

全周波数対応振動エネルギー伝搬解析法の開発

神奈川大学 山崎 徹, 池田 和正, 栗原 海

1. はじめに

”CASE”や”MaaS”などといったキーワードで表されるように、自動車はこれまでの自動車であるだけでなく、新しい概念を有する自動車であることも求められる時代になってきた。これまでの自動車車両の開発は、衝突安全性、操安性、乗り心地、快適性などさまざまな性能を高次元でバランスさせることで成り立ってきた。そこにさらに、新しい自動車としての概念を創出しつつ、その概念をも実現するための性能も含め、より高次元でバランスをとることが求められる。すなわち、今後の車両開発では、開発初期の計画段階から、各種の性能のトレードオフを把握しつつ、バランスをとる(適正化)ことがより一層重要となる。このような適正化のためには、具体的な形状が未決定の設計初期段階でのモデルである「形で考えないモデル」、すなわち数式で記述したモデルの活用が有効である。

著者らは、これまでに、振動騒音問題の形で考えないモデルとして、振動エネルギーの伝達特性に着目したモデルにて、自動車車体のロードノイズ⁽¹⁾や、自動車エンジンの放射音⁽²⁾などの問題に適用、その低減化を検討してきた。一方、振動騒音問題の周波数特性は、低周波数域と高周波数域に分けて考えられる。エネルギーの伝達特性に着目したモデルは、高周波数域での特性の記述に適しており、それによる低減策による低減効果も大きく、低周波数域での効果は整理しきれいでなかった。

そこで本研究では、エネルギー伝達特性に基づくモデルの考え方は、低周波数域でも有効であることを検討したことを報告する。これにより、振動エネルギー伝達特性を用いたモデルにより、全周波数対応した初期設計の可能性が期待される。

2. エネルギーの伝達特性

初期設計における基本構造は、はりや板である。波

動(振動)の伝播は縦波(縦振動)と曲げ波(曲げ振動)である。一般に、車体のような薄板構造は曲げ振動が支配的であるが、二輪車のフレームなどの柱状構造ははりの縦振動と曲げ振動の両方を考慮する必要がある。

いま、図 1 に示すように、二枚の板要素が結合長さ L で接続されている場合の、要素 1 から 2 への伝達パワーを考える。要素 1 内の振動エネルギー密度 $e_1^+ = E_1/S_1$ (E_1 と S_1 は要素 1 の要素エネルギーと表面積)は、伝播速度 c_1 で、平方角 2π の半分の π の広がり で結合辺に向かって伝播する。この振動インテンシティは $e_1^+c_1/\pi$ と表せ、結合部の微小長さ dL に到達するパワー P_1^+ は次式で表せる。

$$P_1^+ = \frac{e_1^+ c_1}{\pi} dL \quad (1)$$

また要素 2 に透過するパワー $P_{1,2}^+(\theta)$ は、屈折角 θ の透過率 $\tau(\theta)$ を用いて以下に表せる。

$$P_{1,2}^+(\theta) = P_1^+ \tau(\theta) \cos \theta \quad (2)$$

したがって、要素 1 から 2 への伝達パワー $P_{1,2}$ は、これを屈折角と結合長さについて積分し、次式となる。

$$P_{1,2} = \int_0^L \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e_1^+ c_1}{\pi} dL \tau(\theta) \cos \theta d\theta = \frac{e_1^+ c_1}{\pi} L \tau_{1,2} \quad (3)$$

ただし、 $\tau_{1,2} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta d\theta$ である。

ここで、SEA における伝達パワーは、

$$P_{1,2} = \omega \eta_{1,2} E_1 \quad (4)$$

と表せ、これと式(3)を比較すると、要素 1 から 2 への

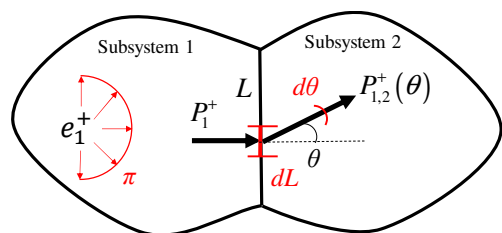


図 1 要素間のエネルギー伝達

伝達特性を表す CLF ($\eta_{1,2}$) が以下に求められる。

$$\eta_{1,2} = \frac{c_1}{\omega \pi S_1} L \tau_{1,2} \quad (5)$$

伝達特性 CLF は、上式右辺の分数部が要素情報で、残りの部分が結合情報で表される。また、曲げ波の伝播速度 c_1 はそれぞれ以下である。

$$\text{曲げ波: } c_1 = \sqrt{\frac{B\omega^2}{m}} \quad (6)$$

ここで、 E はヤング率、 ρ は質量密度、 B は曲げ剛性、 m は単位長さ(板)および単位面積当たりの質量である。

初期設計における透過率の扱いを考察する。構造不連続部では、入射した波動は波形変換して伝播する。例えば、曲げ波が入射すると、透過する波は曲げ波と縦波となり、反射する波も曲げ波と縦波となる。設計においては対象現象によって、曲げ波と縦波の考慮の有無を考える。透過率 $\tau_{1,2}$ の導出は、無限系はりを対象に、不連続部への入射波と反射波、透過波を考え、不連続部での速度や内力のつり合い、連続の関係から、反射係数および透過係数を導出する。二つのはりが同じ材質であれば、段付きはり(板厚のみが中立軸で変化)のとき、縦波間、曲げ波間の透過率はそれぞれ以下で表せる。

$$\tau_{1,2} = \left(\frac{\Delta^{-5/4} + \Delta^{-3/4} + \Delta^{3/4} + \Delta^{5/4}}{\Delta^{-2}/2 + \Delta^{-1/2} + 1 + \Delta^{1/2} + \Delta^2/2} \right)^2 \quad (7)$$

ここで、 $A=t_2/t_1$ である。

透過率を精度よく評価することは重要なことではあるが、部材の詳細が未決の初期設計の段階では、解析式で表されること、簡単な演算で求められることが重要である。そのため、著者らは透過率をまずは式(7)で求めることとし、CLF の式(5)の分数部で示される要素特性と結合長さにまずは着目する。

3. 伝達特性に基づく初期設計の低周波数域での有効性

2 章の伝達特性を活用した初期設計では、加振源から放射源への伝達特性、すなわち結合損失率を設計し、放射源の平均振動を低減する。本節では、後述する検討モデルを対象に、伝達特性による結合損

失率の初期設計の前後で平均振動が低減することを、FEM を用いて検討する。

図 4 に検討に用いた、板厚一様(2mm)である複数の薄板要素から構成される平板モデル(基礎平板モデルと称す)を示す。基礎平板モデルでは端部の要素 A に振動入力を与えられ、他端の要素 C の振動低減を考える。全要素の材質は鋼とする。

この基礎平板モデルについて、伝達特性による初期設計を実施する。入力要素 A から低減要素 C までの結合損失率(式(5))が最小となる設計パラメータの解を探索する。ここでは、要素 B の板厚を設計パラメータとした。また要素 B はさらに m 個の要素 B- i ($i=1 \sim m$)に分割し、各々の板厚を設計する。なお、低騒音と軽量の両立のために、全要素の合計質量が一定、すなわち平均板厚は不変とした。

以上の条件の初期設計で得られた $m=2$ と 8 のときの構造解を「初期設計モデル」として図 3 に示す。いずれも、最大板厚 3mm と最小板厚 1mm が交互に配置される凸凹構造である。

これらの初期設計モデルの振動が、基礎平板モデルより小さいか確認するために、これらの構造物の FE モデルを作成し、周波数応答解析を実施した。得られた解析結果から、入力パワー、要素 C の振動エネルギーを算出した。入力パワーで正規化した振動エネルギーの比較結果を図 4 に示す。ここには、式(5)の CLF の適用が有効といわれる、モーダルオーバーラップ係数 $\text{MOF} < 1$ の領域を網掛で示している。

図 4 の○と●は、伝達特性を用いた初期設計前後の結果を示している。2 分割の図 4(a)ではここに示すすべての周波数において、初期設計による振動低減がわずかではあるが確認できる。また、8 分割の図 4(b)では高い周波数ほど低減量は大きい、 $\text{MOF} < 1$

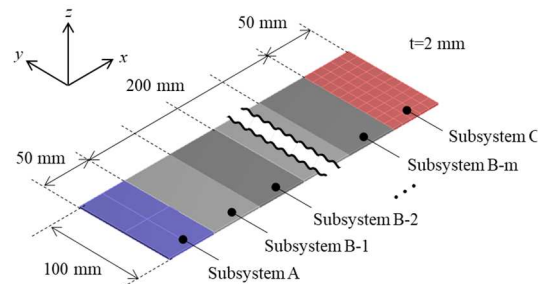


図 2 検討対象構造物

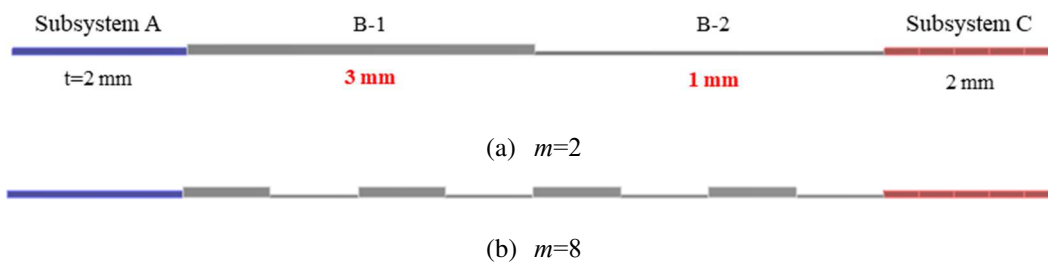


図3 初期設計モデル

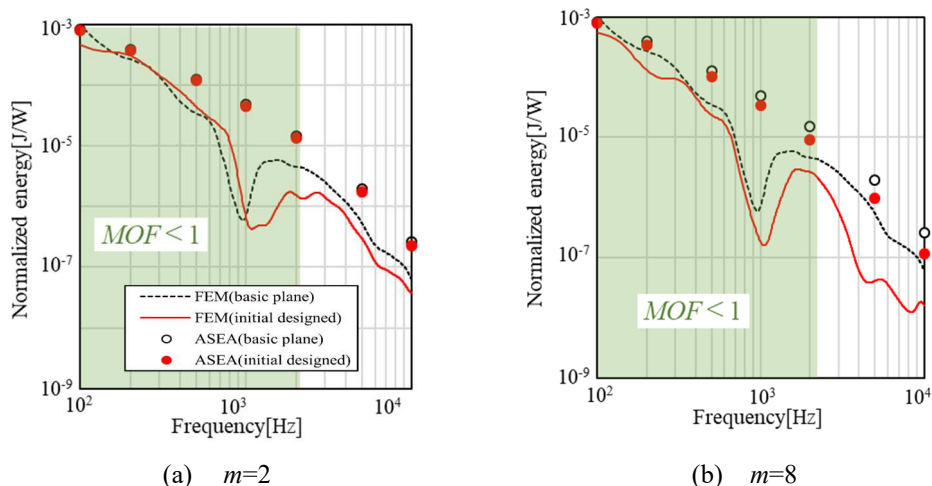


図4 要素Cのエネルギーの比較(FEMと伝達特性(SEA))

となる低い周波数域でも低減を確認できる。

一方、図4のFEMによる結果は、黒点線が設計前の結果、赤実線が設計後の結果を示している。高い周波数域では図4(a)でも(b)でも設計による振動低減を確認できる。また、 $MOF < 1$ となる低い周波数域では、図4(a)では低減されていない周波数もあるが概ね低減されている。また、図4(b)ではすべての周波数で低減を確認できる。

以上の結果より、 $MOF > 1$ となる周波数領域で有効と考えてきた伝達特性モデルは、 $MOF < 1$ となる周波数領域でも振動は低減できていることが確認された。

以上より、伝達特性による初期設計は低周波数域でも有効で、すべての周波数で有効であると言える。

4. 結論

複数の平板から構成される検討モデルを対象に、伝達特性の初期設計による平均振動の低減効果を、

FEMを用いて検討した。その結果、 MOF の値に関わらず、平均振動の低減効果が得られることを確認した。したがって、全周波数帯域において、伝達特性を活用した初期設計は有効であると言える。

参考文献

- (1) 山崎徹, 中西康介, 諏訪部溪太, 塩崎弘隆, 柳瀬純一, ホワイトボディの振動エネルギー伝搬モデルによる概念設計, 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20196158, 2019-10
- (2) 片岡大雄, 宮澤昌也, 江戸宏一, 坂口元康, 中村弘毅, 山崎徹, 解析SEAを用いたエンジンの要素追加による低振動化, 自動車技術会2018年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20186038, 2018-10