最適化法を用いた多段鍛造における中間金型曲面決定法*

坂元 康泰^{*1}, 安部 重毅^{*2}, 吉田 総仁^{*3}A Determination Method of Intermediate Die Surface
in Multi-Step Forging by Means of an Optimization TechniqueYasuhiro SAKAMOTO^{*4}, Shigeki ABE and Fusahito YOSHIDA^{**} Western Hiroshima Prefecture Industrial Research Institute,
3-13-26 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-0046 Japan

In forging operations, an appropriate die-shape determination is of vital importance. This paper presents a new method for automatic determination of the intermediate die surface in multi-step forging based on an optimization technique. In the first stage of the process, using a unique design parameter which generates the shape lying between the pre-form and the final product, a preliminary die surface, which gives the lowest forging load within the design space, is determined. In the second stage, further detailed optimization by local search is performed around thus obtained solution at the first stage. Constraints for avoiding material defects such as folding and cracking during forging are considered. The validity of this method has been confirmed by applying it to the die design for an axisymmetric backward extrusion problem.

Key Words: Forging, Optimum Design, Die, Process Planning, Design, Shape Complexity, Intermediate Shape Determination, Design Variable Reduction

1. 緒 言

型鍛造成形において、一段で素材から製品形状に成形することが困難な場合に、最終製品形状に至るまでの中間的形状の金型を順次使う多段成形が用いられる。本研究は、この工程内で必要となる中間金型曲面を決定する一手法を提案するものである。その特徴は、曲面を表現する設計変数の数を大幅に減らすことにより、計算コストを削減することである。

まず、生産設計領域に最適化手法を適用する上での課題を示す。一般に最適化問題は式(1)で定式化される^①。最初に設計対象である形状を設計変数の集合 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ で表現し、 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) が取り得る範囲 (実行可能領域) A_i , B_i を設定する。そして、目的関数 $f(x)$ を定め、なんらかのアルゴリズムを用いて制約条件 $g_j(x)$ を満足した上でこれを最

小化する設計変数 x_i の値を求めることになる。

$$\left. \begin{aligned} f(x_i) &\rightarrow \text{minimize} \\ \text{subject to } g_j(x_i) &\leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \\ \text{and } A_i &\leq x_i \leq B_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad \dots(1)$$

最近では成形加工プロセスの最適化をこのような枠組みから議論する論文^{②-⑥}もいくつか発表されている。しかし、式(1)の枠組みを用いて最適解を求める工程は計算繰り返し数が多くなることが一般的であり、さらに成形加工の数値シミュレーション (その多くは非線形有限要素法による) は1回の計算負荷が極めて高いので、こうしたアプローチは実務レベルまで普及していない。また、成形加工の不具合現象 (例えば割れ、しわなど) が発生するような成形加工条件 (設計変数) の選択を事前に排除することが困難であることも、この問題を難しくしている。というのは、この場合成形加工過程の数値シミュレーションが正常に終了しないため、自動的に計算を繰り返し実施することが困難となるからである。

本論ではこれらの課題を認識した上で、鍛造工程設計において素材から製品形状を一度に成形できな

* 原稿受付 2003 年 8 月 20 日。

*¹ 正員、広島県立西部工業技術センター (〒739-0046 広島市鏡山 3-13-26)。*² 広島県産業科学技術研究所 (〒739-0046 広島市鏡山 3-10-32)。*³ 正員、広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)。

E-mail: sakamoto@seisan-ac.kure.hiroshima.jp

いときに必要となる中間の金型形状の決定問題（軸対称製品を二段階で成形することとし、これに必要な中間金型形状は自由曲面で表現される場合）を取り扱う。本問題のように、素材形状（軸対称製品の場合は丸棒が多い）及び製品形状が与えられていることを前提にすると、これらを両端形状とする新しい設計変数を導入することにより探索空間を小さくし、妥当な中間金型形状が比較的簡単に決定可能となることを示すものである。

2. 提案手法

提案する手法は2つのステージからなり、ステージ1とステージ2を順に実行することにより、妥当な解を得る近似解法である。図1にその概念を示す。ステージ1は以下である。中間金型設計においては素材（プリフォーム）形状 A_i と最終製品形状 B_i が設計変数の探索範囲としてのいわゆる両端形状となり、この形状の間に解があることを考慮し、問題ごとに両端形状を補間する妥当かつ縮約された設計変数 Y を用いる。そして、これと目的関数の関係を得る。この中で目的関数を最小とする近似中間形状 y_{qr} と妥当な探索範囲 ΔY を得る。なお、本論文における近似中間形状の生成手法としては線形補間法と形状複雑度パラメータを変更する方法について検討している。

ステージ2は近似最適化の枠組みの中で、ステージ1で得られた解を最適解にさらに近づけるために行う。元の設計変数 x_i を用い、 y_{qr} 近傍の探索範囲 ΔX （これは ΔY から決定する）という設計空間内で近似最適解 x_{opti} を得る。ここでは探索範囲が小さいことを考慮すると、例えば格子探索法⁽⁴⁾を用いる、

Fig. 1 Schematic illustration of the proposed method

あるいは応答曲面法⁽⁶⁾を探索範囲 ΔX 全体に適用することが可能である。

計算負荷が極めて高い最適化工程においては、その効率性から妥当な初期設計変数 y_{qr} 及び縮小した探索空間 ΔY を得ることは非常に重要である。提案手法におけるステージ1は、単一設計変数の導入により、これらを簡便に見積もる工程と位置付けることができる。なお、導入した単一設計変数が取り得る範囲内に、目的関数を最小とする解が存在することを保証することは、（特に成形問題においては問題に応じて異なる目的関数や制約関数となることを考慮すると）困難である。よって、導入した単一設計変数の妥当性は、例えば目的関数が向上する解の有無から評価することになる。また、ステージ2は必ずしも単一設計変数上に最適解が存在しないことを補うための工程と位置付けることができる。

3. 適用問題の概要

本手法を適用する部品は、自動車用部品であるギヤを参考として作成したテストモデルであり、機械切削仕上げ及び歯切り加工をする前の鍛造成形品（以下、製品形状）である。図2にそのCADモデルを示す。素材形状は円筒形であり、後方押出成形により製品形状とする。本成形問題において成形荷重値を極力小さくすることを目標とする。この値は、型寿命、生産設備コスト、生産ランニングコストなど多くの生産コストに影響を与える評価値となるためである。また、二段目の成形終了時まで材料の割れがあってはならないことと、巻き込み不良が生じてはならないこととする。そして、提案手法により素材から製品形状まで二段階で成形する上で最も好ましい中間金型形状（最適予備成形形状）を決定する。

表1の軸対称解析条件での各段階での成形の様子を図3に示す。本鍛造工程設計において最適化する

Fig. 2 CAD model of an applied example

形状は図3(左)のPunch₁形状である。なお、第一段目の成形ではバリが発生しないように成形終了時には素材形状体積の3%増の空間を確保するパンチ移動量とする。二段目の成形では半密閉鍛造とし、素材形状体積はその5%がバリ量となるように設定する。

4. 最適化問題の枠組み

4・1 目的関数及び制約関数 目的関数は二段目の成形荷重最大値 F_2 を単段での成形荷重最大値 F^* で除した値(F_2/F^*)とする。なお、一段目の成形荷重最大値 F_1 は F_2 よりかなり小さな値となるため考慮しない。

次に制約条件を設定する。材料の割れが発生しないための制約条件は、ボイド成長理論をベースとす

Table 1 Condition of forging analysis

Solver	Autoforge (commercial)
Analysis type	Axisymmetric
Forging temp.	20°C
Material	S35C
Friction coefficient	0.1
Fillet Radius R	2mm

Fig. 3 An example of analysis results (Axisymmetric model)

る延性破壊条件式の一つである大矢根の式を用いて式(2)で与えられる。

$$\phi = \int_0^{\varepsilon} \left[C_1 + \frac{1}{C_2} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right] d\varepsilon < 1 \quad \cdots(2)$$

ここで、 C_1 と C_2 は材料定数、 σ_m 、 σ_{eq} はそれぞれ静水応力、相当応力、そして ε_f と $d\varepsilon$ は破壊相当歪みと相当歪み増分である。これは基本構造として静水圧応力成分と歪み硬化による延性低下を含むものになっている。なお、材料定数 C_1 及び C_2 は、文献⁽⁸⁾ から推定し、それぞれ 0.83, 1.2 を用いた。成形各工程で式(2)により割れの判定を行う。一方、巻き込み現象が生じないという制約条件については、これを判別する数式モデルが作れなかったので、各計算終了後にこの発生の有無をポストプロセッサにより識別した(図4参照)。なお、成形工程の不具合現象(例えば、巻き込み、肌荒れ、しわなど)を数値シミュレーション内で定量的に評価することは困難な場合が多く、本研究でもそうした理由から巻き込み現象の判別については自動化ができていない。

4・2 設計変数(線形補間を用いた場合) ステージ1で用いる中間金型形状を次に示す方法で定義する。まず、素材形状及び最終製品形状の軸対称断面形状のスプライン曲線を等分割された14個の通過点で表す。そして、 i 番目の素材形状及び製品形状の通過点座標をそれぞれ(r_{1i}, z_{1i})、(r_{2i}, z_{2i})とすると、中間形状の曲線の通過点(r_i, z_i)はパラメータ α を用いて式(3)で得られる。

$$\left. \begin{aligned} r_i &= (1.0 - \alpha) \cdot r_{1i} + \alpha \cdot r_{2i} \\ z_i &= (1.0 - \alpha) \cdot z_{1i} + \alpha \cdot z_{2i} \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2,\dots,14) \quad \cdots(3)$$

この α は中間形状を表す設計変数となる。図5には素材形状 ($\alpha=0$) から製品形状 ($\alpha=1$) まで α を 0.2 ずつ変化させたときの形状を示す。

Fig. 4 An example of material defect (folding).

ステージ2での設計変数はスプライン曲線の通過点の座標値(r, z)を用いる。ただし、探索空間を小さくするため、スプライン曲線を初期点、終期点、そしてその間の2つの通過点の4点で表現する。そして、 r 座標値は固定し、初期点の z 座標は体積一定の条件より決定できるため、設計変数の数は3となる。

4・3 設計変数（形状の複雑度を用いた場合）

前報⁹⁾で棒形状の複雑度を単一の数値パラメータで表現する方法を示した。本報でも同様な方法を用いる。軸対称曲面の複雑度を表す設計パラメータ CD (Curvature Deviation)の定義及び滑らかな形状への変更方法を付録に示す。そして、ステージ1での設計変数としては、まず付録に示す式(A.1)により製品形状の複雑度を計算し、 CD^* とする。中間形状の設計変数は式(A.1)から得られる CD を CD^* で除した値を新たに CD とする。これにより一つの数値で中間形状としての自由曲面を表現でき、0 から 1 までの範囲をとる。図 6 には素材形状($CD=0$)から、製品形状($CD=1$)まで CD を 0.2 ずつ変化させたときの形状を示す。なお、ステージ2での設計変数は線形補間を用いた場合と同様である。

Fig. 5 Intermediate punch shapes which are generated by using design variable α

Fig. 6 Intermediate punch shapes which are generated by using design variable CD

4・4 導出工程 導出工程は解析工程と最適化工程からなり、本事例での解析工程を図7に示す。まず、①基本となる設計変数の設定あるいは繰り返し計算においてはその値の修正と②第1段目のパンチ移動量を算出する。次に、③解析プログラムを自動実行するためのマクロ・プログラムにこれらの変更されたデータを書き込み、④マクロ・プログラムにより解析ソフトを実行する。⑤解析結果としての目的関数、制約関数を入力する。各工程はバッチプログラムとなっており、一連の計算が自動的に進む。

次に最適化工程であるが、ステージ1では設計変数の数が一つであり特別な探索アルゴリズムを必要とせず、これを 0.1 ずつ変えてこの設計変数と目的関数及び制約条件との関係を導出することにより近似中間形状を得る。ステージ2では、ステージ1で得られた解を中心とした小さな探索範囲内 ($\Delta z = \pm 5\text{mm}$) で格子探索法 (探索点数 $3^3=27$) を用いる。さらに、得られた 27 個の解析結果を用い、ニューラルネットワークにより入力 (座標系での3つの設計変数) と出力 (目的関数及び制約関数) の関係を学習し、この探索範囲内での応答曲面を得て最適設計変数を導出する。この設計変数による解析実行とこの結果を追加したニューラルネットワークによる応答曲面の生成は、目的関数の向上がみられなくなるまで行なわれる。なお、ステージ2では設計空間が小さいことと応答曲面生成後は積和により簡単に出力値を計算できることを考慮し、応答曲面上の最適点の導出は、ステージ2での設計空間全体を 50^3 分割し、制約条件を満足し目的関数を最小とする設計変数を全数探索することにより求めている。

Fig. 7 Derivation process of objective function

5 適用事例結果

5・1 設計変数として線形補間を用いた場合
まず、ステージ 1 での設計変数(α)と目的関数の関係を図 8 に示す。この場合、素材に近いところ($\alpha \approx 0.2$)に好ましい解が存在し、それ以外は目的関数の向上は見られない。鍛造成形においては、仕上げ鍛造成形の向上を目的として素材形状を少し成形する荒地成形が従来から行われており、本事例結果はその知見と一致する。次に、 $\alpha \approx 0.2$ 近傍の探索をステージ 2 で実施した。図 9 には各ステージにおける目的関数の最小値と得られた形状を示す。順にステージ 1 終了時(A)、ステージ 2 における格子探索法の適用後(B)、格子探索法によるデータを元にニューラルネットワークで学習させ、応答曲面法による近似最適解を得る方法での繰り返し数 3 回後によるもの(C)である。ステージ 1 では約 20%の目的関数の減少、そしてステージ 2 ではさらに 10%の減少となっており、本中間金型形状決定法が有効であることを示している。なお、本事例では導出途中で制約条件である割れ発生は見られなかったが、巻き込み不具合が幾度か発生した。

5・2 設計変数として形状の複雑度を用いた場合
図 10 にステージ 1 での設計変数(CD)と目的関数の

Fig. 8 The relation between objective value (F_2/F^*) and design variable (α) at the first stage

Fig. 9 Minimum objective value and section profile at the each stage (A) after stage 1: (B) after grid search at stage 2: (C) after response surface searching at stage 2.

関係を示す。この場合、素材と最終製品の中間の複雑形状($CD=0.5$, 以下, CD 中間形状)に好ましい解が存在していることがわかる。次に、ステージ 2 で $CD=0.5$ 近傍の探索を行った。しかしながら、本事例ではステージ 1 での目的関数の最小値を与える形状より好ましい形状は発見できなかった。むしろ、これから離れた形状では材料の巻き込み不具合が発生しやすくなった。

5・3 2つの場合の比較 図 11 は、線形補間 α と形状の複雑度 CD それぞれに基づく方法による得られた好ましい中間形状(一段目成形での最終形状)である。最終的にこれらから目的関数が最小となる形状が選択されることになり、本事例では線形補間を用いた形状となる。

本提案手法の有効性はステージ 1 で導入する新たな設計変数に依存することになる。そして、線形補間による方法では、ステージ 1 で良い解を得てステージ 2 で局所探索によりさらに良い解が得られたことを示した。一方、形状の複雑度による方法では、ステージ 1 で良い解が得られたが、ステージ 2 ではさらに良い解は得られなかった。このことは形状の複雑度に基づく形状最適化プロセスが不要であることを示すものではない。最適化形状が適用する成形問題(成形法、形状、選定する目的・制約関数など)に強く依存することを考慮すると、中間金型曲面として素材形状と製品形状を補間するいくつかの妥当な設計変数を保有し、これらの適用結果から最適解を選択することが好ましい。

Fig. 10 The relation between objective value (F_2/F^*) and design variable (CD) at the first stage

Fig. 11 Final intermediate shape

6. 結 言

従来の最適化の枠組みでは、生産設計における自由曲線・曲面の形状決定は計算負荷が高く探索空間が大きいため困難であった。本論文では、軸対称鍛造製品について、二段で成形する場合の中間金型曲面を決定する一手法を提案した。それは、素材形状と製品形状という両端形状を設計変数の制約として用い、探索範囲を縮小する新しい設計変数を導入することにより、近似最適化の枠組みの中で実務上妥当な計算時間で形状決定を可能とするものである。本手法と導入した設計変数の妥当性は多くの適用事例から評価されるべきであり、現状では限定的に運用すべきものではあるが、本適用事例のような後方押出鍛造成形においては、線形補間による方法では素材形状に近い($\alpha \approx 0.2$)ところに、そして形状の複雑度による方法では中程($CD \approx 0.5$)に、目的関数である成形荷重値が小さくなる形状が存在することがわかった。そして、妥当な設計変数の縮約が計算効率の点から効果的であることを示した。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法, (1996), 12, 技報堂出版
- (2) Grandhi, R., Modukuru, C. and Malas, J., Integrated strength and manufacturing process design using a shape optimization approach, ASME DE, Vol. 23 NO. Vol. 2 (1990), 265-272
- (3) 小島・藤川・石原, 摩擦モデルを応用した鍛造工程最適化システム, 塑性と加工, 43-495(2002), 331-335
- (4) 仲町・本田・中易・片山・中村, 有限要素法・離散化最適化手法による板材成形用金型最適設計, 塑性と加工, 39-446(1998), 63-67
- (5) Hino, R. and Yoshida, F., Optimum blank design for deep drawing process, Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Vol. 1 (2002), 213-216.
- (6) Stander, N., Burger, M., Zhu, X. and Maker, B., Spring back compensation in sheet metal forming using a successive response surface method, AIAA/ISSMO Symposium on multi disciplinary analysis and optimization (2002), 1-10
- (7) 山崎, 応答曲面近似と非線形構造最適化, 日本機械学会第4回最適化シンポジウム講演論文集, No. 00-27(2000), 169-174
- (8) 大森, 機械の研究, 39-1(1987), 83-89.
- (9) 坂元・吉田・松永, 形状の複雑性を考慮した鍛造製品の形状決定法, 機論 (A 編), 68-673(2002-9), 1420-1426.

付 録

曲線について、直線や円弧の曲率が一定であり、これらが単純で滑らかな形状であると認識できることから、曲率が変化する形状は複雑であると評価することは妥当であるという考えのもと、前報⁹⁾で棒形状曲面の複雑度を示すパラメータ CD を定義した。これは、製品形状が素材である丸棒からどの程度複雑であるかを各曲率の変化に基づき算出するものである。本報ではこの考えを踏襲し、軸対称形状について形状の複雑度を以下のように定義する。図 12 を参照し、面積 A の曲面の代表長さとして軸断面輪郭線の長さを L_d 、この曲線上の微小曲線が作り出す曲面 dA 上の曲率を $K(L)$ 、素材形状の曲率を K_o (円筒形の場合は 0 で一定値) とし、断面形状が作り出す曲面の複雑度 CD を式(A.1)で定義する。

$$CD = \sqrt{\frac{L_d^2}{A} \int (K(L) - K_o)^2 \cdot dA} \quad \cdots (A.1)$$

これは、製品と素材の対応する各曲率の偏差の形をしており、かつ同じ曲率偏差であっても微小表面積 dA が大きければ CD 値も大きくなるよう面積の重み付けをしている。ここで L_d の存在は、相似形ならば製品の大きさによらず CD 値を同一値とするためであり、 CD は無次元量となっている。滑らかな形状への変更方法は、曲面上の各点の曲率差に基づき、式(A.2)により表面上の点の法線方向に $\Delta V(L)$ 移動させる。

$$\Delta V(L) = C \cdot (K(L) - K_o) \cdot n(L) \quad \cdots (A.2)$$

ここで、 C は変更量を決定するための小さな値を持つ定数であり、 $n(L)$ は移動点の単位法線ベクトルを示す。

Fig. 12 Schematic illustration to define shape complexity (CD) of an axisymmetric model