（ 続紙 １ ）

京都大学	博士（工学）	氏名	山田　崇恭
論文題目	A Level Set-Based Topology Optimization Incorporating Concept of the Phase-Field Method（フェーズフィールド法の考え方を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化）		

（論文内容の要旨）

本論文は，レベルセット法に基づく形状表現と，フェーズフィールド法の考え方を用いた新しいトポロジー最適化手法を構築し，その方法論を，平均コンプライアンス最小化問題，コンプライアントメカニズムの最適設計問題，固有振動数最大化問題，熱拡散最大化問題へ展開する具体的方法について論じている．本論文は８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．構造最適化の歴史と分類について紹介した後，従来までに報告されているトポロジー最適化の方法，レベルセット法に基づく形状最適化の方法，およびそれらの方法の問題点を指摘し，本論文の目的はそれらの問題点を抜本的かつ本質的に解決する方法論を構築することであると述べている．

第２章では，フェーズフィールド法の考え方とレベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適化の方法論を述べている．最初に，区分的一定値関数のプロファイルをもつレベルセット関数を用いたレベルセット法による形状表現に基づき，トポロジー最適化問題を定式化している．これにより，従来法において問題となったグレースケールを本質的に排除している．次に，トポロジー最適化が本質的にもつ非適切性(ill-posed)の問題を克服する新しい正則化法として，フェーズフィールド法の考え方に基づく仮想的な界面エネルギーを導入する方法を提案している．さらに，その方法に基づき，仮想的な時間の導入により，トポロジー最適化問題を反応拡散方程式に帰着して解く方法について述べている．この方法では，設計変数としているレベルセット関数の感度解析において，トポロジカルデリバティブに基づく新しい方法を構築することにより，従来のレベルセット法に基づく構造最適化では不可能であった，物体領域に空洞領域が創出されるような形状形態の変更を可能としている．

第３章では，本論文で提唱する方法の最適化アルゴリズムと具体的な数値実装法について述べている．最初に，有限要素法と随伴変数法を用いた感度解析に基づく最適化アルゴリズムを示している．次に，レベルセット関数の更新に必要な反応拡散方程式の数値解法として，有限差分法と有限要素法を用いた新しい方法を提案している．また，レベルセット関数のプロファイルの制御方法としては，感度の正規化と単純な関数写像に基づく方法を構築することにより，従来法で必要とした再初期化処理などの複雑な数値計算技術を必要としていない．

第４章では，本方法論の平均コンプライアンス最小化問題への展開方法を示し，数値解析例により，提案する方法の有効性と妥当性の検証を行っている．これにより，提案する手法が自己随伴問題へ適用可能であることを示している．また，設計変数の初期値や有限要素の格子分割数などの設定パラメータが，得られる最適構造に与える影響が極めて低く，３次元の最適設計問題や，非構造格子を含む最適設計問題への適用も可能であることを示している．さらには，正則化係数により最適構造の幾何学的複雑さの設定が可能であることも示している．そして，正則化係数の

氏　名	山　田　崇　恭

考え方を拡張し，等断面形状制約が考慮可能な正則化項の設定法を提案し，その方法の有効性を数値解析により示している．

第５章では，本方法論のコンプライアントメカニズムの最適設計問題への展開方法を示している．まず，コンプライアントメカニズムの設計要件を満足する目的関数を，相互平均コンプライアンスの考え方に基づき定式化している．次に，仮想的なバネの設置に基づく剛性を考慮する方法に基づき，最適化問題を定式化している．さらに，２次元と３次元の数値解析例により，方法論の妥当性の検証を行っている．これにより，非自己随伴問題においても提案手法が適用可能であることを示している．また，等断面形状制約が考慮可能であることも示している．

第６章では，本方法論の固有振動数の最大化問題への展開方法を示している．本章では固有振動モードの入れ替りを考慮した目的汎関数の定式化を行い，さらに数値解析例により，方法論の妥当性の検証を行っている．これにより，固有値問題に対しても，提案手法が適用可能であることを示している．

第７章では，本方法論の熱拡散最大化問題への展開方法を示している．すなわち，まず全ポテンシャルエネルギーの考え方に基づき，熱伝導問題，内部発熱問題，熱伝達問題の全てが取り扱い可能な一般的な熱拡散最大化問題を定式化している．また，構造境界上に熱伝達境界条件を付加可能な方法論を述べるとともに，その具体的な数値実装法について説明している．最後に，前述の３つの問題に関する数値解析例により，方法論の妥当性の検証を行い，物理的に妥当で明瞭かつ，滑らかな最適構造が得られることを示している．また熱伝達問題に対しては，２次元及び３次元の数値解析例を示し，提案手法が，設計変数に依存する境界条件を含む最適設計問題への適用が可能であることを示している．

第８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．

（続紙 ２ ）

氏 名	山 田 崇 恭

（論文審査の結果の要旨）

本論文は，従来のトポロジー最適化手法と，レベルセット法に基づく形状最適化の問題点を抜本的かつ本質的に改善する方法論を構築することを目的として，レベルセット法に基づく形状表現と，フェーズフィールド法の考え方に基づき，新しいトポロジー最適化手法の構築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．レベルセット法による形状表現によりグレースケールを排除可能で，フェーズフィールド法の考え方に基づく仮想的な界面エネルギーにより最適化問題を正則化可能な新しいトポロジー最適化の方法論を提案した．この方法では，レベルセット関数のプロファイルとして，区分的一定値関数として定義しているため，再初期化処理などの複雑な数値計算技術を必要としない特長をも有している．

２．トポロジー最適化問題を，反応拡散方程式を解く問題に帰着して解く新しい方法を構築した．そして，有限要素法と有限差分法に基づき，その反応拡散方程式を数値計算により解く具体的な数値実装法を示した．これにより，本提案手法が３次元構造物や非構造格子を含む設計問題へも容易に適用可能となった．

３．提案手法を，平均コンプライアンス最小化問題，コンプライアントメカニズムの最適設計問題，固有振動数最大化問題，熱拡散最大化問題へ適用し，構造最適化を図った．トポロジカルデリバティブと随伴変数法に基づき設計感度を導出し，自己随伴問題及び非自己随伴問題に適用可能であることを示した．さらには，固有値問題，設計変数に依存する境界条件を含む最適設計問題へも適用可能であることも示した．また数値解析結果から，提案手法は，初期構造，格子分割数などの設定パラメータの依存性が極めて低く，物理的に妥当で明瞭かつ滑らかな最適構造が得られることを示した．また，正則化係数の設定値により，最適構造の幾何学的複雑さを定性的に設定可能であることを示した．さらには，３次元の数値解析例において，正則化手法の拡張に基づく等断面形状制約を提案し，工学的に有効な最適構造が創成設計可能であることも示した．

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トポロジー最適化手法を提案しており，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２２年８月３日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果，合格と認めた．