

# The square cup deep drawing by variable blank holder force

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00009872">https://doi.org/10.24517/00009872</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# 可変ブランクホルダー力による角筒深絞り加工

北山哲士<sup>\*1</sup> 濱野智史<sup>\*2</sup> 山崎光悦  
久保達男<sup>\*3</sup> 西川 輝<sup>\*4</sup> 木下 洋

## The Square Cup Deep Drawing by Variable Blank Holder Force

Satoshi KITAYAMA, Satoshi HAMANO, Koetsu YAMAZAKI, Tatsuo KUBO,  
Hikaru NISHIKAWA, Hiroshi KINOSHITA

College of Science and Engineering, Kanazawa University  
Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192, Japan

In the deep drawing, the low blank holder force (BHF) will cause the wrinkle, while the high BHF will result in the tearing. Therefore it is important to determine the appropriate BHF in the forming. In this paper, the variable blank holder force (VBHF) approach for the deep drawing is employed. The simple closed-type algorithm is developed to obtain the VBHF trajectory. The proposed algorithm is roughly divided into two phases. The objective of first phase is to check the wrinkle and the tearing. In this phase, the low BHF, which causes the wrinkle, is used as the initial BHF. The BHF is increased in order to avoid the wrinkle. The algorithm will be terminated when the tearing occurs. The distance between the die and the blank holder is used to measure the wrinkle. Then, the second phase is considered. The main objective of second phase is to examine the thickness deviations. It is expected that the BHF will be decreased by considering the thickness deviation. The wrinkle is also checked in the second phase. By iterating above two phases, the VBHF trajectory can be obtained. One of the advantages by the VBHF is to reduce the forming energy. The validity is examined through the numerical simulation and experiment.

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

### 1. 緒言

近年、概念設計や基本設計などの設計上流部におけるアイデア創出手段の一つとして、コンピュータシミュレーション (CAE) 技術が分野を問わず幅広く活用されている。塑性加工の分野では、直接材料を加工する前の様々な条件を決定するための検討手段の一つとして、CAE技術が活用されている。一般に深絞り加工では、材料はブランクホルダーとダイスに挟まれており、材料を抑えるブランクホルダー力 (Blank Holder Force:BHF) を適切に調整して金型間に材料を流し込むことで加工する。成形加工過程において、加工中のBHFは、全工程に対して一定値が割り当てられる場合が多いが、BHFが大きすぎると材料に割れが生じ、一方でBHFが小さすぎると材料にしわが発生してしまうため、材料に割れやしわが発生しないようなBHFの大きさを設定することが重要である。

Wangらは、BHFの大きさ・ストローク・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<sup>(1)</sup>。すなわち、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、さらにObermeyerらによれば、最小BHFで材料を加工することが良いとされている<sup>(2)</sup>。材料の割れやしわを防ぎ、かつより深く絞ることを考えた場合、図1(a)では、割れ発生領域としわ発生領域を避けるような一定のBHFの大きさを見つければ成形可能であり、(b)や(d)の場合は、ストロークに応じてBHFの大きさを変化させる必要がある。また(c)の場合は、割れ発生領域としわ発生領域が交差しているため、絞り加工を完了することができない。

Obermeyerらが指摘しているように、最小BHFで材料を加工するためには、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。このことは、例えば図2に示すように複数のBHFに分割して、各BHFに対して適切な大きさを設定したり<sup>(3)</sup>、ストロークに応じて可変ブランクホルダー力 (Variable Blank Holder Force: VBHF) の軌道を求めることが一つの設計問題となることを示唆しており、近年、塑性加工シミュレーション

\* 原稿受付 平成??年?月 日

\*<sup>1</sup>正員, 金沢大学理工研究域 (〒920-1192 金沢市角間町)。

\*<sup>2</sup>学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)。

\*<sup>3</sup>非会員, (株) コマツ プレス・工機 (〒923-8666 小松市八日市町地方5)。

\*<sup>4</sup>非会員, コマツ産機 (株) 鍛圧KBU (〒923-8666 小松市八日市町地方5)。

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

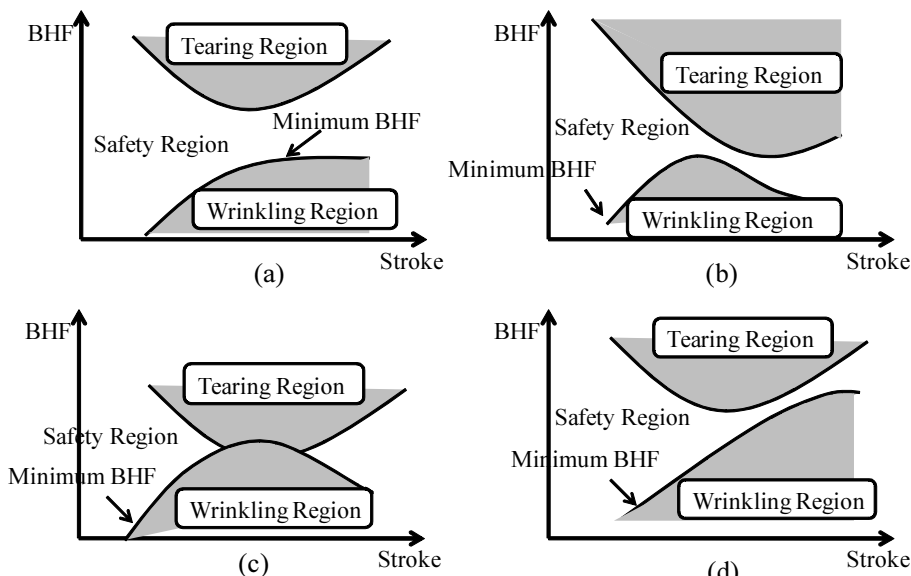


Fig.1 Four basic types of BHF formability windows

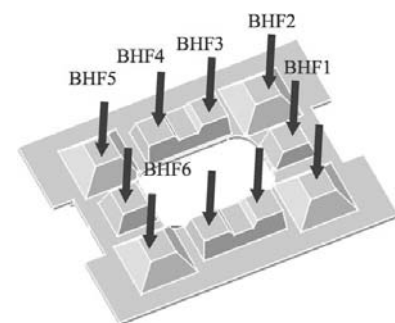


Fig.2 Segmented blank holder forces

を活用した研究が盛んに行われている。これらの研究は、次の二つに大別することができる。

(1) 閉ループ型のアルゴリズムを構築し、VBHFの大きさや軌道を求める研究<sup>(1,4-9)</sup> (満足化)。

(2) 応答曲面法を用いて近似的なVBHFの大きさや軌道を求める研究<sup>(3,10-16)</sup> (最適化)。

前者の研究の多くは、しわの発生量等を状態変数としてフィードバックすることによりVBHFの大きさや軌道を求めるものであるが、その目的としてはしわの発生を抑制するようなVBHFの大きさや軌道を求めるものであり、しわや割れという制約を満足するようなVBHFの軌道を求める研究であるため、最適化というよりも満足化の考え方に基づいた研究である。一方、後者の多くは、成形限界線図を用い、目的関数を定量的に表現し、種々の制約条件の下で、目的関数を最小化するようなVBHFの大きさや軌道を求めるため、最適化に関する研究であると言えよう。

VBHFによる成形加工を、加工に要するエネルギーという視点から眺めてみると、例えば図1(a)で考えた場合、VBHFで加工することは、一定のBHFで加工するよりも少ないエネルギーで材料を成形加工することが期待できる。大きなエネルギー減少率が達成できれば、例えばプレス機のモータの定格能力を下げることなどにつながるものが考えられ、結果的にはコスト削減につながるものが期待される。また、図1(b), (d)で考えた場合は、VBHFによる加工は、必ずしも最小VBHFで加工できなくとも、より深く絞ることが可能であるなどの多くの利点を含むものと考えられる。

深絞り加工を対象としたVBHFの軌道を求める従来の研究の主眼は、割れやしわを抑制するようなVBHFの軌道を求めることに重点が置かれている。具体的に

は、割れは材料を押えるBHFが大きく、材料の一部の板厚が非常に薄くなるため、これを防ぐためには板厚の減少率を考慮してBHFの大きさを低くする。一方、材料を押えるBHFが小さいと、多くの材料が流れ込み、その結果、しわが発生するため、しわの発生を抑制するためには、ダイスとブランクホルダーの距離を利用して、これらの距離が一定値以上となったとき、BHFの大きさを上げることで材料の流れを抑制して、しわの発生を防ぐ。これらを繰り返しながら、VBHFの軌道を求めている。しかし、成形加工中の材料の板厚の変動までを考慮したVBHFの軌道を求める研究は行われていない。

本論文では、角筒深絞り加工を対象として、割れやしわの発生を抑制しつつ、さらに成形加工中の材料の板厚の変動を考慮したVBHFの軌道を求める閉ループ型アルゴリズムを構築する。そのため、基本的な立場は満足化にある。従来のVBHFの軌道を求める研究では、局所的な材料の板厚やダイスとブランクホルダーの距離のみに基づき、BHFの大きさを決定しVBHFの軌道を求めていたが、本論文では割れやしわの発生を抑制しつつ、さらに加工中の材料の板厚の変動を考慮するため、局所および大域的な材料の板厚に基づきVBHFの軌道を求める点に特徴がある。LS-DYNAを用いた深絞り加工シミュレーションを通じて、アルゴリズムの有効性を検討すると同時に、加工に要するエネルギーが、一定のBHFで成形加工する場合に比べ大幅に減少できることを示す。以降、対象とする解析モデルについて記述し、割れやしわの発生を抑制しつつ、さらに板厚の変動を考慮した閉ループ型アルゴリズムを示す。シミュレーションおよび実験を通じて、本論文で提案したアルゴリズムの有効性を検討する。

## 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諸寸法を図3と図4(a), (b)に示す。



Fig.3 Molding

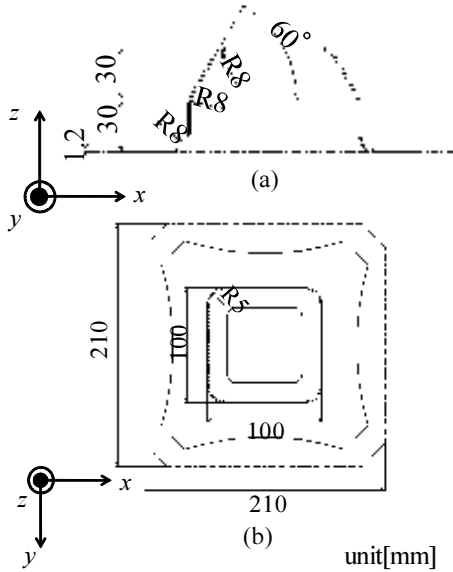


Fig.4 Dimensions of the molding

**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: $\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]	$7.84 \times 10^{-6}$
Young's modulus: $E$ [MPa]	$2.06 \times 10^5$
Poisson's ratio: $\nu$	0.3
Yield stress: $\sigma_Y$ [MPa]	353
Tensile strength: $\sigma_T$ [MPa]	479
Normal anisotropy coefficient: $r$	0.98
Strain hardening coefficient: $n$	0.189

**2.3 有限要素モデル** 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、  
1/4モデルを採用している。材料の寸法は92.5[mm]×  
92.5[mm]×1.2[mm]とし、材料とパンチ/blankホル  
ダー/カウンター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。材料はシェル要素

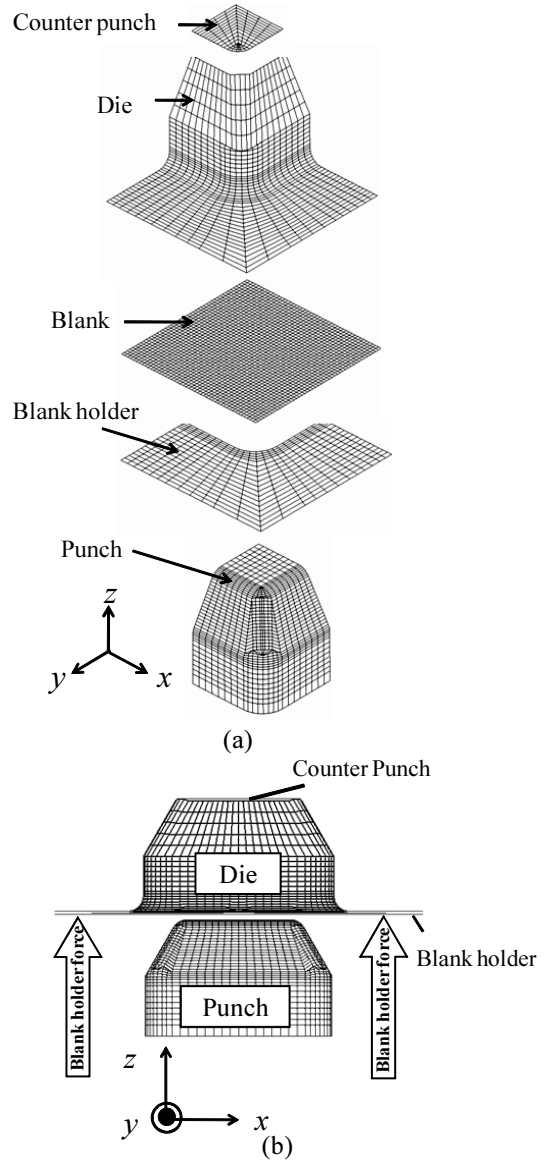


Fig.5 Finite element models

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

(Belytschko-Tsay)を用い、板厚方向の積分点数は7点と  
した。

図5において、パンチは固定され、blankホル  
ダー力は、blankホルダー全体に、 $z$ 軸正の方向に  
作用する。カウンターパンチとダイスに $z$ 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  
ンターパンチ・ダイス・blank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。 $BHF = 100[kN]$ 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

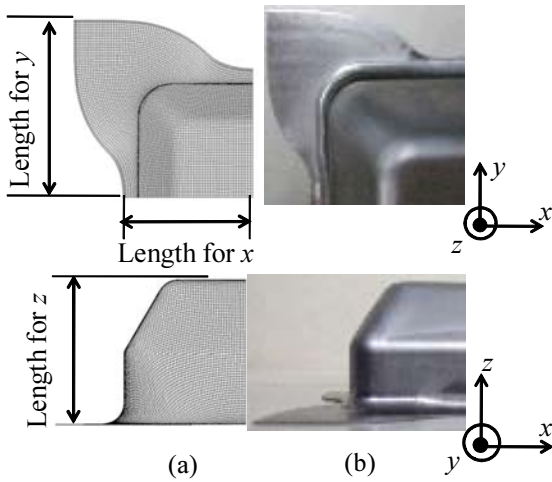


Fig.6 Comparison between simulation model and experiment

Table 3 Errors of length

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

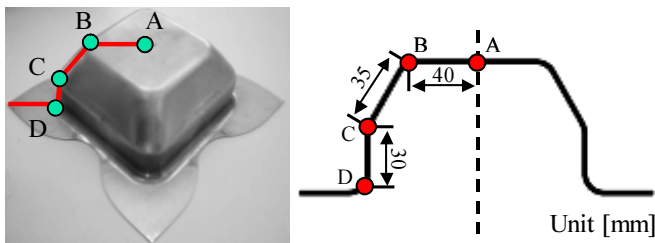


Fig.7 Measuring point of the thickness

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

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、本論文で用いているシミュレーションモデルは妥当であると考えられる。

#### 2.4 モーション設定

ダイスとカウンター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blank holderが接触し始め、下死点まで到達し、材料とblank holderの接触が終了するまでの

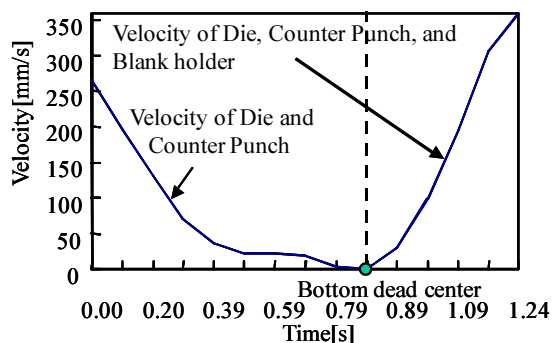


Fig.8 Motion of the die, blank holder, and counter punch

時刻を対象とした。解析中において、ダイスとカウンターパンチの初期速度  $v_{init}$  最大速度  $v_{max}$  はそれぞれ次の通りである。

$$v_{init} = 267 [mm/s] \quad (2)$$

$$v_{max} = 359 [mm/s] \quad (3)$$

#### 2.5 しわの判定

はじめに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、 $BHF = 20 [kN]$  一定であり、実験においてもしわが発生している (図10)。

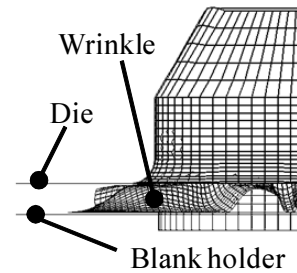


Fig.9 Wrinkling by the simulation



Fig.10 Wrinkling in the experiment

図9から明らかなように、しわが発生すると、ダイスとblank holder間の距離は、初期板厚  $t_0$  よりも大きくなる。そこで、本研究においては、従来の研究で用いられているように、ダイスとblank holder間の距離を用いてしわの発生判定を行う<sup>(1,3-5)</sup>。具体的には、ダイスとblank holder間の距離を  $D$  とすると

$$D > B \times t_0 \rightarrow \text{Wrinkling} \quad (4)$$

とする。ここで、 $B (>1)$  は定数である。

#### 2.6 割れの判定

板厚が事前に決めた一定値  $t_{cri}$  を下回った場合に、割れが発生したものとす。すなわち、割れの判定は、材料の有限要素の数を  $m$ 、要素の板厚を  $t_i (i=1,2,\dots,m)$  とした場合、割れの判定は

$$t_i < t_{cri} \rightarrow \text{Tearing} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

である。

### 3. 板厚変動を考慮したVBHFアルゴリズム

本章では、はじめに板厚の変動を考慮したVBHFの軌道を求めるアルゴリズムを示し、以降、その詳細について記述する。

#### 3.1 アルゴリズムの概要

割れやしわの発生を抑制しつつ、さらに成形加工中の材料の板厚の変動を

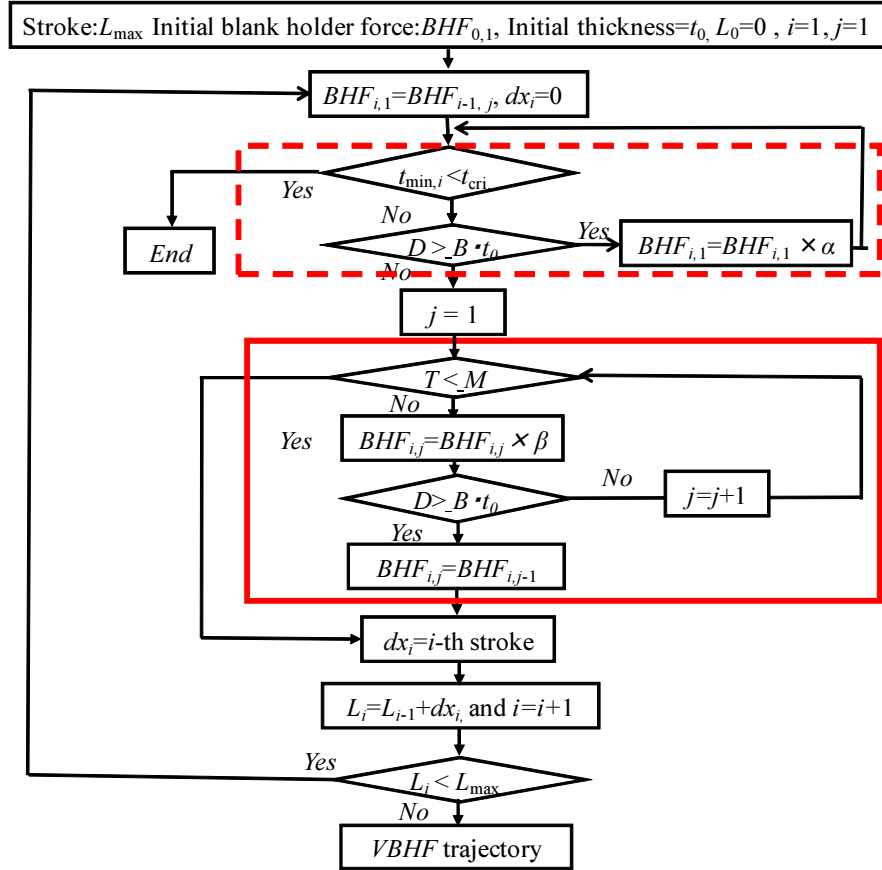


Fig.11 The algorithm of Variable Blank Holder Force considering the wrinkle, tearing, and the variation of thickness

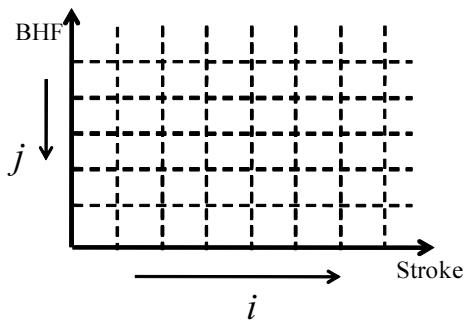


Fig.12 Concept of the  $BHF_{i,j}$

考慮したVBHFの軌道を求める閉ループ型アルゴリズムを図11に示す. 本論文で提示するアルゴリズムは大きく, しわと割れを抑制する閉ループ(図中破線部)と, 板厚の変動を考慮する閉ループ(図中実線部)に分かれる.

**3.2 アルゴリズムの詳細** はじめに全ストローク長  $L_{max}$  を  $n$  分割し,  $i$  ストローク目のストローク長を  $dx_i$ , このときのBHFを  $BHF_{i,j}$  と表記する. ここで  $i$  はストローク数,  $j$  は図11中の実線で囲われた板厚変動の閉ループ中の反復回数を表わす. 横軸にストローク数, 縦軸にBHFをとると,  $BHF_{i,j}$  は図12のようなメッシュ状に切られた交点となる.

初期BHF ( $BHF_{0,1}$ ) が設定され, ストロークが始まる. はじめに割れの判定が行われ, もし割れと判定されていれば, アルゴリズムは終了する. そうでなければ,

しわの判定を行う. しわの発生と判定された場合は,

$$BHF_{i,1} = BHF_{i,1} \times \alpha \quad (\alpha > 1) \quad (6)$$

としてBHFを上げることにより, 材料の流入を防ぐ. ここで  $\alpha$  はBHFの増加係数である. ここまで, しわと割れの抑制が保証される. しかし, この部分(図11破線部)のみのアルゴリズムでは, ブランクホルダーとダイス間の距離を用いた局所的な板厚のみを評価しており, 材料全体の大域的な板厚を評価できていない. そこで, 図11中の実線部で囲われている板厚変動の評価を行うステップへ移行する.

材料全体の大域的な板厚の評価として, 次の  $T_1, T_2$  を評価項目として考えた.

$$T_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m (t_i/t_0 - 1)^2} \quad (7)$$

$$T_2 = (t_{max,i} - t_{min,i})/t_0 \quad (8)$$

式(7)は材料全体の板厚変動を評価するものである. また式(8)中の  $t_{max,i}, t_{min,i}$  はそれぞれ,  $i$  ストローク目の有限要素の板厚の最大値および最小値を表している. ここで, 式(8)はある意味で局所的な板厚を評価していると思われるかもしれないが, 加工過程において, 板厚の最大値および最小値をとる有限要素は変化するため, 材料全体の大域的な板厚の評価項目として考えた.



板厚変動  $T$  が事前に決めた一定値  $M$  (無次元) 以下であれば、板厚の変動はないものとみなし、 $i$  ストローク目のストローク長  $dx_i$  が決定する。一方、一定値  $M$  以上の場合は、板厚の変動があるので、

$$BHF_{i,j} = BHF_{i,j} \times \beta \quad (0 < \beta < 1) \quad (9)$$

として、BHFを一旦下げることにより、材料を流入させる。ここで  $\beta$  はBHFの減少係数である。BHFを下げるることにより、しわの発生が予想されるが、この箇所ではしわの発生判定を行っている (実線部中の  $D > B \times t_0$ )。しわが発生した場合、 $j-1$  回目のBHFを  $i$  ストローク目のBHFとして採用するため、しわの発生を抑制できるようになっている。具体的な例を図13を用いて説明する。

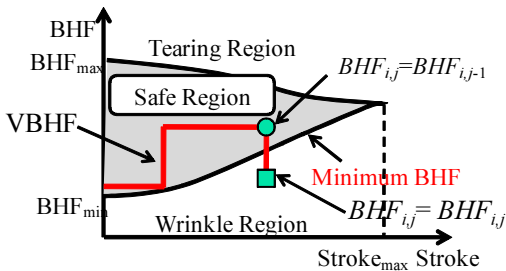


Fig.13 An illustrative example of Variable Blank Holder Force

図13において、●は、 $i$  ストローク目の板厚変動の閉ループにおける  $j-1$  回目のBHFを表し、■は  $j$  回目のBHFを表している。板厚変動の閉ループにおける  $j-1$  回目のBHFではしわが発生しておらず、BHFを下げた  $j$  回目ではしわが発生したとする。このとき、 $i$  ストローク目におけるBHFは、しわが発生しなかったときのBHFを用いる (すなわち、 $BHF_{i,j} = BHF_{i,j-1}$ )。

$L_{max}$  に到達するまでこれらの操作を繰り返し、VBHFの軌道を求めることになる。

### 3.3 アルゴリズムの特徴とパラメータ

本論文で提示する閉ループ型アルゴリズムの特徴をまとめると以下ようになる。

- (1) 簡素であり、容易に実行可能である。
- (2) 従来の閉ループ型アルゴリズムによるVBHFの軌道を求める研究では、局所的な情報 (しわや割れの判定) のみに基づき、VBHFの軌道を求めている<sup>(1), (4)-(9)</sup>。一方、本研究では、局所的な情報に加え、大域的な情報として、式(7)、(8)で表わされる成形中の板厚の変動を考慮している。すなわち、VBHFの軌道を求めるに当たり、局所および大域的な情報を利用している。

また、このアルゴリズムで必要となるパラメータは以下の通りである。

- (1) BHFの増加係数  $\alpha$  と減少係数  $\beta$ 。
- (2) しわの発生判定に用いる式(4)の  $B$ 。
- (3) 割れの発生判定に用いる  $t_{cri}$ 。

(4) 板厚変動の有無を判定する  $M$ 。この値については、式(7)と式(8)を用いる場合で異なる。

## 4. 数値シミュレーション

本論文で提示するしわと割れを抑制しつつ板厚の変動を考慮した閉ループ型アルゴリズムの有効性をシミュレーションにより検討する。数値シミュレーションで用いたパラメータの設定の一例を表5に示す。

Table 5 Parameter setting

$\alpha$	1.2
$\beta$	0.8
$B$	1.2
$t_{cri}$	$0.75 \times t_0$

シミュレーションでは、ストローク長  $L_{max} = 62[mm]$  とし、これを125ステップに分割した。初期板厚は  $t_0 = 1.2[mm]$  である。

### 4.1 初期BHFの設定

図10に示したように、実験で  $BHF = 20[kN]$  一定として  $L_{max}$  まで加工した際、しわが発生した。また図9に示したように、シミュレーションにおいてもしわが発生している。最小BHFで加工することがよいとされていることを考慮し、以下のシミュレーションでは、初期BHFを20[kN]として、VBHFの軌道を求めることにする。

### 4.2 板厚変動として式(7)を用いた場合

図11

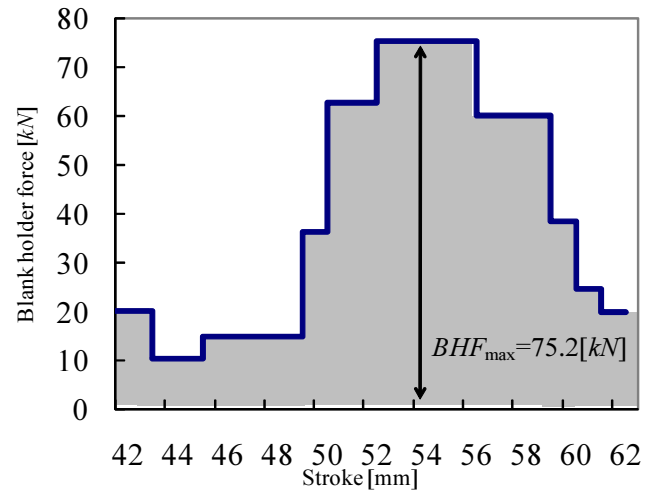


Fig.14 Trajectory of VBHF using Eq.(7)

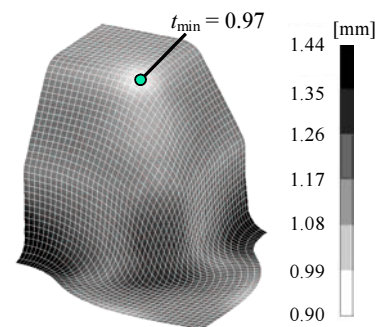


Fig.15 Molding by the VBHF in the simulation

中の  $M$  値を  $M=2.5$  としたときのVBHFの軌道を図14に示す。図14において、ストロークが42[mm]までは初期BHFであったため、変化をはじめた時点からのVBHFの軌道を示している。また一例として、VBHFによるシミュレーションの結果を図15に示す。成形加工終了時の板厚の最小値は、パンチ角部において生じており、 $t_{\min}=0.97[\text{mm}]$  であり、割れの判定として用いた  $t_{\text{cri}}=0.90[\text{mm}]$  よりも大きい。

**4.3 板厚変動として式(8)を用いた場合** 前節と同様に、 $M$  値を  $M=2.5$  としたときのVBHFの軌道を図16に示す。なお、成形加工終了における板厚の最小値は、図15同様にパンチ角部で生じており、 $t_{\min}=0.98[\text{mm}]$  であった。

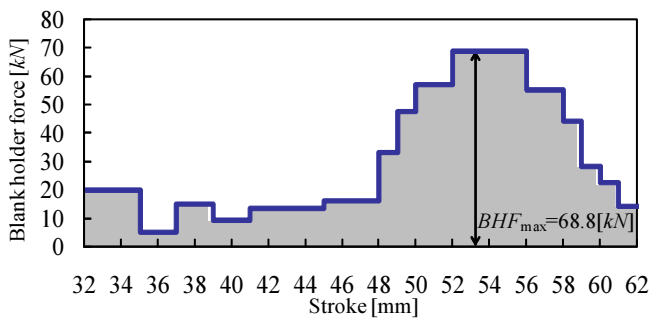


Fig.16 Trajectory of VBHF using Eq.(8)

**4.4 成形加工に要するエネルギー** シミュレーションを通じて、VBHFの軌道を求めた。式(7)および式(8)を用いた場合の最大BHFはそれぞれ、

$$BHF_{\max} = 75.2[\text{kN}] \quad (10)$$

$$BHF_{\max} = 68.8[\text{kN}] \quad (11)$$

であった。そこで、最大BHF一定で成形加工した場合とVBHFで、成形加工した場合の成形に要するエネルギーを  $(BHF) \times (\text{ストローク})$  として考える。そのためVBHFの場合は図14, 16の灰色部が成形に要するエネルギーとなる。このとき、式(7), (8)を用いた場合の成形に要するエネルギーを表6にまとめて示す。同表には、2.3節で示した  $BHF=100[\text{kN}]$  の場合との比較も併せて示してある。

表6から、VBHFでは大きなエネルギー減少率を達成していることがわかる。深絞りで大きな問題となるの

Table 6 Comparison of the forming energy by VBHF

Equation		Forming energy [kN・mm]
	BHF=100 [kN]	6200
Eq.(7)	BHF=75.2 [kN]	4662
	VBHF	1655
Eq.(8)	BHF=68.8 [kN]	4266
	VBHF	1551

は、しわと割れの発生であり、本論文で提示したアルゴリズムでは、しわと割れの発生を抑制できており、さらに成形に要するエネルギーという側面でも考えた場合、VBHFによる成形加工の効果は非常に大きいものと考えられる。

**4.5 板厚変動の評価の相違** 本論文では、板厚変動の評価として、式(7), (8)を用いた。表6より、どちらの評価式を用いても、成形に要するエネルギーに関しては、BHF一定の場合と比べ、大幅な減少を達成している。特に式(8)を用いた場合では、式(7)を用いた場合に比べ、最大BHFを抑えることができている。成形に要するエネルギーも、より低く抑えることができている。

**4.6 パラメータM値とVBHFの軌道** 本論文で提示したアルゴリズム内において、 $M$  値の設定はVBHFの軌道に影響を与える。現時点で、 $M$  値の設定値は、シミュレーションによって設定せざるを得ず、的確な指針はなく、 $M$  値に関する感度解析を行うことも困難である。しかし、いくつかの異なる  $M$  値を設定し、シミュレーションを通じて、定性的ではあるが、VBHFの軌道を求めることは、傾向を知る上で重要であると考えられる。

本節では特に、板厚変動として式(7)を対象とし、 $M=2.0, M=3.0$  と変化させたときのVBHFの軌道(図17中破線)を求める。これらの結果を  $M=2.5$  のときの結果(図17中実線)と併せて図17に示す。

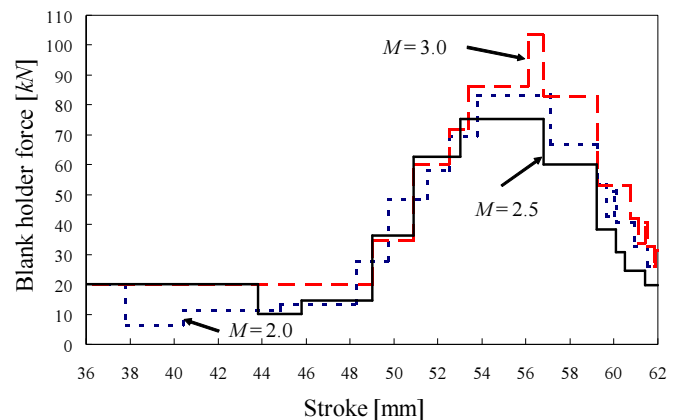


Fig.17 VBHF trajectory in the cases of various  $M$  values

図17より、3つの  $M$  値に関するVBHFの軌道を概観すれば、定性的ではあるが、ストロークが進むにつれ、BHFが大きくなり、加工の最終段階では、BHFが下がるという傾向があることがわかる。

## 5. 実験

本論文で提示した板厚の変動を考慮したVBHFの軌道を求めるアルゴリズムの有効性を実験を通じて確認



する．使用した材料は高強度鋼板(SPF440)であり，材料特性は表1に示した通りである．実験機には，コマツ産機サーボプレスH1F150（ハイブリッドACサーボプレス）を用いた．実験に際しては，シミュレーションで得られた図14および図16のVBHFの軌道を用いる．

**5.1 板厚変動として式(7)を用いた場合** 実機のVBHFの軌道を図18中の実線で示す．図18中の破線は図14のVBHFの軌道である．このときの最終的な加工結果を図19に，また図6に示した寸法の比較結果および図7に示した測定点における板厚の誤差を，表7と表8にそれぞれに示す．

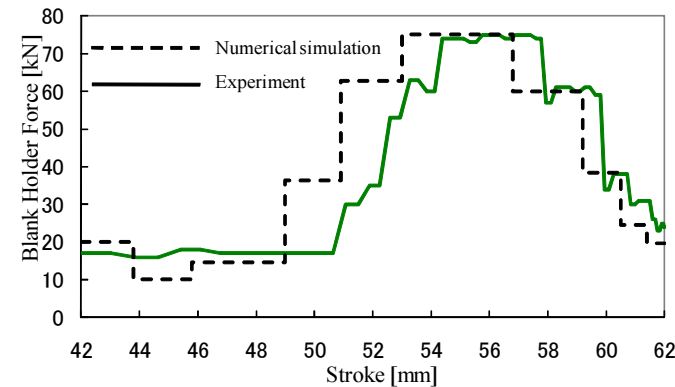


Fig.18 VBHF trajectory on the experiment using Eq.(7)



Fig.19 Square cup by the experiment

Table 7 Comparison of the length

	x	y	z
Simulation [mm]	54.8	77.2	59.0
Experiment [mm]	57.0	77.6	59.2
Error [%]	3.9	0.5	0.3

Table 8 Comparison of the thickness at the measuring points

Measuring point	A	B	C	D
Simulation [mm]	1.14	0.96	1.11	1.30
Experiment [mm]	1.15	0.96	1.09	1.30
Error [%]	0.35	0.21	1.84	0.38

**5.2 板厚変動として式(8)を用いた場合** 実機のVBHFの軌道を図20中の実線で示す．図20中の破線は図16のVBHFの軌道である．このときの最終的な加工結果を図21に，また図6に示した寸法の比較結果および図7に示した測定点における板厚の誤差を，表9と

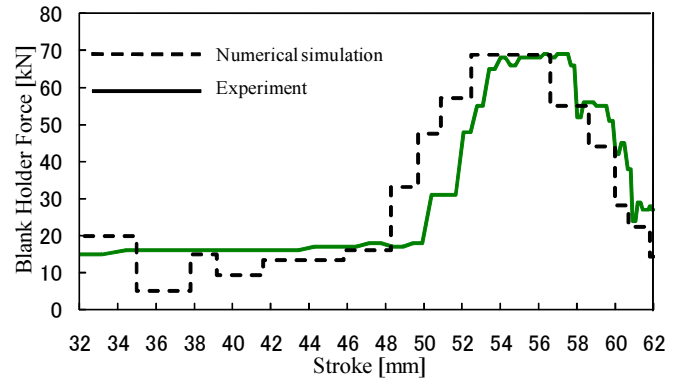


Fig.20 VBHF trajectory on the experiment using Eq.(8)



Fig.21 Square cup by the experiment

Table 9 Comparison of the length

	x	y	z
Simulation [mm]	54.7	77.4	59.0
Experiment [mm]	57.0	77.5	59.3
Error [%]	4.0	0.1	0.5

Table 10 Comparison of the thickness at the measuring points

Measuring point	A	B	C	D
Simulation [mm]	1.15	0.96	1.10	1.30
Experiment [mm]	1.15	0.95	1.08	1.31
Error [%]	0.17	1.16	1.20	0.69

表10にそれぞれ示す．

実験結果から，材料にしわや割れは発生していないことがわかる．また，実機のVBHFはシミュレーション結果をほぼ追従しており，シミュレーション結果と実験結果における諸寸法および測定点における板厚はほぼ一致していることがわかる．

## 6. 結言

本論文では，角筒深絞り加工を対象として，割れやしわの発生を抑制しつつ，さらに成形加工中の材料の板厚の変動を考慮したVBHFの軌道を求める簡素な閉ループ型アルゴリズムを構築し，シミュレーションを通じ，その有効性を検討した．開発したアルゴリズムでは，最小BHFで成形することがよいという立場から，BHFが一定値ではしわが発生するような低いBHFから成形加工をはじめますが，しわの発生により，BHFを高くする．一方で，板厚の変動を考慮することにより，BHFを減少する仕組みが組み込まれているため，

ストロークに対するVBHFの軌道は増加・減少を繰り返す。きめ細かくBHFを変化させることにより、しわや割れを防ぐと同時に、成形に要するエネルギーも大幅に減少できることがシミュレーションを通じて明らかとなった。また、本論文で提示したアルゴリズムを実機で検証したところ、材料にしわや割れは発生せず、諸寸法もほぼ一致した。本論文では、対称性を活用できるモデルについて実験およびシミュレーションを実施したが、実際の成形品には、例えば自動車のドアパネルなど、対称性が利用できないものも多い。そのような場合は、例えば図2のように、BHFを作用させる領域を事前に決め、本論文で提示したアルゴリズムを適用すればよいものと考えている。

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、適切なお助言をいただいた。この場を借り、感謝申し上げる。

## 付録

本論文では、最小BHFで成形することがよいという立場から、しわが発生するような低いBHFからシミュレーションを開始しているが、高いBHF (=100[kN]) からスタートさせたときのVBHFの軌道を示す。材料はSPFC440であり、式(7)を用いたときのシミュレーションによって得られたVBHFの軌道を図A1（破線、実線は実験で用いたVBHFの軌道）、実験結果を図A2、寸法誤差を表A1、板厚の測定結果を表A2に示す。M値については $M=2.5$ とした。

また、式(8)を用いたときのシミュレーションによって得られたVBHFの軌道を図A3（破線、実線は実験で用いたVBHFの軌道）、実機による実験結果を図A4、寸法誤差を表A3、板厚の測定結果を表A4に示す。M値についてはM値については $M=2.5$ とした。

図A1, A3から、初期BHFが大きい場合、ストロークがある程度進むと、極端にBHFが低くなり、その後、徐々にBHFが増加する結果となった。両図より、最大BHFは初期BHF (=100[kN]) に到達することなく、成形を終了している。この結果は、初期BHFは低く設定して成形を開始すればよいことを示唆しているものと考えられ、成形に要するエネルギーも低く抑えることができ、最小BHFで成形することがよいということの一つの裏付けであると考えている。さらに、板厚の最小値は図15同様、パンチ角部(図7中B点)において生じており、式(7)を用いた場合、 $t_{\min}=0.93$ であり、式(8)を用いた場合、 $t_{\min}=0.95$ であった。これより、シミュレーション上では、しわや割れは発生していないことにな

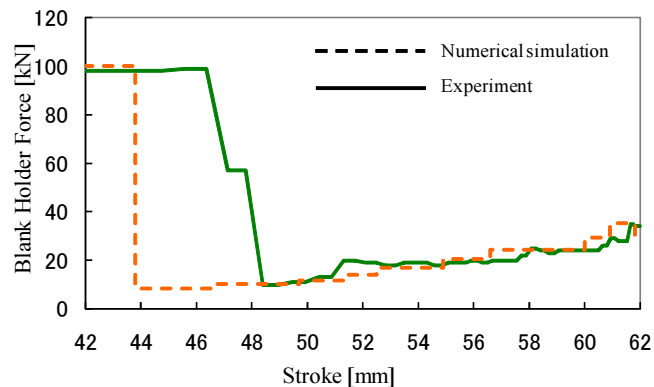


Fig.A1 Trajectory of VBHF using Eq.(7)



Fig.A2 Square cup by the experiment

Table A1 Comparison of the length

	x	y	z
Simulation [mm]	56.2	77.2	59.0
Experiment [mm]	59.1	78.0	59.2
Error [%]	4.9	1.0	0.3

Table A2 Comparison of the thickness at the measuring points

Measuring point	A	B	C	D
Simulation [mm]	1.12	0.93	1.13	1.31
Experiment [mm]	1.13	0.79	1.08	1.31
Error [%]	1.24	17.51	4.35	0.08

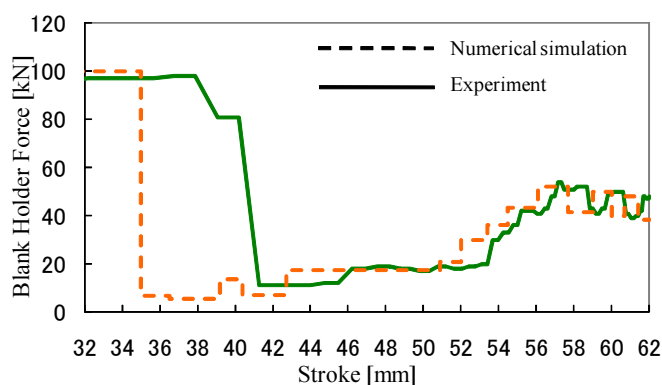


Fig.A3 Trajectory of VBHF using Eq.(8)



Fig.A4 Square cup by the experiment

Table A3 Comparison of the length

	x	y	z
Simulation [mm]	54.8	77.2	59.0
Experiment [mm]	57.0	77.6	59.2
Error [%]	3.9	0.5	0.3

Table A4 Comparison of the thickness at the measuring points

Measuring point	A	B	C	D
Simulation [mm]	1.13	0.95	1.11	1.30
Experiment [mm]	1.13	0.82	1.08	1.32
Error [%]	0.09	15.91	2.68	1.82

り、また図A2, A4に示したように、実験結果からもしわや割れは発生していない。すなわち、シミュレーションで用いた割れ判定の値は厳しい条件であったことがわかる。なお図7中B点では、割れが発生しやすい箇所であり、板厚に関して、実験とシミュレーションで誤差が大きくなっているが、これは図A1, A3から明らかかなように、サーボプレスの遅れが大きく影響しており、材料がすでにパンチ角部に当たっているために起きた結果である。これらの実験結果から、本論文で用いたハイブリッドACサーボプレスの今後の改良点としては、大きなBHFから小さなBHFに急激に変化させるための制御部分(追従性の向上)であると思われる。

## 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, *Int. J. 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, *J. of Materials Processing Technology*, Vol.75, (1998), pp.222-234.

(3) Chengzhi, S., Guanlong, C., Zhongqin, L., Determining the optimum variable blank-holder forces using adaptive response surface methodology (ARSM), *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.26, (2005), pp.23-29.

(4) 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, *J. of Material Processing Technology*, Vol.183, (2007), pp.339-346.

(5) Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S., Altan, T., Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol.44, (2004), pp.487-494.

(6) Hsu, C.W., Ulsoy, A.G., Demeri, M.Y., An approach for modeling sheet metal forming for process controller design, *Trans. of ASME/ J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.122, (2000), pp.717-724.

(7) Traversin, M., Kergen, R., Closed-loop control of the blank-holder force in deep-drawing: finite-element modeling of its effects and advantages, *J. of Materials Processing Technology*, Vol.50, (1995), pp.306-317.

(8) Sim, H.B., Boyce, M.C., Finite element analyses of real-time stability control in sheet forming processes, *Trans. of ASME/ J. of Engineering Materials and Technology*, Vol.114, (1992), pp.180-188.

(9) 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, *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.24, (2004), pp.553-559.

(10) 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.

(11) Wei, L., Yuying, Y., Multi-objective optimization of sheet metal forming process using pareto-based genetic algorithm, *J. 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) Wang, H., Li, G.Y., Zhong, Z.H., Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method, *J. of Materials Processing Technology*, Vol.197, (2008), pp.77-88.

(14) Breikopf, 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.

(15) Wang, H., Li, E., Li, G.Y., Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology, *J. of Materials Processing Technology*, Vol.206, (2008), pp.45-55.

(16) 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.