

流れの高精度近似手法と構造最適化に基づく 高性能水冷傾斜機能ラティス構造の開発

竹澤 晃 弘*

Development of Variable Density Lattice for Effective Liquid Cooling Based on Porous Flow Approximation and Structural Optimization

Akihiro TAKEZAWA*

The development of cooling devices is important for many industrial products, and the lattice structure fabricated by additive manufacturing is expected to be useful for effective liquid cooling. However, lattice density should be carefully designed for an effective arrangement of coolant flow. In this research, we optimize the lattice density distribution using a lattice structure approximation and the gradient method. Fluid flow is approximated by deriving effective properties from the Darcy–Forchheimer law and analyzing the flow according to the Brinkman–Forchheimer equation. Thermal conduction and convection are also approximated as a weakly coupled problem. We use a simple basic lattice shape composed of pillars, optimizing only its density distribution by setting the pillar diameter as the design variable. Flow rate under a fixed pressure and average temperature are treated as objective functions. Through quasi 2D studies including experiment, we validated the proposed methodology.

1. 導入

近年、次世代の加工技術として金属積層造形（3D プリンティング）が注目を集めている。特に、複雑構造を三次元的に形成可能なことから、水路を構造内部に自在に形成し、高効率冷却を可能にする等、熱交換技術に大きなブレイクスルーをもたらしている。他方、金属積層造形特有の高機能構造として内部に中空構造を周期的に設けたラティス構造がある。このラティス構造内の空孔に冷媒を流し込めば、従来の水路という概念を取り払った、巨大な表面積を活かした極めて高効率の熱交換が実現できる期待がある。ただし、均一なラティスを配置しただけでは流れの生じる箇所と淀む箇所が生じるため、金型内部に冷却に効果的な流れを生み出すには、ラティス形状を箇所によって適切に変化させた、いわゆる傾斜機能材料のような構造にする必要がある。そこで本研究では、多孔質体の流れを近似的に表現する Brinkman–Forchheimer 方程式を、代表体積法（RVE 法）による巨視的流れ抵抗の導出と組み合わせることでラティス構造に適用し、ラティス構造内の流れを巨視的・近似的に計算する手法を構築する。そして、ラティス密度分布最適化法と組み合わせ、高効率冷却を目的とした最適傾斜機能ラティス構造の実現を目指す。

2. 最適設計と考察

多孔質体の流れを近似的に表現する理論として、Darcy の法則があり、この法則は単位体積の多孔質体を単位時間に流れる液体の流量（Darcy 流速）は圧力勾配に比例するという法則で、多孔質体の流れを巨視的・平均的に扱う手法である。しかし、ダルシーの法則はレイノルズ数が極めて小さな（10 以下程度）の流れ、すなわち流速が極めて遅いか、多孔質体のスケールが極めて小さく粘性が支配的かという流れにのみ適用可能であり、流体による冷却の場合には適さない。それに対し、ダルシーの法則を拡張し、高レイノルズ数の流れまで適用可能な Darcy–Forchheimer の法則がある⁽¹⁾。また、この法則に基づき、多孔質内の流れをナビエ・ストークス方程式に似た形で表現した、Brinkman–Forchheimer の方程式があり⁽¹⁾、本研究ではラティス流れの近似計算に用いる。

Brinkman–Forchheimer の方程式においては、浸透率と Forchheimer の抵抗係数が巨視的な物性値として必要になり、それぞれ対象のラティスに関して計算する必要がある。本研究では代表体積（Representative Volume Element, RVE）法を用いてそれらを計算する。まず、ラティスの単位セルをモデル化し、ナビエ・ストークスの方程式に基づく流体領域を導入し、圧力勾配を生じさせる境界条件を与え、それによって生じる Darcy 流速を求める。いくつかの圧力勾配に対し対応

2023年3月1日 受理

* 豊田理研スカラー

早稲田大学理工学術院基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科

する Darcy 流速を求めたら、それらの関係式を二次の曲線で近似的に求める。この二次曲線の係数から浸透率と Forchheimer の抵抗係数が求まる。

なお、本研究では準二次元の冷却構造を考えているため、ラティスの基準形状として単純な円柱を考える。円柱の径の大小がラティスの疎密に対応する。基準寸法は 5mm とし、円柱の直径を 1mm から 4mm の間で変化させる。なお、最適化アルゴリズムでの取扱を容易にするため、いくつかの直径について浸透率と Forchheimer の抵抗係数の代表値を計算し、近似曲線で補間し、最適化アルゴリズム中で用いる。以上の理論に基づき、ラティス構造内の Darcy 流速を求めた後、それを熱伝導・熱伝達方程式に代入し、温度分布を求める。ラティス構造の熱伝導率は均質化法で求める。

本研究での設計対象はラティスを内包する外寸 $72 \times 52 \times 7$ [mm] ので板状構造であり、の下部から熱流束 400kW を作用させ、また、冷却水の流入口と流出口を設け、圧力差 500Pa で冷却水を流入させる。そして、上面の平均温度を最小化する問題と、冷却水の流量を最大化する問題を考える。なお、解析においては十分に時間が経過した定常状態を考える。そして、設定した目的に向けて、単位ラティス構造構成する円柱の直径を設計変数として最適化を行う。また、金型等のある程度剛性が必要な対象を想定し、ラティス構造の体積を一定値以上にするという制約条件を導入する。なお、材質は 316L ステンレス鋼とする。

得られた最適ラティスの詳細ジオメトリを同体積の均一図 1(a) に示す。温度最小化を対象とした場合は、壁沿いに細かいラティス構造が配置され、それが冷却水を構造全体に誘導する役割を果たしていると推察される。対して、流量最大化を対象とした場合は流入口から流出口まで短絡するようなラティスレイアウトとなっている。また、解析で得られた流量は均一、温度最小化、流量最大化ラティスでそれぞれ 518, 666, 730 [ml/min] であり、流量が確かに最大化されていることが確認できる。また、表面温度分布を図 2(b) に示す。温度最小化ラティスは全体的に均一な温度となり、最大温度が著しく低いことが確認できる。更に、解析と同条件で実験を行い、表面温度をサーモグラフィーで計測した結果を図 1(c) に示す。最大・最小値に誤差はあるものの、それぞれのラティスはシミュレーションと近い温度分布を示しており、最適化した構造の妥当性が実験においても確認された。また、熱電対で 12 点の温度を厳密に計測し、解析結果と比較した際も平均誤差は概ね 10% 以下となり、同様に妥当性が確認できた。今後の課題としては、冷却構造の三次元化やラティス内流れの詳細な検討が挙げられる。

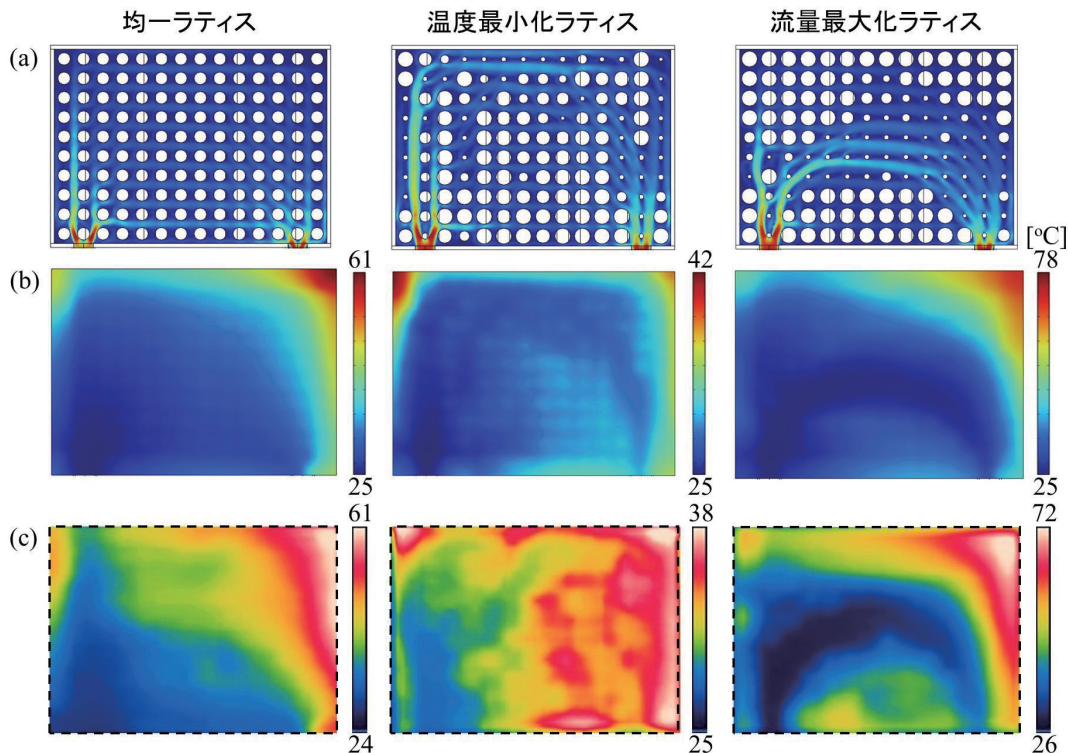


図 1 最適解とそれに対する解析および実験結果。

(a) 最適ラティスジオメトリと流速分布解析結果, (b) 表面の温度分布解析結果, (c) サーモグラフィーでの表面温度計測結果。

REFERENCE

1) R. Hill, *Proc. Roy. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.*, **326** (1972) 131.