

京都大学	博士（工学）	氏名	矢 地 謙 太 郎
論文題目	Topology optimization using the lattice Boltzmann method and applications in flow channel designs considering thermal and two-phase fluid flows（格子ボルマン法を用いたトポロジー最適化と熱および二相流を考慮した流路設計への応用）		
（論文内容の要旨） 本論文は、種々の流路デバイスの抜本的な性能向上、あるいは革新的な流路構造の創成を目的として、内部流れの流路抵抗最小化問題、熱と流体の連成を考慮したヒートシンクの熱交換性能最大化問題、および異なる不混和性の溶媒を利用した液液抽出マイクロ流路の抽出性能最大化問題を対象としたトポロジー最適設計法に関する研究について論じた結果をまとめたものであって、6章からなっている。 第1章は序論であり、構造最適化の分類、および流体関連分野における構造最適化に関する研究の発展の経緯について概観し、本研究の目的および論文の構成について述べている。 第2章は、トポロジー最適化の歴史と基本的な考え方、および流体問題への展開方法について概説している。次に、流体場の解析に有限要素法を用いた流路構造のトポロジー最適設計法について説明している。そしてその方法を拡張することにより、熱流体問題を対象としたトポロジー最適設計法を提案し、数値例により、トポロジー最適化の熱流体問題への有効性を示している。 第3章では、流体場の解析に格子ボルツマン法を用いた新しいトポロジー最適設計法を提案している。格子ボルツマン法は、完全陽解法であることから並列計算に適した数値解析手法であると共に、質量および運動量保存性に優れていることから、混相流といった複雑に界面が変化する流体場の解析に適した手法として近年注目を集めている。これらの特徴から、格子ボルツマン法をトポロジー最適化に導入することにより、従来法において困難であった大規模かつ複雑な流体場を対象とした最適化問題への展開が期待できる。本章ではその基礎的な方法論の構築を目的として、内部流れの流路抵抗最小化問題を定式化し、流体場と随伴場の解析に格子ボルツマン法を用いることで、設計感度を効率的かつ正確に算出可能な最適化アルゴリズムを構築している。随伴場を格子ボルツマン法で解く方法は随伴格子ボルツマン法と呼ばれ、その基本的な考え方は、連続系に基づくボルツマン方程式を用いて感度解析を行うことにより、連続系に基づく随伴方程式を導出し、それを格子ボルツマン法で離散化して解くことにある。この方法は定式化上、格子ボルツマン法における単純な境界条件しか扱えないという問題があり、トポロジー最適化への展開は成されていなかった。そこで本研究では、随伴格子ボルツマン法を離散ボルツマン方程式に基づき定式化することで、様々な境界条件を導入できる方法論を提案している。この方法で得られた設計感度の妥当性を検証するために、直接法によって得られた数値差分近似との比較を行い、提案手法によって効率的かつ正確に設計感度を算出可能であることを示している。そして、2次元および3次元の流路設計問題を対象とした数値例を示し、提案手法の妥当性と有効性を検証している。 第4章では、第3章で提案した手法を、熱移動を伴う流体場のトポロジー最適化問題に展開している。具体的には、ヒートシンクの熱交換性能最大化と、圧力損失の最大値を規定する制約条件により最適化問題を定式化し、流体場と熱移動を格子ボルツマン法で解析する最適化アルゴリズムを構築している。数値例により提案手法の妥当性			

京都大学	博士（工学）	氏名	矢 地 謙 太 郎
と有効性の検証を行った結果、幾何学的に複雑な流路構造が得られることを確認している。これは、許容される圧力損失の制約値に応じて、熱交換が促進されるように可能な限り表面積が大きい流路が最適解として優位になるためと考察している。 第5章では、第3章および4章で構築した方法論を液液二相流の最適化問題へ展開し、化学分析において広く利用されている液液抽出マイクロ流路のトポロジー最適設計法を構築している。液液抽出は不混和性の二つの溶媒を用いることで、一方の溶媒に含まれる成分をもう一方の溶媒へ選択的に分離する操作である。本研究では、液液抽出を移流拡散方程式に帰着させる方法と、二相流の界面を捕捉するためのフェーズイールド法とを組み合わせ最適化問題を定式化し、格子ボルツマン法により液液抽出と二相流を解析する最適化アルゴリズムを構築している。数値例によって提案手法の妥当性と有効性を検証した結果、液液抽出が十分に完了するように、波状の流路が最適構造として得られることを確認している。また、圧力損失の最大値を規定するパラメータを変更することにより、圧力損失と抽出性能の相反関係を考慮しながら液液抽出マイクロ流路の最適設計を行うことが可能であることを示し、提案手法の有効性を示している。 第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、種々の流路デバイスの抜本的な性能向上、あるいは革新的な流路構造の創成を目的として、内部流れの流路抵抗最小化問題、熱と流体の連成を考慮したヒートシンクの熱交換性能最大化問題、および液液抽出マイクロ流路の抽出性能最大化問題を対象としたトポロジー最適設計法の構築に関する研究についてまとめたものである。得られた主な結果は次のとおりである。

1. 流体場の解析に格子ボルツマン法を用いたトポロジー最適設計法を提案した。内部流れの流路抵抗最小化問題を定式化し、流体場と随伴場の解析に格子ボルツマン法を用いることで、設計感度を効率的かつ正確に算出可能な最適化アルゴリズムを構築した。数値例として、有限要素法を用いた先行研究との比較を行い、同様の結果が得られることを示した。さらに、レイノルズ数および格子解像度に対する最適構造の依存性の検証を行い、提案手法の妥当性と有効性を示した。

2. ヒートシンクの熱交換性能最大化を目的として、熱と流体の連成を考慮したトポロジー最適設計法を構築した。熱流体問題におけるトポロジー最適化の有効性を検証するため、まず従来法に基づき有限要素法を用いた最適設計法を構築し、数値例により幾何学的に複雑な流路構造が熱交換性能を向上させるために重要であることを示した。そして、流体場と温度場、およびそれらに対応する随伴場の解析に格子ボルツマン法を用いた方法論を構築し、数値例にて、熱交換性能と圧力損失が相反関係にあることを示した。

3. 化学分析で広く利用されている液液抽出マイクロ流路の抽出性能最大化を目的として、二相流を考慮したトポロジー最適設計法を構築した。抽出性能を定量的に評価するための目的関数を設定し、液液抽出を移流拡散方程式に帰着させる方法と、二相流の界面を捕捉するためのフェーズフィールド法とを組み合わせた最適化問題を定式化した。そして、二相流と液液抽出、およびそれらに対応する随伴場を格子ボルツマン法で解析する最適化アルゴリズムを構築した。数値例により、波状の流路が最適構造として得られることを示した。さらに、抽出性能と圧力損失の相反関係を考慮しながら流路の最適設計が可能であることを示した。

以上のように本論文は、主に格子ボルツマン法を用いた新しいトポロジー最適化に基づき、各種流路デバイスの最適設計法を構築し、数値例により提案手法の有効性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。