

ラティス構造を活用した伝熱機器の トポロジー最適化

矢地 謙太郎

大阪大学 大学院 工学研究科

1 はじめに

ヒートシンクや熱交換器に代表される伝熱機器は、電子機器、空調、輸送機器、エネルギー機器といった幅広い産業分野で不可欠な部品であり、その性能は最終製品の信頼性および省エネルギー性を大きく左右する。近年、デバイスの高発熱化および小型化が急速に進行する中で、従来の設計指針では達成が困難な高効率・高性能の熱制御が求められるようになってきている。とくに限られた体積でいかに効率よく熱輸送性能を高めるか、という課題は要求レベルが急速に高まっており、これを解決する新たな設計技術の開発が強く求められている。

筆者はこれまで、熱流体問題に対するトポロジー最適化の研究を推進してきた。トポロジー最適化は、構造の外形や位相（トポロジー）までも変化させながら、物理法則に基づいて最適構造を探索する数値設計手法である。これにより、新規性の高い熱流路配置や高比表面積構造を自動生成することが可能となる¹⁾。

しかし、トポロジー最適化により得られる構造は一般に複雑であり、従来の機械加工では具現化が困難であった。この問題を根本的に解決しうる技術として近年注目されているのが積層造形（Additive Manufacturing：AM）技術である。AMは材料を積層しながら三次元形状を形成するため、切削加工では困難な内部流路、複雑な多孔質構造、三次元ラティス構造などを直接造形できる点に優れる。とくに金属AMの発展により、伝熱性能向上に有利な高比表面積の三次元ラティス構造を製造可能となり、伝熱機器の高性能化に対する応用が期待されている。

一方で、ラティス構造は高比表面積を得られる半面、流動抵抗が増大しやすく、圧力損失の増加が性能の制約要因となる。また、ラティスユニットの種類や幾何寸法によって熱伝達・流動特性が大きく異なることが知られており、人の勘や経験に頼る設計では適切なバランスを得ることが難しい。

そこで本研究では、既往研究²⁾をベースに均質化法とトポロジー最適化を融合し、複数のラティスユニットを対象とするラティス構造最適化手法の構築を目的とした。本手法は、各ラティスユニットを代表体積要素（RVE）として扱い、その熱流体物性を均質材料として定義することで、数値解析の高効率化と安定性を確保するものである。そして、ラティス形状の不均一分布を可能とすることで、従来の均一ラティス構造では実現が難しかった熱性能の高度化をめざす。具体的な例題として、強制対流ヒートシンクを対象に提案手法の有効性を検証する。

2 研究の方法

本研究では、均質化法とトポロジー最適化を組み合わせたラティス構造最適化法を構築した。まず、図1に示すラティスユニット（CC, BCC, FCC）のRVE解析により、透過率や空隙率といった物性値を算出し、均質化モデルを構築した。次に、その均質化モデルを用いた上で底面温度の平均値最小化を目的としたトポロジー最適化を実施した。流れ場にはBrinkman-Darcy方程式を用い、勾配ベースの数値計画法によりラティス密度を更新した。そして得られた結果から各セルの密度に応じてラティスの梁径を決定し、不均一ラティス構造を再構成した。

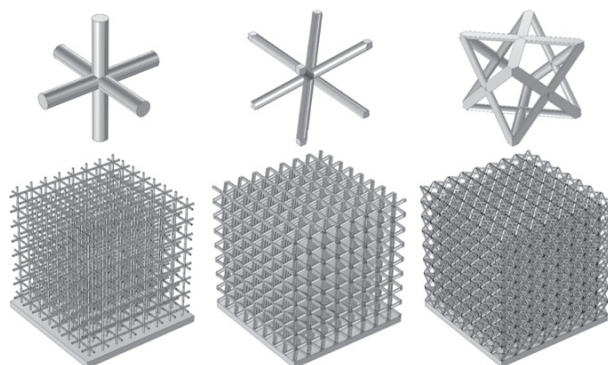


図1 ラティスユニット（左からCC, BCC, FCC）³⁾

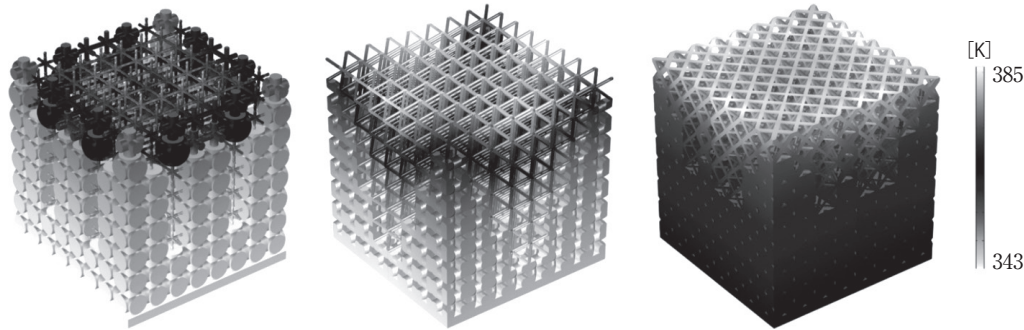


図2 最適化された不均一ラティス構造の温度分布の一例 (左からCC, BCC, FCC)⁴⁾

3 主な研究成果

三種類のラティスユニットを対象とし、各ユニットの特性が最適構造および性能に与える影響を検討した。以下にその概要を示す(詳細は文献3,4)を参照されたい)。

まず均質化されたラティスの密度分布最適化により得られた構造には共通的な傾向が確認された。すなわち、流入部付近では圧力損失を抑えるために低密度領域が選択され、中央部では伝熱性能を高めるために高密度のラティス構造が形成された。この傾向は全てのユニットパターンにおいて一貫しており、本手法が熱移動と流動抵抗の空間的バランスを自動的に調整する最適なラティス構造として機能していることを示すものである。

一方、各ユニットパターンが示す最適構造の差異は明確であった。FCCユニットを用いた場合、図2に示すように最適化されたラティス構造は温度の低減において最も高い性能を示した。しかしその一方で圧力損失の増大は顕著であった。これはFCC構造が高い比表面積を持つため熱交換性能に優れる一方、流路が複雑化して流体抵抗が大きくなるという特徴と符合する。これに対し、BCCユニットは圧力損失を適度に抑制しながらも十分な熱伝達性能を保持しており、熱性能と流動性能の両面で最もバランスのよい結果を示した。とくに高レイノルズ数領域においては、BCCラティスによる不均一構造が、均一ラティス構造を上回る総合性能を示すことが明瞭となった。CCユニットについては、圧力損失が最も低く安定した流路が形成される一方、熱伝達性能はBCCやFCCに比べて劣り、熱輸送の改善量もやや小さい傾向にあった。

さらに、本研究の結果から、均質化モデルの限界と課題も明らかとなった。例えば、最適化段階で均質化された連続体モデルは、実際のラティス構造に対して流れの局所的な剥離や渦生成などの非線形効果を基本的に再現できない。とくにFCCユニットでは、最適化後にラティス構造へマッピングした際、均質化モデルで予測し

た圧力損失と実際の数値解析結果との間に大きな差異が生じた。この差異の一因として、隣接セル間でラティスの梁方向が急激に変化する場合、局所的な流れの干渉が均質化モデルでは十分に表現されない点が挙げられる。この現象はBCCやCCに比べてFCCでより顕著であり、ユニットセルの幾何学的複雑さが流動場に対して大きな影響を与えることを示唆している。

以上の結果から、本研究で構築したラティス構造最適化手法はまだ課題が残るものの、AM造形を前提とする伝熱デバイスに対して高い設計自由度と性能向上の可能性を提供することが明らかとなった。とくに今回のケースでは、BCCユニットを用いた最適構造は熱性能と圧力損失の両面で優れた総合性能を示しており、この結果は今後の産業応用に向けたひとつの指針になり得る。

4 おわりに

本研究では、複数のラティスユニットを対象にAMを前提とした伝熱機器のためのラティス構造最適化手法を構築し、熱伝達性能と圧力損失を両立する不均一ラティス設計を実現した。今後は、均質化誤差の低減、実機AM造形による性能実験、産業用伝熱機器への展開を進め、AM×トポロジー最適化の基盤技術の確立を目指す。

参考文献

- 1) 近藤継男, 矢地謙太郎, 西脇眞二, トポロジー最適化の基礎: 弾性体ならびに熱流体関連工学諸問題への応用のために, コロナ社, 2024.
- 2) Takezawa, A., Zhang, X., Kitamura, M., Optimization of an additively manufactured functionally graded lattice structure with liquid cooling considering structural performances, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.143 (2019), p.118564.
- 3) Kikuchi Y., Seki K., Yaji K., Fujita K., Saito T., Ushijima K., Homogenization-based design for non-uniform lattice structures in air-cooled heat sinks: A comparative study of unit cell patterns, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, No.IDETC2025-168776, Anaheim, 2025.
- 4) 菊池優斗, 関佳吾, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄, 斎藤龍記, 牛島邦晴, ラティス構造ヒートシンクのユニットパターンの選定と密度分布の探索による最適設計, 第30回計算工学講演会, No. A-06-02, 大宮, 2025.