報告番号	※甲　　第　　号

主　論　文　の　要　旨

論文題目　　マルチフィジックスにおける

振動現象を対象とした形状最適化問題

氏　　名　　林　拓也

論 文 内 容 の 要 旨

本論文の目的は、マルチフィジックス（複数の物理現象が連成する場）における振動現象に対して，ノンパラメトリック形状最適化問題の定式化と解法の導出を行い、その実問題への応用の可能性を明らかにすることである。

CAE(Computer Aided Engineering)という概念が提唱されてから 40 年の歳月が流れ，産業における製品開発のプロセスは大きく効率化された．数多くの商用のソフトウェアとして提供されているその機能は構造の単純な弾性解析に始まり，今では多様な物理現象のシミュレーションまでが可能となった．その発展に伴って，CAE で得られた結果を評価指標とするような構造最適化の技術も成長を続けている．構造最適化は設計変数の選び方によって 2 種類に大別される．有限個のパラメータによって設計案を表現するパラメトリックな構造最適化については商用 CAE ソフトウェアの多くにも実装されているが，関数を用いて設計案を表現するような，より設計自由度の高いノンパラメトリックな構造最適化についてはパラメトリックな構造最適化で用いられている汎用的な解法が適用できないことから，複雑な物理現象への適用については今もなお発展途上の段階にある．また，ノンパラメトリックな構造最適化により得られる形状はその自由度の高さゆえに複雑なものとなりがちで，製造が困難となりやすいことも実用上においてはしばしば欠点として挙げられる．

その一方で，近年では 3D プリンターの台頭によりこれまで製造できなかった複雑な形状が実現可能となったという背景もあり，ノンパラメトリックな構造最適化は以前に増して注目されるようになってきている．そこで本論文では複雑な物理現象へのノンパラメトリックな構造最適化の適用例として，偏微分方程式の境界値問題として定式化されるようなマルチフィジックスにおける振動現象を考え，それが定義される領域のノンパラメトリックな構造最適化問題の定式化と解法の導出について示す．ノンパラメトリックな構造最適化にも設計変数となる関数の選び方によっていくつかの種類が存在するが，本研究ではあらかじめ与えられた初期形状から新しい形状への連続な 1 対 1 写像の変位を設計変数とする形状最適化を対象とした．以下で本論文の中で扱う 2 つの具体的な問題について述べる．

1つ目の問題は，音響と構造が連成する場に対する形状最適化問題である．騒音問題に代表されるように，我々の身の周りで生じる音に関わる課題は数多く存在する．近年では多様な種類の音響解析を実行できる商用CAEソフトウェアの発展によって，こうした現象の評価が計算機上で可能となってきた．また，そうしたソフトウェアの中にはパラメトリックな構造最適化の機能が備わっているものもあり，比較的簡単な設計案の導出についてはこれらを適用することで設計業務の効率化が可能となった．その一方で，ノンパラメトリックな構造最適化を行えるようなソフトウェアはまだほとんど存在しない．音響に関する評価指標は形状のわずかな違いによってその値が大きく変わることが多いため，この領域に対するノンパラメトリックな構造最適化の応用がより実用的なものとなれば，パラメトリックな構造最適化では表現することのできない設計案を提示することが可能となり，製品開発に対して大きく貢献できるものと考えられる．

2つ目の問題は，流体と構造が連成する場に対する形状最適化問題である．我々の身の回りにある構造物は空気や水など，何らかの流体と接していることがほとんどであり，問題によってはその相互作用による影響が無視できないほど大きいものが存在する．このような問題に対しても商用CAEソフトウェアによるシミュレーションを行えるようになり，得られた解析結果を評価指標とした構造最適化にも焦点が当たるようになってきている．こちらも音響・構造連成の場合と同様に，ノンパラメトリックな構造最適化についてはいまだ発展途上の段階にあるが，得られる設計案の性能という観点からはパラメトリックな構造最適化では得られない結果を提示できる可能性を持つものとなる．

本研究ではこの2種類の連成問題に対して，これまでになされていないノンパラメトリックな形状最適化問題の定式化と解法の導出を行い，その有効性を明らかにした．ここで用いる形状最適化問題の理論については2種類の連成問題に共通する事柄となるため，第2章に簡潔にまとめた．ノンパラメトリックな構造最適化では勾配法に基づいた解法を用いることとなるが，そのときに直面する数値不安定現象を回避するためにH1勾配法と呼ばれる手法を用いていることが大きな特徴として挙げられる．以下で，それぞれの連成問題に対して取り組んだ具体的な内容について述べる．

1つ目の問題に対しては第3章において，楽器の放射音を最大化するような問題を選んだ．楽器の設計は古くから職人の経験と勘を頼りに行われ続けており，形状最適化問題によるアプローチを用いた設計案の数学的な導出が可能となれば必要以上の試作を減らすことが可能となり，材料である木材の節約などに繋げることができる．一般に音の評価は人間の感覚に依存する部分が大きく最適化問題においては定量的な評価が最も容易である音の大きさを評価指標とすることが多いことから，本研究でも音の大きさを対象として最適化問題の定式化を行った．音響・構造連成系のノンパラメトリックな形状最適化に関しては先行研究が存在するが，それ以降に発見された関数の形状微分を用いた新しい公式を適用した例はこれまで提案されていない．そこで本研究では音の大きさを表す量として用いられる音響パワーレベルを最大化するような形状最適化問題を構成し，新しい公式によって得られる形状微分に基づいて最適解を得る解法を示した．数値例では簡易的なアコースティックギターのボディモデルを用いて提案手法の妥当性を示した．

2つ目の問題に対しては第4章において，魚型の弾性体の泳ぎ運動を望んだもの

に一致させるような問題を定式化し，その解法を示した．主に海洋探査を目的として魚型ロボットの開発が行われている．そのようなロボットは環境に溶け込むために，実物の魚により近い運動をすることが要請されるため，それを再現するようなロボットの形状を最適化問題の枠組みで求めることを考えた．すなわち，実物の魚の運動を表す理想的な泳ぎ運動というものをあらかじめ定義しておき，連続体で表された魚型ロボットに周期的な外力を負荷したときに生じる振動的な運動とその理想的な泳ぎ運動の 2 乗誤差を目的関数として最小化するような形状最適化問題を解くことによって，実物の魚と同じ泳ぎ運動を行う魚型ロボットの設計案を得ることを試みた．ただし，弾性体と流体の動的な相互作用を考慮するに先立って，魚型ロボットの有限変形を仮定した定式化を用いる必要があるが，動的な流体・構造の連成問題へのノンパラメトリックな形状最適化の適用はこれまでに例がない．そこで本研究では，はじめに 4.1 節で流体を考慮せずに，超弾性体の有限変形問題を状態決定問題とした泳動の制御問題を定式化し，数値例によって本アプローチが魚型超弾性体の泳動を制御できる可能性を持つことを示した．ここで用いられた超弾性体とは，構成則が弾性ポテンシャルと呼ばれる関数を介して表されるような弾性体のことで，連続体の有限変形を導入する上で最も簡単な構成則であることから本研究で採用された．続いて 4.2 節で魚型超弾性体の周囲の流体を考慮に入れて状態決定問題を改めて構築し，その解法を示した．ここで，流体の挙動をモデル化する偏微分方程式の境界値問題には Navier-Stokes 方程式が用いられた．目的関数については流体を考慮しない場合のものと同じ 2 乗誤差を採用した．

以上 2 つの具体的な問題を通して，本論文ではマルチフィジックスにおける振動現象に対するノンパラメトリックな形状最適化問題の定式化とその解法について示し，それらの問題に対する有効な解法となる可能性を持つことを明らかにした．また，今後の課題と展望について第 6 章でまとめた．