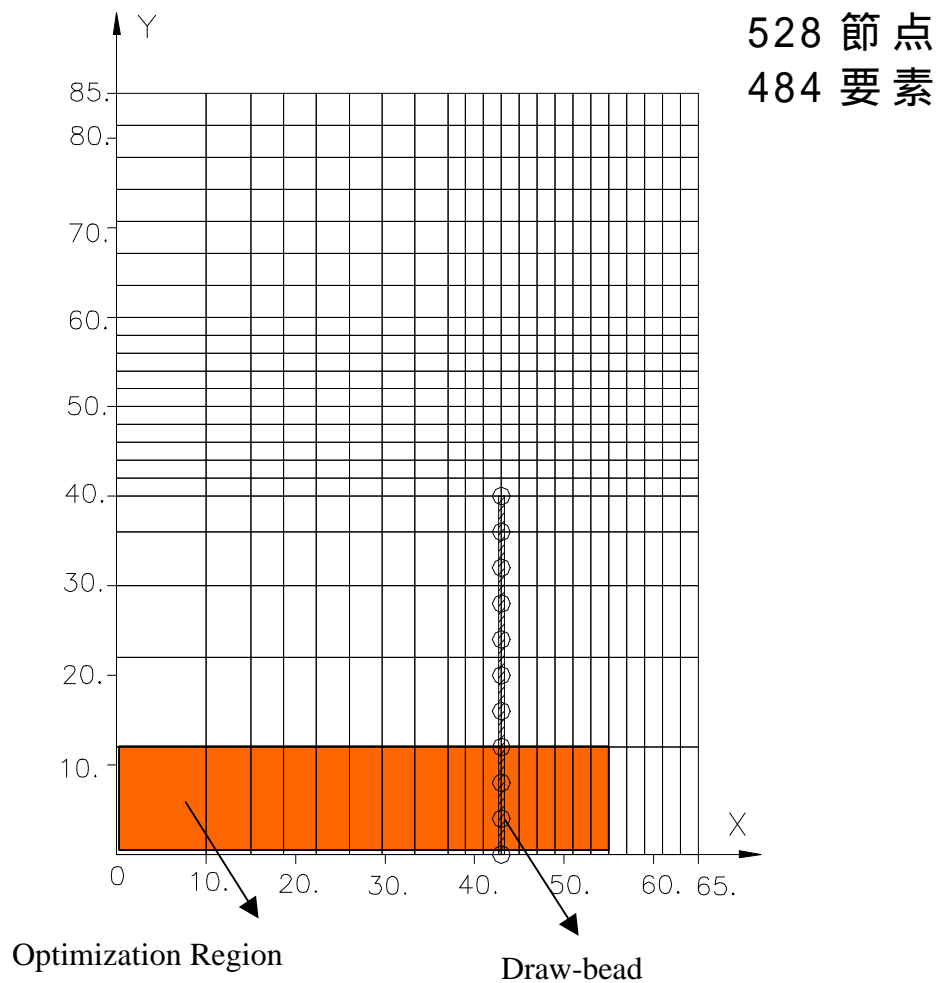
板厚 : $t = 0.69$ mm

ブランクサイズ: 130mm×170mm

クーロン摩擦係数: 0.11

ドロースキッドモデル

- ・ドロースキッドを 11 節点からなる 10 本の線要素として離散化
- ・ドロースキッド線要素における等価節点圧力よりドロースキッド力を近似的に算出



最適設計関数

$$\min. \quad \Phi(E(\mathbf{U}(\mathbf{p}), \mathbf{X}(\mathbf{p}), \mathbf{p}), \mathbf{p}) = \int_{\Omega_{\text{opt}}} (E_1 - \tilde{E}_1)^2 d\Omega$$

subject to $\mathbf{p} \geq \mathbf{0}$ (ビード力は正)

$$E_1 < \tilde{E}_c \quad (\text{割れ防止})$$

E : 主歪み, X : 節点位置, U : 変位, p : ビード力

E_1 : 解析値(主歪み)

\tilde{E}_1 : 目標値,

$$\tilde{E}_1 = -E_2 + E_0 \quad \text{if } E_2 \leq 0$$

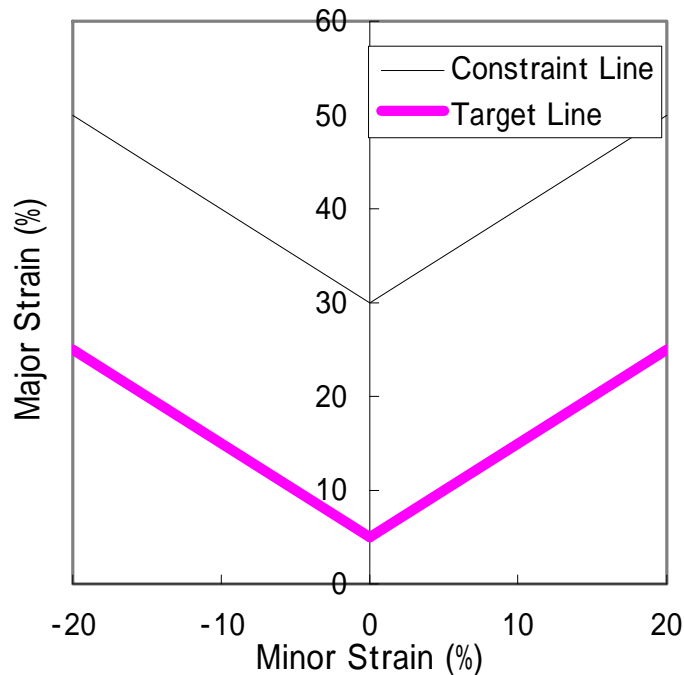
$$\tilde{E}_1 = E_2 + E_0 \quad \text{if } E_2 > 0 \quad \text{where } E_0 = 5\%$$

\tilde{E}_c : 割れ領域の境界線

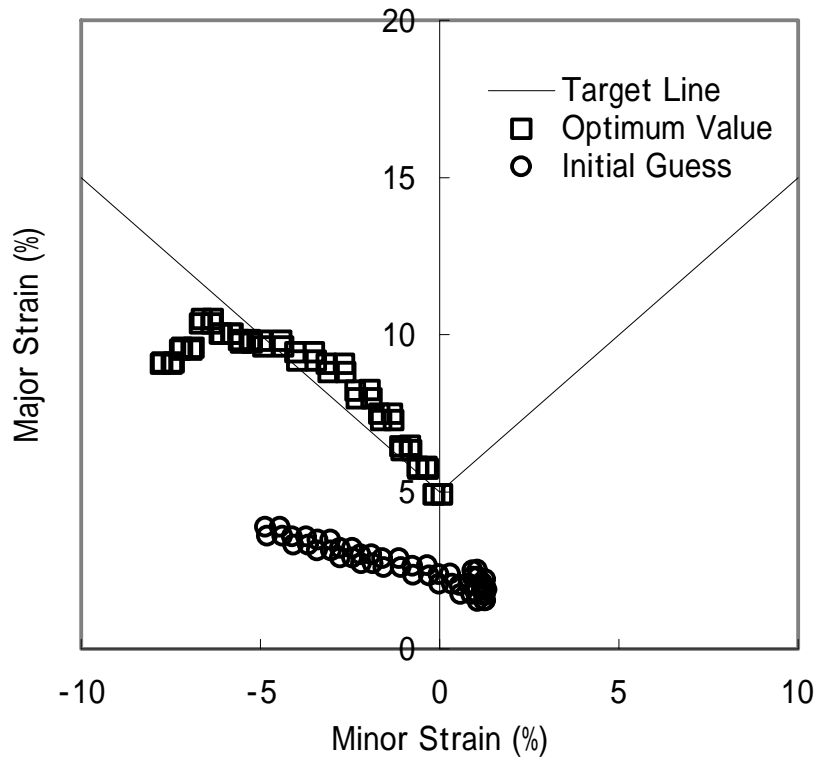
$$\tilde{E}_c = -E_2 + E_{c0} \quad \text{if } E_2 \leq 0$$

$$\tilde{E}_c = E_2 + E_{c0} \quad \text{if } E_2 > 0 \quad \text{where } E_{c0} = 30\%$$

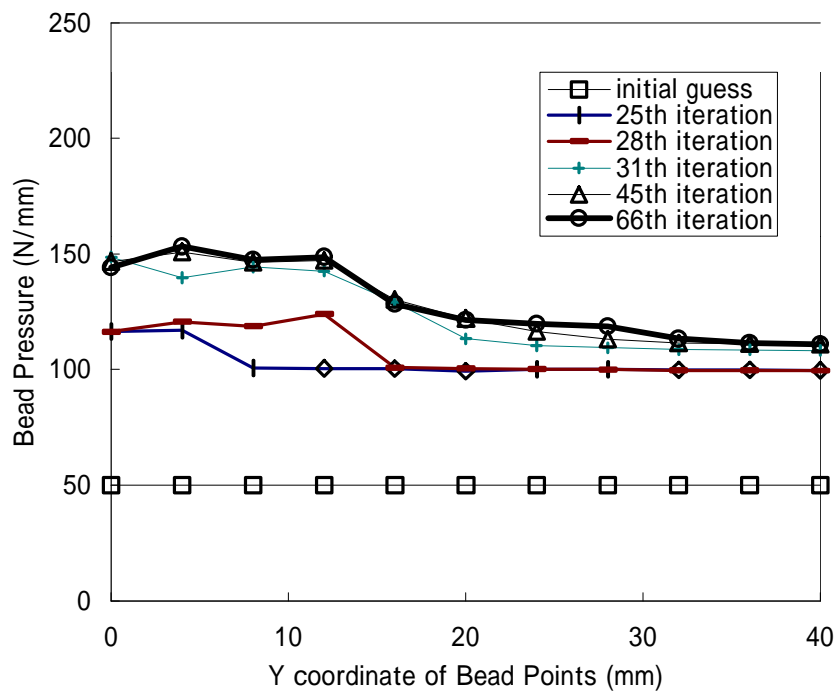
E_2 : 最小主歪み



変形限界図 (forming limit diagram)



最適化前後の主歪み分布

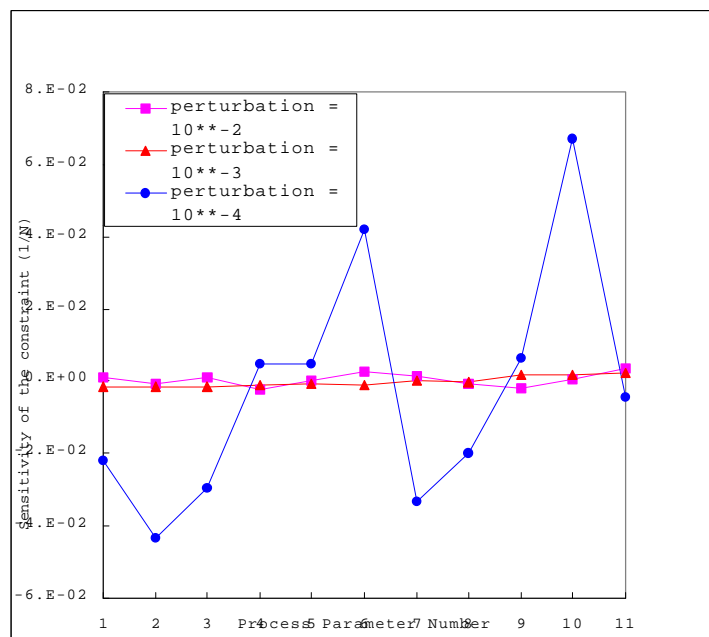
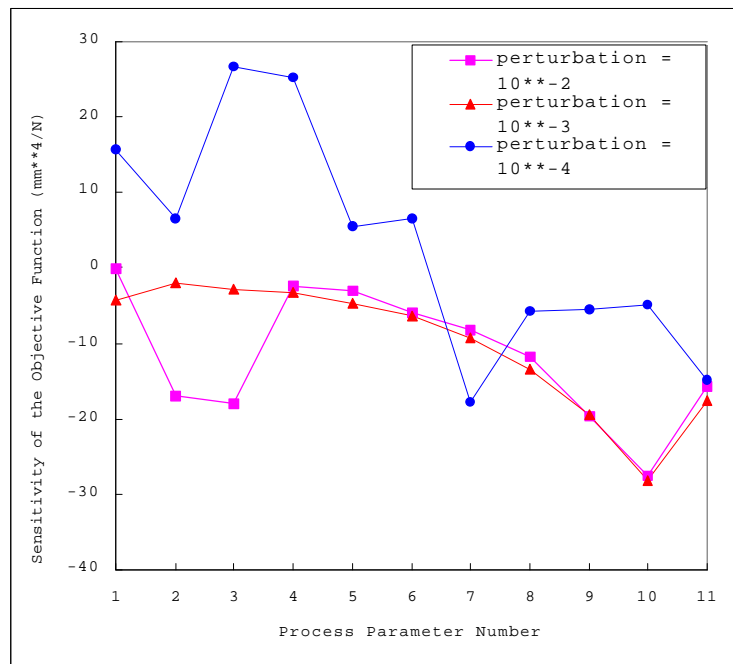


最適過程での等価ビード力の変化

曲面近似応答法の処理

- 曲面構築にはパラメータ n 個に対し, 最低限 $2n+1$ 回の順解析が必要
- 初期ビード力 50 N/mm に対し, 各ビード点に $\pm 10 \text{ N/mm}$ の摂動値 (23 パターンの初期解析)

差分法との比較



目的関数及び拘束条件の感度

5. むすび

板成形パラメータ最適設計のため，最適設計手法を薄板成形有限要素解析に導入した。

順問題での解析手法としては，修正板要素を用いた三次元剛塑性有限要素法を用いた。

最適設計仕様は変形中の割れを防止するように FLD(forming limit diagram)を用いて構築した。

最適値探索手法には曲面近似応答法を用いた。

複雑な変形プロセスに適用可能な事が確認され，少量の繰り返し計算により設計目標値と設計拘束条件を満足する解の導出に成功した。