

京都大学	博士 (工学)	氏名	久保世志
論文題目	Topology optimization for the duct flow problems in laminar and turbulent flow regimes (層流および乱流の内部流れを対象としたトポロジー最適化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、流体機械の革新的な内部流路構造の創出による性能向上を目的として、層流場における分岐を伴う定常非圧縮粘性流体の内部流れの流量制約条件を考慮した流路抵抗最小化問題、プレート型マイクロリアクタの流量均一性を実現するためのマニホールド流路構造設計法、および乱流場における内部流れの流路抵抗最小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、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、最適化手法の分類と流体関連問題の最適化に関する研究の進展、および流体問題を対象としたトポロジー最適化手法に関する研究について概観し、本研究の目的および論文の構成について述べている。</p> <p>第2章は、レベルセット法に基づくトポロジー最適化の定式化、および流体問題への展開方法について説明している。次に、層流場における分岐を伴う内部流れを対象に、規定の流路出口において所望の流量を得るための制約条件を考慮した最適化問題を定式化している。このとき、最適化問題を解く過程で数値的に安定して流量制約条件を満足させるため、流量制約関数に対するラグランジュの未定乗数の決定法を提案している。すなわち、流量制約関数の残差に応じて指数関数により未定乗数を動的に決定する方法を提案している。そして、数値例として単一の入口に対して二つの出口を有する場合、および入口と出口を各三つ有する場合の流路抵抗最小化問題を対象に、数値的に安定して最適化問題を解き、規定の流量制約条件を満足する最適流路構造が得られることを示し、手法の有効性を検証している。</p> <p>第3章では、プレート型マイクロリアクタの反応効率を向上させるためのマニホールド流路形状の最適設計法を提案している。プレート型マイクロリアクタは複数の反応流路を有し、反応流路間の流量均一性が高いほど反応効率が高くなることが知られている。そこで本章では、第2章で構築した流量制約を考慮したトポロジー最適化手法を応用し、各反応流路の流量均一性を制約条件として考慮した流路抵抗最小化を目的とするマニホールド形状のトポロジー最適設計法を構築している。そしてZ型およびU型の代表的なプレート型マイクロリアクタを数値例として、それぞれの入口および出口マニホールド形状の流路構造を最適化することにより、流量均一性が飛躍的に向上し流路抵抗の小さい最適マニホールド形状が得られることを確認している。</p> <p>第4章では、乱流場を想定した内部流れのトポロジー最適化手法を提案している。流体問題に対する従来のトポロジー最適化手法は、流体抵抗となる仮想的な外力を導入し、抵抗が大きい領域を物体領域、無視できるほど抵抗の小さい領域を流体領域として表現する手法が用いられている。そのため、物体と流体の界面には陽的に非すべり条件を課すことのできないという根本的な課題を含んでおり、壁面近傍での流体の粘性エネルギー散逸が層流に比べて大きくなる乱流では、最適化問題において流路抵抗を過小評価する恐れがある。また、仮想的な外力が比較的大きくなるように設定しても、物体内部に弱い流れが生じ、薄い隔壁を貫通する非物理的な現象が生じることも指摘されている。そこで本章では、物体と流体の界面に陽的に非すべり条件を課すことのできる最適化手法の構築を目的として、レベルセット法と埋め込み境界法を組み</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	久保世志
<p> 合わせた乱流のトポロジー最適化手法を提案している。レベルセット法を用いることにより、物体と流体の界面を明瞭に表現でき、埋め込み境界法と組み合わせることによって、物体と流体の界面に対して陽的に非すべり条件を課すことができる。さらにレベルセット法を用いることで、壁面からの距離の算出が容易となり、乱流場の数値解析において壁関数を導入することを可能としている。この方法に基づき、本研究では、$k-\epsilon$ および $k-\omega$ 乱流モデルを用いた定常非圧縮粘性流れの流路抵抗最小化問題を定式化し、乱流粘性係数を定数として扱う Frozen turbulence の仮定のもと設計感度としてトポロジー導関数を用いたトポロジー最適化アルゴリズムを構築している。そして、本提案手法で導入した埋め込み境界法の妥当性を検証するため、平行平板間の流れを対象に、実際の壁面と埋め込み境界法を用いて表現した壁面に対して壁面近傍の速度分布を評価し、計算格子を増やすことで、実際の壁面に非すべり条件を課した場合と同等の速度分布が埋め込み境界法を適用した場合に得られることを確認している。さらに、流れに対して計算格子を 45 度傾けた場合にも壁面近傍の速度分布は変化なく、最適化の過程で逐次更新される任意の界面形状に対して埋め込み境界法が有効であることを検証している。さらに、レイノルズ数 10,000 の乱流場を仮定した内部流路の流路抵抗最小化問題に本手法を適用した結果、数値不安定を生じず最適な流路構造が得られることを示している。また、薄い隔壁を有する U 字流れの流路抵抗最小化問題においても、非物理的な貫通のない妥当な最適構造が得られることを示し、提案手法の有効性を確認している。 </p> <p> 第 5 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。 </p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、流体機械の革新的な内部流路構造の創出による性能向上を目的として、層流場における分岐を伴う定常非圧縮粘性流体の内部流れの流量制約条件を考慮した流路抵抗最小化問題、プレート型マイクロリアクタの流量均一性を実現するためのマニホールド流路構造設計法、および乱流場における内部流れの流路抵抗最小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. 複数の出口において流出流量を規定することのできる流路構造のトポロジー最適設計法を提案した。流量制約関数に対するラグランジュの未定乗数の決定法として、規定流量からの残差に応じて、指数関数により値を動的に更新する方法を構築した。数値例として、複数の出口に対して規定流量を満足し、流路抵抗が最小となる物理的に妥当な最適構造が得られることを示した。

2. プレート型マイクロリアクタの反応流路の流量均一性を高めることを目的として、流量制約条件を考慮したマニホールド形状のトポロジー最適設計法を構築した。数値例として、U型およびZ型のマイクロリアクタを対象に、各反応流路の流量が均一になるような流量制約条件を課した流路抵抗最小化を行い、十分な流量均一性を有する最適構造が得られることを示した。

3. 乱流の定常非圧縮粘性流れのトポロジー最適化手法として、物体と流体の界面上に非すべり条件を陽に課することのできる、レベルセット法と埋め込み境界法を組み合わせ最適設計手法を構築し、トポロジー導関数を用いた乱流場の最適化アルゴリズムを提案した。平行平板間の流れの数値例により、十分な格子解像度があれば埋め込み境界近傍の速度分布は、実際の壁面近傍と同等の速度分布となることを示した。さらに、内部流れの流路抵抗最小化問題により、高レイノルズ数の乱流場においても数値不安定なく最適な流路構造が得られることを示した。また、薄い隔壁のあるU字流れの流路抵抗最小化問題では、隔壁を貫通することのない物理的に妥当な流路構造が得られることを示した。

以上のように本論文は、分岐を伴う内部流れに対して規定流量を制約した場合の最適流路構造設計法を構築するとともに、乱流場へも適用可能な内部流れのトポロジー最適設計法を提案しており、学術上、実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31年1月15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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。