

補助事業番号 2019M-141

補助事業名 2019年度 生体模擬の超軽量マイクロ骨組構造創成のための最適設計手法
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

工業製品の要求仕様や機能を最小限の重量で実現させるため、それを構成する構造は軽量であることが常に求められる。運動するものについては特に重要となる。要求される力学特性を満たす軽量構造を追求していくとその極限は骨組構造になる。生体中の骨や翼、羽脈、コルクや海綿体、珪藻等、生物が進化の過程で超軽量なマイクロ骨組構造を獲得していることから裏付けられる。超軽量化には多数の空孔の適切配置が重要であり、本研究では生体骨の内部構造を模擬したマイクロ骨組構造の形態最適化(寸法&形状&材料トポロジー最適化)手法の開発で実現する。

既に数多く利用されている骨組構造ではあるが、その使用や形態は限定的であり、その殆どは格子やトラス状に直線部材を規則的に組み合わせられたものである。それに対し、生体のマイクロ骨組構造を模擬し、自由曲線を許容し、立体的に組み合わせた部材を自由に変動させ、更に断面寸法や材料も自由に変動可能とすると極限的な軽量化が期待できる。

こうしたアイデアが実現できない背景には超大規模設計問題の扱いとその解法にある。これを解決する手法の候補として、有限要素法と数理計画法を利用した構造最適化手法があり、国内外で多くの研究が報告されている。汎用的な手法であるが、設計変数の著しい増加は解の探索を困難にするため、限られた設計変数の問題に限定される。極端な設計変数の増加は解の探索を困難にする他、最適化の過程で発生する不適切メッシュに基づく数値不安定問題も生じさせる。本研究で3次元の超軽量マイクロ骨組構造の創成を狙いとしており、形状と断面寸法、及び材料を自由に変動させる超大規模設計問題となるため、これを従来の離散系の手法で解決することは不可能である。

これらの問題を同時に解決しようとするのが本研究である。離散化された状態からの定式化ではなく、変分法に基づいた分布系(関数空間)で定式化を行い、関数空間のスカラーとベクトル変数用勾配法で解を求める。得られる最適性条件や解探索は解析的には行えないため、有限要素法による数値解析を利用する。これにより理論的に無限自由度の設計が可能となる。超軽量化と力学特性の両立を達成するマイクロ骨組構造の最適設計に関する関数空間での解法はこれまでにない新たな手法の提案であり、それに基づく汎用最適骨組設計システムも合わせて開発する。

2 研究の目的と背景

社会の持続的発展のため、省資源や環境負荷低減の観点から工業製品を構成する構造体の従来にない劇的な軽量化が求められており、その設計では力学特性との両立が要求される。

運動を伴う乗り物系の構造設計では特に厳しい要求が課せられる。非適切な設計は環境を害すばかりでなく、安全をも脅かす。一方、若い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、超軽量化と力学特性の両立を実現するための最適設計手法とそれに基づく計算機を利用した汎用システムの開発が望まれている。

要求する力学特性を実現する超軽量最適構造が得られる最適化手法とそれを実行する計算機を利用した汎用設計支援システムの開発を目的とする。あらゆるマイクロ骨組構造設計への適用が可能で、効率的、且つ低コストな構造設計を実現する。問題の関数空間での定式化と感度関数の導出、及び解探索手法がキーとなる。開発する手法は設計者を悩ます設計変数のパラメータ化を不要とし、生体由来の力学的に自然で超軽量なマイクロ骨組構造の自動創生を可能とする。得られた形状の試作と評価試験を繰り返し、開発した手法の妥当性と効果の検証を行う。

3 研究内容

生体模擬の超軽量マイクロ骨組構造創成のための最適設計手法

(<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>)

本研究は8つの主プロセスからなり、各プロセスでの実施内容を以下に示す。

①先行研究の調査

本研究に関連する先行研究を調査し、各手法の特長や適用例をまとめた。同時に、本研究で開発する手法の新規性を確認した。この調査結果は学会発表論文へ反映させる。

②問題の定式化と感度関数の導出

剛性問題(変位コントロール問題)を対象に、形状と断面寸法、及び材料の各変動を設計変数とし、体積と平衡方程式を制約条件に設定し、関数空間(分布系)で最適化問題を定式化した。ラグランジュ乗数法、随伴変数法を利用し、トポロジー最適化にはGSIMP法を利用して変分法と物質導関数法に基づき、最適性条件と感度関数を理論的に導出した。

③形状&トポロジー&寸法最適化用の関数空間勾配法の構築

随伴方程式の数値解法と感度関数の数値解法を構築すると共に、形状とトポロジーと寸法の設計変数からなる大規模最適設計問題を解くための関数空間の勾配法を構築した。最適形状変動量分布はベクトル変数を決定する関数空間のH1勾配法で求め、正定値テンソルには弾性テンソルを利用する。最適断面寸法分布と材料分布(トポロジー)はスカラー変数を決定する関数空間のH1勾配法で求め、正定値テンソルには熱伝導テンソルを利用する。

④最適化システムの構築

C言語でコーディングし、ワークステーション上へ実装した。汎用性と実用性を考慮し、Cプログラムと商用FEMソフトと組み合わせたシステムを開発した。そのコントロールはMS-DOS上のバッチ処理コマンドで行う。

⑤基本マイクロラス構造への適用による手法の検証

構築した手法と最適化システムの検証のため、基本的な2次元と3次元のマイクロラス構造へ適用し、不具合を修正しながら、最終的にその有効性が確認できた(図1).

⑥供試品の製作と評価試験による有効性の検証

計算で得られた構造の1つを3Dプリンターで試作し、評価試験を実施。狙い通り剛性が向いていることを確認。購入した形状測定機を用い、自然界のマイクロ骨組構造を調査、観察すると共にモデリングも実施。最適化計算のための初期形状に適用。

⑦大規模マイクロラス構造への適用による実用性の検証

開発した手法を設計変数の数が非常に多い(従来手法では解けないレベルの)マイクロラス構造へ適用し、その有効性と実用性を確認(図2, 図3).

⑧大規模マイクロラス構造の製作

⑦で得られた3次元構造を3Dプリンターで製作し、複雑な構造を目視で確認し、狙い通りの構造となっていることを確認。

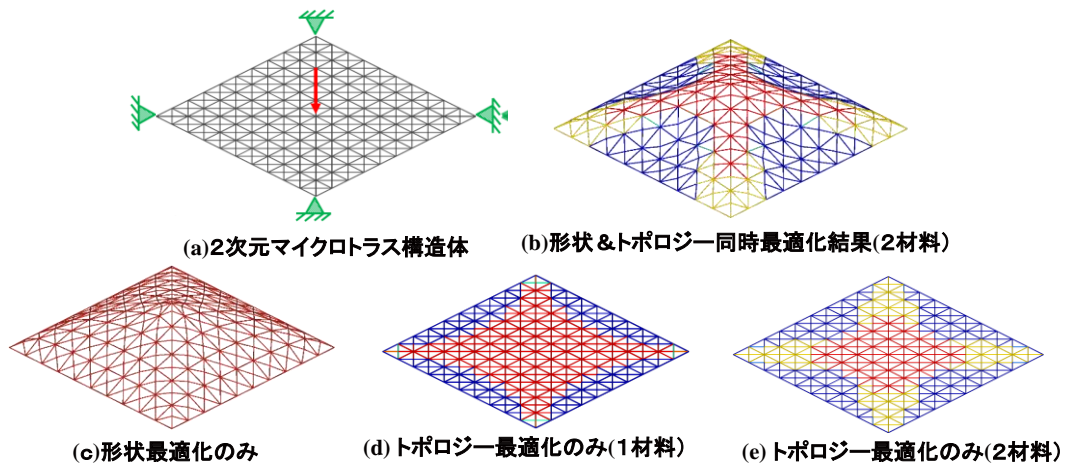


図1 2材料から成る2次元マイクロラス構造体の形状&トポロジー同時最適化結果

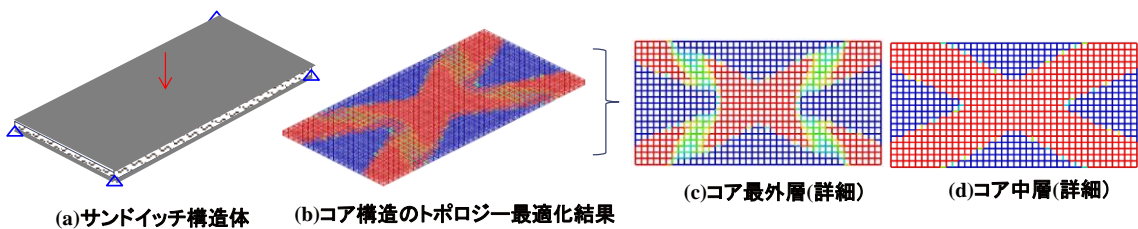


図2 3次元マイクロコア構造を有するサンドイッチ構造体のトポロジー最適化結果

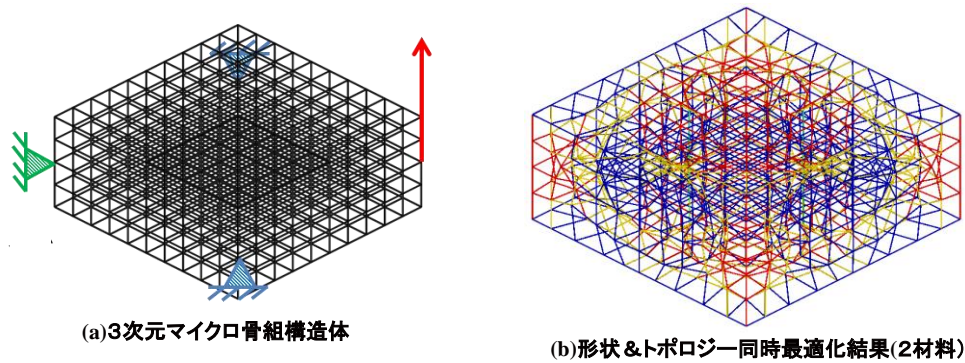


図3 3次元マイクロ骨組構造体の形状&トポロジー同時最適化結果(2材料)

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

- ・社会の持続的発展のため、省資源や環境負荷低減の観点から工業製品に対する軽量化の要求は尽きることなく、特に、運動を伴う乗り物系の構造設計では特に厳しい要求が課せられるため、開発した手法が活かされる。
- ・最近では3Dプリンターの開発が飛躍的に進み、金属用3DプリンターやCFRP用3Dプリンターも実用レベルになってきており、従来の樹脂用3Dプリンターも高精度化されてきている。今後、こうした3Dプリンターの更なる性能向上に伴い、マイクロ骨組構造の需要が増し、工業製品の設計に幅広く利用されてくるものと考えられる。
- ・今回は剛性問題を対象としたが、強度や座屈、振動設計問題等への応用が可能である。また、板や膜と組み合わせた構造へも展開可能である。更に、得られた最適化構造をデータベース化し、人工知能技術と組み合わせることにより、大規模設計問題の効率的な構造決定と新たな構造の創生も期待できる。
- ・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、超軽量化と力学特性の両立を実現するための最適設計手法とそれに基づく計算機を利用した汎用支援システムとなる。基本構造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。
- ・本研究はデザインと情報工学、構造力学及び応用数学の学際的な研究に位置づけられ、今後の幅広い分野への展開も期待できる。

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、多くの構造最適設計の解法やシステムの開発を行ってきた。基本となる2次元弾性体から始め、3次元ソリッド、3次元シェルの寸法、形状、トポロジー最適化問題の解法を示した。これらの解法を大規模3次元骨組構造へ発展させたのが本研究であり、複数の材料からなる骨組構造体の形状とトポロジー、及び寸法の同時最適化手法を開発した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

国内学会(2回)と国際会議(1回)で研究発表を行い、講演論文集として出版.

- ① 谷祥輝, 下田昌利, 宮下直章, セル構造体の形状・トポロジー最適化, 日本機械学会2019年度年次大会(2019.9.8-11, 秋田).
- ② 谷祥輝, 下田昌利, H¹勾配法に基づく形状・トポロジー最適化を利用したマイクロフレーム構造設計法, 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会講演論文集(2019.9.25.-27, 宮城県仙台市)
- ③ Shoki Tani and Masatoshi Shimoda, Shape and Topology Optimization of Micro-frame Structures, The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics 2019(APCOM 2019), (2019-12, Taipei)

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

- ・超軽量マイクロ骨組構造創成のための最適設計手法理論と最適化システムを開発
- ・前述の講演論文集3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

申 請 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

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