

氏名	伊賀 淳郎
----	-------

(論文内容の要旨)

本論文では、熱負荷の作用する構造物の性能を最適設計手法に基づき抜本的に改善することを目的として、種々の熱の影響を含んだ問題、すなわち、形状最適化による熱応力最小化、トポロジー最適化による熱拡散最大化、および熱拡散と剛性の最大化に関する構造最適化手法について論じている。本学位論文は六章からなり、得られた主な結果は以下のとおりである。

第一章では、研究の背景と目的について述べている。機械構造物の最適設計を目的として、従来より提案されている、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の歴史と、各々の特徴を説明している。次に、熱問題に対する構造最適化の過去の研究事例を紹介し、これまでに提案されている手法の問題点を指摘している。そして、本研究の目的を、構造最適化手法に、従来の機械荷重に対する剛性最大化に加えて、構造物の温度低減の考え方を導入することにより、剛性向上と温度低減の両方の要求を満足する構造を創出できる新たな手法を提案することとしている。

第二章では、エンジン部品の耐久性確保を目的とした、形状最適化を用いた熱応力最小化手法を提案している。形状最適化は、形状変化が大きい場合には、有限要素が極端に歪み、大きな近似誤差が生じてしまうという問題点や、熱応力問題を厳密に取り扱うには、形状変更に伴う温度変化を考慮しなければならないという問題点があった。これに対して本章では、最適化時の形状更新にメッシュモーフィング技術を適用し、さらに、熱・構造の連成解析を行うような最適化手法を構築している。最後に、本手法をシリンダヘッドの燃焼面肉厚分布最適化問題に適用し、物理的に妥当で適切な最適解が得られることを示している。さらに、形状最適化における初期形状設定に実験計画法を用いることで、局所最適解を回避し、より最適な構造が得られることを示している。

第三章では、熱伝導体の性能を、形態変化も含めて改善をすることを目的とした、トポロジー最適化手法を提案している。最初に、均質化法により、均質化された熱拡散テンソルを導出し、これと、材料分布の連続性を仮定した節点補間によるトポロジー最適化に基づき設計空間の緩和を行うことで構造最適化法を構築している。また、節点補間による設計空間の緩和法を用いることで、固定設計領域内の構造部分に発生する内部発熱を、設計変数依存性を持つ境界条件として定式化している。さらに、全ポテンシャルエネルギーを目的関数とすることで、最適化問題を、Neumann 型と Dirichlet 型境界条件の両方に対して目的関数の最大化問題として扱えることを示している。そして、目的関数の感度と、逐次線形計画法を用いて最適化アルゴリズムを構築している。最後に、固定設計領域の境界辺に設定した温度固定、熱流束、熱伝達の境界条件に対して、熱流束および温度固定境界の範囲および熱伝達係数の値が最適構造へ与える影響を検討するとともに、内部発熱の設定方法と最適構造の関係についても検討を行い、本研究で提唱する方法論の妥当性を示している。

氏名	伊賀 淳郎
----	-------

第四章では、第三章で述べた熱拡散最大化問題に対する最適化手法を、構造境界上の熱伝達を考慮可能な手法へ拡張している。従来までに提案されているトポロジー最適化手法では、固定設計領域の境界上に設定する境界条件を前提とした最適化問題のみを対象としていた。そのため、最適構造を示す領域の境界を必要とする境界条件については、取り扱うことが難しいという問題点があった。この問題を解決するため、本章では、近似 Hat 関数を用いた構造境界の抽出方法および、構造境界への熱伝達条件設定方法を開発している。さらに、より現実的な境界条件設定することにより最適構造を得ることを目的として、上記の構造物表面上に設定する熱伝達境界条件に対して、代理モデルと物体表面形状の情報に基づき熱伝達係数を更新する、形状依存性を考慮した熱伝達係数設定手法を提案している。そしていくつかの簡単な数値例について、熱伝達係数や熱伝導率の値に応じて物理的に妥当な構造を得ている。また、熱伝達係数をより高い値に設定すると、より構造物の表面積が大きい最適構造が得られることを示している。さらに、代理モデルと物体形状の情報を用いることで、熱伝達係数が、形状依存性を持つ場合の最適構造も得ている。

第五章では、熱拡散と剛性の両方の性能向上を目的とした二目的構造最適化手法を提案している。熱、構造の各々の全ポテンシャルエネルギーに重み付け総和法を適用することで目的関数を定式化し、レベルセット法による形状表現を用いながら、フェーズフィールド理論に基づくエネルギー汎関数を導入することで、構造の形状変化だけでなく形態変化をも可能とした最適化手法を構築している。そして簡単な数値例により、熱拡散と剛性の両方の影響を考慮したグレースケールのない明確な最適構造を得ている。さらに本手法においては、陰的ではあるが明確な境界が存在するため、設計境界上に物理的な境界条件を課すことができる。そこで、上述の二目的最適化問題において、物体境界に熱伝達境界条件を設定し最適構造を求め、高い熱伝達係数を設定し、熱拡散性向上を優先するほど、熱源である熱流束境界条件近傍の表面積の増加により、放熱を促進させる最適構造が得られることを示している。

第六章は結論であり、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、構造物の熱負荷に関連する性能を抜本的に改善することを目的として、種々の熱の影響を考慮した問題に対する新しい構造最適設計法の研究成果について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. 形状最適化を熱構造連成問題に適用し、複雑形状を有する機械製品に対しても適用できる、より汎用性の高いパラメトリック形状最適化手法を提案した。本手法をエンジン部品の熱応力最小化問題へ適用し、物理的に妥当で適切な最適解が得られることを示した。さらに、形状最適化における初期形状設定に実験計画法を適用し、局所最適解回避に対する有効性を示した。

2. 均質化法と材料分布の連続性を仮定した設計空間の緩和法を用いて、熱伝導問題に対するトポロジー最適化を提案した。提案法では、全ポテンシャルエネルギーを目的関数とすることで、最適化問題を、Neumann型とDirichlet型境界条件の両方に対して目的関数の最大化問題として扱えることを示した。

3. 従来の密度法によるトポロジー最適化手法では、物体境界の特定が難しく、物体表面に定義すべき熱伝達境界条件を設定できない問題があった。本論文では、固定設計領域中の物体境界の抽出方法とその境界上への熱伝達条件設定を開発し、熱伝達問題にも適用可能なトポロジー最適化手法を提案した。さらに幾つかの設計例により、物理的に妥当な最適解が得られることを示した。

4. トポロジー最適化を、熱・構造の連成問題に適用し、熱拡散と剛性の向上をねらいとした二目的最適化手法を開発した。提案法では、熱、構造の各々の全ポテンシャルエネルギーに重み付け総和法を適用することで目的関数を定式化した。これにより熱拡散および剛性の双方の影響を考慮した構造最適化を可能にしている。さらに提案法では、物体境界上の熱伝達条件も考慮可能であり、構造問題において、熱伝達の影響がある場合に対しても、利用可能な方法であることを示した。

以上のように、本論文では、熱応力、熱拡散、熱拡散と剛性など、種々の熱の影響がある問題に適用可能な最適設計法を提案しており、学術上、実際上の価値が高い。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21年8月19日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行なった結果、合格と認めた。