

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19768

研究課題名（和文）複合領域システム統合設計法に基づくマルチスケール構造最適化

研究課題名（英文）Multiscale structural optimization based on integrated multidisciplinary system design method

研究代表者

泉井 一浩（Izui, Kazuhiro）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：90314228

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジー最適化において、マクロスケールの形状だけでなく構造物のミクロスケールの形状に対しても自由度の高いトポロジー最適化を応用して材料設計を行うことができれば、通常のバルク材では得られないような特殊な性能を持った材料を用いた高機能なデバイスを設計することができるようになることが期待される。本研究ではミクロスケールの問題を複数変数の場合と無限個の変数をもつトポロジー最適化の場合の両者について、代理モデルを導入した非線形特性のモデル化の方法についても検討を進めた。ガウス関数に基づいた放射基底関数を用いたモデル化により代理モデルを構築し、その代理モデルを利用した、マルチスケール最適化の実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械構造やデバイスのマクロスケールの形状を最適化するだけでなく、ミクロスケールの材料設計を行うことで、バルク材では実現できない特異な性能をもつ製品を設計できる可能性がある。ここでは、そのような製品を試行錯誤ではなく計算で求めるための方法として、トポロジー最適化に着目し、マクロ・ミクロの両者を同時に最適化するマルチスケールトポロジー最適化法の基礎理論の構築を行った。

研究成果の概要（英文）：By using topology optimization simultaneously in the macroscale structural shape design and the microscale material design, we can expect to design high-performance devices using materials with special properties that cannot be obtained with ordinary bulk materials. In this research, we investigated methods for modeling nonlinear characteristics by introducing surrogate models for the results of microscale topology optimization problems. We constructed a surrogate model using radial basis functions based on Gaussian functions, and also constructed a method to optimize macroscale structural shape design method using optimization using that surrogate model.

研究分野：設計工学

キーワード：マルチスケール最適化 ミクロ構造 マクロ構造 トポロジー最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジー最適化は、構造の外形形状だけでなく、穴の数までのような形態をも変更可能な非常に自由度の高い構造最適化法であり、この方法は自動車産業や機械産業などにおける構造力学の分野の実設計に幅広く利用されるようになってきている。このトポロジー最適化において、マクロスケールの形状だけでなく構造物のミクロスケールの形状に対しても自由度の高いトポロジー最適化を応用して材料設計を行うというマルチスケールを考慮した最適設計を行うことができれば、通常のパルク材では得られないような特殊な性能を持った材料を用いた高機能なデバイスを設計することができるようになると期待される。このために、ミクロ構造の最適設計と、マクロ構造のトポロジー最適設計を同時に実施するための方法論の構築を行う必要がある。

2. 研究の目的

ミクロ構造の最適設計と、マクロ構造のトポロジー最適設計を同時に実施するための方法論の構築において、ミクロ構造の最適化の変数がマクロ構造の特性の関係を表現する必要がある。このとき、均質化法を用いれば、ミクロ構造のもつマクロ構造特性を求めることができるため、マルチスケールの最適化は可能である[1]-[3]。しかしながら、その適用範囲は限定的であり、一般の構造最適化問題においてマルチスケール最適化を実施するためには、ミクロ構造の数値解析の結果をデータベース化し、マクロ特性と結びつける方法の構築が必要である。ここでは、データベース化するための方法、および、そのデータベースを用いたマクロ構造のトポロジー最適化の方法について、それぞれ開発を行う。

3. 研究の方法

- (1) 一般的なトポロジー最適化問題では、構造の各部位の有無を密度やレベルセット法を用いて表現し、その表現を制御する変数を、構造全体の性能を向上させるように変化させることで最適化を実行する。マルチスケールのトポロジー最適化においては、各部位のミクロ構造を表現する設計変数を、構造全体であるマクロスケールの性能を向上させるように変化させることで、最適化を行うことが目的となる。そのためには、従来の均質化法に基づくマルチスケールトポロジー最適化で行われるように、マクロスケールでのトポロジー最適化において、ミクロ構造を表現する設計変数を直接扱う方法がある。本研究においてもこの方法を踏襲することでマルチスケールトポロジー最適化の方法論を構築する。
- (2) ミクロスケールの構造の設計変数とマクロ特性との関係性を表現する方法を構築する。従来の均質化法に基づく方法では、周期的なミクロ構造がもつマクロ特性を漸近展開に基づいて導出するが、非線形性の取り扱いなど、題の特性により適用性に限界がある。そこで、ミクロ構造とその構造が持つマクロ特性の関係性を、複数のサンプル点においてミクロスケールの数値解析に基づき、データベース化を行うことで構築することとする。データベース化を行うにあたり、ミクロスケールの計算を可能な限り少数に抑制しながら、設計領域全体を表現する必要がある。そのための方法として、区分線形補間を用いる方法もあるが、その方法ではマクロ特性の連続性が保証されず、マクロスケールのトポロジー最適化を実施するにあたり、収束性に不都合が生じる可能性がある。そこで、逐次近似最適化等で用いられる放射基底関数(Radius Basis Function: RBF)に基づくマクロ特性の補間方法を導入し、マクロ特性の連続性を保証しながら最適化を行う方法を構築する。

4. 研究成果

- (1) ミクロスケールの構造がもつマクロ特性のデータベース化

本研究では熱流体問題を対象として取り上げる。熱流体問題では、デバイス内を流れる流体によって取り除かれる熱量を最大化し、流体の流れにくさを表すエネルギー損失量を最小化することを目指す。ミクロスケールの構造設計では、構造の寸法を表す設計変数を導入する。この設計変数が表すミクロ構造とマクロスケールの特性との関係をデータベースにより表現する。

マクロスケールではナビエ・ストークス方程式に基づく、ブリンクマンモデルにより、トポロジー最適化問題を定式化する。ただし、通常のブリンクマンモデルでは、仮想的な密度を変数としてマクロ特性である抵抗係数を表現するというを行っている。一方で、本問題では、ミクロ構造の具体的な形状をミクロ構造設計変数により表すことを行っているため、ブリンクマンモデルにおける、密度に相当する量を、ミクロ構造設計変数により表す必要がある。さらに、マクロスケールの熱伝導率、マクロスケールの熱伝達率についても同様の手続きを踏む必要があり、したがって、3つのマクロ特性の量を表すデータベースを構築することとした。

本研究では、サンプル点を20点程度に抑制し、それぞれの点において、設計変数が表すマイクロ構造について、マイクロスケールの数値解析を実行し、抵抗係数、熱伝導率、熱伝達率を評価した。さらにRBFによる代理モデルを構築した。この際、それぞれの特性は、マイクロ構造の形状により大きく変動するため、特性値を対数変換した値を補間するという手続きを提案し、RBFの代理モデルの補間の精度が向上することを確認した。

以上の手続きにより、20点程度という、非常に少数の回数のマイクロスケールの数値解析により、マイクロ構造のもつマクロ特性の表現が可能となった。図1に抵抗係数の代理モデルの例を示している。

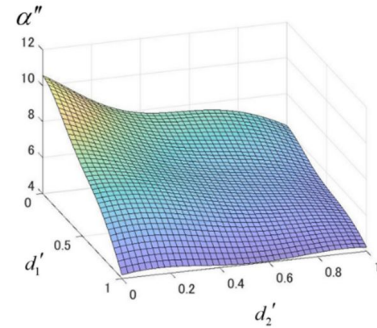


図1 RBFに基づくマイクロ特性のデータベース

(2) データベースを用いたマクロスケールのトポロジー最適化

上で構築したマイクロ構造がもつマクロ特性のデータベースを用いてマクロスケールのトポロジー最適化を行う方法を構築した。

マクロスケールのトポロジー最適化では、構造の各部位でのマイクロ構造の形状の最適化を行う。このとき、すでに構築したデータベースを用いれば、各部位のマイクロ構造の設計変数を直接マクロ構造のトポロジー最適化で求めることが可能となる。求めた設計数の分布を図2に示す。ここでは2つの設計変数でマイクロ構造を表現する場合について、その解を示している。

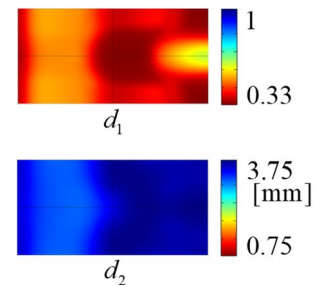


図2 マクロスケールのトポロジー最適化の例

以上のように、本研究ではマイクロスケールのもつ構造の特性を、データベース化することにより、マルチスケールのトポロジー最適化を実行できることを示すことができた。今後は、マイクロスケールの設計においてより自由度の高い表現方法を用いる場合などの、本手法を拡張することが課題となる。さらには、得られたトポロジー最適化の結果を可視化する方法について、より一般性のある形で議論する必要がある。

<引用文献>

- [1] X. Wang, H. Liu, Z. Kang, K. Long, and Z. Meng, "Topology optimization for minimum stress design with embedded movable holes," *Computers and Structures*, vol. 244, p. 106455, 2021
- [2] J. Gao, Z. Luo, L. Xia, and L. Gao, "Concurrent topology optimization of multiscale composite structures in matlab," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, 05 2019.
- [3] S. Ozguc, L. Pan, and J. A. Weibel, "Topology optimization of microchannel heat sinks using a homogenization approach," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 169, p. 120896, 2021

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 計0件（うち招待講演 0 件 / うち国際学会 0 件）

1. 発表者名
2. 発表標題
3. 学会等名
4. 発表年

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	泉井 一浩 (IZUI Kazuhiro) (90314228)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	西脇 眞二 (NISHIWAKI Shinji) (10346041)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

国際研究集会	開催年
--------	-----

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 尾関達大, 佐藤綾美, 石田尚之, 古田幸三, 泉井一浩, 西脇眞二, 茂木春樹, 島田貴弘
2. 発表標題 熱流体問題を対象としたマルチスケールトポロジー最適化手法の開発
3. 学会等名 第35回計算力学講演会(CMD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 泉井一浩
2. 発表標題 トポロジー最適化：現在と将来
3. 学会等名 Mate2024 第30回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム, 横浜, 2024年1月23日-24日（招待講演）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西脇 眞二 (Nishiwaki Shinji) (10346041)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------