

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420076

研究課題名(和文) 可変分割ブランクホルダー力と初期ブランク形状の多目的最適設計

研究課題名(英文) Multi-objective design optimization of both segmented variable blank holder force trajectories and blank shape

研究代表者

北山 哲士 (Kitayama, Satoshi)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：90339698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では薄板材の深絞り加工を対象に、成形中に材料を押さえる力であるブランクホルダー力を制御しつつ、成形後の耳が最小となるようなブランク形状の同時最適設計法を提案した。提案手法の基礎的検討を行うため、角筒を対象に可変ブランクホルダー力とブランク形状の最適設計を行い、サーボプレスで検証実験を行った。次に、複雑形状を対象に、シミュレーションで分割ブランクホルダー力とブランク形状の同時最適設計を行い、サーボプレスで検証実験を行い、整合性の高い結果を得た。自動車部品等の複雑な成形品に対し、成形不良なく成形するためには分割可変ブランクホルダー力は有効な成形法の一つであることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Blank holder force (BHF) is one of the important process parameters for successful sheet metal forming. Variable blank holder force (VBHF), that the BHF varies through the forming process, is recognized as an advanced forming technology. It has also been reported that segmented VBHF (S-VBHF) is valid to a complex shape forming, but the optimal S-VBHF trajectories are rarely discussed. In addition to BHF, blank shape has an influence on the product quality. The blank shape minimizing the earing is still an important issue in sheet metal forming. Simultaneous optimization of both segmented VBHF trajectories and blank shape is proposed in this research. Numerical simulation in sheet metal forming is so intensive that a sequential approximate optimization is adopted for the simultaneous design optimization. Based on the numerical result, the experiment using a servo press is carried out. It has been confirmed from the numerical and experimental result that the proposed approach is valid.

研究分野：最適設計

キーワード：最適設計 逐次近似最適化 機械学習 塑性加工 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

自動車部品やシंकなど多くの工業製品は、深絞り加工によって成形される。深絞り加工では、薄板(ブランク)をダイとブランクホルダーに挟み、材料を押さえるブランクホルダー力(Blank holder force: BHF)を作用させ、金型間にブランクを流入させることで所望の立体形状を得る。加工時間が短いため高い生産性を有しており、複雑形状の成形が容易なため、産業上重要な生産技術の一つである。BHFはプレス機での調整が容易な成形パラメータであるが、試行錯誤的に決められていることが多く、また成形中に一定のBHFを用いていることがほとんどである。複雑形状を対象とした絞り加工においては、ブランクホルダーを分割し、各ブランクホルダーに独立なBHFを作用させ、材料の流入を部分的に制御する分割ブランクホルダー力(Segmented blank holder force: S-BHF)による成形の有効性が指摘されており、特に、ストロークに応じてS-BHFを変化させる分割可変ブランクホルダー力(Segmented variable blank holder force: S-VBHF)による成形の研究開発を行うことは、学術研究としては先進的な取り組みであり、また産業応用上も適用範囲が広い重要な生産技術開発である。また、成形後、フランジ部に生じる部分(一般には耳と呼ばれる材料の余剰部分で、以降、耳と記述)を最小とするような初期ブランク形状を決定することも重要な研究課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の点に焦点を絞り、研究を行った。

(1) しわや割れが発生しないような分割可変ブランクホルダー力の最適軌道を決定する。しかし、可変ブランクホルダー力の軌道は無数に存在するため、最適設計問題として定式化することで、有限に落とし込み、問題の解決を図る。

(2) 上記に加え、成形後に生じる耳を小さくするような初期ブランク形状も同時に決定する。すなわち、初期ブランク形状と分割可変ブランクホルダー力の最適軌道を同時に決定する。

(3) 薄板成形シミュレーションは計算負荷が高いため、Radial basis function (RBF) ネットワークによる逐次近似最適化システムを活用する。

(4) シミュレーションで求めた最適S-VBHF軌道と初期ブランク形状を用いて、サーボプレスを用いて検証する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 分割ブランクホルダー

本研究で対象とする製品のパンチと分割ブランクホルダーを図1に示す。同図に示す通り、ブランクホルダーは分割されており、BHFが各ブランクホルダー(Blank holder<sub>1</sub>とBlank holder<sub>2</sub>)に独立に作用する。各ブランクホルダーに作用するBHFをそれぞれ、BHF<sub>1</sub>、BHF<sub>2</sub>と表記する。

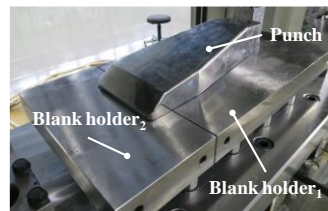


図1 分割ブランクホルダーの外観

#### 3.2 有限要素解析モデル

全ストロークは75mmであり、初期ブランクサイズは板厚0.8mm、長さ650mm、幅380mm、材料はSUS304を用いた。BHF<sub>1</sub>=BHF<sub>2</sub>=40kN~120kNまで20kNきざみで一定BHFを作用させて実験を行ったが、すべての実験において、しわや割れが生じる結果となった。そこで、BHF<sub>1</sub>=BHF<sub>2</sub>としてVBHFによる成形やBHF<sub>1</sub>とBHF<sub>2</sub>に異なるBHFを与えて成形を試みたが、しわや割れが生じる結果となった。これらの結果から、図1に示したモデルは、S-VBHFによる成形が有用であるモデルと考えられる。そこで一定BHFの実験結果を利用して、LS-DYNAにより図2に示す有限要素解析モデルを作成した。解析モデルは、対称性を考慮し、1/2とした。同図中において $n_{elm}$ は要素数を表しており、パンチは固定されており、ダイに $z$ 軸負方向に強制変位を与える。またBHF<sub>1</sub>とBHF<sub>2</sub>は $z$ 軸正方向に与える。ダイ、パンチ、ブランクホルダーは剛体でモデル化し、ブランクにはBelytschko-Tsayシェル要素を用いた。板厚方向の積分点数は9点であり、接触ペナルティ係数は0.1、ダイとブランク、パンチとブランク、ブランクホルダーとブランクの間の摩擦係数はすべて0.15とした。表1に材料定数等を示す。なお、材料の加工硬化には、 $n$ 乗硬化を用いた。

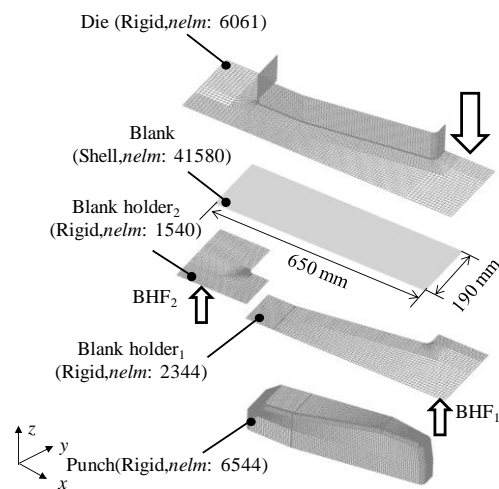


図2 有限要素解析モデル

#### 3.3 最適設計問題

しわや割れといった成形不良なく成形するためのS-VBHFの軌道は無数に存在する。

また、S-VBHF の軌道決定のみならず、耳を最小とするような初期ブランク形状も同時に決めることは困難を極める。本研究では最適設計問題として定式化することで、有限次元に落とし込み、問題の解決を図る。

#### (a) 目的関数

成形後のシミュレーションの状況を図3に示す。同図において、トリムライン(破線)は製品の外形(Exact shape)から15 mmに設定した。これより外の部分の面積を耳として考え、最小化する目的関数 $f(x)$ とする。

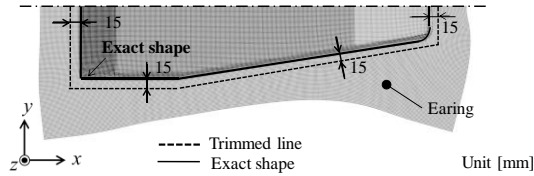


図3 目的関数(耳)の一例

#### (b) 設計変数

設計変数 $x$ は、ブランク形状を決定する部分 $x_S$ と、S-VBHFの最適軌道を決定する部分 $x_T$ から構成するものとした。すなわち、 $x = (x_S, x_T)^T$ と表記される。はじめにブランク形状に関する設計変数 $x_S$ について図4を用いて説明する。ブランク形状に関しては、図4中の6つの制御点を設計変数 $x_S = (x_1, x_2, \dots, x_6)$ とした。具体的には、 $x_1$ と $x_6$ は $x$ 軸方向のみ、 $x_3$ と $x_4$ は $y$ 軸方向のみに移動を許容し、 $x_2$ と $x_5$ は破線で示す初期ブランク形状の頂点を結ぶ直線方向のみに移動するものとした。

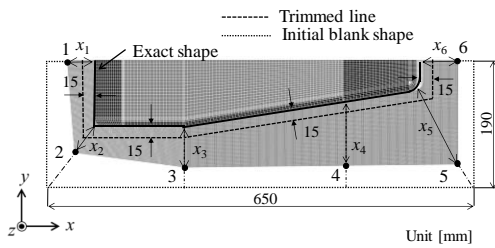


図4 ブランクの設計変数

S-VBHFの最適軌道を決定するための設計変数 $x_T$ について述べる。分割ブランクホルダー1の場合、ブランクホルダー間のバランスを維持する等の諸条件から、次のような制約が課せられる。

$$BHF_1 = \alpha_{\max} \times BHF_2 \quad (1)$$

ここで $\alpha_{\max} (>1)$ は片側の最大BHFを規定する係数である。上式は、片側のBHFの最小値と最大値は、もう片方のBHFに規定されることを意味している。このような条件の下で、S-VBHFの軌道を決定する方法を考える。具体的には、図1のブランクホルダー1のVBHF

の軌道に対し、式(1)を考慮した形でS-VBHFの軌道を決定する。ブランクホルダー1に対するVBHFの軌道に対しては、全ストロークを $M$ 分割し、分割した位置(図5中 $L_1, L_2, \dots, L_{M-1}$ )と第 $k$ 番目のサブストロークのBHF( $BHF_{1,k}$ と表記)を設計変数とする(図5参照)。次に式(1)を考慮したブランクホルダー2のVBHFを決定することを考えるが、式(1)は、ブランクホルダー2のVBHFは図5の灰色部分( $1/\alpha_{\max} \sim \alpha_{\max}$ )に収まらなければならないということを意味している。そこで、 $1/\alpha_{\max} \sim \alpha_{\max}$ の未知係数(設計変数) $\beta_k$ を導入すれば、ブランクホルダー2の第 $k$ 番目のサブストロークのBHF( $BHF_{2,k}$ と表記)は

$$\left. \begin{aligned} BHF_{2,k} &= BHF_{1,k} \times \beta_k \\ \frac{1}{\alpha_{\max}} &\leq \beta_k \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \right\} k=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

と書くことができ、これによりS-VBHFの軌道を表現することができる。

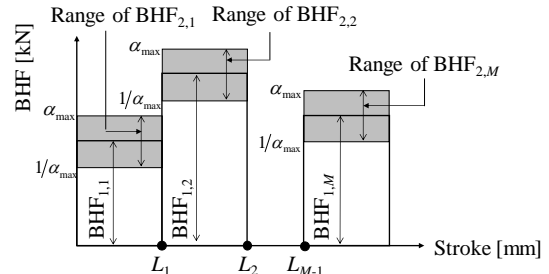


図5 分割ブランクホルダー力の設計変数

#### (c) 制約条件

しわと割れは成形不良になるため、これらは避けるべき条件として考え、制約条件として扱う。また、これらの定量化には成形限界線図(FLD)を用いたので、その算出方法について図6を用いて説明する。

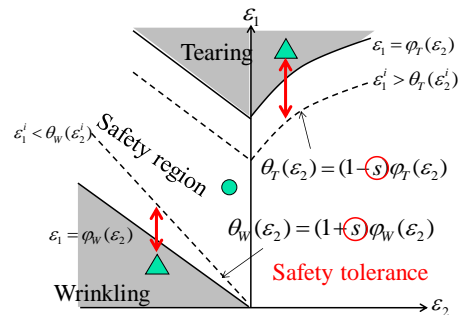


図6 成形限界線図を用いたしわと割れ評価

図9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 $\epsilon_1$ は、

$$\epsilon_1 = \varphi_T(\epsilon_2) \quad \epsilon_1 = \varphi_W(\epsilon_2) \quad (3)$$

と表記される．ここで  $\varphi_T$  は、割れを制御する成形限界曲線(Forming Limit Curve: FLC)を表し、 $\varphi_T$  と  $\varphi_W$  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．

$$\left. \begin{aligned} \theta_T(\varepsilon_2) &= (1-s)\varphi_T(\varepsilon_2) \\ \theta_W(\varepsilon_2) &= (1+s)\varphi_W(\varepsilon_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

そして、しわの危険性に関する制約条件  $g_1(\mathbf{x})$  は、

$$g_1(\mathbf{x}) = \left( \sum_{j=1}^{n_{elm}} W_j \right)^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} W_j &= (\theta_W(\varepsilon_2^j) - \varepsilon_1^j)^p & \varepsilon_1^j < \theta_W(\varepsilon_2^j) \\ W_j &= 0 & otherwise \end{aligned} \right.$$

として評価し、割れの危険性に関する制約条件  $g_2(\mathbf{x})$  は、

$$g_2(\mathbf{x}) = \left( \sum_{j=1}^{n_{elm}} T_j \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} W_j &= (\varepsilon_1^j - \theta_T(\varepsilon_2^j))^p & \varepsilon_1^j > \theta_T(\varepsilon_2^j) \\ W_j &= 0 & otherwise \end{aligned} \right.$$

として評価する．式(5)、(6)の意味であるが、しわの危険性がある場合、有限要素  $j$  が  $\theta_W(\varepsilon_2^j)$  よりも下にプロットされる(図6中▲)．また、割れの危険性がある場合は、有限要素  $j$  が  $\theta_T(\varepsilon_2^j)$  よりも上にプロットされる(図6中■)．安全領域にプロットされた有限要素に対しては評価値0を割り当て、しわ領域や割れ領域にプロットされた有限要素に対しては、 $\theta_W(\varepsilon_2^j)$  や  $\theta_T(\varepsilon_2^j)$  からの距離を危険度として評価する．そして、ブランクのすべての有限要素の総和をとることで、しわと割れの危険性を定量評価する．式(5)、(6)中の  $p$  はパラメータであり、 $p=4$  とした．

本研究では、初期ブランク形状の最適化も併せて考えており、例えば図7に示すような初期ブランク形状を考えた場合、同図(b)のように変形する．このとき、トリムラインを下回った面積が生じてしまう可能性があるが、このような状況を避けるため、第三の制約条件  $g_3(\mathbf{x})$  として、トリムラインを下回った場合はその面積(正值)を制約条件値として与えた．なお、下回った部分の面積がない場合はゼロを割り当てている．

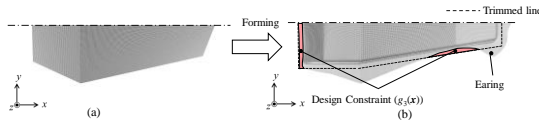


図7 トリムラインを下回った場合の例

### 3.4 逐次近似最適化を用いた最適設計の手順

RBF ネットワークを用いた逐次近似最適化を用いた最適設計の計算手順について簡単にまとめる．

**STEP1:** Latin Hypercube Design (LHD)により、初期サンプル点(計算を行うための設計変数の組み合わせ)を決める．

**STEP2:** LS-DYNA でシミュレーションを行い、サンプル点における目的関数値と制約条件値を算出する．

**STEP3:** RBF ネットワークによる応答曲面を構築し、応答曲面の最適解を求める．

**STEP4:** 終了条件を満足していれば終了．そうでなければ、応答曲面の最適解をサンプル点として追加する．

**STEP5:** 現時点のサンプル点をすべて用いて、サンプル点の疎な領域を見つけるための密度関数を構築し、最適化をする．密度関数の最適解をサンプル点として追加する．

**STEP6:** STEP2 へ戻る．

STEP5 を何回か繰り返すことで、サンプル点の疎な領域を段階に見つけ、新たなサンプル点として追加することで大域的な様相の把握が可能となる．また、STEP4 では STEP3 で得られた応答曲面の最適解を追加するため、局所的精度の向上を狙っている．全体の流れを図8に示す．

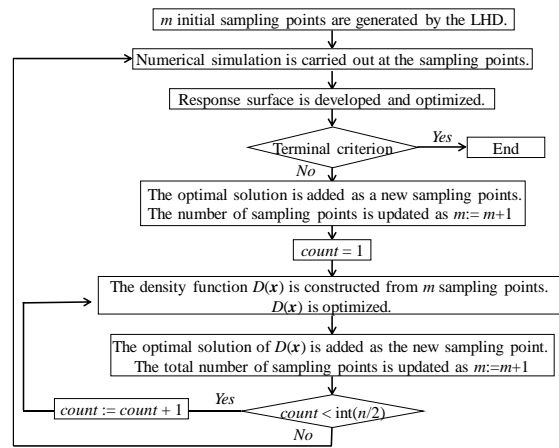


図8 全体の流れ

## 4. 研究成果

### 4.1 シミュレーション結果

全ストロークが 75mm であることを考慮し、ストロークを3分割した．設計変数の側面制約条件は式(7)、(8)のように設定した．

$$\left. \begin{aligned} 19 \leq x_1 \leq 45 & & 30 \leq x_2 \leq 60 \\ 48 \leq x_3 \leq 70 & & 75 \leq x_4 \leq 120 \\ 48 \leq x_5 \leq 90 & & 45 \leq x_6 \leq 65.3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} 10 \leq L_1 \leq 45 & & 50 \leq L_2 \leq 73 \\ 40 \leq BHF_1, BHF_2, BHF_3 \leq 140 \\ 1/1.3 \leq \beta_1, \beta_2, \beta_3 \leq 1.3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、式(7)はブランク形状に関する設計変数  $x_s$  であり、また式(8)はS-VBHFの最適軌道のための設計変数  $x_T$  である．なお、式(1)において  $\alpha_{\max} = 1.3$  とした．逐次近似最適化では、応答曲面の最適解における目的関数値と制約条件値の誤差が5%以下となったときに終了するものとした．初期サンプル点を35点とし、最適解を得るまでに63点を要した．

最適化の結果、得られた初期ブランクの最



適形状とその変形後の形状を図 9 に、また S-VBHF の最適軌道を図 10 に示す. 図 10 において、実線は図 1 の Blank holder<sub>1</sub> の VBHF の最適軌道(VBHF<sub>1</sub> と表記)、破線は Blank holder<sub>2</sub> の VBHF の最適軌道(VBHF<sub>2</sub> と表記)をそれぞれ表している. 図 9 から、初期ブランクの最適形状はほぼ金型に沿ったような形となっており、初期ブランクサイズ(長さ 650 mm, 幅 380 mm)と比較すると約 26 %削減でき、成形後の耳は約 74 %削減できた. また、シミュレーション上はしわも割れもなく成形できていることがわかる. 次に図 10 に示す S-VBHF の最適軌道について考察すると、S-VBHF の最適軌道は交差を繰り返していることがわかる. 成形初期段階では、VBHF<sub>2</sub> を弱くすることで材料の流入を促す一方、VBHF<sub>1</sub> は高くすることでしわの発生を抑えている. 第二段階において、BHF はともに小さくなるが BHF の大小関係の入れ替えが起き、VBHF<sub>1</sub> 側で材料は積極的に流入させ、VBHF<sub>2</sub> 側でしわを抑えている. 最終段階においては、BHF ともに高くなるが、再度 BHF の大小関係の入れ替えが起き、VBHF<sub>1</sub> 側でしわを抑え、VBHF<sub>2</sub> 側で材料の流入をさせて成形は終了している. BHF の大小関係の入れ替えがない場合を想定すると、片側に高い BHF (もしくは低い BHF) が作用し続けると、割れ (もしくはしわ) が発生することが予想され、本論文で得られた分割可変ブランクホルダー力の最適軌道は、成形不良なく成形するために、材料の流入を最適に制御していると考えられる.

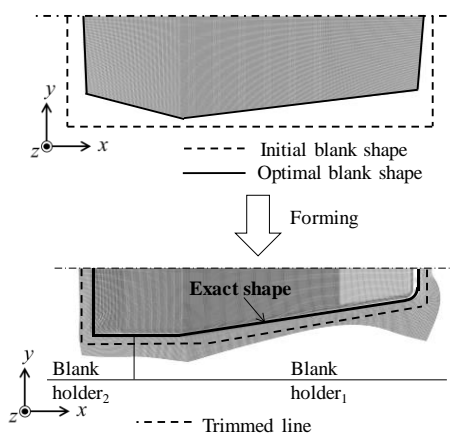


図 9 最適初期ブランク形状と変形の様子

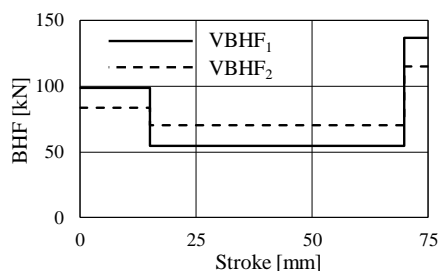


図 10 分割可変ブランクホルダー力の最適軌道

## 4.2 実験結果

シミュレーション結果を用いて、AC サーボプレスで検証実験を行った結果を図 11, 12 に示す. 図 11 は初期ブランクの最適形状を用いた結果であり、図 12 の実線は S-VBHF の最適軌道(計測値)であり、点線がシミュレーションで得られた最適軌道(図 10)を表している. 同図(a)は図 1 の Blank holder<sub>1</sub> の最適軌道、図(b)は Blank holder<sub>1</sub> の最適軌道である.

図 16 から、成形初期段階では BHF が高い段階からスタートしているため、シミュレーションで得られた荷重に対し、BHF の追従性に若干の遅れが見られるが、その後の BHF の追従性が高いことがわかる. また、表 3 から寸法精度の高い結果が得られており、本論文で目指した初期ブランクと S-VBHF 軌道の同時最適化の妥当性を確認できる.

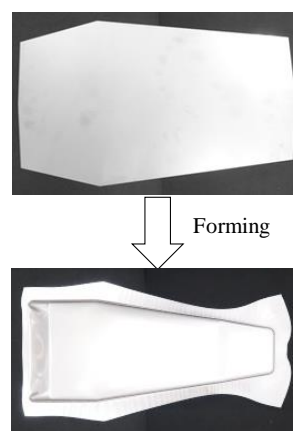
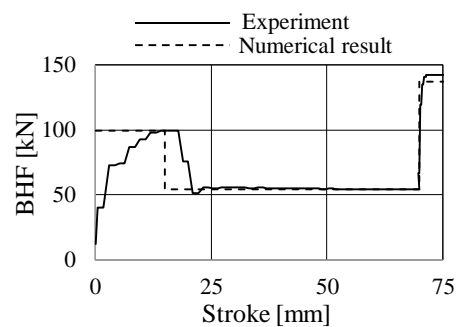
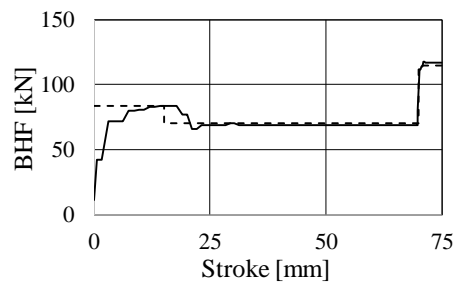


図 11 実験結果 (ブランク)



(a) VBHF trajectory of blank holder<sub>1</sub>



(a) VBHF trajectory of blank holder<sub>2</sub>

図 12 実験における分割可変ブランクホルダー力の最適軌道

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① **Kitayama, S.**, Koyama, H., Kawamoto, K., Noda, T., Yamamichi, K., Miyasaka, T., Numerical and experimental case study on simultaneous optimization of blank shape and variable blank holder force trajectory in deep drawing, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(1), pp.347-359, (2017) DOI 10.1007/s00158-016-1484-4 (査読有)
- ② 河本基一郎, 宮坂卓嗣, 山道頭, 野田拓也, **北山哲士**, 小山浩季, 山崎光悦, 深絞り加工におけるブランク形状と分割可変ブランクホルダー力の同時最適化, *日本機械学会論文集 Vol. 83, No. 845, 16-00485*, (2017) (査読有)
- ③ **北山哲士**, 機械学習と最適化の融合による薄板成形技術開発, シミュレーション, Vol. 35, No. 4, (2016), pp.228-232 (査読有)
- ④ **Kitayama, S.**, Saikyo, M., Kawamoto, K., Yamamichi, K., Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing with variable blank holder force via sequential approximate optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 52(5), pp.1001-1012, (2015) DOI 10.1007/s00158-015-1293-1 (査読有)
- ⑤ 齊京真里奈, **北山哲士**, 可変ブランクホルダー力を用いた角筒深絞り加工における初期ブランク形状の最適化, *日本機械学会論文集 Vol. 80, No. 813, DSM0136*, (2014) (査読有)
- ⑥ **Kitayama, S.**, Yoshioka, H., Springback reduction with control of punch speed and blank holder force via sequential approximate optimization with radial basis function network, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 10-2, pp.109-119, (2014) DOI 10.1007/s10999-013-9234-x (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- ① Miyasaka, T., Kawamoto, K., **Kitayama, S.**, Koyama, H., Yamamichi, K., Noda, T., Simultaneous optimization of blank shape and variable blank holder force trajectory in deep drawing, *Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016*, (2016, 5.26), Paper ID 3C1-1, Brick Hall, Nagasaki, Japan
- ② Yamada, S., **Kitayama, S.**, Optimization of initial blank shape using the variable blank holder force for automobile front side member, *Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016*, (2016, 5.26), Paper ID 3C2-2, Brick Hall, Nagasaki, Japan

- ③ **Kitayama, S.**, Saikyo, M., Kawamoto, K., Yamamichi, K., Simultaneous optimization of initial blank shape and blank holder force trajectory for square cup deep drawing using sequential approximate optimization, *11th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2015,6.10), Paper ID. 1375, Sydney, Australia
- ④ **Kitayama, S.**, Sequential approximate optimization using radial basis function and its application, *3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics*, (2015, 10. 14), p. 69, KFC Hall & Rooms, Tokyo, Japan
- ⑤ **Kitayama, S.**, Sequential approximate optimization in sheet metal forming, *Proc. of 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, Paper No. 0026, (2014, 5.27), Gyeongju, Korea
- ⑥ Saikyo, M., **Kitayama, S.**, Optimization of initial blank shape for square cup deep drawing using variable blank holder force, *Proc. of 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, Paper No. 0036, (2014, 5. 28), Gyeongju, Korea

[図書] (計 1 件)

- ① **北山哲士**他 37 名, 人工知能・機械学習・ディープラーニング関連技術とその活用 (全 296 ページ), 第 3 章 7 節:「成形加工への応用」(255-268 ページ), 情報機構, (2016.5)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

北山哲士 (Satoshi Kitayama)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号: 90339698