

学 位 論 文 要 旨

題 目 モーダルエネルギー伝搬解析法の研究

氏 名 山下 亘貴

自動車をはじめとして鉄道や航空機、船舶などは、人や物資を輸送する機械として身近な存在であり、現代の生活に欠かせないものである。これらの機械構造物が作動する際、動力源や路面、風からの入力により振動騒音が必ず発生する。振動騒音は周囲の人々に不快感を与える環境問題として厳しい規制が設けられている一方で、使用者や顧客の快適性や購買意欲を左右する商品価値として重要な要素である。特に自動車は容易に扱える存在として広く普及していることから、単なる移動手段としてだけではなく、趣向性の面を持ち合わせており、コストや実用性、燃費、安全性能とならび、振動騒音（静粛性）は商品価値の一つとして高い性能を要求される。

これまでに、高い“静粛性”を確保するための設計法として FEM、モード解析法や SEA 法といった種々の解析的アプローチが行われている。個々の固有モードを扱う FEM・BEM モード解析手法については、周波数が高くなるとモード密度が増大し、また個々のモード寄与が分散することから、着目周波数帯に対する主要なモードの特定が困難となる。さらに分系間の相互作用もより複雑になり、モード形状も複雑化するため、全系の振動に対する分系モードの寄与の把握も困難である。一方、固有モードを統計的に扱う SEA 法は、モード密度が小さい周波数帯では個々の固有モードの影響を無視できず、平均的に扱うという前提条件が成立しない。また要素分割された系のモード密度が低い場合、解析制度が低下することから、分割できる単位に限度が生じる。このことから、SEA 法はモード密度が十分担保できる高周波数帯での適用に限定される。このように両手法が前提とする特性上、どちらの手法も適さない周波数帯（本研究ではこの周波数帯を、中周波数帯と呼ぶ）が存在し、従来手法を発展させた新たな解析手法の研究が進められている。

このような中周波数帯と呼ばれる帯域での解析手法として、FEM モード解析手法を発展させた高モード密度の領域では分系のモード形状が類似したモードが多く含まれることに着目し、構造変更時のモードの変化の類似性をもとに、固有モードをグループ化する手法や、SEA 法を発展させたモード密度の低い要素を FEM モデル、モード密度の高い要素を SEA モデルとして扱う、ハイブリッド手法など様々な研究が取り組まれているが、いずれの手法も理論構築と簡易構造への適用検証が進められており、実構造への適用例は見当たらず、実用化には至っていないのが現状であり、中周波数帯の解析手法は様々なアプローチにより研究が行われ発展途上であり、確立された手法は存在しないといえる。

そこで本研究では、中周波数帯の新たな振動解析手法として、分系の固有モードと要素間の振動パワーフローの関係性を直接的に評価するモーダルエネルギー伝搬解析法を提案し、模型試験並びに実車に適用しその有効性を検証した。

本研究で得られた主要な結論を纏めると以下の通りである。

第1章“緒言”では本研究の背景として、自動車業界を例に振動騒音問題を取り巻く環境と、代表的な振動解析手法について述べた。モード密度やロバスト性の観点から、従来手法では適用が困難な中周波数帯の振動解析手法の必要性について述べ、新たな解析手法としてモーダルエネルギー伝搬解析法を提案することを述べた。解析手法の妥当性および有効性を検証すべく、簡易モデルや車両モデルを用いた検証項目について述べた。

第2章“モーダルエネルギー伝搬解析法の基礎理論”では、モーダルエネルギー伝搬解析法の基礎理論となるモード解析法及びモード合成法について述べると共に、半拘束モード合成法に基づいた主構造と従構造の連成系の運動方程式をエネルギーの次元に拡張・定式化し、各構造の固有振動モードの間の振動パワーフローを評価する手法を提案した。合せて各構造の個々の振動モードを非連成化して振動パワーフローを算出する2自由度近似法を提案した。本手法を簡易構造である箱型モデルに適用し、解析理論の妥当性検証結果について述べた。2自由度近似手法により各モード組み合わせにおける伝達パワーを評価することで、狙いの周波数帯に対し寄与の高いモード組み合わせを抽出すると共に、主構造から従構造への伝達パワー（従構造の消散パワー）を低減し、従構造の振動パワーを低減できることを確認した。

第3章“フレーム・パネルモデルへの適用”では、第2章で提案した2自由度近似が困難なより構造が複雑な系において、主構造・従構造間の伝達パワーに対する各構造の固有振動モードの寄与度を評価し、縮小モデルを構築する方法として、特異値分解の導入について検討した。主構造から従構造への伝達パワーを、結合点における振動速度と主構造から従構造への作用力の積とみなされる事を示し、合わせてこれらへの各構造の固有振動モードの寄与度を特異値分解で求められる事を示した。本手法をフレーム・パネル構造に適用し、特異値分解により同定した伝達パワーへの寄与度の高い固有振動モードのみを用いた縮小モデルで伝達パワーを近似計算できることを確認した。寄与度の高いモードの特徴を抽出し、これらのモードを抑制することで伝達パワー（従構造の消散パワー）を低減できることを示した。

第4章“実車構造における車内騒音の低減への適用”では、モーダルエネルギー伝搬解析法を車両構造モデルに適用し、車内におけるロードノイズに対し寄与が高い内装材の一つである天井の内装材（トップシーリング）からの放射音の低減を題材に実効性の検証を行った。車体を主構造、トップシーリングを従構造とした系に対し本手法に基づく数値シミュレーションを行い、車体からトップシーリングへの伝達パワーに対し寄与の高いモードを抽出すると共に、トップシーリングのモード変位と、結合点を介して車体から受ける強制的な変形が類似することで、車体からトップシーリングへの伝達パワーが増大することを明らかにした。トップシーリングのモード変位抑制のためのデッドウェイト付加対策、車体構造の強制変位成分を抑制するための剛性変更の対策を実車へ適用し、台上試験ならびに走行試験にてトップシーリングの振動レベル及び放射音（耳位置音圧）の低減を確認し、本解析法の実効性を検証した。

次に車体のパネル構造への適用を行い、トップシーリングの適用例と同様にセンターフロアパネルの固有モードによる変形と車体から強制的に受ける変形の形状が類似することで伝達パワーが増大することを示した。センターフロアパネルへ質量を付加し寄与の高い固有モードのモード特性を変更することで、センターフロアパネルの振動レベルおよび放射音の低減が可能であることを示した。

いずれも本手法に基づく数値シミュレーションと実車試験での振動レベル及び放射音（耳

位置音圧)低減量はよく一致しており、本解析法の妥当性を確認すると共に、実用性を検証することができた。