

補助事業番号 2017M-110
補助事業名 平成29年度 薄板構造体の過渡振動挙動のコントロールを目的とする最適設計手法の開発 補助事業
補助事業者名 豊田工業大学 教授・下田昌利

1 研究の概要

高いレベルの軽量化が求められる輸送機器の主構成要素である薄板構造体の振動特性は固有振動や周波数応答解析に加え、過渡応答解析により評価される。このうち過渡応答解析は時間軸で振幅や加速度を評価するため、複雑な大規模計算が必要で、最適設計手法の開発は課題とされてきた。従来の設計法では予め形状や板厚をパラメータ化してその値を最適化手法で決定していたが、得られる形状や性能が限定的であった。本研究でパラメータ化を行わずに自由に変動させる、すなわち理論的に無限自由度の最適設計を効率的に行うことを可能とし、それにより自由形状の創成と過渡振動特性の向上を実現する。任意時刻や任意時間帯における薄板構造上の任意箇所での振幅を目標値へコントロールするための振幅二乗誤差積分を目的汎関数とし、体積と振動方程式を制約条件とする。また、設計変数は板厚関数と外形形状関数とする。この最適設計問題を関数空間で定式化し、核となる感度関数を随伴変数法を利用しながら理論的に導出する。得られた感度関数の数値計算方法を検討し、それをを用いて目的汎関数を最小化するための関数空間の勾配法を構築する。これらをシステム化して汎用FEMコードを利用しながらコンピュータ上に実装することにより、汎用性のある薄板構造の最適設計システムを開発する。得られた形状を実際に試作し、振動試験を行い、最適化形状と初期形状との振動特性の比較を行うことによって手法の有効性を検証する。

2 研究の目的と背景

CO2排出量の削減等、厳しい環境対策が求められる中、高性能化する人工物の力学特性や機能を最小限の重量で実現させるため、軽量設計の要求は増々厳しくなっている。優れた燃費と運動性能が求められる輸送機器においては、その要求は特に厳しく、主構成要素である薄板構造の抜本的な軽量化が求められている。設計自由度を大きくするため、樹脂の使用や金属との併用、多層化も利用されているが、非適切な設計は環境を害する振動や騒音を招くため、薄板構造の振動に対する最適設計手法とそれに基づく汎用システムの開発が望まれている。

一方、シミュレーション技術の発展により、ドアの閉まり音のような衝撃荷重後の過渡振動特性の予測が可能になってきた。これを発展させ、薄板構造を対象に、時間振動特性を評価関数にし、狙いとする特性を最低重量で実現するための構造最適化理論とそれに基づく汎用最適設計システムの開発を目的とする。開発する手法は設計者を悩ます設計変数のパラメータ化を不要とし、力学的に自然な最適構造の自動創生を可能とする。振動、騒音問題を招き易い薄板構造の振動特性の時間応答解析は時間軸で振幅や加速度を評価するため、大規模計算となり、評価のための順解析に留まっていた。本研究では課題とされてきた逆解析、すなわち最適設計手法の開発を

行う。軽量で高性能な過渡特性を得るため、無限自由度の板厚分布と形状設計を可能とする変分法に基づく分布系(関数空間)の最適化手法を構築する。任意時刻や任意時間帯における薄板構造上の任意箇所での振幅を目標値へコントロールするための振幅二乗誤差積分を目的汎関数とし、体積と波動方程式を制約条件とする。また、設計変数は板厚と外形形状とする。この最適設計問題を関数空間で定式化し、核となる感度関数を随伴変数法を利用しながら理論的に導出する。得られた感度関数の数値計算方法を検討し、それをを用いて目的汎関数を最小化するための関数空間の勾配法を構築する。また、得られた形状を実際に試作し、振動試験を行い、手法の有効性を試験を通して検証する。

3 研究内容

薄板構造体の過渡振動挙動のコントロールを目的とする最適設計手法の開発

(<https://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/about.html>)

本研究は7つの主プロセスからなり、各プロセスでの実施内容を以下に示す。

①問題の定式化

- ・板・シェル構造の過渡応答における動的コンプライアンス最小化問題に対して、板厚最適化問題と形状最適化問題を分布系の最適化問題として定式化した。
- ・板・シェル構造の過渡応答において、指定時間における指定場所の振幅を所望の値にコントロールすることを目的とする板厚最適化問題と形状最適化問題を分布系の最適化問題として定式化した。
- ・板・シェル構造の固有振動数コントロールを目的とする形状・トポロジー最適化問題の解法にも着手し、分布系の同時最適化問題として定式化した。

②感度関数の導出

- ・動的コンプライアンス最小化において、板厚変動と形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。
- ・振幅コントロール問題において、板厚変動と形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。
- ・固有振動問題において、形状変動と密度変動に対する感度関数も理論的に導出した。

③勾配法の構築

- ・板厚を設計変数とする場合のスカラー関数に対する関数空間での勾配法を考案し、アルゴリズムを構築した。
- ・形状を設計変数とする場合はベクトル関数に対する関数空間の勾配法が必要となるが、これはこれまで研究室で開発してきた手法を応用した。
- ・密度を設計変数とする場合はスカラー関数に対する関数空間の勾配法が必要となるが、これは板厚変数のものを利用した。

④最適化システムの構築(ワークステーションへの実装)

- ・②で求めた感度関数と③で構築したアルゴリズムを含む最適化システムを設計した。
- ・ワークステーション上へ実装し、動作確認を行った。

⑤基本例題への適用(手法の検証)

- ・手法とシステムの検証のため、基本的な設計例題に対して解析を実施し、良好な結果が得られることを確認した。
- ・例題への適用を増やし、バグがないことを検証した。

⑥供試品の製作と検証試験

- ・検証試験のための3Dプリンターによる供試品製作を行った。
- ・製作したものについて、振動試験を行った。

⑦追加計算と供試品の追加製作、確認試験

- ・構築した手法を他の設計例題へ応用し、システムの検証と手法の効果を確認した。
- ・得られた形状を3Dプリンターで製作し、試験を行い、効果を確認した。

図1から図4に、強制振動時の0.5(s)の振動を最小化することを目的とした最適化計算例を示す。図1は初期と最適化後の板厚分布の比較を示し、図2は図1(左)の加振点に与えた強制振動入力を表す。図3は最適計算履歴を表し、体積一定条件を満たし、目的関数が最小化されていることがわかる。図4は初期と最適化後の時間応答曲線を表すが、大きく振動が低減されていることが確認される。

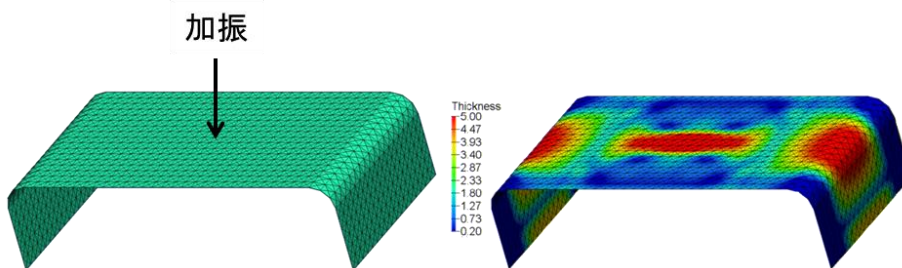


図1 初期板厚と最適化板厚分布(左:初期, 右:最適化後)

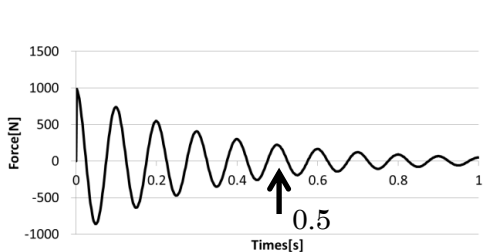


図2 加振に用いた強制振動入力

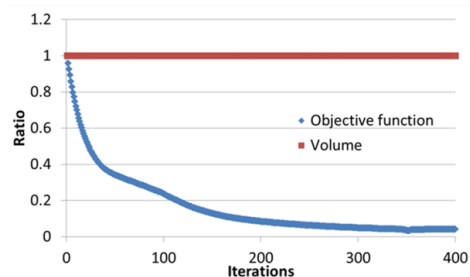


図3 最適化履歴

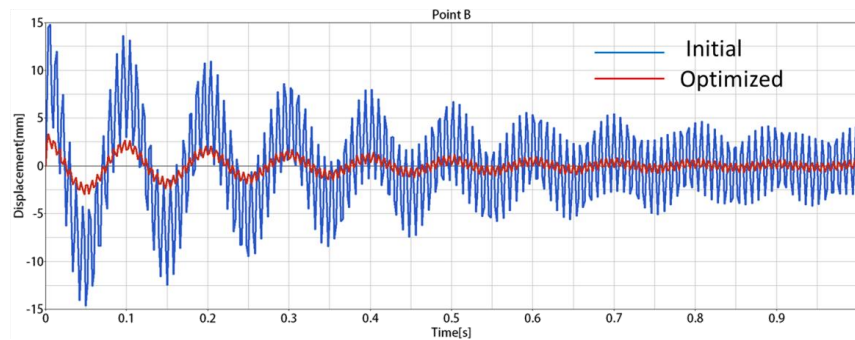


図4 時間応答の比較

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

開発した汎用設計支援システムは設計者が薄板構造の初期形状案を与えれば、要求する振動特性を有する最適な仕様が得られる。振動特性の実現には多くの知識や経験を必要とするが、設計者の熟練度に依らず最適構造が得られるため、特に知識や経験の少ない設計者やエンジニアに対して強力な支援システムとなる。あらゆる薄板構造の設計への適用が可能で、短時間で効率的、且つ低コストな構造設計を実現できる。ルーチンの構造設計は計算機(本システム)に任せ、設計者はより創造的な仕事への注力が可能となる。従来の設計では得ることが難しかった軽量で時間振動特性に優れた薄板構造体の最適構造を計算機を利用して効率的に求めることができるため、薄板構造を含むものであれば、輸送機器や大規模土木構造物等に幅広く利用可能である。

本研究では時間を考慮した振動応答問題を対象としたが、他の時間を考慮すべき工業製品の設計問題への応用(例えば、非定常熱伝導問題)も可能である。また、得られた最適化構造をデータベース化し、人工知能技術と組み合わせることにより、大規模設計問題の効率的な構造決定と新たな構造の創生も期待できる。データベースの活用は社会問題にもなりつつある構造解析や設計技術の伝承問題の解決の一助ともなる。更に、本研究はデザインと情報工学、構造力学及び応用数学の学際的な研究に位置づけられ、今後の幅広い分野への展開も期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、多くの構造最適設計の解法やシステムの開発を行ってきたが、時間を考慮した薄板構造の時間応答設計問題への取り組みは初めてであった。これまで蓄積してきた技術に、時間軸を扱う手法を組み合わせ、任意の時間と場所における振動のコントロールを可能にする新たな構造最適化手法を開発した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

○国内学会と国際会議で研究発表を行い、講演論文集として出版。

- ・若狭, 下田, 過渡応答特性のコントロールを目的とするシェル構造体の板厚最適化手法, 日本機械学会 2017設計工学システム部門講演会(2017.10.13,山口)

・Mamoru Wakasa¹ and Masatoshi Shimoda, Shape optimization of shell structure for controlling transient response, in Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization, Proceedings of the 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation, (WCSMO12), (2017-6, Braunschweig), A. Schumacher, et al. (Eds), Springer, ISBN 978-3-319-67987-7, pp. 889-903.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

・薄板構造体の過渡振動挙動のコントロールを目的とする最適設計手法の理論と最適化システムを開発

・前述の講演論文集2編

(<https://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/about.html>)

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし.

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 豊田工業大学 (トヨタコウギョウダイガク)

住 所: 〒468-8511

愛知県名古屋市天白区久方2-12-1

申 請 者: 豊田工業大学 教授 下田昌利 (シモダマサトシ)

担 当 部 署: 固体力学研究室 (コタイリキガクケンキュウシツ)

E - m a i l: shimoda@toyota-ti.ac.jp

U R L: <https://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/about.html>