

## 2 形状の複雑性を考慮した鍛造製品の形状決定システムの開発

坂元康泰, 佐々木憲吾, 安部重毅, 松永尚徳, 吉田総仁\*

(Development of Light Design System)

### A Shape Determination Method for Forged Products in Consideration of Shape Complexity

SAKAMOTO Yasuhiro, SASAKI Kengo, ABE Shigeki, MATSUNAGA Hisanori, YOSHIDA Husahito\*

In general, the structural shape optimization method based on the fully stressed design gives us a solution of too complex shape which will be difficult to be manufactured. The present paper proposes a novel approach to the determination of moderately complex shapes that satisfy the requirement for lightweight, high stiffness and enough strength. There are two original ideas in this method. One is for the clear definition of shape complexity. A new parameter CD (curvature deviation) which represents the degree of structural shape complexity is proposed. The other is a method of derivation of moderately complex shapes that satisfy the requirement for lightweight, high stiffness and strength. A smoother shape is derived by an evolutionary change of CD, while a structural shape is obtained by an iterative change of an allowable stress region. The proposed method has been verified by applying it to the design of a hook.

キーワード：構造形状決定法, 鍛造, 成形性, 形状の複雑度, 剛性, 強度, 軽量化

### 1 緒 言

本研究は, 設計工程の効率化と高度化をライト(手軽)な感覚で実現する設計システムのご概念の提案と手法を開発するものである。それは, 従来は設計者が実施していた工程をコンピュータが代替する自動化機能により, 中小企業の設計者にも広く利用できる枠組みを保有することを目指すものである。本設計システムを“ライト設計システム”と呼ぶ。第一報<sup>1)</sup>では, 形状が長さ, 厚さなどの設計変数で表現できる場合に対し, その決定手法を開発した。第二報<sup>2)</sup>では, 形状をパラメータで表現することが困難な自由曲面で構成される場合, 形状の剛性, 強度, 重量の構造特性を満足する形状決定手法を示した。本報では, 鍛造製品を対象とし, 成形性が形状の複雑性と強い関連性を持つことを利用した新しい構造形状決定法を提案する。

### 2 形状の複雑度の表現と形状修正

曲線について形状の複雑度あるいはその逆の滑らかさを評価する場合, 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と考えられる。そこで, 曲面の複雑度を示すパラメータとして, 成形前の単純で滑らかな形状からどの程度

異なるかを形状表面の曲率の変化量を用いて表現する。まず, 図1に示すように全体形状を代表するような軸線を設定する。そして, 軸線上の点 $z$ について直交する横断面を考え, その断面積を $S(z)$ , これと同一断面積を有する円の半径を $r(z)$ , そして断面周囲上の点 $(z,x)$ の曲率を $K(z,x)$ とする。さらに, 形状の複雑度を算出する上で基準となる滑らかな形状として, 対象形状と同一軸線(軸線長さ $L$ )及び同一体積 $V$ となる棒状形状を参照形状として設定し, その断面積を $S_0$ , 円筒部の表面積を $A_0$ とする。 $S_0$ 及び $A_0$ は $L$ と $V$ により一意に定まる。これらを用い, 軸線上に肉付けされるような形状表面の複雑度として式(1)を定義する。

$$CD = \sqrt{\frac{1}{A_0 \cdot S_0} \int_0^L \int_0^L (r(z) \cdot K(z,x) - 1)^2 \cdot S(z) dx dz} \quad (1)$$

式(1)で算出された値はその構造から以下 CD (curvature deviation) 値と呼ぶこととする。滑らかな形状への変更方法は, 対象曲面上の各点の曲率値 $K(z,x)$ に基づき, 式(2)により表面上の点の法線方向に $V(z,x)$ 移動させる。

$$\Delta V(z,x) = C \cdot (r(z) \cdot K(z,x) - 1) \cdot n(z,x) \quad (2)$$

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,  $n(z,x)$ は移動点の単位法線ベクトルを示す。曲率に基づく形状変更は, 初期形状が自分自身と交わらない曲線ならば, 滑らかさが持続し凸形になっていく特

\*広島大学大学院工学研究科

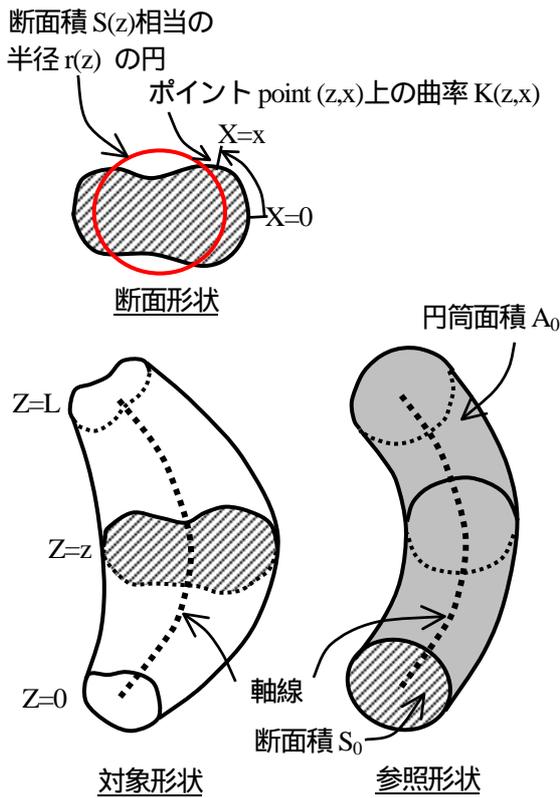


図1 形状の複雑度の定義

徴があり<sup>3)</sup>、成形性良好形状からは好ましい。

本手法を用いた形状変化の例を示す。図2(上)は、「平等強さ」に近い形状として求めたフックモデルの2次元断面形状(中央部に「くびれ」部を持つ)を初期形状とし、滑らかな形状を半円としたものである。なお、各

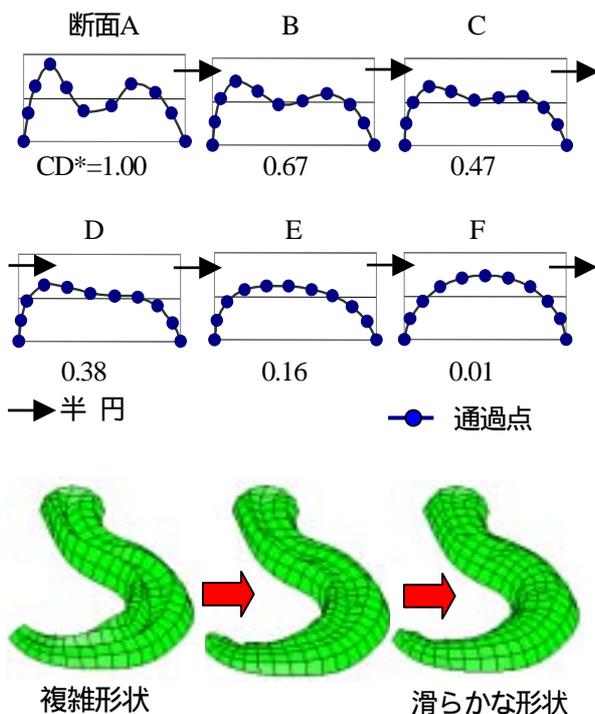


図2 形状の複雑度に基づく形状変化の例

CD値は式(1)で算出された値を断面AのCDで除した値(以下、CD\*)で示している。図2(下)は本手法によるフック形状のメッシュ・モデルの変化例である。各横断面の面積が保たれた状態で滑らかな形状へ変化していることがわかる。

### 3 多目的最適化

本研究で扱う目的あるいは制約の関係を図3に示す。本形状決定法では、使用者が要求する機能を実現するための形状制約があり、剛性、強度および重量の構造目的と形状の複雑性の目的について最低限満たすべき特性値(与えられた仕様)が存在するとして、これらを満たす制約空間(実行可能解)の中で、定められた複数の目的の向上を目指すものである。ところで、競合する多目的最適化に対して、妥当かつ広く利用されている方法の一つである min-max 法は  $n$  個の各目的関数  $f_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) に対し、スケールリングと重み付けを行い、同一の価値規準とした目的関数  $f_i$  を得る。次に、その中で最大値となる目的関数を選択し、これを他の目的関数より小さくすることを繰り返して実行することにより各目的関数を小さくすることを狙う手法である。図3においては、定められた目的関数の最大値が設定された制約空間に入ったのちは、この境界から遠ざかるように向かうことにより多目的最適点へ至るアルゴリズムと言える。それは、本形状決定問題のように各目的が競合する場合にも向く手法である。

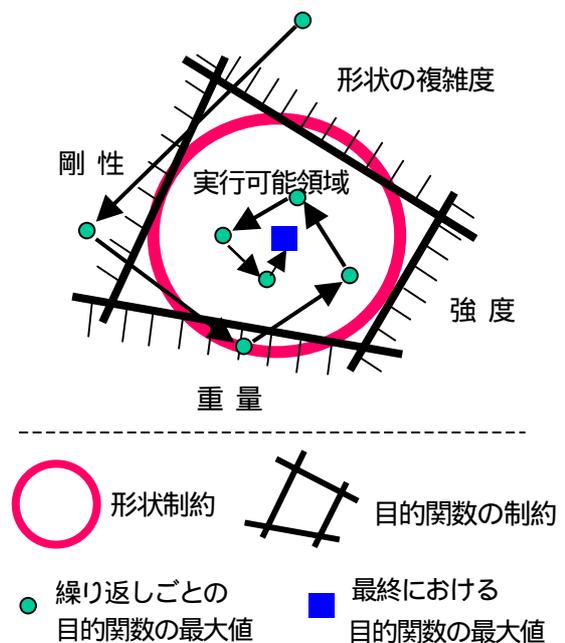


図3 目的最適化手法の概念図

提案する形状決定法の枠組みを示す。多目的を単一目的化する手法として min-max 法を用いる。ここで扱う問題は 高強度化, 高剛性化, 軽量化, そして 適度な形状の複雑性である。各単一目的関数を向上する(小さくする)ための規準となるパラメータとして以下を設定する。最大応力, 変位量及び重量の目的関数を向上するためのパラメータおよび形状変更方法は, 著者らが前報<sup>(2)</sup>で提案した全応力設計に基づく手法において目標応力に範囲を持たせるアルゴリズムを用いる。これは, 目標応力に上限値  $upper$  と下限値  $lower$  を設け, 形状表面上の各節点の応力がこの範囲に入るように形状修正を繰り返す方法である。まず, 初期値として  $upper$  は許容応力  $\sigma_a$  に, 下限値  $lower$  は小さな値に設定する。そして,  $upper$  を小さくしていくと許容応力範囲外の節点数が増え, 全応力設計のアルゴリズムにより形状は拡大し変位量が小さくなる。同様に,  $lower$  を大きくしていくと形状は縮小し重量が減少する。つまり,  $upper$  と  $lower$  は最大応力, 変位量及び重量の向上を図るパラメータとなる。一方, 形状の複雑性の目的関数を向上するための形状変更方法は, 2 章に示した形状外表面の曲率に基づく方法を用いる。

ここで, 本形状決定工程途中で導出される形状に関する多目的達成度の評価は全ての目的関数の最大値によるものとし, 計算繰り返し  $m$  番目において, この値の変化が見られないことを式(3)で判定し, これが続くと終了するものとする。

$$\left| \max f_i^{(m)} - \max f_i^{(m-1)} \right| < \varepsilon \quad (3)$$

: small value

#### 4 適用事例

上で述べた多目的最適化を実行する枠組みである min-max 法, 構造上の複数目的の向上として全応力設計をベースとした手法, そして, 形状の複雑度を抑制させる手法の3手法を組み合わせた本形状決定法をフック設計に適用してみる。適用したフックの初期形状および解析条件を図4(左)に, 本手法により得られた最終形状を(右)に示す。初期形状は位相最適化手法によって求められた高剛性形状から, 素材形状として円筒形を考慮し決定した 1/2 モデルからシェル要素を作成した。境界条件として, 対象面に対象条件を上端部には固定条件を設定し, ワイヤ取付け相当部に下方向に面荷重( $0.98 \times 10^4 \text{N}$ )を加えた。さらに, 形状制約としてフックのワイヤ取付け部に半径 28mm の円筒空間とフック先端部には力が作用しないことによる縮小を防止するための形状

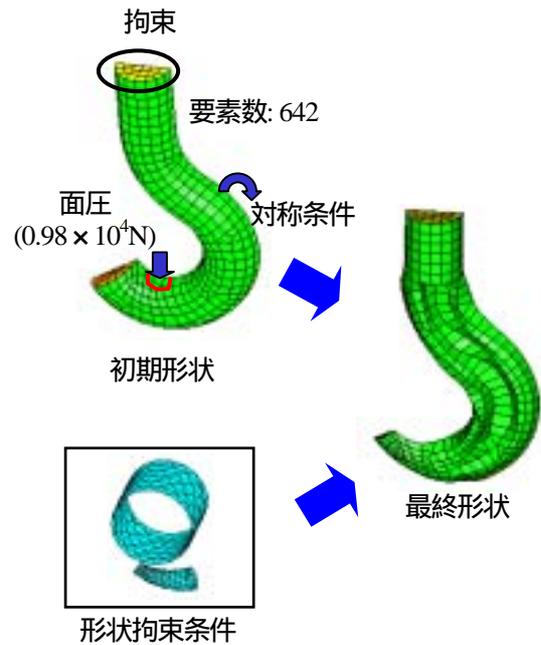


図4 本手法によるフックの初期と最終形状

を設け, この領域外での形状変更とすることとした。

構造解析部は境界要素法によるプログラム HISES<sup>(4)</sup>を用いた。目的関数は, 応力については外表面上の相当応力の最大値, 変位量については荷重点中心部節点の変位量とした。そして, 各目的関数を同一の価値基準とするために式(4)を用いた。なお, 式(4)において採用した係数  $f_{i1}$ ,  $f_{i2}$  の値を表1に示す。

$$F_i = w_i \frac{f_i - f_{i1}}{f_{i2} - f_{i1}}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

$f_{i2}$  は最低限満たすべき特性値(設計上与えられた仕様)を用いたため, 本工程の初期段階では1を越える値となる。CDについては図2(左)に示した形状より20%減少を目標として  $f_{i2}$  を定めた。なお, 重み係数  $w_i$  はすべて1とした。

図5は提案手法により実行された多目的関数の最大値(多目的達成度)およびCD値の経過である。初期段階では構造特性の向上とともにCD値の上昇が見られる。そして, 繰り返し計算回数4回目で目的関数の最大値と

表1 目的関数を正規化するパラメータ

Objectives	$f_{i2}$	$f_{i1}$	Unit
Maximum stress	180	0	MPa
Deflection	1.0	0	mm
Weight	1000	0	g
CD	0.8	0	-

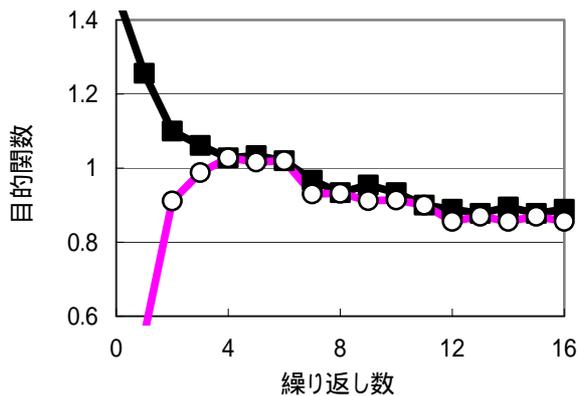


図5 フックの多目的最適化の導出課程

CD 値の一致がみられ、その後は両者が少しずつ小さくなっていった。繰り返し回数 13 以降目的関数の最大値の減少がみられなくなり、式(3)の判定により計算を終了した。得られた最終形状は過度に複雑な形状とならず、構造特性上好ましい形状が得られている。

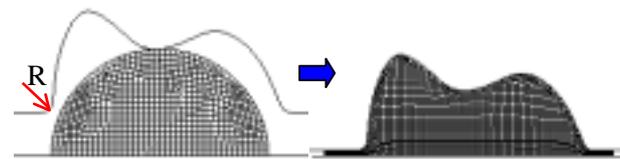
## 5 形状の複雑度と成形加工性の関係

成形加工性の評価は工法等に依存する他、生産者が保有する設備、入手可能な材料、生産数など考慮しなければならない項目が多く、これらが影響しあうものである。多様な評価規準を持つ成形加工性を、ここでは主要部はプリ・フォームからの型鍛造成形と形状の複雑度との関係から捉える。

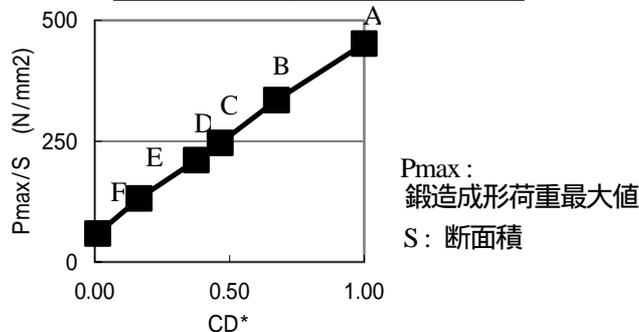
フック断面形状とこれを鍛造成形で必要な荷重値の関係を示す。図2(A)に示したフック断面から断面積一定形状をパンチ形状とし、半円形状を素材形状とし、2次元鍛造成形解析を実施した。図6(A)はその実行結果の一例である。パンチ形状が複雑になると材料が型内に充填しにくくなり、成形荷重値が上昇する。形状複雑度CDと素材がパンチ型内への充填終了時までの成形荷重最大値の関係を図6(B)に示す。横軸にはCD\*を用い、縦軸には成形最大荷重値 $P_{max}$ を素材断面積Sで除した値を用いた。素材から製品形状を生成するための鍛造荷重値が素材からの形状複雑度と強い関連をもつことを示している。なお、フックの断面成形は一般化平面歪み問題と考えられ、フック軸線単位長さあたりの成形荷重値を積分することにより全体の成形荷重値が推定できる。

従来、SSOの枠組みの中では、実務上妥当な計算時間内で成形加工性を考慮することは困難であった。しかし、

形状をCDで数値表現し、これと成形加工性評価値との関連性が事前に得られるならば、この関連を近似式とし



A) 鍛造成形事例 (パンチ形状: 断面B)



B) 鍛造荷重値とCDの関係

図6 形状の複雑度と鍛造荷重値の関係

て陽な形で求めておくことにより成形加工性を扱うことが容易となると考える。

## 6 結 言

本研究は、剛性、強度および重量の構造上の目的とこれらと競合すると考えられる形状の複雑性の向上を達成するための形状決定法を提案したものである。これは、多数の節点座標による自由曲面表現を可能とし、各目的を向上させるために規準となるパラメータをそれぞれ設け、それを変更することにより結果として好ましい形状を決定するものである。そして、本手法を鍛造製品であるフックの設計問題に適用し、その有効性を検証した。最後に、提案した形状の複雑度が成形加工性の指標となる例として、フック形状における鍛造成形荷重最大値との関係を示した。これは、製品ごとに限定的に取り扱う必要があるものの、形状決定化工程において計算負荷が非常に高い成形加工性を簡便に評価し形状修正しうる可能性があることを示唆するものである。

## 文 献

- 1) 坂元他: 広島県西部工技研究報告, No44(2001), 1
- 2) 坂元他: 広島県西部工技研究報告, No45(2002), 1
- 3) 儀我他: 動く曲面を追いかけて, 27, 日本評論社
- 4) 蔦他: 日本機械学会中国四国支部第31期講演会, No. 935-1, P106-108