角筒深絞り加工における可変ブランクホルダー力の最適軌道設計*

北山 哲士^{*1}, 喜多 健太^{*2}, 山崎 光悦^{*3}

Optimum Trajectory of the Variable Blank Holder Force in the Square Cup Deep Drawing

Satoshi KITAYAMA^{*1}, Kenta KITA and Koetsu YAMAZAKI^{*1} Kanazawa University, College of Science and Engineering
Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192, Japan

In deep drawing, a low blank holder force (BHF) will cause wrinkling, while a high BHF will lead to tearing. The Variable Blank Holder Force (VBHF) is an attractive approach in the industries, and it is important to determine the VBHF trajectory. In this paper, a sequential approximate optimization (SAO) approach is employed for determining the VBHF trajectory. The objective is taken as the minimization of the deviation of whole thickness. The constraint is quantitatively defined with the Forming Limit Diagram (FLD), in which no wrinkling and tearing can be observed. The blank holder forces are taken as the design variables. Two constraints in which wrinkling and tearing are avoided are employed in this paper. The Radial Basis Function (RBF) network is employed for constructing the response surface to capture the non-linear phenomena. In the proposed SAO approach, the optimum BHF is added to refine the VBHF trajectory, while some data points are also added to cover the entire design variable space. The result of the VBHF trajectory with the proposed SAO approach is compared with the one of the closed-loop type algorithm.

Key Words : Deep Drawing, Finite Element Method, Computational Mechanics, Plastic Working, Computer Aided Engineering, Computer Aided Analysis, Engineering Optimization

1. 緒 言

大型プレス機は、自動車のドアパネルの加工をはじめ、様々な用途で用いられている。板材を抑えるブランクホルダー力 (Blank Holder Force: BHF) は、材料加工中、一定であることが多く、板材にしわや割れを発生させないような適切な BHF を決めるには、試行錯誤を要する。そのため、コンピュータシミュレーション (CAE) を用いて、事前に十分な検討を行っておき、実機による加工が行われることが多い。一方、サーボプレス機は、従来のプレス機と異なり、ストロークに応じて BHF を可変させることができるため、しわや割れを防ぐような可変ブランクホルダー力 (Variable Blank Holder Force: VBHF) による加工が可能である。

Wang らは、BHF の大きさ・ストローク・加工材料に発生する割れ・しわの間には、基本的には図 1(a)~(d) に示すような関係があると指摘している⁽¹⁾。すなわち、加工材料には、割れやしわが発生しないような領域が存在し (図 1 中の Safety Region)、その領域内で BHF の大きさを設定すれば割れやしわが発生しないこと、また Obermeyer らによれば、最小 BHF で加工することが良いとされている⁽²⁾。このことを達成するためには、図 1 から明らかなように、BHF の大きさをストロークに応じて変化させる必要がある。しかし、ストロークとしわ・割れの関係は一般には未知であるため、最小 BHF の軌道を求めることは非常に難しく、実機を通じて最小 BHF の軌道を求めることは、時間やコストの観点から好ましくない。そのため、CAE 技術を用いて、最小 BHF の軌道を求めることが望ましい。

VBHF の軌道を求める研究は、大きく二つに大別することができる。

* 原稿受付 2010 年 8 月 4 日

^{*1} 正員, 金沢大学理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)^{*2} 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科^{*3} 正員, フェロー, 金沢大学理工研究域

E-mail: kitagon@t.kanazawa-u.ac.jp

Fig.1 Four basic types of BHF formability windows

Fig.2 Segmented blank holder forces

(1) 閉ループ型のアルゴリズムを構築し、VBHFの軌道を求める研究^(1, 3-9).

(2) 応答曲面法を用いて近似的なBHFの大きさやVBHFの最適軌道を求める研究⁽¹⁰⁻²⁰⁾.

筆者らは、角筒深絞り加工を対象とした簡素な閉ループ型アルゴリズムを構築し、その有効性を数値シミュレーションおよび実験を通じて検討した⁽⁹⁾. この研究では、板材の板厚変動を考慮し、加工中の板厚変動が一定値以上であれば、BHFを下げるという仕組みを組み込んでおり、数値シミュレーションの結果を基にサーボプレス機による実験を行った結果、両者は極めてよい一致をみた. この研究の特徴は、成形加工中の板厚変動を逐次的にチェックするため、きめ細かなBHFの制御が可能であり、詳細なVBHFの軌道を得ることができた. 一方で、簡素なアルゴリズムであるにも関わらず、アルゴリズムの自動化は極めて困難であり、また板厚変動を判断するパラメータの設定指針が決めづらいなどの課題も同時に残されていた.

一方、応答曲面法による研究は、成形限界線図(Forming Limit Diagram: FLD)を用いて、成形加工終了時における材料のひずみ状態から、目的関数や制約条件等を定量的に評価し、目的関数や制約条件を応答曲面近似し、応答曲面の最適解を最終的なBHFの大きさとする方法である. 閉ループ型アルゴリズムでは、成形加工中の材料の状態を考慮できるため、VBHFの軌道を求めるのは比較的容易であるが、応答曲面法によるアプローチでは、例えば図2に示すように、板材に作用するBHFを分割し、各BHFに対して適切な大きさを決定する研究が多く⁽¹⁰⁻¹⁷⁾, ストロークに応じてBHFを変化させるといったVBHFの最適軌道設計に関する研究は極めて少ない⁽¹⁸⁾. これは、応答曲面法によるアプローチでは、成形終了時の状態におけるFLDを活用しているためであり、閉ループ型アルゴリズムのように成形加工中の板材の状態までは考慮できないこと、またVBHFの最適軌道を求めるとなると設計変数の取り方自体が難しく、場合によっては設計変数の数が多くなってしまうため、応答曲面によるアプローチが困難となってしまうためであると考えられる. また、従来の応答曲面法を用いた研究では、下記の点で課題が残されているものと考えている.

- (P1) しわや割れの危険性を目的関数の一つとして考えているが^(10, 11, 14-20), これらは本来、制約条件として扱うほうが自然である.
- (P2) 複数の目的関数を設定し、線形加重法を用いて、単一目的関数の最小化問題に変換している^(10, 14, 16-19). 線形加重法における重みの決定について、何ら指針が得られておらず、一組の重みを設定して最適化を終了している. 重みに関する有効な知見、すなわち、目的関数間のトレードオフ関係について、何ら言及されていない.
- (P3) 多くの研究では、複数存在する目的関数の応答曲面作成において、二次多項式近似が基本となっており、交互作用等に関する注意が払われていない^(10-16, 20). 近年、KrigingやSupport Vector Machineを用いた研究が報告されているが⁽¹⁷⁻¹⁹⁾, BHFの大きさを求める研究であり、VBHFの最適軌道を求める研究ではない.
- (P4) 逐次近似最適化のアプローチが取られている研究も行われているが^(10, 12, 15, 16), これらの研究では、応答曲面の最適解のみを追加してゆくZooming法である⁽²¹⁾. 解の精度および近似的な大域的最適解を得たいの

であれば、応答曲面の最適解に加え、サンプル点の疎な領域にもサンプル点を追加する逐次近似最適化を行うことが望ましい。

- (P5) 応答曲面法による VBHF の最適軌道と閉ループ型アルゴリズムによる VBHF の軌道を比較することで、両者の相違点もしくは類似点の議論が可能となる。

そこで、本論文では上記の課題点を踏まえ、逐次近似最適化の考えに基づき、近似的な VBHF の最適軌道を設計する。逐次近似最適化の方法として、筆者らが取り組んでいる RBF ネットワークによる逐次近似最適化システムを用いる⁽²²⁾。第2章では、本論文で用いる有限解析モデル等について概説する。第3章において、応答曲面法による VBHF の最適軌道設計問題について詳述する。数値計算例を通じ、逐次近似最適化システムによって得られた近似的な VBHF の最適軌道を示し、閉ループ型アルゴリズムによって得られた VBHF の軌道との相違について考察する。塑性解析シミュレーションには、動的有限要素解析ソフト LS-DYNA を用いた。

2. 解析モデルおよび諸条件

2・1 実成形品

本論文で対象とする角筒深絞りの実際の成形品及びダイス・カウンターパンチの寸法を図3と図4(a), (b)に示す。

Fig.3 Rectangular cup

Fig.4 Dimensions of the die and counterpunch

2・2 材料特性

使用する材料は高強度鋼板(SPFC440)であり、材料特性（実測値）を表1に示す。応力—ひずみの関係は式(1)であらわされる。

$$\sigma = 793\varepsilon^{0.189} \quad (1)$$

Table 1 Material properties of SPFC440

Density: ρ [kg/mm ³]	7.84×10^{-6}
Young's modulus: E [MPa]	2.06×10^5
Poisson's ratio: ν	0.3
Yield stress: σ_Y [MPa]	353
Tensile strength: σ_T [MPa]	479
Normal anisotropy coefficient: r	0.98
Strain hardening coefficient: n	0.189

2・3 有限要素モデルと精度

金型形状から作成した有限要素モデルの概要を図 5(a), (b)に, 各モデルの要素タイプおよび要素数を表 2 に示す. 対称性を考慮し, 解析には 1/4 モデルを採用している. 板材の寸法は $92.5\text{mm} \times 92.5\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ とし, 板材とパンチ/ブランクホルダー/カウンタパンチの摩擦係数はすべて 0.1 とした. また, 接触に関しては, ペナルティ法を用い, ペナルティ係数は 0.1 とした. 板材はシェル要素(Belytschko-Tsay)を用い, 板厚方向の積分点数は 7 点とした.

Table 2 Element type and number of finite elements

	Element type	Number of finite elements
Counter punch	Rigid	120
Dies	Rigid	924
Blank	Shell (Belytschko-Tsay)	2116
Blank holder	Rigid	432
Punch	Rigid	962

図 5 において, パンチは固定され, ブランクホルダー力は, ブランクホルダー全体に, z 軸正の方向に作用する. カウンタパンチとダイスに z 軸負の方向へ強制変位を与え, 下死点まで到達した後, カウンタパンチ・ダイス・ブランクホルダーに対し, z 軸正の方向へ強制変位を与えることで, 加工は終了する. BHF=100kN 一定で加工した際の加工終了後の材料(1/4 モデル)を図 6(a), (b)に示す. 図 6(a)はシミュレーションによる結果, 図 6(b)は実験結果であり, 寸法誤差を表 3 に示す. また図 7 に示す測定点における板厚誤差を表 4 に示す. これらの結果より, 本論文で用いるシミュレーションモデルは妥当であると考ええる.

Fig.5 Finite element models

Fig.6 Comparison between simulation model and experiment

Fig.7 Measuring point of the thickness

Table 3 Errors of length

Error for x-direction	3.3 [%]
Error for y-direction	0.1 [%]
Error for z-direction	1.2 [%]

Table 4 Errors of thickness between simulation and experiment

Measuring point	A	B	C	D
Simulation [mm]	1.12	0.93	1.12	1.35
Experiment [mm]	1.14	0.93	1.11	1.30
Error [%]	1.75	0.00	0.90	3.85

2・4 モーション設定

ダイスとカウンタパンチの実験におけるモーション設定を図8に示す。解析でも同じモーション設定を標準として用いている。材料とブランクホルダーが接触し始め、下死点まで到達し、材料とブランクホルダーの接触が終了するまでの時刻を対象とした。解析中において、ダイスとカウンタパンチの初期速度 $v_{init} \text{ mm/s}$ と最大速度 $v_{max} \text{ mm/s}$ はそれぞれ次の通りである。

$$v_{init} = 267 \quad (2)$$

$$v_{max} = 359 \quad (3)$$

Fig.8 Motion of the die, blank holder, and counter punch

2・5 しわの発生

シミュレーションにおいて、しわが発生したときの状況を図9に示す。このとき、BHF=20kN一定であり、実験においてもしわが発生している（図10）。このことから、本研究で用いる有限要素解析モデルの妥当性がうかがえる。

Fig.9 Wrinkling by the simulation

Fig.10 Wrinkling in the experiment

3. VBHFの最適軌道設計問題

本章では、応答曲面法を用いた近似的なVBHFの最適軌道設計問題について詳述する。また、材料の有限要素の数を m と表記する。

3・1 最適設計問題の定式化

本論文で扱う近似的なVBHFの最適軌道設計を次のように定式化する。

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i=1,2,\dots,ndv \quad (5)$$

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j=1,2,\dots,ncon \quad (6)$$

ここで $f(\mathbf{x})$ は最小化する目的関数, $\mathbf{x}$ は設計変数ベクトル, $g_j(\mathbf{x})$ は挙動制約条件を表す. また, x_i^L と x_i^U は i 番目の設計変数ベクトル x_i に直接的に課せられる側面制約条件であり, ndv は設計変数の数, $ncon$ は挙動制約条件の数を表す.

3・2 目的関数

一般に深絞り加工では, パンチ角部において板厚が最も減少し, 割れが発生しやすい. そこで最小板厚を最大化するような目的関数も考えられるが, その場合, 最小板厚のみに着目しているため, 板材全体の板厚を考慮することができない. そこで, 成形加工終了時における板厚変動を最小化するような次の目的関数を採用する⁽¹⁴⁻¹⁷⁾.

$$f(\mathbf{x}) = \left\{ \sum_{i=1}^m (t_i/t_0 - 1)^p \right\}^{1/p} \quad (7)$$

式(7)中において, t_0 は初期板厚を表わし, t_i は成形終了時における i 番目の有限要素の板厚を表す. また p は目的関数の極値を強調するパラメータであり, $p=2,4,6,\dots$ とされている. 本論文では, 文献(14),(16)で用いられている値($p=4$)を採用した.

3・3 設計変数

VBHF の軌道を求めるため, 本論文では, ストローク長をいくつか分割し, 各ストロークにおける BHF の大きさを決定することで, VBHF の軌道を求めることにした. ストローク長を $L_{\max}$ と表記する. $L_{\max}$ を n 分割し, i ストロークにおける BHF の大きさを設計変数とする. 具体的な設計変数の様子を図 11 に示す.

Fig.11 An example of the design variables

3・4 制約条件

本論文では, しわや割れの危険性をそれぞれ, 制約条件として扱うことにする. これらを定量的に扱うために, FLD を用いて制約条件値を求める. 制約条件値の算出方法について図 12 を用いて説明する.

図 12 中において, しわの危険性が予測される有限要素は, しわ領域(Wrinkling region)にプロットされ, 一方, 割れの危険性が予測される有限要素は, 割れ領域(Tearing region)にプロットされる. また, しわや割れがないと予測される有限要素は, 安全領域(Safety region)の中にプロットされる. 主ひずみ ε_1 は,

$$\varepsilon_1 = \varphi_T(\varepsilon_2) \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = \varphi_W(\varepsilon_2) \quad (9)$$

と表記される．ここで φ_T は、割れを制御する成形限界曲線(Forming Limit Curve: FLC)を表し、 φ_T と φ_W は用いる材料に依存する．ここで、安全係数 s を考慮した次の関数を考える．

$$\theta_T(\varepsilon_2) = (1-s)\varphi_T(\varepsilon_2) \quad (10)$$

$$\theta_W(\varepsilon_2) = (1+s)\varphi_W(\varepsilon_2) \quad (11)$$

しわと割れの危険性を、以下のようにして、それぞれ個別に定量的に評価した．

(a) 割れの危険性評価について： 割れの危険性に関する制約条件 $g_1(\mathbf{x})$ を下記のようにして評価する．

$$g_1(\mathbf{x}) = \left(\sum_{j=1}^m T_j \right)^{1/p} \quad (12)$$

ただし、

$$T_j = (\varepsilon_1^j - \theta_T(\varepsilon_2^j))^p \quad \varepsilon_1^j > \theta_T(\varepsilon_2^j) \quad (13)$$

$$T_j = 0 \quad \text{otherwise} \quad (14)$$

である．

(b) しわの危険性評価について： しわの危険性に関する制約条件 $g_2(\mathbf{x})$ を下記のようにして評価する．

$$g_2(\mathbf{x}) = \left(\sum_{j=1}^m W_j \right)^{1/p} \quad (15)$$

ここで、

$$W_j = (\theta_W(\varepsilon_2^j) - \varepsilon_1^j)^p \quad \varepsilon_1^j < \theta_W(\varepsilon_2^j) \quad (16)$$

$$W_j = 0 \quad \text{otherwise} \quad (17)$$

である．

Fig.12 Constraint with the Forming Limit Diagram

ここで、各制約条件の意味について説明する．割れの危険性評価について、有限要素 j が $\theta_T(\varepsilon_2^j)$ よりも上にプロットされた場合(図 12 中の■), 割れの危険性があると判断され、式(13)により有限要素 j の危険性が計算される．すべての有限要素に関し、式(13), (14)が計算され、その総和を考えることで割れに関する制約条件値 $g_1(\mathbf{x})$ が求まる．一方、しわに関して、同様の手順を踏めばよい．すなわち、有限要素 j が $\theta_W(\varepsilon_2^j)$ よりも下にプロットさ

れた場合 (図 12 中の▲), しわの危険性があると判断され, 式(16)により有限要素 j の危険性が計算される. すべての有限要素に関し, 式(16), (17)が計算され, その総和を考えることで, しわに関する制約条件値 $g_2(\mathbf{x})$ が求まる. また図 12 中の安全領域(Safety region)にプロットされた有限要素については, 式(14)もしくは式(17)が適用され, 割れもしわも危険性はないと判断される. 式(12), (15)中の p は目的関数の場合と同様の性質をもつパラメータであり, 目的関数値の評価と併せるため, $p = 4$ とした.

文献等^(10, 14-18)では, しわと割れの定量的評価法として, 本論文で示した方法と同様な評価方法を用いており, それらを目的関数の一つとしており, 線形加重法により, 単一の目的関数を最小化する問題を設定している. 多目的最適化における制約法では, 複数ある目的関数の中から一つの目的関数だけを残し, 残りの目的関数を制約条件とする方法であり, 本論文は, しわや割れの危険性を制約条件として扱っていることから, 制約法を用いた例の一つである. 実際の成形では, 製品に発生したしわは切り落とすことなどの対処により, ある程度は許容されているものの, 割れは許容されていない. しわと割れの危険性を一つの制約条件として扱った場合, しわの危険性が高いのか, 割れの危険性が高いのかを判断することが困難となり, 割れとしわのどちらの危険度が高いのかを明確に扱うため, これらを個別の制約条件として扱った. 当然のことながら, 3.2 節の目的関数に加え, しわや割れの危険性を最小化するという問題を考えた場合, しわと割れの危険性は, 個別の目的関数としてとらえることになるが, 多目的最適化におけるトレードオフ分析の手間を省くため, 本論文では, 単一の目的関数を設定した.

3・5 全体の流れ

近似的な大域的最適解を得るため, 筆者らは RBF ネットワークを用いた逐次近似最適化システムを提案している⁽²²⁾. 詳細は文献 (22) を参照されたい. 本論文で対象とする VBHF の最適軌道設計問題を対象として, 全体の流れを以下に示す. 以下の流れの中で, サンプル点とは, BHF の大きさやストローク長の組合せを意味しており (図 11 参照), シミュレーション回数と同意である.

(STEP1) 初期サンプル点を Latin Hypercube Design (LHD)によって決定.

(STEP2) 目的関数値および制約条件値を算出.

(STEP3) 目的関数および制約条件の応答曲面を RBF ネットワークで作成. 応答曲面の最適解を探索.

(STEP4) 応答曲面の最適解を新たなサンプル点として追加. また, サンプル点の疎な領域を見つけるため, 密度関数を作成し, 密度関数の最適解も新たなサンプル点として追加.

(STEP5) 最大サンプル点数に到達したら終了. そうでなければ, STEP2 へ戻る.

応答曲面および密度関数の最適解探索には, Differential Evolution (DE)を用いた.

4. 数値シミュレーション

本章では, 数値シミュレーションを通じて, VBHF の最適軌道を求める. 全ストローク長を $L_{\max} = 62\text{mm}$ し, 6 分割した場合の VBHF の最適軌道を求めることにする. また実験結果を参考に, BHF の大きさの上限値は, 割れが発生した 150 kN , 下限値はしわが発生した 20 kN と設定した. 数値シミュレーションでは, 割れの判定値として, 初期板厚の 75% (0.90mm) を下回ったとき, 割れと判定した. また, しわの発生については, ブランクホルダーとダイスの距離を用い, 初期板厚の 120% (1.44mm) 以上になった場合, しわが発生するものと想定した.

4・1 制約条件が二つの場合

本論文では, しわと割れをそれぞれ個別の制約条件として扱う. 全ストローク長を 6 つに分割, 各ストロークにおける BHF の大きさを設計変数とする. ダイスとカウンターパンチの速度変化を考慮し, 各ストローク長 $L_i\text{mm}$ ($i=1, 2, \dots, 6$) は, それぞれ下記のように設定した.

$$0.00 \leq L_1 \leq 10.09 \quad (18)$$

$$10.09 \leq L_2 \leq 21.07 \quad (19)$$

$$21.07 \leq L_3 \leq 31.93 \quad (20)$$

$$31.93 \leq L_4 \leq 41.61 \quad (21)$$

$$41.61 \leq L_5 \leq 51.50 \quad (22)$$

$$51.50 \leq L_6 \leq 62.00 \quad (23)$$

はじめに 15 点の初期サンプル点 (各ストロークにおける BHF の大きさ) を LHD によって決め, 最大サンプル点数を 30 とした場合, 最終的に得られた VBHF の最適軌道と成形状態を図 13 に示す. なお同図中には, 筆者らが開発した閉ループ型アルゴリズムによって得られた VBHF の軌道 (点線) も併せて示してある. また, 図 14(a), (b) に板厚の分布及び最小値, 図 13 に示した $s = 0.2$ における VBHF の最適軌道によって得られた成形品の FLD を図 15 に示す.

Fig.13 Optimal VBHF trajectories

Fig.14 Thickness distribution by the VBHF trajectory

Fig.15 Forming Limit Diagram of the VBHF trajectory($s = 0.2$)

図 15 において, ①はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1$ となる等二軸引張線, ②はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = -r/(1+r)$ となる単軸引張線, ③はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = -1$ となる純粋せん断線, ④はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = -(1+r)/r$ となる単軸圧縮線を表す. なお, r は表 1 に示した異方性パラメータである. さらに⑤は Storen-Rice の局所くびれ理論に基づく成形限界線を表す⁽²³⁾.

図 13 より, 式(10), (11)のパラメータ s は本論文で設定した値においては, VBHF の最適軌道には大きな影響を与えていないことがわかる. また成形状態を考えると, 板材がパンチ角部に当たるとき (図 13 右中の丸印) に, BHF は低くなっており, ストロークが進むにつれ, 徐々に BHF が大きくなっている. 本論文で用いたパンチ形状では, 板材はパンチ角部で最も薄くなり, 割れの発生しやすい箇所であるため, 板材がパンチ角部に接触すると, 材料を積極的に金型内に流入させ, 割れの発生を防ぐよう BHF が低くなっているものと考えられる. またス

トロークが進むにつれ、BHFが大きくなるのは、角部の成形が終了した後は、金型内への材料流入を防ぎ、しわの発生を抑制するためと考えられる。実際の成形加工の現場では、「決押し」と呼ばれており⁽²⁴⁾、本論文で求めたVBHFの最適軌道は、経験的に行われていた成形加工法と定性的に一致する。

次に図14について考えると、シミュレーション上で割れが発生すると仮定した0.90mmを上回っている。さらに図15に示したFLDにおいても、割れが発生すると想定される領域において、有限要素が存在していないことから、シミュレーション上では、割れは発生していないと考えられる。また、ブランクホルダーとダイスの距離は1.40mmであり、しわは発生していないと判断できる。応答曲面の最適解とシミュレーションの誤差を表5に示す。

Table 5 Errors between response surface and numerical simulation

	s	$f(\mathbf{x})$	$g_1(\mathbf{x})$ (Tearing)	$g_2(\mathbf{x})$ (Wrinkling)
Reponse Surface	0.1	6.29E-01	7.68E-03	6.24E-02
	0.2	6.40E-01	3.55E-02	1.00E-01
Numerical Simulation	0.1	6.12E-01	7.80E-03	6.34E-02
	0.2	5.97E-01	3.50E-02	1.02E-01
Error [%]	0.1	2.86	1.53	1.49
	0.2	7.09	1.43	1.84

4・2 制約条件が一つの場合

文献等では、しわと割れを併せて一つの評価項目としている。そこで、制約条件の扱いがVBHFの最適軌道に与える影響を調べるため、しわと割れを一つの制約条件としてVBHFの軌道を求めてみる。具体的には、次のようにして制約条件値を求めることになる。

$$g_1(\mathbf{x}) = \left(\sum_{j=1}^m G_j \right)^{1/p} \quad (24)$$

ただし、

$$\begin{cases} G_j = (\varepsilon_1^j - \theta_T(\varepsilon_2^j))^p & \varepsilon_1^j > \theta_T(\varepsilon_2^j) \\ G_j = (\theta_W(\varepsilon_2^j) - \varepsilon_1^j)^p & \varepsilon_1^j < \theta_W(\varepsilon_2^j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

である。式(24)、(25)中の p は、 $p=4$ とし、初期サンプル点配置、逐次近似最適化が終了する最大サンプル点数は同じとした。式(10)、(11)中の s を $s=0.2$ としたときのVBHFの最適軌道を図16中の実線で示す。また、成形終了時における板厚分布を図17に示す。

図16より、制約条件の取り扱いにより、VBHFの最適軌道は大きく異なることがわかる。また図17より、板厚の最小値は、制約条件が二つの場合に比べ、小さくなっており、割れの危険性が増していることが分かる。式(24)、(25)から明らかなように、しわと割れを一つの制約条件として扱うと、どちらの危険性が高いのかを明らかにすることはできない。その結果、板厚の最小値は、しわと割れを一つの制約条件として扱った場合、しわと割れを個別の制約条件として扱った場合に比べ、小さい値をとっている。

本節の数値計算結果は、しわと割れを制約条件として扱う場合、個別の制約条件として扱うことが有効であることを示唆しており、これは、しわや割れを目的関数として考える場合も個別に考えることが有効であることを示唆しているものと考えられる。

Fig.16 VBHF trajectory with one constraint

Fig.17 Thickness distribution with one constraint

4・3 閉ループ型アルゴリズムとの相違・類似について

筆者らは本論文で扱った解析モデルに対して、しわや割れを防ぎつつ、板厚変動を既定値以下に抑えるような VBHF の軌道を得るアルゴリズムを提案し、シミュレーションおよび実機による試験を通じ、その有効性を検討した。一方、本論文では、目的関数や制約条件を定量的に定義し、逐次近似最適化により VBHF の最適軌道を求めた。図 13 に、初期 BHF=20kN としたときの閉ループ型アルゴリズムによる VBHF の軌道と、逐次近似最適化による VBHF の最適軌道が示されており、これらの相違・類似について考察する。

閉ループ型アルゴリズムで VBHF の軌道を求める場合、成形加工中の板材の状態を常に検討することにより、細かな BHF の制御が可能である。閉ループ型アルゴリズムでは、板厚変動を既定値以下に抑えるように BHF を変化させる満足化設計であり、また成形開始からしばらくの間（ストローク長が 40mm 程度まで）は、一定の BHF である。すなわち、ストローク長が 40mm 程度までは、板厚変動が既定値以下であり、さらにしわや割れが発生しておらず、諸条件を満足した状態で成形加工が行われていることを意味している。

一方、本論文で用いた逐次近似最適化による VBHF の最適軌道は、閉ループ型アルゴリズムによって得られた VBHF の軌道に比べ、頻繁に BHF が上下に変動している。本論文では、目的関数や制約条件を定量的に定義して、応答曲面を構築し、応答曲面の最適解を求めている。一般に制約条件がある最適化問題では、一つ以上の制約条件がアクティブ（活性）な状態で最適解が得られることを考慮すれば、最終的に得られた VBHF の最適軌道は、満足化によるアプローチとは異なり、しわや割れが発生する限界に近い状態として得られたものと考えられる。このことは表 5 の割れに関する制約条件値がアクティブとなっていることから明らかであり、割れの発生を極力抑える軌道となっている。

両アプローチによる VBHF の軌道の相違は、満足化と最適化の相違が明確に現れた結果であり、また成形過程の板厚の変動を常に考慮したアプローチと、成形前後の状態から板厚の変動を最小化するアプローチの差でもありと考えている。一方、ストロークが最終段階に近づくにつれ、BHF が一旦大きくなっているという現象は、共通した点である。これはすでに述べたように、成形加工の現場で言われている「決押し」を表しているものと考えられ、両アプローチとも、経験を裏付ける結果を出しているものと考えられる。

5. 結 言

本論文では、角筒深絞り加工を対象として、割れやしわの発生の危険性を制約条件、全ストロークを分割し、各ストロークにおける BHF の大きさを設計変数とし、成形加工中の板厚変動を最小化するような VBHF の最適軌道を RBF ネットワークを用いた逐次近似最適化により求めた。

逐次近似最適化によって得られた VBHF の最適軌道は、定性的には M 字に近く、これは本論文で扱ったパンチ形状における成形加工において、経験的によいといわれているものと極めて近いものとなり、経験則を裏付ける結果となったものと考えている。また本論文で求めた VBHF の最適軌道と閉ループ型アルゴリズムによる VBHF の軌道では、最適化と満足化の相違が表れた結果と考えられる。また、安全係数の値によって VBHF の最適軌道は非常に類似したものとなった。

塑性加工のような非線形性の強い現象に対し、数理計画法に代表される勾配法を用いることは、計算時間や微分可能性の問題等から得策ではなく、本論文で示した応答曲面による方法が有効であろう。実務への応用について言及すれば、しわや割れが発生する BHF を事前に把握して設計変数の下限値および上限値を決めておき、逐次近似最適化を用いることで、近似的ではあるもののしわや割れの発生を抑え、板厚変動を最小にするような最適な VBHF 軌道を設計できる。

本研究を進めるにあたり、渡辺聖司氏（(株)コマツプレス・工機事業本部、技管・解析グループ長）には、適切なご助言をいただいた。この場を借り、感謝申し上げる。

付 録

本論文では、しわや割れの危険性を成形限界線図を用いて定量化している。図 15 はプレス成形シミュレーションシステム JSTAMP を用いている。図 15 中の⑤は以下の式によって求めることができる。

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} \frac{n}{(1+\beta) \left\{ \frac{1-n}{2} + \left[\frac{(1+n)^2}{4} - \frac{\beta n}{(1+\beta)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} & -1 \leq \beta \leq 0 \\ \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} & 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases}$$

ただし、 $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ である。ここで n は表 1 に示す加工硬化係数である。ここで上式を展開し、 ε_1 について解くと次のようになり、図 15 中の⑤を書くことができる。

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} \frac{1}{2}(-1 - \varepsilon_2 + n + \sqrt{A}) & \varepsilon_2 \geq 0 \\ \frac{1}{6}[(-3\varepsilon_2 + 2n) - \frac{9\varepsilon_2^2 - 4n^2}{B} + B] & \varepsilon_2 < 0 \end{cases}$$

ただし、

$$A = 1 - 2\varepsilon_2 - 3\varepsilon_2^2 + 2n + 2\varepsilon_2 n + n^2$$

$$B = \{C + 9\sqrt{D}\}^{\frac{1}{3}}$$

であり、

$$C = 81\varepsilon_2^2 - 27\varepsilon_2^2 n + 8n^3$$

$$D = 81\varepsilon_2^4 + 9\varepsilon_2^6 - 54\varepsilon_2^4 n - 3\varepsilon_2^4 n^2 + 16\varepsilon_2^2 n^3$$

である。

参 考 文 献

- (1) Wang, W.R., Chen, G.L., Lin, Z.Q., Li, S.H., "Determination of optimal blank holder force trajectories for segmented binders of step rectangle box using PID closed-loop FEM simulation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.32, (2007), pp.1074-1082.

- (2) Obermeyer, E.J., Majlessi, S.A., "A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.75, (1998), pp.222-234.
- (3) Lin, Z.Q., Wang, W.R., Chen, G.L., "A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol.183, (2007), pp.339-346.
- (4) Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S., Altan, T., "Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.44, (2004), pp.487-494.
- (5) Hsu, C.W., Ulsoy, A.G., Demeri, M.Y., "An approach for modeling sheet metal forming for process controller design", *Trans. of ASME/ Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.122, (2000), pp.717-724.
- (6) Traversin, M., Kergen, R., "Closed-loop control of the blank-holder force in deep-drawing: finite-element modeling of its effects and advantages", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.50, (1995), pp.306-317.
- (7) Sim, H.B., Boyce, M.C., "Finite element analyses of real-time stability control in sheet forming processes", *Trans. of ASME/ Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.114, (1992), pp.180-188.
- (8) Lo, S.W., Yang, T.C., "Closed-loop control of the blank holding force in sheet metal forming with a new embedded-type displacement sensor", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.24, (2004), pp.553-559.
- (9) 北山哲士, 濱野智史, 山崎光悦, 久保達男, 西川輝, 木下洋, "可変ブランクホルダー力による角筒深絞り加工", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.766, (2010), pp.1617-1626.
- (10) Chengzhi, S., Guanlong, C., Zhongqin, L., "Determining the optimum variable blank-holder forces using adaptive response surface methodology (ARSM)", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.26, (2005), pp.23-29.
- (11) Wei, L., Yuying, Y., "Multi-objective optimization of sheet metal forming process using pareto-based genetic algorithm", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.208, (2008), pp.499-506.
- (12) Jansson, T., Nilsson, L., Redhe, M., "Using surrogate models and response surface in structural optimization -with application to crashworthiness design and sheet metal forming", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.25, (2003), pp.129-140.
- (13) Jansson, T., Andersson, A., Nilsson, L., "Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part An Evaluation Using Surrogate Models and Response Surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.159, (2005), pp.426-436.
- (14) Wang, H., Li, G.Y., Zhong, Z.H., "Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.197, (2008), pp.77-88.
- (15) Breitkopf, P., Naceur, H., Rassineux, A., Villon, P., "Moving least squares response surface approximation: Formulation and metal forming applications", *Computers and Structures*, Vol.83, (2005), pp.1411-1428.
- (16) Wang, H., Li, E., Li, G.Y., "Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.206, (2008), pp.45-55.
- (17) Wang, H., Li, E., Li, G.Y., "Parallel Boundary and Best Neighbor Searching Sampling Algorithm for Drawbead Design Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.41, (2010), pp.309-324.
- (18) Jakumeit, J., Herdy, M., Nitsche, M., "Parameter optimization of the sheet metal forming process using an iterative parallel Kriging algorithm", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.29, (2005), pp.498-507.
- (19) Tang, Y., Chen J., "Robust Design of Sheet Metal Forming Process Based on Adaptive Importance Sampling", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.39, (2009), pp.531-544.
- (20) Naceur, H., Ben-Elechi, S., Batoz, J.L., Knopf-Lenoir C., "Response surface methodology for the rapid design of aluminum sheet metal forming parameters", *Materials and Design*, Vol.29, (2008), pp.781-790.
- (21) Kurtaran, H., Eskandarian, A., Marzougui, D., Bedewi, N.E., "Crashworthiness Design Optimization Using Successive Response Surface Approximations", *Computational Mechanics*, Vol.29, (2002), pp.409-421.
- (22) 北山哲士, 荒川雅生, 山崎光悦, "RBF ネットワークによる逐次近似最適化 (サンプル関数の基礎的検討)", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.768, (2010), pp.1978-1987.
- (23) Storen, S., Rice, J., "Localized Necking in Thin Sheets", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.23, (1975), pp.421-441.
- (24) プレス成形難易ハンドブック (第3版), 薄鋼板成形技術研究会(編), 日刊工業新聞社.