

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 数理的アプローチによる機械設計に関する研究

氏 名 新谷 浩平

論 文 内 容 の 要 旨

本論文の目的は、機械構造部材の形状設計問題に対して、数理的アプローチによる形状設計の可能性を明らかにすることである。機械構造部材の設計では、力学などの指導原理に基づいて形状設計が行われる。また、設計対象とする形状や現象が複雑な場合には、実験や CAE などによる評価結果が設計指針として利用される。このような場合には設計者は実験や CAE によって得られた評価結果を解釈して、形状修正を行う必要がある。しかしながら、これらの判断は設計者の経験と勘に依存し、最適な形状を限られた検討期間で設計することは容易ではない。本論文では、偏微分方程式の境界値問題として数理モデル化された力学現象を考え、その偏微方程式の境界値問題が定義された領域を最適化する方法を示す。具体的には、領域変動を表す写像を設計変数にした境界変動型の形状最適化問題を構成し、その解法を示す。さらに、その解法が機械構造部材の設計問題に有用であることを明らかにする。特に、自動車部品の形状設計の観点から構造最適化における課題を選定した。以下で本研究で設定した課題について述べる。

1 つめの課題はアセンブリ状態で生じる設計評価指数を評価関数とする形状最適化技術の開発である。自動車のように多くの部品から構成される複雑な製品の開発では分解、再統合のプロセスが行われる。具体的には、車両の性能設計ではアセンブリ状態における性能目標達成するために、まずはコンポーネントの性能目標にカスケードリングする(分解)。次に、コンポーネントの形状設計が行われた後に、各コンポーネントを結合してアセンブリ状態で効果を確認する(再統合)。これまでの形状最適化は主にこのコンポーネント設計のフェーズで適用されることが多い。その理由は、このフェーズではコンポーネントに要求される目標性能は剛性や固有振動数など、比較的形状最適化問題で扱いやすい指標が用いられていることが挙げられる。しかしながらコンポーネント目標値へのカスケードリング精度が低い場合

には、形状最適化後の各コンポーネントをアセンブリ状態に組み上げて評価した場合に、狙いとした性能が得られていない場合がある。このようなことが生じる要因としては部品間の摩擦や接触剛性が挙げられる。このような場合には設計の手戻りが生じる恐れがある。このような問題を回避するためには、本来の評価指標であるアセンブリ状態における特性値を直接評価関数とおいた形状最適化技術が必要である。

2 つめの課題は最適なビード形状を得るための実用的な形状最適化手法の開発である。ここで、ビードとは曲げ変形に対する剛性の向上を目的に造られる板部品の凹凸のことである。板部品は板厚を増加させることなく、面外方向への形状変化で曲げ剛性を大きく変化させることができるため、軽量化の観点からも、構造要素として広く自動車部品で利用されている。実際に、自動車を構成する材料の約 5 割は鋼板であることから板部品に対する形状最適化技術に対する重要性が窺える。板部品の形状設計にあたっては、成型性の観点からビード形状の設計が非常に重要である。このようなビード形状を対象とした形状最適化問題は先に述べたトポグラフィ最適化問題と呼ばれ、ベシスベクトル法を用いた解法が商用プログラムに実装されている。しかしながら、ベシスベクトルの選び方によっては最適化によって得られる結果形状が、数値不安定性を有する (形状がジグザグ) ことが知られている。その為、形状最適化後にスムージング処理などの別工程が必要となる。

3 つめの課題は、非線形弾性問題を主問題とする形状最適化手法の開発である。剛性や固有値といった線形領域の特性値を対象とした形状設計問題は設計者が机上検討で形状を設計することは困難ではない場合が多い。しかしながら、幾何学的非線形性や材料非線形性などの非線形現象が含まれる形状設計問題では、設計者が机上で検討することは容易ではない。これらの背景より非線形性が無視できない形状設計問題においては形状最適化技術の適用効果が高いと考えられる。

本研究では、これらそれぞれの課題に対して、標題に掲げるように数理的アプローチによる形状設計法を示し、その有用性を明らかにした。具体的には、数理モデル化された偏微分方程式の境界値問題に対する解関数と領域を用いた形状最適化手法を用いて、上記 3 つの課題に対する形状最適化問題を定義し、その解法を示した。本研究で用いる形状最適化理論は第 2 章でまとめた。以下では本研究で取り組んだ具体的な内容について述べる。

1 つめの課題に対しては第 3 章において、アセンブリ状態における現象の具体例として車両のブレーキ鳴き現象を取り挙げ、その形状最適化手法を示した。ブレーキ鳴きはパッドやローター摩擦に起因して生じる振動現象である。ブレーキ鳴きが生じると、車両の使用者に不快感を与えてしまうため、車両の品質に直結する重要な設計指標のひとつと考えられている。また、ブレーキ鳴きは自励振動現象として知られており、自由振動問題が複素固有値問題で記述され、CAE を用い

て数値的に評価することができる。このような CAE の解に基づいて、ブレーキ鳴き現象における最適化の研究としてはパラメータ最適化に基づいた多くの方法が提案されてきた。しかしながら、アセンブリ状態の評価指標である複素固有値を目的関数としたノンパラメトリック形状最適化手法はこれまで提案されていない。そこで、本研究ではこのような複素固有値を目的関数としたノンパラメトリック形状最適化問題を構築し、その解法を示した。また、数値例では簡易ブレーキモデルを用いて提案手法の妥当性を示した。

また、2 つめの課題に対しては第 4 章において、滑らかなビード形状を得るための設計変数を用いた新しいビード形状設計手法を提案した。商用プログラムではパラメトリック最適化手法のひとつであるベシスベクトル法が利用されているため、先に述べたように、設計変数の選び方によっては数値不安定性を有する(形状がジグザグ)が生じる可能性があった。これに対して、本研究ではノンパラメトリック形状最適化手法を採用し、このような数値不安定性を回避することができる手法を提案した。提案手法では、面外方向への変動量を表すために用意した連続関数を設計変数とし、シグモイド関数を用いた変換により、実際のビードの高さはある範囲を超えないように制限した。また、数値例では簡易シェルモデルを用いて提案手法の妥当性を示した。さらに、自動車部品設計への応用例としてダストカバー部品の固有振動数最大化問題を構成し、提案手法を用いることで最適な形状が得られることを示した。

最後に、3 つめの課題に対しては第 5 章において、幾何学的非線形性と材料非線形性を有する大変形問題に対する形状最適化問題を定義し、その解法を示した。従来、これら非線形性を有する現象に対する形状最適化解法では随伴変数法を用いた形状感度の計算コストが大きいことが課題として考えられていた。本研究では超弾性体の大変形問題や荷重に除荷がない弾塑性問題のような負荷経路非依存問題を考えた場合に、従来の方法に比べて形状感度解析の計算コストを小さくすることができることを示した。具体的には、随伴問題が大変形後の釣り合い状態における状態量のみを用いて評価できることを示した。また、自動車部品設計への応用例として、ゴムブッシュの静特性を評価関数とした形状最適化問題と、サスペンションアームの最大反力を最大化する問題を用いて提案手法の妥当性と有用性を示した。

以上の結果より、本論文では、形状最適化理論を基礎にした数理的アプローチによる設計法を具体的に示し、それらの設計法が実際の機械部品の設計において有効な手段になり得ることを明らかにした。また、今後の残された課題に対して第 6 章でまとめた。