

京都大学	博士 (工学)	氏名	LI HAO
論文題目	Level set-based topology optimization of thermal fluid-structure systems (熱流体・構造連成問題を対象としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、機械や航空機産業等において最も重要な設計課題の一つである熱・流体機器の性能向上を目的に、構造・熱・流体が連成する大規模なマルチフィジックス問題を対象とした、トポロジー最適設計法の構築について論じている。本学位論文は7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景としてトポロジー最適設計法に関する研究の発展と課題について概観し、本論文の目的と構成について述べている。</p> <p>第2章では、レベルセット法と反応拡散方程式に基づき、大規模設計への対応を可能とする汎用性の高いトポロジー最適化設計法の構築について説明している。すなわち、大規模設計問題を効率よく解く方法として、ボディフィッティッドアダプティブメッシュ法とスケラブル領域分割を用いた完全分散型フレームワーク環境をトポロジー最適化において構築している。そして、そのフレームワークを様々な平均コンプライアンス最小化問題に適用し、大規模な構造最適化問題を極めて多くの有限要素を用いて効率よく解くことができることを検証している。</p> <p>第3章では、流体と構造が弱連成する問題を対象に、トポロジー最適設計法を展開可能とする方法論について説明している。トポロジー最適化において、流体・構造連成状態を取り扱うには、最適化過程により移動する流体相と固体相の境界を追跡しながら、各相を別々の状態方程式により解析する必要がある。この問題を解決するため、流体と構造の境界を明確に表現できるボディフィッティッドメッシュを導入することにより、レベルセット関数による陰的に表現された境界表面から、陽的に表現された境界表面を生成することを可能としている。さらに、その明示的な境界生成法と大規模な非線形問題を解くためのマルチグリッドプリコンディショナー法との統合化を行うことにより分散型有限要素解析法を構築し、大規模3次元連成物理問題を解くことを可能にしている。そしてその方法論を、様々なエネルギー損失最小化問題に適用し、妥当な最適構造が得られることを検証している。</p> <p>第4章では、自然対流により冷却するヒートシンクの構造設計を目的に、熱・流体連成問題への展開を可能とする方法論について説明している。すなわち、まず、自然対流問題を効率よく解くために、ビジネス近似したナビエ・ストークス式と熱輸送を示すエネルギー式を強連成させた熱流体モデルを構築している。その構築したモデルに基づき、熱伝導をする構造と自然対流をする流体の境界を陽的に表現できるボディフィッティッドメッシュを用いた数値解析法を構築し、それにより得られた結果を、他の数値計算法による計算結果、実験結果と比較することにより、解析法の妥当性を検証している。さらに、非定常な解析法により、異なるグラスホフ数における流体の挙動を考察・検証している。そして、トポロジー最適化において、性能の低い局所解に陥らないようにするため、物理量の遷移を非線形 RAMP(Rational Approximation of Material properties)スキームで補間する方法を採用し、開発した数値解析法と統合化することにより、自然対流を対象としたトポロジー最適設計法を構築している。そして、この方法を様々なヒートシンクの構造設計に適用し、方法論の有効性を検証している。さらに、特定のグラスホフ数において得られた最適構造は、そのグラスホフ数にお</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	LI HAO
<p>る流体場において、冷却性能を最大化できることも確認している。</p> <p>第 5 章では、大規模な流体問題に対して、短時間で効率よく最適構造を導出することを目的に、種々の分散型非構造アダプティブメッシュ法に基づくトポロジー最適設計法を構築している。すなわち、まず流体と構造の境界を表現する方法として、等方性、異方性、ボディフィッティッドの 3 つの異なるアダプティブメッシュ法を検討している。その検討結果から、等方性、異方性メッシュは流体相と固体相の境界における物理量の遷移を Darcy-Brinkman モデルにより内装近似できる層流問題に有効で、ボディフィッティッドメッシュは、流体相と固体相の境界を、壁関数を用いて厳密に評価できるため、乱流問題に有効であることを見出している。そして、これらのアダプティブメッシュ法に基づくトポロジー最適化の方法を構築し、その方法論を、層流下の簡単な空気力学問題と強制熱対流による冷却問題に適用し、妥当な最適構造を得られることを検証するとともに、異方性メッシュにより最も精度よく最適構造を求められることを見出している。</p> <p>第 6 章では、生体分解可能なインプラントの構造設計において利用される多孔質構造のトポロジー最適設計法を構築している。この基本的な考え方は、PDE(Partial Differential Equation)フィルターを用いて、材料の有無を表現する特性関数の局所平均値に対して最大許容体積率の制約を課すことにある。この幾何制約設定法により、従来法の最適化を効率化する際の課題であった近隣有限要素の位置情報取得を必要とせず、非構造メッシュ上の「局所平均」密度を計算することができ、大規模問題への適用を可能としている。さらに局所平均密度の最大値を求める目的関数を、p-norm 関数で近似することにより、微分可能な最適化問題として定式化している。そしてこの幾何制約設定法と定式化に基づきトポロジー最適化の方法論を構築し、様々な大規模 3 次元構造設計問題に適用し、その有効性を検証している。</p> <p>第 7 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>			

氏 名

LI HAO

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、熱・流体機器の性能向上を目的に、構造・熱・流体が連成する大規模なマルチフィジックス問題を対象とした、トポロジー最適設計法の構築について論じた結果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) レベルセット法と反応拡散方程式に基づき、大規模設計への対応を可能とする汎用性の高いトポロジー最適化の方法を構築した。すなわち、大規模設計問題を効率よく解く方法として、スケラブル領域分割を用いた完全分散型フレームワーク環境をトポロジー最適化において構築するとともに、種々の大規模構造設計問題に適用し、方法論の有効性を示した。
- (2) 流体と構造が弱連成する問題を対象としたトポロジー最適化の方法論を構築した。すなわち、有限要素解析には、流体と構造の境界を明確に表現できるボディフィッティッドメッシュを導入し、大規模な非線形問題を解くためにマルチグリッドプリコンディショナー法を採用することにより、大規模3次元連成物理問題を解くことを可能にする方法論を構築した。そしてその方法論を、エネルギー損失最小化問題に適用し、方法論の有効性を示した。
- (3) 自然対流により冷却するヒートシンクの構造設計を目的に、熱・流体連成問題を対象としたトポロジー最適化の方法論を構築した。すなわち、まずブジネスク近似したナビエ・ストークス式と熱輸送を示すエネルギー式を強連成させた熱流体解析モデルを構築し、その解析モデルに基づきトポロジー最適化の方法論を開発した。そして、その方法論により冷却性能を最大化可能な最適構造を導出し、方法論の有効性を示した。
- (4) 大規模な流体問題に対して、短時間で効率よく最適構造を導出することを目的に、種々の分散型非構造アダプティブメッシュ法に基づき、トポロジー最適化の方法論を構築した。そしてその方法論を、層流下の簡単な空気力学問題と強制熱対流による冷却問題に適用し、妥当な最適構造を得られることを示した。
- (5) 大規模な多孔質構造からなる最適構造を導出するため、PDE フィルターにより幾何学的制約を課すトポロジー最適設計法を構築した。この幾何制約設定法の導入により、従来法の最適化を効率化する際の課題であった近隣有限要素の位置情報取得を必要とせず、非構造メッシュ上の「局所平均」密度を計算することができ、大規模問題への適用を可能とした。そしてその方法論を、様々な大規模3次元生構造設計問題に適用し、その有効性を示した。

以上のように本論文は、構造・熱・流体が連成する大規模なマルチフィジックス問題を対象に、トポロジー最適設計法の構築を行い、さらに種々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、令和4年7月26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。