

希薄気体効果を利用した負の熱拡散を可能とする

ナノ複合材料のトポロジー最適化

京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

山田 崇恭

要旨

気体分子の平均自由行程の大きさが無視できない微小スケールにおいて、温度場により流れ場が誘起されることが知られている。本研究では、この希薄気体流れに着目し、この現象の逆、すなわち、流れ場により温度差が生じる現象（負の熱拡散）を生じさせるナノ構造体の創成を目指して、希薄気体流れ場のトポロジー最適化法を構築する。具体的には、ボルツマン輸送方程式により希薄気体流れをモデル化し、最適構造設計理論に基づき、所望の現象を生じさせるナノ複合材料を創成可能な最適設計アルゴリズムを構築する。

1. 研究の背景と目的・目標

気体分子の平均自由行程の大きさが無視できない微小スケールにおいて、温度場により流れ場が誘起されることが知られている。希薄気体流れと呼ばれるこの現象は、近年、大気圧下においても実証され、注目を集めつつある。本研究では、この希薄気体流れに着目し、この現象の逆、すなわち、流れ場や圧力勾配により温度差が生じる性質（負の熱拡散）を持つ特異な人工材料（メタマテリアル）の創成設計法の開発を目的とした、希薄気体流れ場の最適設計法の構築を行う。例えば、特定のナノ構造を持ち温度が一定の構造物について考える。このとき、構造物に外力等を与えることにより、構造体内部に圧力勾配が生じる。その結果、熱が特定の場所に集中する構造体の実現を目指す。このような人工材料が開発できれば、特定の圧力勾配や外力を利用した加熱冷却が可能となり、超高性能あるいは新しい機能を持つ革新的な熱流体デバイスの実現が可能となる。さらには、ペルチェ効果を用いた冷蔵庫等と同様に、これまでにはない画期的な熱機関の創成も期待できる。また、この方法論の拡張により、廃熱を利用した新たなエネルギー回収装置の開発も可能となる。すなわち、本研究は、次世代の分散型エネルギー供給システムの一部を担う、画期的なエネルギー変換システムの開発における基盤技術であり、持続的発展可能な社会システムに実現に向けた重要課題の一つであると言える。

本研究では、自由自在に加熱冷却機能を持つ流体熱メタマテリアルの提唱と、その具体的な設計法の構築を目指して、希薄気体効果を考慮可能な構造最適化法の開発を行う。

2. 結果と考察

希薄気体効果を考慮したトポロジー最適化法の開発に成功した。構築した方法論の妥当性の検証として、希薄気体効果によって生じる特異な材料構造（熱流体メタマテリアル）の創成設計を行った。

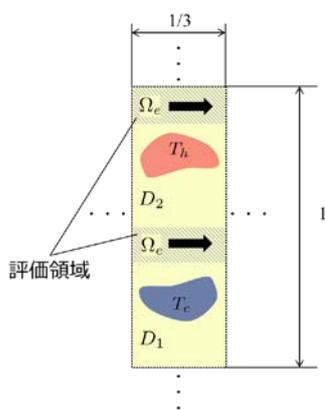


図 1 設計対象とする単位材料構造

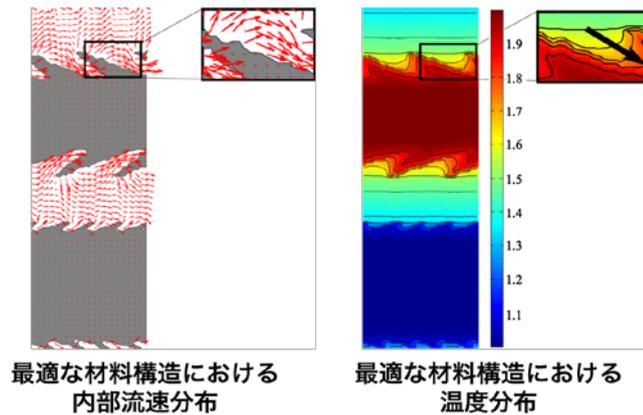


図 2 提案手法により得られた最適設計解

図 1 に設計対象とする材料の単位構造を示す．領域 D_2 と領域 D_1 では異なる温度を持つ構造とし，それにより評価領域 Ω_e で流れ場が誘起される材料構造の創成を行う．すなわち，材料内部の温度勾配から内部の空隙に流れ場が発生する材料の設計を行う．なお，重力に影響は十分に小さいと仮定することで，生じる流れ場が熱対流ではないことを明確にしておく．すなわち，得られた最適材料構造内部における流れは，材料構造のスケールと気体の平均自由行程が同程度において生じる希薄気体流れである．図 2 に得られた最適材料構造，生じる内部流れ場及び内部温度分布を示す．図に示すように，内部の温度勾配により，所望の希薄気体流れが生じていることが確認できる．

3. まとめと課題

希薄気体効果により流れ場が誘起される材料構造のトポロジー最適化法を構築した．すなわち，ボルツマン輸送方程式により，希薄気体流れ場を解析し，温度場により所望の流れ場が誘起される材料構造の創成設計法を構築した．さらには，数値解析例により，提案手法の有効性と妥当性の検証を行った．

今後の課題として，実際に得られた材料構造を製造し，実験及び計測をしてその有効性を検証する必要がある．次に，負の熱拡散係数を持つ材料構造の実現のためには，構造領域内部における熱拡散よりも大きな効果を得る必要がある．すなわち，構造内部の熱伝導場と希薄気体流れ場を同時に解析し，さらには，温度勾配を目的関数とした最適設計法の構築が必要となる．

また，本研究では，製造方法を考慮せずに，所望の目的を達成する材料構造をトポロジー最適化により創成設計した．より複雑な目的に設定した場合には，製造が困難な構造が得られる可能性がある．製造法についても検討をし，製造工程から要求される幾何学的制約を考慮した拡張を行う必要もある．

成果発表

日本機械学会論文集，国際会議，国内学会講演会において研究成果を公表した．