

# 振動エネルギー伝搬解析を用いた機械構造物の低振動初期設計

神奈川大学 山崎 徹, 中村 弘毅, 三山 壮

## 1. 緒言

機械製品の静粛性は重要な製品価値であり, EV車など今後の更なる電動化などにより対処すべき周波数域は高く, 広くなってくる. 機械製品の低振動設計は, 固有振動視点と振動伝搬視点の二つに大別できる<sup>(1)</sup>. 固有振動視点の設計は, 振動騒音の原因である共振ピークに着目し対策を考える. しかし高周波においては, 多数の固有振動が密に存在するため, 共振ピークの特定制およびその特定制が困難な場合が多い. 一方, 振動伝搬視点の設計は, 構造物の振動の伝搬特性を評価するため, 高周波数域においても適用可能である<sup>(2)</sup>.

このような背景の下, 著者らは統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis, 以下 SEA) や振動インテンシティ解析 (Structural Intensity; 以下 SI) といった振動エネルギー伝搬解析に着目し, 構造諸元の変更によるパッシブな低振動設計法の確立を目指して研究を行っている<sup>(1)~(6)</sup>. そのうち文献(5)では, 主振動系を変更せずに, シェル要素を付加し, 付加した要素(動吸振要素)に振動エネルギーを伝える(逃がす)ことで, 広帯域の周波数で主振動系の振動低減を図ることを提案している. そこでは付加する動吸振要素の諸元や付加位置など, 動吸振器要素の設計について明らかになっていない.

そこで本報では, 広帯域の振動低減を目的とした動吸振要素の設計指針, すなわち要素の諸元や付加位置の決め方について論じる. はじめに, 主振動系と動吸振要素間のパワー平衡に着目し, SEAの理論式を基に動吸振要素の働きについて考察する. 次に, 動吸振要素の付加による低減効果は, 二つの周波数域に大別されることを示し, それらの周波数域で動吸振要素の効果の違いについて SI解析を用いて分析する. さらに, SI分布から得られたその知見を基に, 各周波数域での動吸振要素の設計指針を提案し, その妥当性を FEMで確認する.

## 2. SEAに基づく動吸振要素の考察

本節では, 定常状態のパワー平衡式に基づき, 動吸振要素の働きについて述べる. また, 伝搬特性を表す結合損失率の解析式を基に, 動吸振要素の低減効果について考察する.

### 2.1. 動吸振要素の働き

動吸振要素の働きを, パワー平衡式から考察する.

いま, 主振動系として2要素系の SEAモデルを考える. 一つの要素にのみ入力パワー  $P$  があるとき, 入力パワーは各要素

での散逸パワー( $\omega\eta_i E_i$ )の和として, 次式のパワー平衡式が成り立つ.

$$P = \omega\eta_1 E_1 + \omega\eta_2 E_2 \quad (1)$$

ここで,  $\omega$  は中心角振動数,  $E_i$  と  $\eta_i$  はそれぞれ要素  $i$  の要素エネルギー, 要素内部での減衰を表す内部損失率である.

そこで, この主振動系に要素3, すなわち動吸振要素を付加すると, パワー平衡式は次式となる.

$$P = \omega\eta_1 E'_1 + \omega\eta_2 E'_2 + \omega\eta_3 E'_3 \quad (2)$$

ここで,  $E'_i$  は動吸振要素付加時のエネルギーを表す. 動吸振要素の右辺第三項を左辺に移行し, 入力パワー  $P$  が不変とすれば, 式(1)との比較より, 主振動系(要素1と要素2)の振動エネルギーは要素3の分だけ減少する.

すなわち, 入力パワーが変わらなければ, 要素の付加により主振動系の振動エネルギーは減少させられる.

### 2.2. 動吸振要素の諸元の設計

要素間のパワーフローと結合損失率の解析式を用いて, 動吸振要素の諸元について考察する.

主振動系(2要素系)の要素1にのみ動吸振要素を付加した場合, 動吸振要素へのパワーフロー  $\Pi_{13}$  は式で表される.

$$\Pi_{13} = \omega(\eta_{13} E_1 - \eta_{31} E_3) \quad (3)$$

この式から, 主振動系の振動を小さくするには, 動吸振要素へのパワーフロー  $\Pi_{13}$  を大きくすればよい. そのためには, 結合損失率  $\eta_{13}$  は大きく, 結合損失率  $\eta_{31}$  は小さくすればよい.  $\eta_{31}$  は式(4)で表され, 動吸振要素の低減効果を大きくするためには, 動吸振要素(要素3)の板厚  $h_3$  やヤング率  $E_3$  を小さく, 面積  $S_3$  や密度  $\rho_3$ , ポアソン比  $\nu_3$ , 結合長さ  $L$  や透過率  $\tau$  を大きくすればよいといえる.

$$\eta_{31} = \frac{2L_{31}\tau_{31}}{\pi S_3} \sqrt{\frac{h_3}{\omega}} \sqrt{\frac{E_3}{12\rho_3(1-\nu_3^2)}} \quad (4)$$

以上より要素の概寸, 材質などの諸元はこの式に基づいて考

えられる。

### 3. SIによる動吸振器の考察

前章では動吸振の低減効果について、SEAの解析式を基に示した。SEAの解析式では無反射を前提としているため、前述した考えは、周波数に依存しない。しかし、実構造物においては不連続部で反射するため、共振の影響が含まれる。

そこで本章では、動吸振要素の効果について、FEMでエネルギーを算出し、考察する。要素付加による振動の低減効果を分類し、それぞれの効果についてSI解析により分析する。

#### 3.1. 動吸振要素の低減効果の大別

動吸振要素を主振動系(平板)の側面に付加し、主振動系の面外振動を評価する。主振動系の面外振動に対して、面内方向に動吸振要素を付加することを考える。

本研究の対象構造物は平板構造物とする。図1に示すように、主振動系は長さ250mm、幅45mm、厚さ1.7mmのSS400製の長方形平板(密度7800kg/m<sup>3</sup>、ヤング率200GPa、ポアソン比0.30)であり、これをoriginalと称する。加振点を(x, y)=(0.025, 0.045)の位置とし、0.20 < x < 0.25の範囲の応答を評価する。付加する動吸振要素は、縦22.5mm、横50mm、厚さ1.7mmの主振動系と同質の平板とし、本報では、動吸振要素による振動低減効果に着目するため、図1に赤線で示すように加振点近傍と評価部を除く、三種類の位置(model A, model B, model C)の各々に動吸振要素を付加した場合を考える。

FEM解析を用いて、動吸振要素による振動低減効果を示す。4つのFEMモデルを作成し、周波数応答解析を行った。上限有効解析振動数を20kHzとなるメッシュサイズとし、境界条件は周辺自由とした。また、振動応答はモード重ね合わせ法により算出し、損失係数(構造減衰係数)を一定に0.1とした。構造物の伝搬特性に着目するため、運動エネルギーを入力パワーで正規化したものを図2に示す。

動吸振要素の付加により、広い周波数域で主振動系(original)よりも振動エネルギーが低減している。また、動吸振要素の付加による低減効果は周波数域によって異なる。低周波数域では、1450Hzや2600Hzで動吸振要素の付加位置(A, B, C)によらず大きく低減している。一方、5000Hz付近では、低減効果が大きくなる周波数は、動吸振要素付加位置で異なる。また、12000Hz以上の周波数では、広帯域でmodel Bの低減効果が大きい。このように高周波数域では、動吸振要素の付加位置が、動吸振器の低減効果に及ぼす影響が大きいと言える。

以上のことから、動吸振要素による低減効果は、その付加位置によらない低周波数域と付加位置の影響が大きい高周波数域に大別できる。

#### 3.2. SI分布による考察

前節で述べた二つの周波数域ごとの振動低減効果について、SIを算出して考察する。

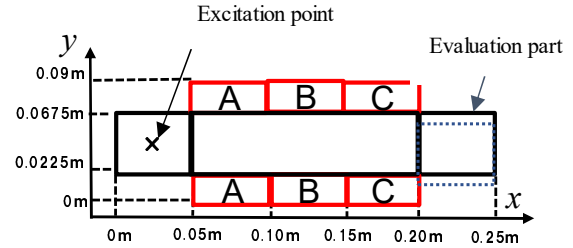


Fig.1 Subdivision of a test structure, main structure and locations of vibration absorbing structure

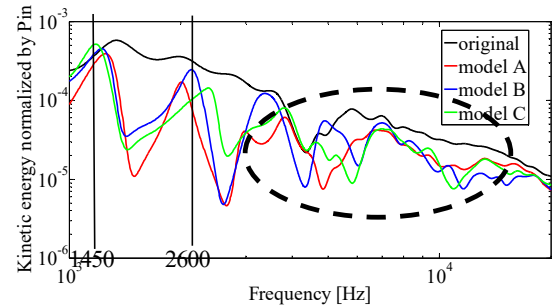


Fig.2 Comparison of energies before and after adding vibration absorbing sub-structure with loss factor = 0.1

#### 3.2.1. 低周波数域のエネルギー流れ

動吸振要素による低減効果が大きい周波数の代表例として、図3に1450HzでのそれぞれのモデルのSI分布をベクトル図で示す。また、振動変位をコンタ図で示す。同図(a)において、主振動系(original)のSI分布は加振点から評価部へストレート形のエネルギーを表しており、構造物の減衰によって、伝達パワーは加振点から離れるにつれて小さくなる。

一方、動吸振要素を付加した際のSI分布(図3(b), (c), (d))は動吸振要素へ伝搬しており、評価部へのエネルギー伝搬は確認できない。また、付加位置によらず動吸振要素近傍(破線部)の振動変位が大きくなっており、動吸振要素の付加によりローカルな共振が現れている。このローカルな共振によって、動吸振要素にエネルギーが集まると考えられる。

#### 3.2.2. 高周波数域のエネルギー流れ

高周波数域の振動伝搬特性について検討する。15200HzのSI分布と振動変位を図4に示す。同図(a)の主構造物(original)のSI分布は加振点から蛇行しながら評価部へ向かう流れとなっている。これは周波数が高くなるに伴い、波長が短くなるためである。

一方、model A(図4(b))とmodel C(図4(d))のSI分布では、動吸振要素へのエネルギー伝搬はほとんど見られず、図中の矢印のように構造物の中央部を伝搬している。この中央部のエネルギー流れに類似した流れをoriginalでも確認でき、動吸振要素が主振動系のエネルギー伝搬に及ぼす影響は小さいことがわかる。対して、図4(c)のmodel BのSI分布では加振点から動吸振要素へのエネルギー伝搬が確認でき、評価部への

エネルギー伝搬は小さい。図 4(a)の original の SI 分布において、model B の付加位置近傍のエネルギーは縁を伝搬しており、エネルギーが伝搬している位置に動吸振要素を付加することでエネルギー流れが大きく変化する。

したがって、低周波数域では、ローカルな共振によってエネルギーを集めることができる。また、動吸振要素の付加位置がエネルギー伝搬に及ぼす影響は小さい。一方、周波数が高くなるに伴い主振動系のエネルギー流れが複雑になるため、付加位置の影響が大きくなる。エネルギー流れが大きいところに動吸振要素を付加することで、より大きな低減効果が期待できる。

#### 4. 動吸振要素による広帯域低振動設計の提案

前章までの検討を基に、動吸振要素による広帯域の低振動設計法を提案する。また、提案手法の妥当性を FEM で確認する。

#### 4.1. 全周波数域における低振動設計指針

二章の考察から、動吸振要素の低減効果は、主振動系と動吸振要素間のパワーフローに依存するため、式(4)の結合損失率の理論式を基に設計する。

#### 4.2. 低周波数域における低振動設計指針

低周波数域では、動吸振要素の低減効果は、付加位置によらず、ローカルな共振周波数で大きくなる。そのため、ローカルに共振している概寸法に着目することで、動吸振要素による低減効果が大きい周波数が設計可能である。

#### 4.3. 高周波数域における低振動設計指針

高周波数域では主振動系のエネルギー流れが複雑になるため、動吸振要素の付加位置が低減効果に及ぼす影響が大きくなる。そのため、図 4 のように SI が大きい位置に要素を付加することによって、大きな低減効果が期待できる。

#### 4.4. 提案指針の確認

前述した動吸振要素の設計指針の妥当性を FEM で確認する。図 1 の model B の 2 枚の動吸振要素の各々の縦寸法

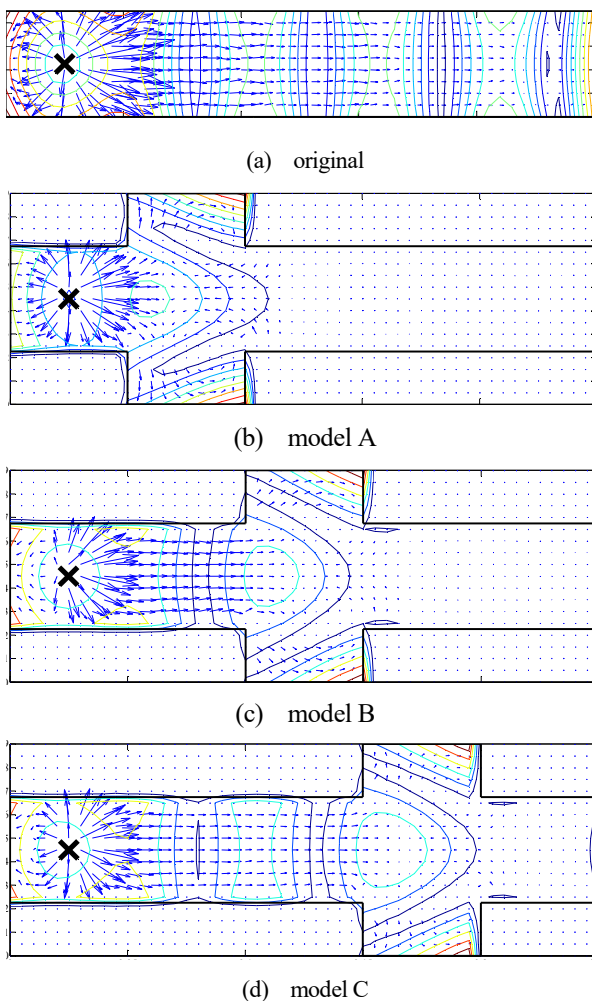


Fig.3 Comparison of structural intensity distribution before and after adding vibration absorbing sub-structure at 1450Hz with loss factor of 0.1

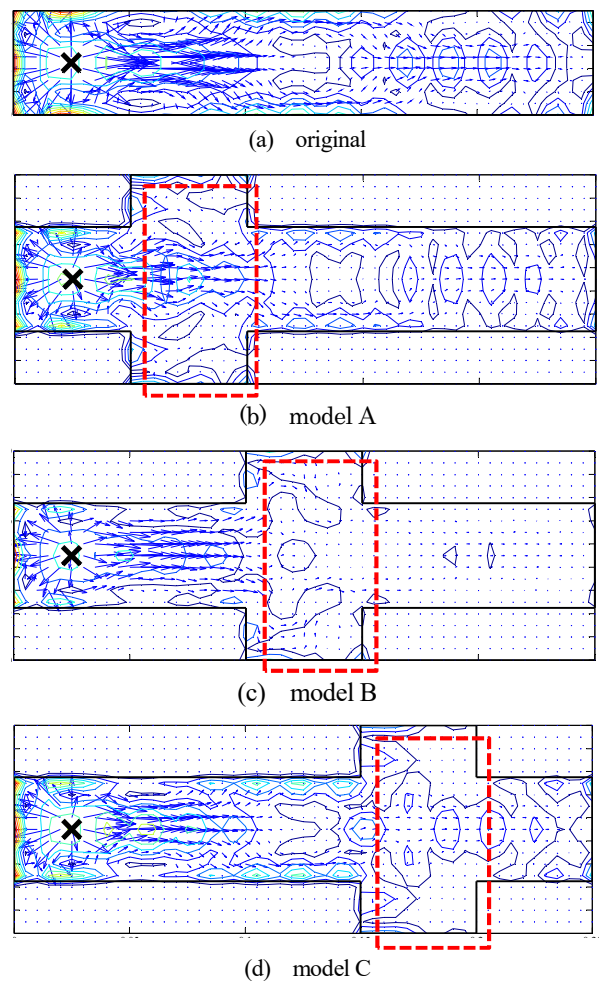


Fig.4 Comparison of structural intensity distribution before and after adding vibration absorbing sub-structure at 15200Hz with loss factor of 0.1

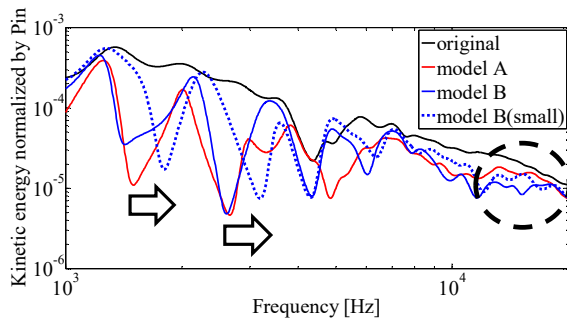


Fig.5 Comparison of energies adding different vibration absorbing sub-structure with loss factor = 0.1

を 5mm ずつ短くしたモデル (model B (small)) を作成した。評価部の運動エネルギーの比較を図 5 に示す。

動吸振要素の面積を小さくしたため、model B (small) のエネルギーの低減効果は、周波数平均で小さくなっている。一方、低周波数域では、動吸振要素の縦寸法が短くなるに伴い、ローカルな範囲の共振周波数が高くなるため、低減効果が大きい周波数が高くなっていることがわかる。また、12000Hz 以上の周波数域 (破線部) では model A よりも低減していることから、付加位置による影響が大きいことも確認でき、提案した設計指針が妥当であるといえる。

## 5. 結言

本報は動吸振要素による主振動系の振動低減効果について、SI 分布を基に考察し、広帯域の低振動設計指針について論じた。以下に得られた知見についてまとめる。

- (1) 主振動系と動吸振要素についてのパワー平衡式で論じた。
- (2) 動吸振要素による低減効果は、要素の概寸法の影響が支配的な周波数域と要素の付加位置の影響が支配的な周波数域に大別できることを示した。
- (3) 主振動系のエネルギー流れが単純な場合、動吸振要素の付加位置がエネルギー伝搬に及ぼす影響は小さく、エネルギー流れが複雑になるため、付加位置の影響が大きくなる。また、エネルギー流れが大きいところに動吸振要素を付加することで、より大きな低減効果が期待できる。
- (4) SEA 理論式と SI 分布から得られた知見を基に広帯域の低振動設計指針を提案した。また、その妥当性を FEM で確認した。

## 参考文献

- (1) 山崎徹, 三山壮, 中村弘毅, 宮崎敦子: モードと波動の両視点による機械構造物の振動低減設計, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.6, pp.1373-1379 (2016)
- (2) 三山壮, 宮崎敦子, 中村弘毅, 山崎徹: 振動エネルギー

流れの促進と抑制に基づく低振動構造設計, 自動車技術会講演予稿集, pp.336-341 (2017)

- (3) 山崎徹: 日本機械学会講習会: 1DCAE 概念に基づくものづくり設計教育 (第三弾): 機械のデザインのための 1DCAE 「基礎: 音振動の 1DCAE」, No.14-71, pp.15-24 (2014)
- (4) 村田和宏, 三山壮, 村山誠英, 中村弘毅, 中満翼, 川端直人, 山崎徹: 振動騒音低減のための二段階設計法の実験的検証, 自動車技術会講演予稿集, pp.431-436(2017)
- (5) 村田和宏, 三山壮, 谷本悠輔, 中満翼, 川端直人, 山崎徹: 振動増大要素の追加による主構造の振動低減, 自動車技術会講演予稿集
- (6) D. U. Noiseux, Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates, Journal of Acoustical Society of America, Vol.47, pp.238-247, (1970)