氏　名	山 﨑　慎 太 郎

（論文内容の要旨）

本論文では，レベルセット関数と呼ばれるスカラー関数の零等位面によって構造物の形状を表現するレベルセット法を用いて，機械構造物を最適に設計するための方法について論じている．本論文は９章からなっている．

第１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唱されている，形状最適化法とトポロジー最適化法について紹介し，これらの方法の問題点について指摘している．次に，これらの問題点を解決しうる構造最適化法として，レベルセット法に基づく構造最適化法を紹介している．レベルセット法に基づく構造最適化法の発展について簡単に概観したのち，研究の目的を，有限要素法を用いてレベルセット関数を更新する新しい構造最適化法を提案し，平均コンプライアンス最小化問題，固有振動数最適化問題，熱伝導性能最大化問題へ適用することとしている．

第２章では，本論文で提案する構造最適化法における新しいレベルセット関数の更新手続きについて述べている．レベルセット関数を更新するためにはレベルセット方程式と呼ばれるハミルトンーヤコビ方程式を解く必要がある．本章では，レベルセット方程式を陽解法に基づき離散化し，更新前のレベルセット関数が常に零等位面に対する符号付き距離関数であることを保証することによりレベルセット方程式を単純化し，単純化されたレベルセット方程式を有限要素法を用いて離散化することにより，レベルセット関数を複雑な数値計算法を必要とせず，効率よく更新する方法を提案している．

第３章では，レベルセット関数の再初期化法について述べている．再初期化法とは，零等位面の位置を保持しつつ，レベルセット関数を符号付き距離関数にする数値計算技術のことである．本論文で提案する構造最適化法では，更新前のレベルセット関数が常に零等位面に対する符号付き距離関数であることを保証する必要があるため，レベルセット関数を更新する都度，レベルセット関数を再初期化する必要がある．しかしながら，従来より提案されている再初期化法は再初期化精度が十分でなく，さらに差分法に基づく方法であるため，非構造メッシュには対応できない．本章では，これらの問題を解決するため，有限要素法の形状関数を用いた補間に基づく，新しい幾何学的再初期化法を構築している．さらに，幾つかの数値例を用いて，従来法と比較して幾何学的再初期化法は十分に高い精度でレベルセット関数を再初期化できることを示している．

第４章では，本論文で提案する構造最適化法の最適化アルゴリズムについて述べている．最適化の基本的な流れは，単純化されたレベルセット方程式を有限要素法を用いて解き，レベルセット関数を更新する都度，レベルセット関数を幾何学的再初期化法を用いて再初期化するという処理の繰り返しである．レベルセット関数を更新すると，構造最適化問題の目的汎関数は改善されていき，目的汎関数の変動が収束した時に，最適構造が得られる．本論文で提案する構造最適化法では，レベルセット方程式を有限要素法と陽解法を用いて離散化し，レベルセット関数を更新するため，更新後のレベルセット関数が制約条件を満

氏　名	山﨑　慎太郎

たさない可能性がある．この問題を解決するために，本章において，制約条件を満たすようにレベルセット関数を修正する方法を提案している．さらに，得られる最適構造の初期構造に対する依存性を低減するために，トポロジカルデリバティブに基づく形態変更法を導入している．

第５章では，本論文で提案する構造最適化法を用いて，平均コンプライアンス最小化問題を定式化し，幾つかの数値例について最適構造を得ている．本章では，解析領域を構造メッシュで分割しても非構造メッシュで分割しても，同じ最適構造が得られており，本論文で提案する方法が，解析領域のメッシュ分割について制約の少ない，汎用性の高い最適化法であることを示している．また，トポロジカルデリバティブに基づく形態変更法を導入することにより，様々な初期構造から同じ最適構造が得られることを示している．さらに，三次元問題においても，物理的に妥当で適切な最適構造が得られることを示している．

第６章では，本論文で提案する構造最適化法を用いて，最低次の固有振動数最大化問題を定式化し，幾つかの数値例について最適構造を得ている．本章では，最低次の固有振動数最大化問題において，解析領域を構造メッシュで分割しても非構造メッシュで分割しても，同じ最適構造が得られることを示している．また，三次元問題においても，物理的に妥当で適切な最適構造が得られることを示している．

第７章では，本論文で提案する構造最適化法を用いて，特定の固有振動数を持つ構造を求める問題を定式化し，幾つかの数値例について最適構造を得ている．本章では，最低次の固有振動数について，特定の値を持つ構造を求め，目標値にほぼ一致する固有振動数を持つ構造が得られることを示している．トポロジー最適化法を用いて固有振動数が低い構造を求めた場合，グレースケールを含む構造が得られることが知られているが，本研究で提案する構造最適化法はレベルセット関数を用いて明確に構造物の形状を表現しているため，そのような問題は生じず，物理的に妥当で適切な最適構造が得られることを示している．また，三次元問題においても，物理的に妥当で適切な最適構造が得られることを示している．

第８章では，本論文で提案する構造最適化法を用いて，熱伝導性能最大化問題を定式化し，幾つかの数値例について最適構造を得ている．本章では，材料中の伝熱だけではなく，構造物表面からの放熱も考慮した最適構造を得ており，熱伝達係数をより大きな値に設定すると，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．

第９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．

氏　名	山﨑　慎太郎

（論文審査の結果の要旨）

本論文は，機械構造物の性能を抜本的に改善することを目的として，レベルセット関数と呼ばれるスカラー関数の零等位面によって構造物の形状を表現する，レベルセット法に基づく新しい構造最適設計法に関する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．レベルセット関数の更新に有限要素法を用いることにより，解析領域を非構造メッシュで分割しても最適化が行なえる，より汎用性の高い構造最適化法を提案した．有限要素法を用いた更新手続きは，最小二乗有限要素法などの複雑な数値計算技術を必要とせず，実装が容易であり，三次元構造の最適化も問題なく行なえることを示した．

２．提案法では，更新前のレベルセット関数が常に零等位面に対する符号付き距離関数であることを前提条件としているため，零等位面の位置を保持しつつレベルセット関数を符号付き距離関数に再初期化する必要があるが，従来の再初期化法は，再初期化精度が十分でなく，差分法に基づく方法であるため，有限要素法に基づくレベルセット関数の更新手続きには利用できないことを指摘した．この問題を解決するために，本論文では，新しい再初期化法を開発した．さらに，幾つかの数値例を用いて，新しい再初期化法を用いた場合，高い精度でレベルセット関数を再初期化できることを示した．

３．提案法を，平均コンプライアンス最小化問題，固有振動数最適化問題，熱伝導性能最大化問題へ適用し，最適構造を求めた．そして，提案法は，解析領域のメッシュ分割への依存性が少なく，三次元問題で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，従来法に比べ汎用性が高く様々な最適設計問題に適用可能な構造最適化法を提案しており，学術上，実際上の価値が非常に高い．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１月７日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行なった結果，合格と認めた．