

# ライト設計システムの開発 (第2報)

## 構造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 (2<sup>nd</sup> Report)

### Development of Structural Shape Determination Method

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

This paper proposes a novel approach to the determination of structural shapes that satisfy the requirement for high stiffness, lightweight and strength. In this method, a basic shape is derived in the first phase by the FEM-based topology optimization, and then, in the second phase the final shape is determined by the BEM-based fully stressed design. In the second phase, the shape is iteratively changed in such a way that the von Mises stress of all the material elements,  $\sigma(x_i)$ , lies within an allowable stress region defined as  $\sigma_{lower} < \sigma(x_i) < \sigma_{upper}$ . By making an appropriate choice of  $\sigma_{lower}$  and  $\sigma_{upper}$ , this algorithm allows us to derive a lightweight structural shape with high stiffness and enough strength. As an example, this method was employed for the determination of the shape of a hook.

キーワード：構造形状決定法, 位相最適化, 形状最適化, 全応力設計, 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<sup>(1)</sup>。前報では, 形状が長さ, 幅, 厚み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。本報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開発するものである。

図1に, 提案する構造形状決定手法の枠組みを示す。通常の構造形状最適化( structural shape optimization 以下, SSO)の枠組みは, 種々の制約条件を満足する実行可能解の中で, 何らかの目的関数を定義し, その最適化を図るものである。構造設計問題では, 設計者が要求する剛性, 強度, 重量などの特性の他, 使用者が要求する機能を実現するための形状制約が存在するため, これらの制約の中で最適解を求める問題となる。そして, 自由曲面を有する形状最適化

問題では, 形状を表現するための膨大な設計変数が必要となる。よって, この問題を解決する現実的な手法として, 成長ひずみ法<sup>(2)</sup>などによる全応力設計(fully stressed design)が用いられている。これは, 剛性や軽量化(重量)を直接目的関数に選んで最適化を図っている訳ではないが, 応力均一化が結果として高剛性・軽量化構造を実現することを利用したものである。この方法は簡単なアルゴリズムで膨大な自由度の形状変更が可能であるという長所をもつため, 詳細な製品形状生成問題に利用されている。しかしながら, これらの手法を機械構造物の設計に利用しようとした場合には以下のような課題が残っている。

- 1) 生産上困難な形状を生成する場合がある。
- 2) 種々の制約を同時に満足するアルゴリズムが提案されていない。



図1 構造形状決定手法の枠組み

\*広島大学大学院工学研究科

3) 全応力設計では必ずしも、均一応力となる形状が得られる保証がない。

そこで本研究では、これらの課題に対処し、構造設計で重要な剛性、強度および重量に関する制約条件を満足する構造形状が比較的簡単に決定できるアルゴリズムを、全応力設計をベースにして新しく提案するものである。

## 2 本システムの概要

提案するシステム<sup>(3)</sup>の概要をフック設計への適用事例とともに図2に示す。形状を、具現化する順にA：許容設計空間、B：基本形状、C：最終形状の三つに分類する。そして、許容設計空間から基本形状を決定するため、Step1で位相最適化を実行する。ここでは、はじめに許容設計空間全体に6面体要素により構成される初期形状を与える。剛性の指標である許容変位量を制約値とし、重量の最小化を目標とし、剛性制約を満足した軽量形状を導出する。位相最適化で得られる最終形状が6面体要素の集合体で表現されるため、これから中心パスラインや、断面の大きさなどの形状の基本的特徴を示すパラメータを取得する。Step2ではStep3に用いる初期形状（基本形状）を作成する。この基本形状の決定には、鍛造用の素材が丸棒や角柱といった入手容易な単純形状材であるという生産上の常識が考慮される。

基本形状から最終形状を決定するために、Step3で全応力設計に基づく高剛性・高強度・軽量化構造の形状決定を行う。初期形状として基本形状表面に要素を生成する。剛性の指標である許容変位量および許容重量を制約値とする。さらに、使用者の利便性などから

材料が存在できない空間を与え、これを本工程での形状変更制約とする。以上の枠組みの中で、形状表面の各節点の応力が許容応力範囲内に収まることを目標として高剛性・高強度・軽量化形状を導出する。最終形状は多数の表面要素あるいは節点の集合体として表現されるものとなる。

## 3 位相最適化

### 3.1 定式化

Step1で用いる位相最適化手法について示す。浅野<sup>(4)</sup>は、最小ポテンシャルエネルギーの原理を用いた静的弾性問題の位相最適化形状探索手法を提案しており、本手法もこれに基づく。有限要素法（以下、FEM）による計算結果から歪みエネルギーの低い要素を徐々に削除する工程を繰り返すことにより、剛性を満足する最小の要素数となる要素の組み合わせを決定する。位相最適化工程のフローチャートを図3に示す。一般に、工程は構造解析部（剛性計算）と最適化部（形状変更）で構成されるが、構造解析部は市販ソフト（I-DEAS）のソルバーを用いた。

最適化部では歪みエネルギーが小さい要素を削除する処理手順であるマクロプログラムを生成し、これを実行する。ここで、生産困難な空洞を持つ形状生成をさけるため、外表面要素のみを削除対象とする。また、計算の効率化のため、1回の構造解析により削除する要素数は設定された数とする。本工程を変位量（Disp）が許容変位量（Disp\*）とほぼ一致するまで繰り返すことにより、剛性の制約を満した軽量化形状が得られる。なお、I-DEASを保有している企業ならば本工程を自動実行できる専用メニューも開発している。

Step1: 位相最適化(Step2のための基本形状パラメータ取得)

Step2

Step3: 剛性、強度、重量を考慮した構造形状決定化

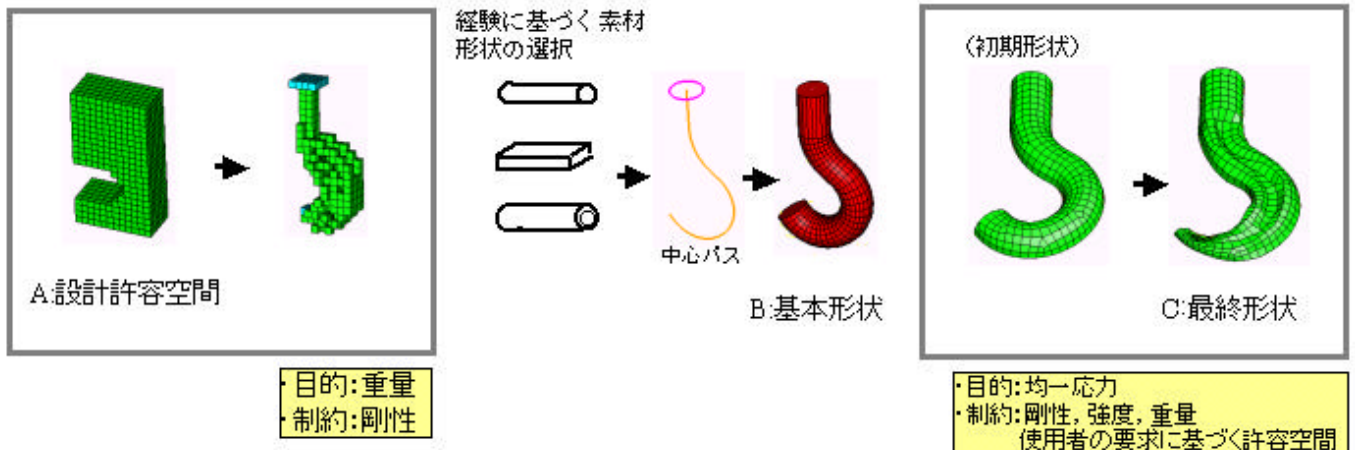


図2 構造形状決定システムの概要

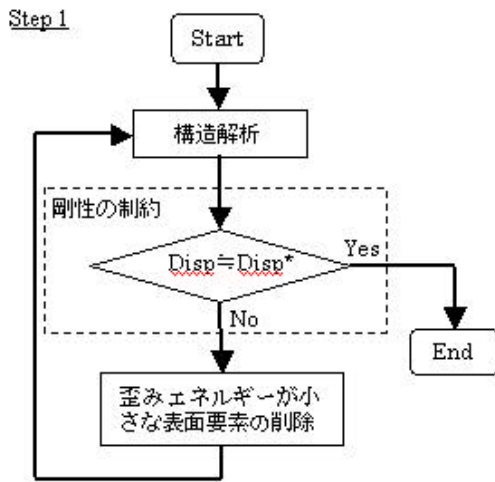


図3 位相最適化工程

### 3.2 適用事例

フックの位相最適化形状の導出過程を図4に示す。初期形状である設計空間は直方体からフックにワイヤをかけるための機能上の制約空間を除いた形状とし、構造解析条件は上端一部分を固定しワイヤ取付相当部に下方向に荷重 ( $1.96 \times 10^4 \text{N}$ ) をかけるものとした。要素数 1332 の初期形状から、荷重点中心での変

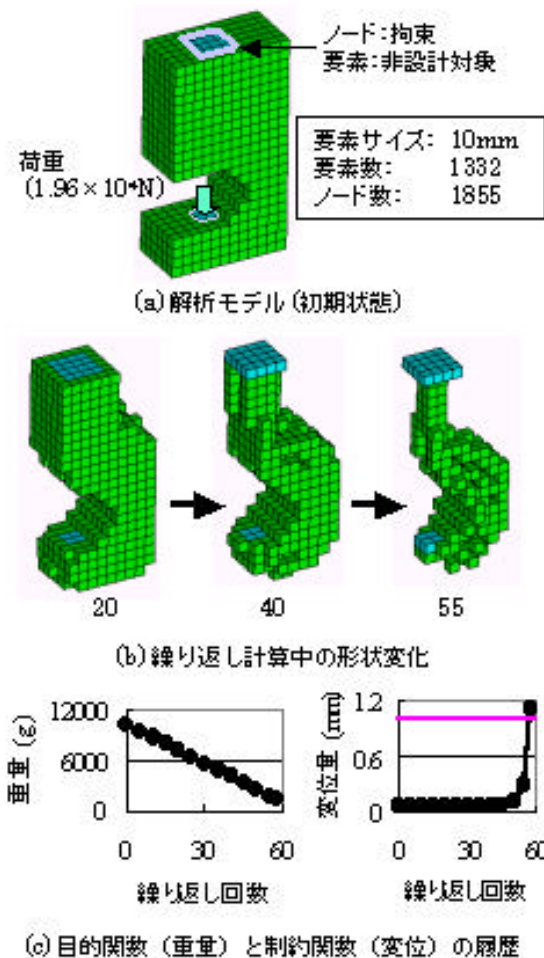


図4 フック高剛性形状の導出

形量 (1mm とする) を制約として繰り返し数 55 回を実施した後、初期許容設計空間の約 15%重量のメッシュ形状を導くことができた。

## 4 高剛性・高強度・軽量化形状の決定

### 4.1 定式化

Step3 で用いる形状決定手法について示す。本手法では構造解析部として境界要素法 (以下、BEM) を用いた。その理由は、最適化部では表面応力値のみを参照してメッシュ変更を行うことからデータ構造の一致が良いこと、内部のリメッシュが不必要なことから比較的大きな形状変更を行うことが可能となるからである。一般的な全応力設計に基づく形状最適化問題は、最適化する形状表面の相当応力 (いわゆるミーゼス応力) を指定する相当応力  $\sigma^*$  と一致することを目標とする問題となる。本形状最適化手法の利点は、局所的応力値のみに基づき形状変更を行うことで高剛性・軽量形状を導くことが可能なことである。しかし、この定式化では目標とする応力値  $\sigma^*$  を事前に指定しなければならない。そして、利用可能なパラメータが  $\sigma^*$  のみであり、応力の制御は可能であるが、形状の特性評価として重要となる剛性および重量を制御することができない。本手法では、単一の目標応力値  $\sigma^*$  に向かっての応力均一化という従来方法とは異なり、個々の節点の相当応力が次式の許容応力範囲に入るようにする形状決定法を新たに提案する。

$$\sigma_{i, lower} (X_i) < \sigma_{upper} < \text{強度規準許容応力} \quad \dots(1)$$

ここで、 $\sigma_{upper}$ 、 $\sigma_{lower}$  は許容応力範囲の上・下限値であり、 $\sigma_{upper}$  は強度規準の許容応力  $\sigma_a$  (例えば、引張り強さ / 安全率) より小さな値として設定される。ある節点の相当応力  $\sigma_i (X_i)$  が設定された許容応力範囲に入っている場合にはその節点についての形状変更は行わないものとし、構造についての全ての節点が不等式(1)を満足し、剛性と重量の制約を満足した段階で本 Step を終了することにする。

形状変更 (節点座標  $X_i$  の修正  $\Delta X_i$ ) は次式による。

$$\sigma_i (X_i) > \sigma_{upper} \text{ のとき}$$

$$\Delta X_i = \Delta x_0 \frac{\sigma_i (X_i) - \sigma_{upper}}{\sigma_0} n_i \text{ (外向きに修正)} \quad \dots(2)$$

$$\sigma_i (X_i) < \sigma_{lower} \text{ のとき}$$

$$\Delta X_i = \Delta x_0 \frac{\sigma_i (X_i) - \sigma_{lower}}{\sigma_0} n_i \text{ (内向きに修正)} \quad \dots(3)$$

ここで、 $\Delta x_0 / \sigma_0$  は修正量を決定するパラメータで



ある。式(2), (3)はそれぞれ上限応力  $\sigma_{upper}$  および下限応力  $\sigma_{lower}$  を目標に形状変更を行うことを表している。式(2)にもとづく形状変更は材料の体積を増やすので剛性を増大させ、一方、式(3)では材料の体積を減らすので構造を軽量化する方向に作用する。すなわち、許容応力範囲を初期の設定から狭めてゆくことにより、より高剛性かつ軽量の構造が導き出せることが期待できる。得られた構造が剛性不足 ( $Disp > Disp^*$ ) あるいは重量オーバー ( $Weight > Weight^*$ ) の場合には  $\sigma_{upper}$  および  $\sigma_{lower}$  の設定値を制約条件を満足するまで、それぞれ次のように修正を繰り返す。

$Disp > Disp^*$  のとき

$$\sigma_{upper} = \sigma_{upper} - \Delta\sigma_{o1} \frac{Disp - Disp^*}{Disp^*} \quad \dots(4)$$

$Weight > Weight^*$  のとき

$$\sigma_{lower} = \sigma_{lower} + \Delta\sigma_{o2} \frac{Weight - Weight^*}{Weight^*} \quad \dots(5)$$

形状最適化手法で求める最終形状(製品形状)として、初期形状に近い形状を望むことがある。これは、初期形状に素材形状を選択すれば、製品形状が素材形状に近いことは生産上好ましいなどの理由があるからである。この点について考えると、本手法は、各制約条件を満足するまで目標とする応力値の許容範囲を縮小していくことにより、初期形状に極力近い形状を導出する方法といえる。

#### 4.2 適用事例

本手法をフック形状に適用した。フック 1/2 モデルに対象条件を付加し、上端部を固定、ワイヤ取付相当部に下方向に  $0.98 \times 10^4 N$  の荷重をかけた。形状変更制約は、機能上の作業空間としてフックのワイヤ取り付け部に半径 28mm の円筒空間を、フック先端部には力が作用しないことによる縮小・消滅を防止するための形状を作成した。以下は本工程を実施した結果である。各制約値および応力均一化の達成度の変化を図5に示す。本事例では初期形状の断面半径が小さく制約空間との間に形状変更スペースがある。繰り返し計算の中で、フック中心パスの内側が制約空間表面まで近づくことにより高剛性と応力緩和が図られている。

### 5 結 言

本システムは、構造形状を決定するものである。それは、位相最適化手法を用いた高剛性形状を導出するステップと、全応力設計手法を用いた高剛性、高強度

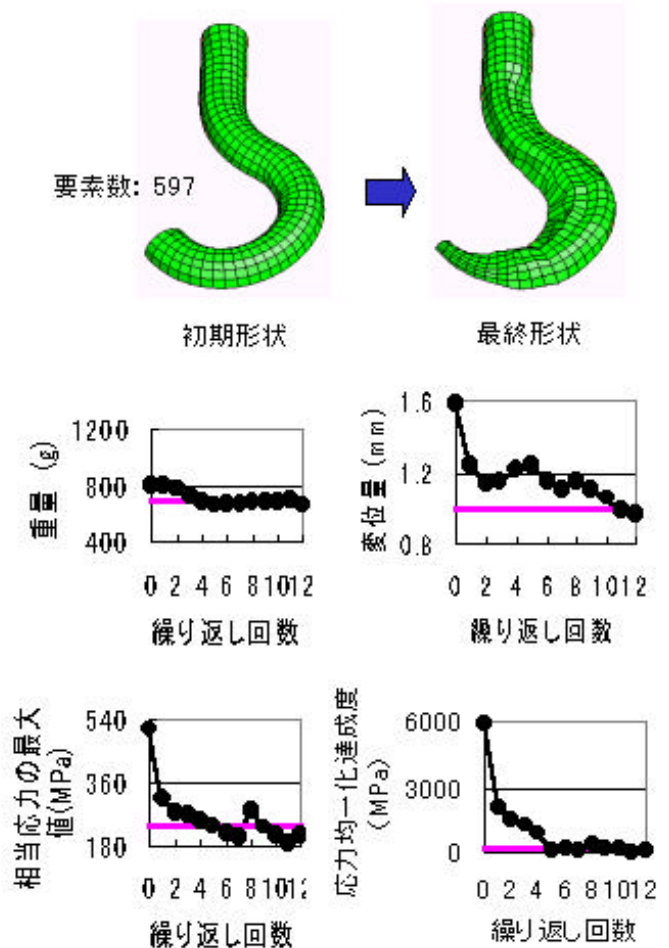


図5 フックの形状最適化の導出

かつ軽量化形状を導出するステップからなる。全応力設計に基づく手法は、局所的応力値のみに基づき形状変更を行うことで高剛性・軽量化形状を導くことが可能となるという特徴をもつ。しかし、設計者は一般に、与えられた剛性、強度および重量の仕様を満たす形状生成アルゴリズムを望む。本手法は、形状最適化手法の均一応力性を緩和し、目標とする応力の上・下限値をそれぞれ剛性と重量の制約を満足するための変更パラメータとすることにより、これらを実現することを可能とするものである。それは、一般にこれらの制約を満足した上で初期形状に近い形状を導出することから、形状最適化で課題であった過度に複雑な形状生成にも対処できる。本手法をフックの設計問題に適用し、本システムの有効性を検証した。

### 文 献

- 1) 坂元他: 広島県西部工技研究報告, No44(2001), 1
- 2) 畔上, 機論, 54-508(1988), 2167-2175.
- 3) 坂元・吉田, 機論, 67-660,A(2001), 43-49
- 4) 浅野, 機論, 63-614,A(1997), 2188-2195.