

論文の要旨

題目 静剛性と固有周波数の制約を満足するサンドイッチパネルを対象とした2段階設計に関する研究
(2 Step Design for Sandwich Panel Structure Satisfying with Restriction of Static Stress and Eigen Frequency)

氏名 佐々木 伸

本論文は、軽量化を目的とし、静剛性と固有周波数の制約を満足しながら、格子型サンドイッチパネルを対象に構造の最適化手法を提案しその有効性について検証し結果を述べる。序論では、自動車の地球環境への影響を測り、自動車車体の中でのフロアパネルの位置づけを固定要素と変動要素に触れながら、展望を述べる。

乗用車の主要構造体である車体の軽量化は大きな技術課題である。車体は、車両全体の範囲を規定するパネルと骨格部材で構成されている。その中で乗員居住空間の下部構造であるフロア部は、走行時に車体の曲げ変形荷重や振動が入力する。パネル構造を含むフロア部での曲げ変形や振動が大きいと操安性や乗り心地が悪化する。車体フロアパネルの動的機能面では、静剛性と固有周波数を高めることは操縦安定性と振動乗り心地の向上につながる。日本市場では、「乗り心地」に対する顧客の感度が高い。パネル構造を含むフロア部での曲げ変形や振動が大きいと操安性や乗り心地が悪化するため、静剛性と固有周波数を質量最小で両立することは、環境への対応と共に商品性上の課題と言える。

第2章では、最適化手法に関して、局所最適手法では全応力設計（以下 FSD）、全体最適手法では遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を対象として取り上げ、その得失と適用の具体手順について述べた上で2段階設計を提案する。

FSD は、「最適な設計は、最小寸法でないすべての部材がその上限まで負荷されている」という考え方にに基づき、各部材が等しく負荷を分担することを目標とし各部材に生じる応力の均一化を目指す。FSD のメリットは、少ない反復計算で全応力解が求められることにある。しかし、FSD から求まる構造は、応力の均一化を目的とした局所解であるため、静剛性、動剛性等をはじめとする制約条件のすべてを必ずしも満足しない。従って、FSD は、最適化の途中段階でその方向性を得るために用いられることが期待される。本論文では FSD を用いて、静的応力に加え、動的応力も対象として直接設計変数に変更を加えることでモード変形を抑制し、その結果固有周波数の維持、または向上を図る。

GA は、多点同時探索を行って大域的に解を得ることが可能な手法である。GA は進化型最適化手法に位置付けられ、生物の進化過程を模擬した選択、交叉、突然変異等の遺伝的操作を毎世代繰り返す。GA は多数の解から構成される個体群を用いた確率的な多点探索により高い大域的探査能力を持っているので、これまで多目的最適化設計に数多く用いられてきている。しかし、GA には様々な性能の最適化に対応できるメリットがある反面、乱数を用いた多大の反復計算を要するため、局所的最適化手法と比較して、最適解を導出するまでの探索にかかる計算コストが大きいというデメリットがある。設計変数の種類や最適化の形態によって、GA と FSD をどのように組み合わせるか選択する必要がある。

位相を固定とする場合は、先に局所解法を使い、次に、他の制約条件も満足させる多点探索を行うのが合理的である。梶原らは、「GA の進化の原動力を淘汰によるスキマタのしぼり込みと考えると、より性能のよいアルゴリズムを構築するためには、親となる世代から少しでもよい解となる可能性の高い個体を数多く生み出すことが重要になってくる」と考え、GA に局所解探索能力をもった突然変異アルゴリズムを導入した。本研究もこの考え方を採択し、最初に FSD を用いて静応力のみを平準化し、次に、

前段階で得た「よりよい解となる可能性の高い個体」を GA の開始時点でエリートとして扱い最適化を行う 2 段階設計法を考案した。静応力への FSD 適用から、さらに固有振動への拡張を行い、構造最適化の手法について、次の二点を新たに提案した。第一に、固有振動時の正規化応力を FSD によって平準化したこと、そのために基準正規化応力と適正基準正規化応力を新たに導入した。板厚範囲の制約を利用することで、基準正規化応力が求まり、それをもとに適正基準正規化応力が簡便に一義的に求められる手法を構築した。この適正基準正規化応力を用いた FSD によって、固有周波数の制約条件への適応度が高い個体が導出できることを示した。第二に、この固有周波数の制約条件への適応度が高い個体、及び静応力の制約条件への適応度が高い個体、さらに両制約をともに満足する個体、これら 3 つの性質の異なる優良な個体を GA 最適化開始時のエリートとして適用する手法を構築した。

本論文での提案手法 Proposed Method である 2 段階最適化手法について説明する。最初の 1st Step では、事前準備としてまず FSD によって性能のよいエリートの導出を図り、次の 2nd Step でそのエリートを利用して GA により最適化を行う。1st Step では、設計変数である板厚を静的荷重下で FSD を用いて基準応力値に応じた数値へ変換する。また固有振動状態では、同じく FSD を用いて基準正規化応力値に応じた数値へ変換する。FSD を最初に適用する理由は、制約条件である静的曲げ荷重、または固有周波数に対して、有利な設計変数の組み合わせを得ることが期待できるからである。よりよい性能が見込まれる設計変数の組み合わせ（個体とそれに含まれる遺伝子）が得られることで、2nd Step で最適解への到達が早められることが期待される。2nd Step では、目的関数を体積最小化、制約条件を静曲げ剛性、及び一次固有周波数とし、GA を用いた最適化を行う。1st Step で得られた静荷重と固有周波数に対してそれぞれ有利な個体から供給される優良な遺伝子によって、GA による最適化が加速されることが期待される。

第 3 章では、第 2 章で提案した 2 段階設計を、簡易モデル（サンドイッチパネル）に適用し、この手法が有効であるか検証を試みる。自動車のパネル部材に求められる基本性能のうち、曲げ剛性と一次固有振動数の 2 性能を制約条件とし、体積最小化を目的関数とする問題を対象とする。固有振動時の正規化応力に対して全応力設計を適用した結果、正規化応力は平準化され、全応力設計が狙い通り機能するか検証する。提案手法の 1st Step で得られる 3 個体のエリートについて、体積（板厚総和）、静剛性、固有周波数の特性が異なることを示す。提案手法が最適解を導出するまでの計算時間短縮に有効であるか、異なる基準正規化応力で得られたエリート個体を用いた GA 計算結果と比較検証する。

剛性向上を目的としたパネル構造としてサンドイッチパネルが挙げられる。建築物の床、列車のフロアや航空機の翼への適用等が挙げられるが、適用の目的は、主に剛性・強度向上となっている。従来、生産性の観点から、中間層に補強構造を持つサンドイッチパネルは、ハニカム型や格子型等の周期構造を前提として考えられてきた。一方で、軽量化と剛性向上を目的に個々の格子型補強部材の配置と厚さの最適化の取り組みも見られる。また、パネルとフレームで構成される補強構造の剛性向上を目的としてパネル要素の離散的板厚配置の最適化が行われている。このように格子型補強材をコアとするサンドイッチパネルは、個々の格子補強板の厚さを調整することで、剛性荷重時応力の分散を適正化することが期待できる。以上を踏まえ、正方格子型補強材をコアとするサンドイッチパネルを研究の対象に選んだ。

局所的な FSD と大域的な GA を段階的に組み合わせることで、複雑な多目的問題の収束を早めることを目指して取り組み、以下の結果を得た：板厚の制約範囲から得られる 3 つの基準正規化応力に全応力設計を適用することで、目的関数（体積）と複数の制約条件（静剛性、固有周波数）の関係式を得た。それをもとに新たな基準正規化応力（適正基準正規化応力）を導出した。この適正基準正規化応力を用いることで、固有周波数制約に最も有利な設計変数が導出できることを示した。これら一連の最適化手

法を構築した。固有振動で生じる正規化された動的応力を平準化することによって、固有周波数の制約を満足することが可能であることを示した。複数制約を両方ともに満足する個体、及びいずれかの制約条件への適応度が高い個体、これら3個体を遺伝的アルゴリズム最適化開始時のエリートとして適用することで、より短い計算時間で最適解が得られることを示した。

最適化を速めるエリートの条件は、2制約条件のどちらかが突出して有利な性能を有していること、及び目的関数の達成度が平均以上であると考察される。このときエリートの性能が突出しているか、平均を上回るかの基準となるのは、GAの最初期に乱数で得られる個体群のレベルである。本検討で得られたサンドイッチ（二層）パネル間の補剛構造は、2性能の制約を満足しつつ、目的である軽量化が可能であることが示された。

また、簡易モデルを対象に計算時間短縮を目的とし、荷重条件の対称性を利用し設計変数を削減した。GAを適用した結果、曲げ剛性と一次固有振動数（ねじりモード）の2性能を維持しつつ、早い収束を示した。

第4章では、市販されている小型自動車の車体前部フロアパネルを対象に、サンドイッチパネルを適用した場合の軽量化効果について考察した。自動車のパネル部材に求められる基本性能のうち、曲げ剛性と一次固有振動数の2性能について、単板パネルとサンドイッチパネルが等価となる場合の質量の違いから、サンドイッチパネルによる軽量化効果を導出した。

また、今後市販がますます進むと考えられる車体下部取付タイプのバッテリーパックを想定し、それを格納する機能を付与すると仮定したサンドイッチパネルを検討した。ここでは、量産性を考慮し周期構造を適用した。24個のスティフナからなる単位ユニットを平面的に25個連結させて600個のスティフナを持つサンドイッチパネルとした。曲げ剛性と一次固有振動数を制約条件とし、GAによる軽量化を行い、周期構造によって合理的なバッテリーパック構造の可能性を示した。