

補助事業番号 2023M-317

補助事業名 2023年度 構造体の超軽量設計のためのポーラスリブの創生・成長手法の開発 補助事業

補助事業者名 豊田工業大学・教授・下田昌利

## 1 研究の概要

本研究では軽量設計の有効な構造母体の表面に立壁を設けるリブ構造に注目した(図1)。従来から格子状のリブが経験的にもしくは数値シミュレーションを利用して設計されてきたが、本研究では極限的な力学性能と軽量化を高次元で両立するための新たな最適設計手法を提案した。具体的には、まず最適な位置に最適なサイズのリブを構造体中から創生し、成長させる。最適な位置の決定にはトポロジー最適化を、その成長には形状最適化を利用し、両最適化を同時に実行した。更に、リブ内部に多孔質(ポーラス)構造を設け(図2)、その孔の形状を均質化法に基づくマルチスケール形状最適化手法で最適化した。これらの最適設計問題をノンパラメトリック最適化(分布系)最適化問題として定式化し、リブがその製品の使用環境(境界条件)に応じて、創生したい箇所から自由に湧き出し、幅と高さを自由に変えながら成長することを可能にする理論的に無限自由度の最適設計手法を構築した。リブ内部のポーラス構造は均質化法に基づくマルチスケール形状最適化を適用し、これも無限自由度で構築した。一連の設計変数の決定には全てH1勾配法を利用した。これにより、解探索における安定的な収束と滑らかなリブ構造の獲得を可能とした。種々の設計問題を解き、得られたポーラスリブ構造を3Dプリンターで試作し、開発システムの有効性と効果を検証した。



図1 リブ構造の例

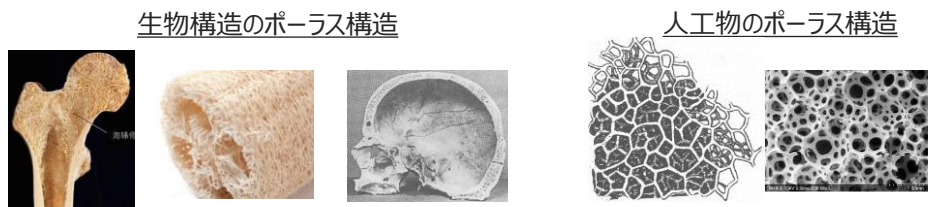


図2 ポーラス構造の例

## 2 研究の目的と背景

あらゆる製品設計において、省資源や環境負荷低減の観点から構造体の軽量化は普遍的に求められ、その要求は厳しさを増している。設計者の経験や勘に基づく設計には限界があり、近年のシミュレーション技術を用いても従来の材料や設計手法の延長では得られる性能は限

定され、劇的な軽量化は達成されない。非適切な設計は環境負荷を増加させるばかりでなく、安全性にも影響を与える。更に、技術者不足による技術伝承も社会問題となっており、経験によらず、軽量化と力学特性の両立を実現するための新たな手法と設計システムの開発が望まれている。軽量設計の有効な手法に構造に立壁を設けるリブ構造がある。従来から格子状のリブが経験的に設計されてきたが、これを革新する。工業製品の軽量化を極限的に達成するため、内部に最適化されたポーラス構造を有するリブを、最適な配置、且つ最適サイズで創生するための設計変数のパラメータ化が不要な革新的手法とそれに基づく最適設計システムの開発を目的とする(図3)。この超大規模設計問題を関数空間で定式化し、得られる感度関数を関数空間の勾配法(H1勾配法)に適用し、最適ポーラスリブを求める。開発した最適設計システムを種々のポーラスリブ設計問題へ適用し、得られた形状を3Dプリンターで試作し、開発システムの有効性を検証する。

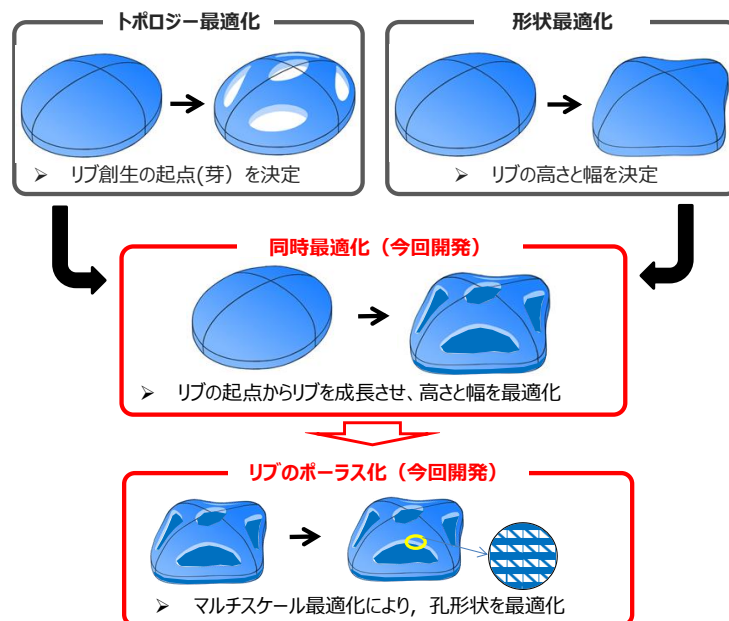


図3 リブ配置とサイズ最適化のための成長設計の流れ

### 3 研究内容

構造体の超軽量設計のためのポーラスリブの創生・成長手法の開発  
(<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>)

#### ① 先行研究の調査

本研究に関連する先行研究を調査し、これまでのリブの最適設計手法を把握すると共に、本研究で開発する形状とトポロジー最適化の組み合わせ手法、及び内部にマイクロ構造を生成する手法の新規性を確認した。この調査結果を学会発表と投稿論文へ反映させた。

#### ② リブ発生源となるトポロジー最適化手法の構築

補強リブを生成・成長させるための起点となる箇所を求めるためのSIMP法に基づく3次元

のトポロジー最適化手法とシステムを構築した。具体的には、

- ・剛性を目的関数に、リブの起点となる材料配置(材料密度)を設計変数にした。
- ・トポロジー最適化問題を定式化し、感度関数を理論的に導出した。このとき、起点となる箇所の体積制約を与えた。
- ・スカラー型 $H^1$ 勾配法により、最適なリブの起点配置を求めた。

### ③リブ成長のためのノンパラメトリック形状最適化手法の構築

②で生成されるリブの起点を上方に成長させるための $H^1$ 勾配法に基づく3次元形状最適化手法を構築し、②のトポロジー最適化と統合した。具体的には、

- ・剛性を目的関数に、リブの起点部の形状を設計変数に成長させる形状最適化問題をノンパラメトリック最適化問題として定式化し、感度関数を理論的に導出した。このとき、3次元弾性体の支配方程式とリブ体積を制約条件に加えた。
- ・形状設計変数の決定のためのベクトル型 $H^1$ 勾配法を構築した。

### ④トポロジーと形状最適化手法の統合によるリブ最適化手法の構築(図4)

②のトポロジー最適化と③の形状最適化を組み合わせ、1つのシステムとして統合化した。

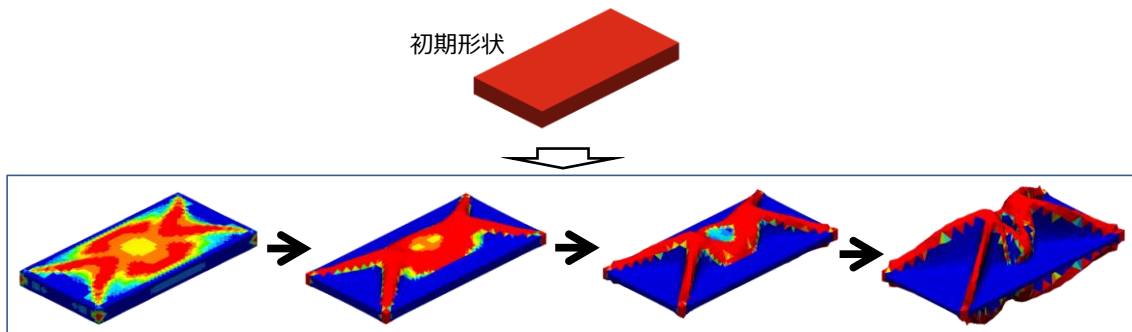


図4 リブの最適化(成長)の計算例

### ⑤バルクリブの試作と検証試験

④のシステムで求めた内部に孔のないバルクリブを試作し、剛性試験を行った。

### ⑥マイクロポーラス構造の形状最適化手法の構築(図5)

リブ構造の内部に微小な孔を最適配置するための形状最適化手法を構築した。

- ・均質化法を利用して無数のポーラス構造(マイクロ構造)の有効弾性定数を求め、リブ構造(マクロ構造)に適用した。
- ・ポーラス構造は複数種類を任意の位置に配置出来るようすると共に、孔の形状を③と同様のベクトル型 $H^1$ 勾配法で最適化した。

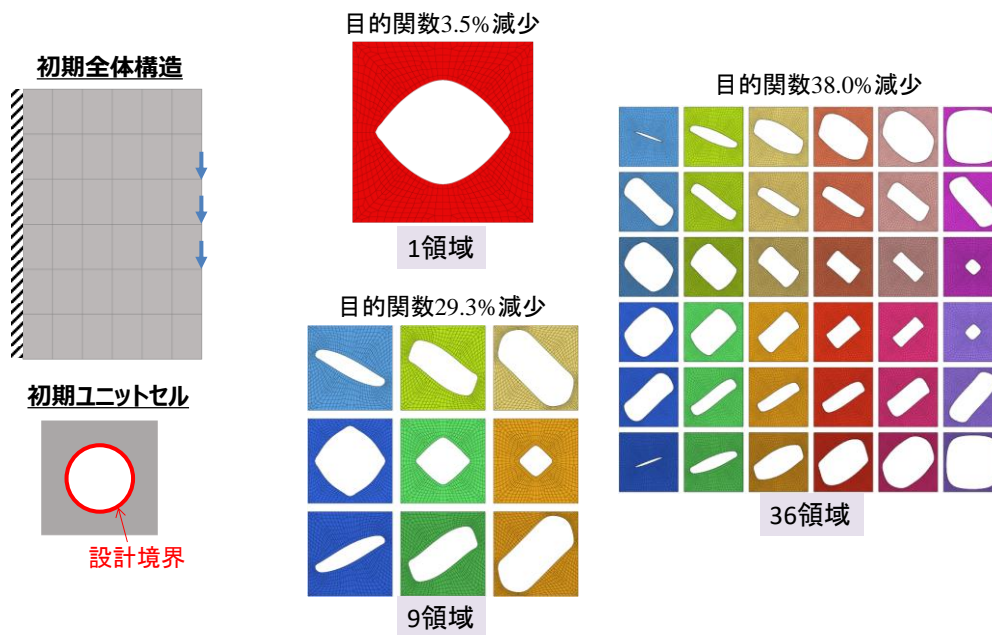


図5 ポーラス構造の最適化の計算例

⑦マイクロポーラスとリブ最適化手法の統合(図6)

④と⑥の統合化を行い、リブ内部の適切な位置に、適切な形状の孔が配置できることを可能にするシステムを構築した。現在、種々の例題へ適用しながらプログラムの検証を行った。

⑧成果の学会発表

これまでの成果を講演論文にまとめ、日本機械学会の設計工学システム部門講演会と計算力学部門講演会で発表した。

⑨ポーラスリブの試作と検証実験

開発した手法を基本的な構造に適用し、得られたポーラスリブ構造を3Dプリンターで製作し、手法の有効性を確認した。

⑩種々のポーラスリブの計算、試作と検証実験

⑨と同様、開発した手法を種々の構造に適用し、得られたポーラスリブ構造を3Dプリンターで製作し、得られた構造の性能を確認した。

⑪まとめと論文作成、投稿

得られた成果の一部を機械学会論文集に投稿し、受理された。

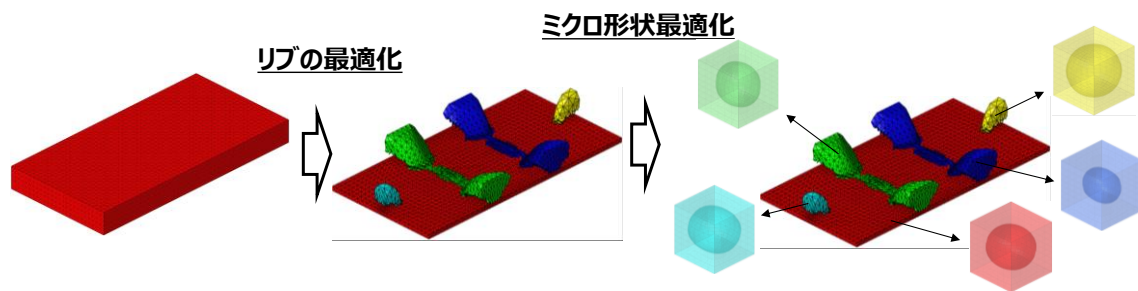


図6 リブとマイクロポラス構造の統合最適設計の計算例

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

薄板構造の補剛や補強方法としてリブ構造は多く用いられている。本研究で開発した手法はリブを用いた補剛構造設計問題の汎用的解法のため、リブ設計が必要なあらゆる工業製品へ幅広く適用できる。本手法により、無駄のないリブ構造が創生されるため、軽量化が達成され、経済性や環境に対してもやさしいグリーン構造設計が可能となる。

本研究では補剛(剛性問題)を対象としたが、振動や強度設計問題への応用も可能である。また、技術者不足による技術伝承の問題も社会問題となっており、人の経験や勘によらず、リブの配置と形状設計を支援する汎用システムとなる。基本設計は本システムに任せ、設計者はより創造的な仕事への注力が可能となる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで構造最適化の分野の研究、特に形状最適化手法の開発とその構造設計への応用の研究を幅広く行ってきた。ソリッド、シェル、骨組、膜構造体といったあらゆる構造形態体を対象に、剛性、強度等の力学特性を評価関数にした形状最適設計法の研究において、多くの手法の提案を行ってきた。ここ数年はマイクロ構造の形状最適設計に興味を持ち、マクロ構造と組み合わせたマルチスケール構造設計法の研究に取り組んできた。今回の研究はその一環として、典型的な補強設計法のリブ構造に注目し、これまでの研究を基にリブの創生手法を提案した。従来の格子状リブではなく、応力状態に応じてベース構造上の適切な位置にリブが創成され、最適な幅と高さに成長していく手法はこれまでにない手法である。更にその内部には最適な孔形状のポラス構造が生成されるが、これも新たな手法である。この最適化問題を無限自由度のノンパラメトリック設計問題として定式化し、解探索を行うため、多自由度で高性能なリブ形状が生成される。これも従来の自由度限定のパラメトリック設計に変わる新しいアプローチである。これらの新手法の組合せにより、極限的な軽量リブ構造を実現する研究は革新的である。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

国内学会で研究発表を行い(2回)、学術雑誌に論文投稿を行い、それぞれ講演論文集、論文として出版。

- ① 山根大輝, 下田昌利, 軽量高剛性設計のためのポーラスリブ構造のマルチスケール最適化, 日本機械学会第33回設計工学・システム部門講演会(2023.9.19-21, 金沢).
- ② 山根大輝, 下田昌利, ミクロ構造のマルチスケール形状最適化における領域分割の影響について, 日本機械学会第36回計算力学講演会(2023.10.25-27, 豊橋).
- ③ 山根大輝, 下田昌利, ソリッド構造体の形状とトポロジーの同時最適化(設計領域変動型トポロジー最適化手法の提案), 日本機械学会論文集, Vol. 90, No. 933 (2024), 23-00289, DOI: 10.1299/transjsme.23-00289.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

- ・トポロジーと形状最適化手法の統合によるリブ最適化手法と最適化システム
- ・ミクロポーラス構造の形状最適化システム
- ・前述の講演論文2編, 論文1編  
(<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>)

### (2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし.

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 豊田工業大学(トヨタコウギョウダイガク)

住 所: 〒468-8511

愛知県名古屋市天白区久方2-12-1

担 当 者: 豊田工業大学 教授 下田昌利(シモダマサトシ)

担 当 部 署: 固体力学研究室(コタイリキガクケンキュウシツ)

E - m a i l: [shimoda@toyota-ti.ac.jp](mailto:shimoda@toyota-ti.ac.jp)

U R L: <http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>