

### 3. 変形法を用いた骨組シェル構造の形状最適化に関する研究

形状最適化 変形法 有限要素法

03168047 櫻谷建太  
指導教官 藤井大地 助教授

#### 1. はじめに

近年、設計・解析技術や施工技術の進歩により、自由曲面を持ったシェル構造が設計されるようになってきている。だがこのような複雑な曲面を持つシェル構造の場合、応力が均一にならず、局所的に大きい箇所ができる。そこで形状最適化を用い、応力を均一にした形状（最適形状）を求めることで、要求された意匠に応えつつ、合理性を加えることも可能となる。

これまで、有限要素法を用いた様々な形状最適化手法が提案されてきたが、境界条件が波打つ問題があることや、形状のコントロールポイントを設定する必要があるため、一般ユーザーにとって、形状最適化を難解なものとしていた。

これに対し畔上ら<sup>1),2),3)</sup>は、形状の変化する方向に表面力を課し、その変形に従い領域形状を変更していく方法（力法）を提案した。この方法では、ユーザーが形状に関するパラメータを設定する必要がなく、境界形状の波打ち現象も生じないことが証明されており、弾性変形にしたがって形状を変更していくため、メッシュのゆがみが生じにくいというメリットがある。

しかし、力法は理論が難解なため、能井、藤井らによって力法の原理にもとづく方法をさらに簡略化した（変形法）が提案された。

だが、現段階では、プログラムの計算効率が悪く、そのうえ現実的なシェル構造に対する有効性が確かめられていない。

そこで本研究では、変形法プログラムの改良を行い、そのうえで、現実的なシェル形状に対する最適化を行い、変形法の有効性を検証する。

#### 2. 解析法のアルゴリズムと概要

本研究では、シェル構造の形状最適化手法として、変形法と力法を用いる。

図1は、変形法と力法の計算アルゴリズムを、図2は変形法の解析フローチャートを示したものである。なお、図2の追加プログラムについては、次章で説明する。

本解析では、まず、有限要素解析に必要なデータを入力し、骨組解析を行う。次に解析によって得られた節点変位に負倍率をかけ、形状変更（節点座標の変更）を行う。そして次式によってコンプライアンスCを決定する。

$$C = \mathbf{f}^T \mathbf{d} = \mathbf{d}^T \mathbf{k} \mathbf{d}$$

ここに、 $\mathbf{d}$ は節点変位ベクトル、 $\mathbf{f}$ は荷重ベクトル、 $\mathbf{k}$ は全体剛性マトリクスを示す。計算は、コンプライアンスを構造の剛性の指標として、値が十分に小さくなった形状を、最適形状として出力する。

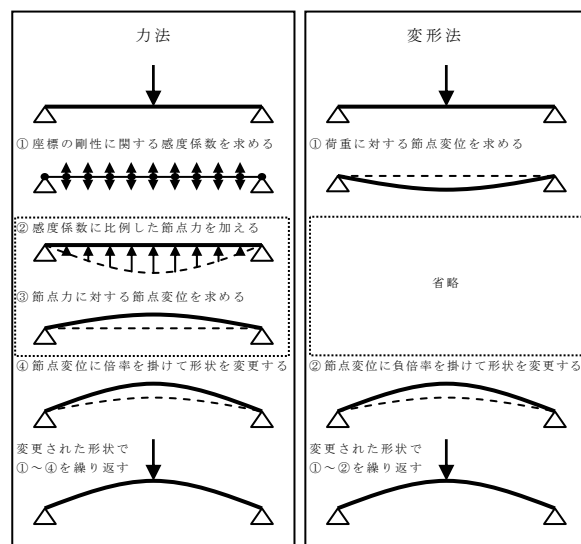


図1 力法と変形法の計算アルゴリズム

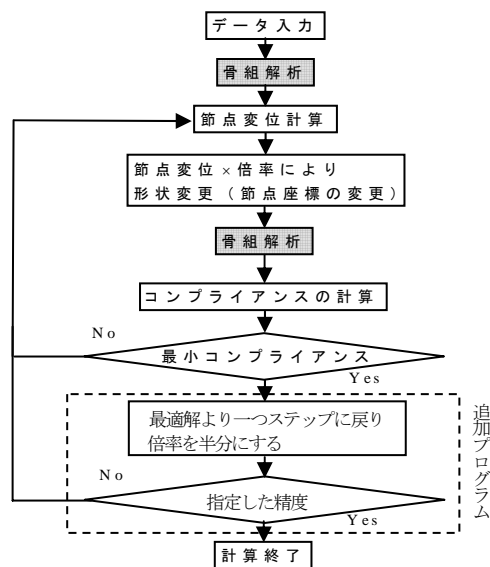


図2 変形法の解析フローチャート

#### 3. 解析例

##### 3.1 プログラムの改善

現在の変形法プログラムでは、膨大な要素を持つ形状や、自由曲面などのような複雑なシェル構造に対しては、計算効率が悪いこともあり、膨大な時間が必要となる。そのため、二分法プログラムを追加することで計算効率を改善させる。

改良点として、今までの変形法コンプライアンスを前ステップの値と比較し、前ステップより小さい値となっている場合は、再度節点変位を計算し、以上の計算を繰り返し、コンプライア

ンスの値が前ステップより大きくなる場合は、それを最適解として出力していたが、改良後は前ステップに戻り、形状変更増分を 1/2 にして、計算を続けて形状変更が十分小さくなった時点で収束と見なし、計算を終了する。

そのプログラムを用いて、図 3 に示す骨組形状に分布荷重をかけて解析した結果、図 4 のようになり、表 1 に示すように短縮することができ、コンプライアンス比（最適形状のコンプライアンスを初期形状のコンプライアンスで割ったものとする）の誤差も見られなかった。

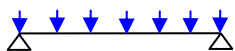


図 3 骨組形状モデル



図 4 最適形状

表 1 ステップ数とコンプライアンスの比

	ステップ数	コンプライアンス比
改善前	4432315	$5.30 \times 10^{-2}$
改善後	4104	$5.30 \times 10^{-2}$

### 3.2 三次元形状を用いた解析

まず、図 5 に示す、スペースフレームの最適化を行う。

その結果、図 6 に示すように、応力の少ない形状に収束させることができ、コンプライアンス比は  $1.62 \times 10^{-2}$  となった。

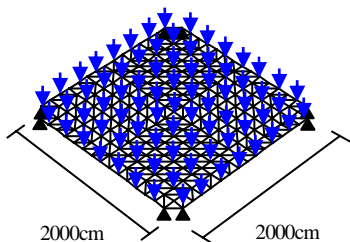


図 5 スペースフレームモデル

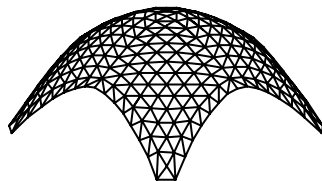


図 6 最適形状

### 3.3 現実的な形状を用いた解析

次に、現実的なシェル構造への変形法の有効性の検証として、図 7 に示すシェル構造をもとに、図 8 に示すようなシェル形状モデルを作成し、この曲面を、変形法を用いて最適化することを試みた。



図 7 新ミラノ国際見本市会場

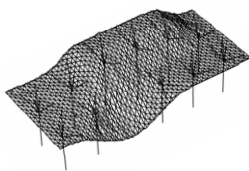


図 8 シェル形状モデル

図 9 と図 10 は、最適化前と最適化後の曲面を比較したものである。図より、本例題では、曲面形状は大きく変更されていないが、コンプライアンスは、最適化前に比較して、15%程低減された。

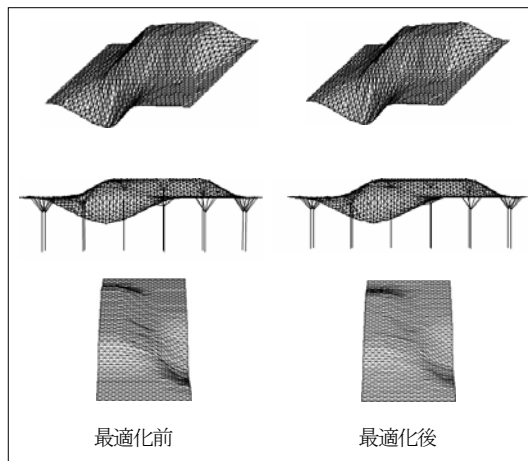


図 9 形状の比較（外観）

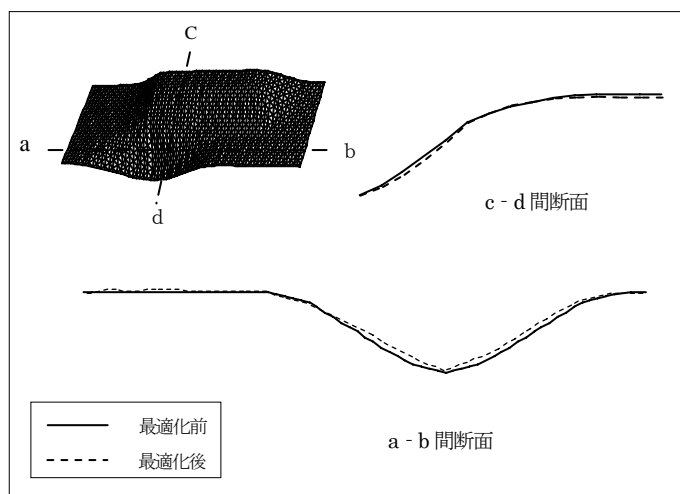


図 10 形状の比較（断面）

## 4. まとめ

本研究では、変形法プログラムを改良し、それを用いて現実的なシェル形状への最適化を行い、変形法の有効性を検証した。

その結果、変形法プログラムの効率を改善することができ、スペースフレームの最適形状を求める問題に適用したところ、この場合も、効率よく最適化を行うことができた。さらに、現実的なシェルの形状変更にも応用可能であることがわかった。

以上の検討より、変形法は、非常に簡単なアルゴリズムで形状変更を行うことができ、しかも、滑らかで綺麗な形状が得られるため、シェル構造の曲面形状の変更（修正）に十分適用できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 畔上秀幸, 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集, A 編 60 巻, (1994), pp.1479-1486
- 2) 下田昌利, 吳志強, 畔上秀幸, 桜井俊明, 汎用 FEM コードを利用した領域最適化問題の数値解析法 (法によるアプローチ) 日本機械学会論文集, A 編, 60 巻, (1994), pp.2418-2425
- 3) 畔上秀幸, 線形弾性問題における領域最適化解析 (法によるアプローチ), 日本機械学会, A 編, 60 巻, (1994), pp.2312-231