

14 多段鍛造における中間金型曲面設計システム

坂元康泰, 佐々木憲吾, 松永尚徳, 小島田博夫, 吉田総仁*

(Development of Light Design System)

An Intermediate Die Surface Design System in Multi-Step Forging

SAKAMOTO Yasuhiro, SASAKI Kengo, MATSUNAGA Hisanori

KOTORIDA Hiroo and YOSHIDA Husahito*

In forging operations, an appropriate die-shape determination is of vital importance. This paper presents a new system 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.

キーワード：鍛造成形，最適設計，生産工程設計，形状の複雑度，中間形状決定

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。そして，最近では成形加工プロセスを最適手法の枠組みから議論する論文¹⁾もいくつか発表されている。しかし，この工程は計算繰り返し数が増え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は1回の計算負荷が極めて高いため，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。

本研究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いときに必要となる中間の金型形状の決定問題を取り扱う。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。

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

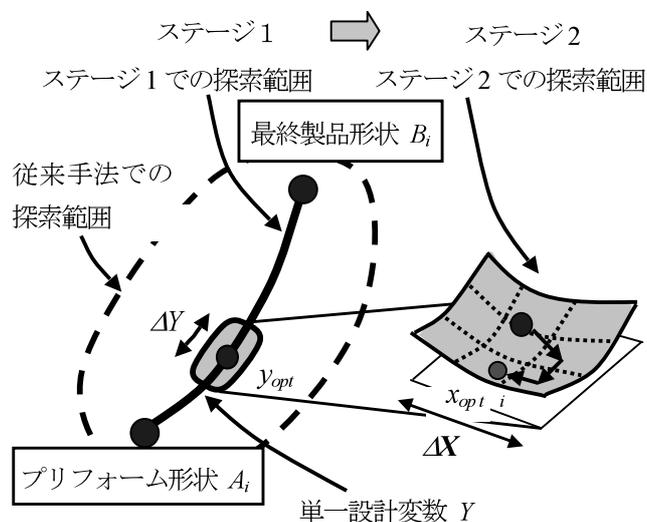


図1 提案手法の概念図

*広島大学大学院工学研究科

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_{opt} と妥当な探索範囲 ΔY を得る。なお、本研究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_{opt} 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_{opt} を得る。ここでは探索範囲が小さいことを考慮すると、例えば格子探索法を用いる、あるいは応答曲面法を探索範囲 ΔX 全体に適用することが可能である。

3 最適化問題の枠組み

3.1 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。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

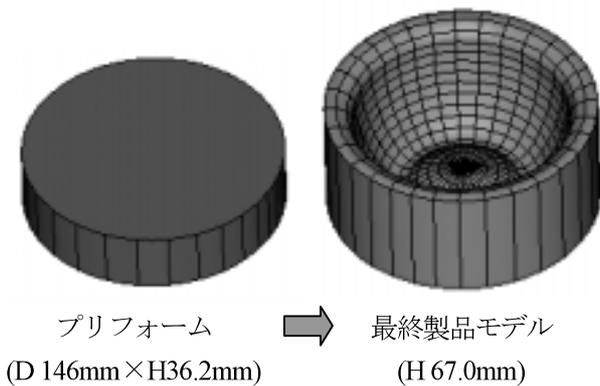


図2 適用部品のCADモデル

表1 鍛造解析条件

解析ソルバー	Autoforge
解析タイプ	軸対称
鍛造成形温度	20
材料	S35C
摩擦係数	0.1
フィレット半径 R	2 mm

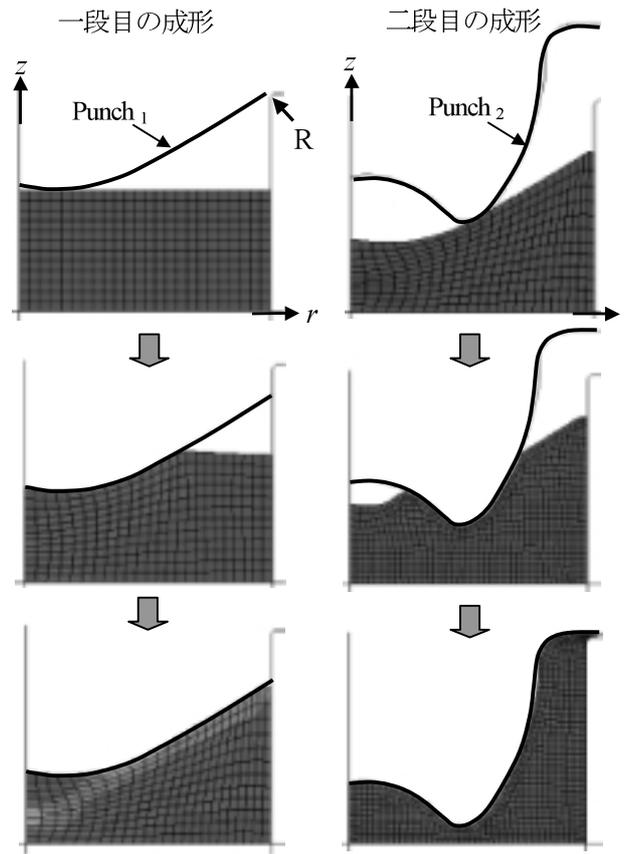


図3 鍛造成形解析事例(軸対称モデル)

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。

3.2 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。これは、二段目の成形終了時まで材料の割れがあらってはならないこと、巻き込み不良が生じてはならないこととする。材料の割れが発生しないための制約条件は、ポイド成長理論をベースとする延性破壊条件式の一つである大矢根の式を用いて式(1)で与えられる。

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

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。材料定数 C_1 及び C_2 は、文献²⁾から推定し、それぞれ0.83, 1.2を用いた。成形各工程で式(1)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ため、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)。

3.3 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(2)で得られる。

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

この α は中間形状を表す設計変数となる。図5(左)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。

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_i, z_i) を用いる。ただし、探索空間を小

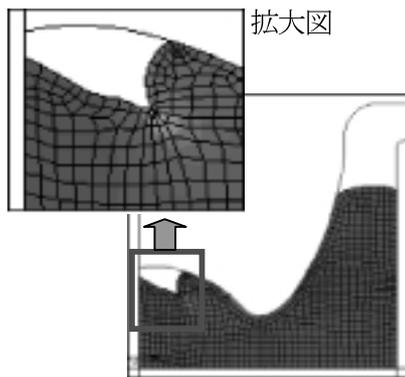


図4 成形不良事例(巻き込み)

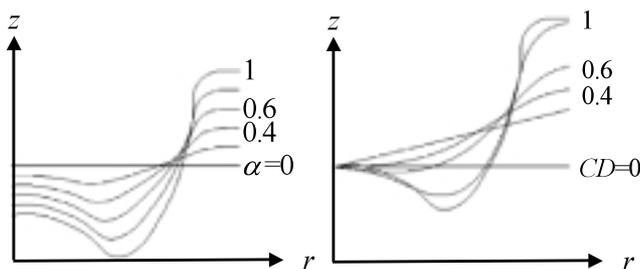


図5 設計変数 α , CD を用いて作成した中間形状

さくするため、スプライン曲線を初期点、終期点、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。

3.4 設計変数(形状の複雑度を用いた場合)

文献³⁾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。本研究でも同様な方法を用い、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行う。そして、ステージ1での設計変数としては、まず、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得られた 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5(右)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。

3.5 最適化工程

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。

4 適用事例結果

4.1 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6に示す。この場合、素材に近いところ($\alpha = 0.2$)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、 $\alpha = 0.2$ 近傍の探索をステージ 2 で実施した。図 7 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。

4.2 設計変数として形状の複雑度を用いた場合

図 8 にステージ 1 での設計変数 (CD) と目的関数の関係を示す。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見発できなかった。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。

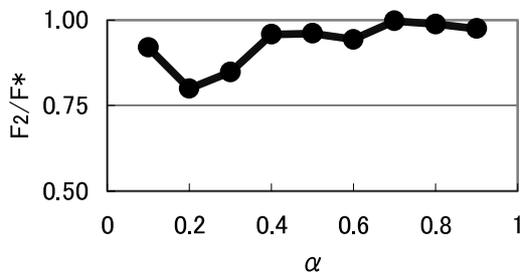


図 6 ステージ 1 における設計変数 (α) と目的関数 (F_2/F^*) の関係

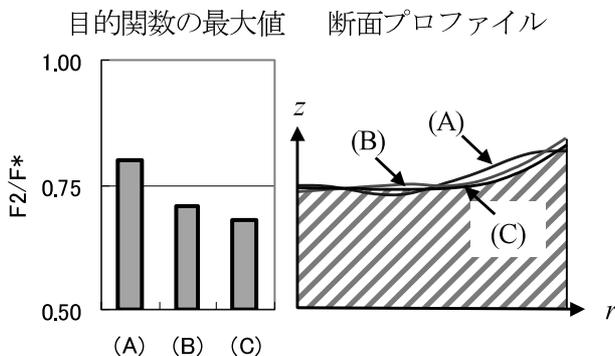


図 7 断面プロファイルと目的関数の最小値の関係 (A) ステージ 1 終了後; (B) ステージ 2 における格子探索後; (C) 応答曲面生成後

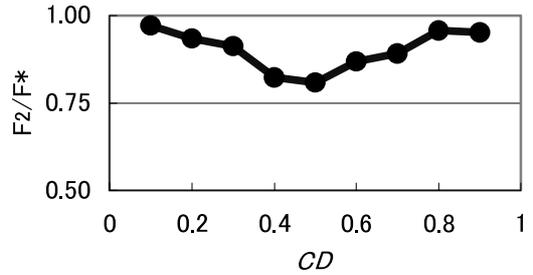
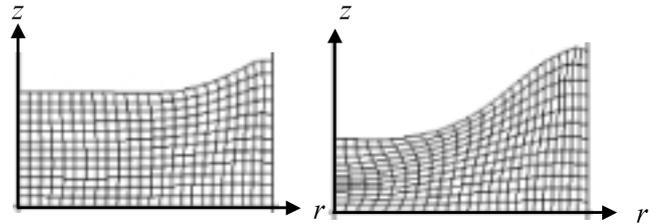


図 8 ステージ 1 における設計変数 (CD) と目的関数 (F_2/F^*) の関係



(a) 設計変数 α を用いた場合 (b) 設計変数 CD を用いた場合
図 9 本手法により得られた中間形状

図 9 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る。

5 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と困難であった。本研究では、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。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) 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
- 2) 大森, 機械の研究, 39 - 1 (1987), 83 - 89 .
- 3) 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 .