

エンジンマウントレイアウトに対する 特性行列連成度を用いた 低周波振動騒音性能評価手法

A Method for Evaluation of Low-frequency Noise and Vibration
of Powertrain Mount Layout using Degree of Coupling with Physical Matrices

久世正文* 渡辺 賢* 酒井竜英*
Masafumi KYUSE Satoshi WATANABE Tatsuhide SAKAI

要 旨

自動車開発において低周波の振動騒音事象である乗心地とアイドル振動騒音とは相反する。この2事象に対し、設計段階で評価する簡便な指標として物理座標系に基づいた特性行列を単純な数式で表現した連成度を定義した。この連成度を用いてアイドル、乗心地に対してCAEによる起振力応答シミュレーションと実機での性能評価の相関性を確認したところ、良好な結果を得ることができた。本手法の特性行列連成度を用いることによってエンジンマウントレイアウト性能評価に対する設計者のツールとして完成車トータルで目指す性能設計に有効であることが分かった。

ABSTRACT

Ride comfort and idling performance are conflicting low-frequency noise and vibration problems in vehicle development. A convenient index for evaluation of these two phenomena at the design stage was formulated by defining the degree of coupling in a simple numerical expression representing the characteristic matrix based on a physical coordinate system. The degree of coupling was used for performance evaluations of idling and ride comfort in CAE impulse forced response simulation and in an actual vehicle, and a good correlation was obtained between them. It was ascertained that this method can be used effectively as a design tool for performance evaluation of powertrain mount layout to be used in designing total vehicle performance.

1. まえがき

自動車のエンジンを防振支持するための設計手法は、その運動方程式から求まる特性行列の連成項に着目し、非連成支持とすることにより、エンジンマウント共振領域の制振と防振領域の振動遮断を両立させる手法が古くから提唱されている⁽¹⁾。自動車開発におけるエンジンマウント設計上の課題は、サスペンション入力に対する乗心地、駆動系トルク入力に対する車両前後振動、エンジントルク変動入力に対するアイドル振動騒音、これらの事象に対して性能を満足させることにあるが、エンジンマウント共振とアイドル振動騒音域である防振域は周波数帯が近く、サスペンション入力に対する制振性能とアイドル振動騒音に対する防振性能は相互に影響しあう関係であることが多い。また、実際の設計上も、エンジンルーム内で非連成支持を行うために理想的な場所にエンジンマウントを置くことはFF車の場合困難なことが多く、ある程度の連成支持を余儀なく

されている。

ここ10年では、コンピュータの性能向上、価格低下に代表されるCAE環境の整備に伴い、CAEソフトウェアを用いた応答計算による性能予測が可能になってきているが、コンピュータの中で膨大な数のシミュレーション案別をこなしているのが一般的である。また、計算実行者が出した周波数応答レベルを設計者はレベルの大小のみ評価していることも少なくなく、物理的な論議が忘れられている場合もある。

そこで本報告では、周波数応答といった設計者にわかりにくい指標ではなく、エンジンマウントレイアウト(ジオメトリとばね値)を設定する際に、簡便な物理座標系に基づいた指標により連成度を規定することを試みた。排気量2リッタークラスのFF横置き乗用車に対し、
(1)特性行列(質量、剛性)を演算処理した連成度
(2)機構解析ソフトによる周波数応答解析
(3)実機テスト

の上記3項目について低周波事象である乗心地、アイドル解析を進めたところ良好な相関が得られ、FF横置きエンジンマウントレイアウトに対する連成度指針が得られたので報告する。

2. 特性行列における連成度

固有値解析では慣性・弾性主軸上の対角行列によって評価されるが、連成度解析においては連成項である非対角項と非連成項である対角項による関係から評価される。質量行列 $[M_{gr}]$ (式(1))、剛性行列 $[K_{gr}]$ (式(2))はそれぞれエンジン単体、ばね特性から解析したもので、両行列ともグランド座標軸上にある。ここで添字 i, j の1から6は順に前後、左右、上下、ピッチ、ロール、ヨー成分を示す。質量行列・剛性行列は一般的にグランド座標系上においては慣性・弾性主軸である対角項のみでなく慣性・弾性乗積である非対角項が存在し、固有6モードが互いに連成していることが分かる。

$$[M_{gr}] = \begin{bmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & \\ & & m & & & \\ & & & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ & & & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ & & & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[K_{gr}] = \begin{bmatrix} k_{11} & & & k_{15} & k_{16} & \\ & k_{22} & & & k_{26} & \\ & & k_{33} & k_{34} & k_{35} & \\ & & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{11} & k_{11} \\ k_{51} & & k_{53} & k_{11} & k_{55} & k_{11} \\ k_{61} & k_{62} & & k_{11} & k_{11} & k_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

このモード連成を評価するため、連成行列として $[D_0]$ を導出する。連成行列 $[D_0]$ は特性行列である質量行列、剛性行列から算出され、式(3)のように表される。ここで ω は角速度[rad/s]であり、評価する事象に合致した値を設定する。

$$[D_0] = [K_{gr}] + \omega^2 [M_{gr}] \quad (3)$$

$$[D_0] = \begin{bmatrix} d_{11} & & & d_{15} & d_{16} & \\ & d_{22} & & d_{24} & d_{26} & \\ & & d_{33} & d_{34} & d_{35} & \\ & & & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ & & & & d_{55} & d_{56} \\ & & & & & d_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

連成行列 $[D_0]$ から事象の主成分である対角項と非対角項との比率として連成度を定義する。例えばアイドル振動騒音の場合、主入力方向であるy軸廻りのモードと連成するz軸廻りを式(5)のように演算する。

$$[D_{idle}] = d_{56} / d_{55} \quad (5)$$

d_{55} はy軸廻りの対角項であり、 d_{56} は d_{55} に連成するz軸廻りの非対角項となる。

各事象の特徴を踏まえ、アイドル、乗心地それぞれに連成度を設定した。

3. CAE 計算と実機テストとの相関

実際にエンジンマウントレイアウトをAタイプ、Bタイプ、Cタイプ(従来のレイアウト)と3種類試作し比較した。実機による確認の前にあらかじめ機構解析ソフトウェアにより検討を行い、連成度検討を行った結果を記す。

3.1. アイドル振動騒音

この現象時には、エンジンy軸廻り(以降ロール軸)に駆動トルク変動が働き、ロール軸廻りの振動モードが主となる。入力方向のロールモードが主となり、エンジンz軸廻り(以降ヨー軸)のモードが連成することによって振動が悪化する。アイドル性能評価における連成度は式(5)となり、Cタイプを基準とすると Fig. 1 に示すとおりとなる。

従来のレイアウトであるCタイプに対してAタイプはほぼ1.4倍の値であり、Bタイプはほぼ4倍の数値である。

次にCAEモデルとしてFig. 2のようなモデルにより実機アイドル振動モードをシミュレートした。このモデルではエンジン諸元として質量、慣性項を、マウントばね特性は

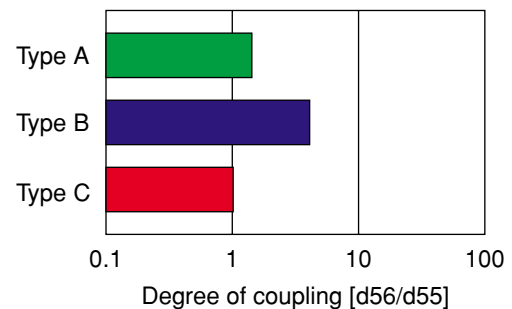


Fig. 1 Degree of coupling for idling Noise and Vibration

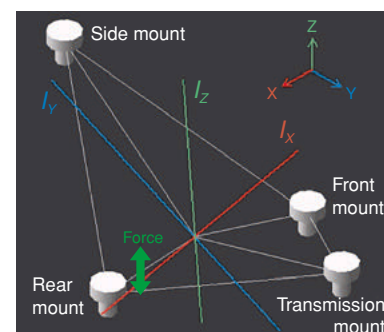


Fig. 2 CAE model for idling Noise and Vibration

アイドル時の周波数特性を与えている。そしてエンジン起振力を与えることでマウントにかかった応答力、加速度を評価している。その結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 から、Bタイプは 20Hz 域のヨーモードとの連成度が高く、それによりアイドル振動騒音領域で振動を増加させている。Fig. 4に実機によるテスト結果を示すが、CAE とほぼ同様な結果が得られている。Bタイプでは明確に振動が増加しており、Aタイプでは若干振動が増加するものの実機テストではアイドル振動騒音に大きな影響を及ぼすほどではないことがわかる。

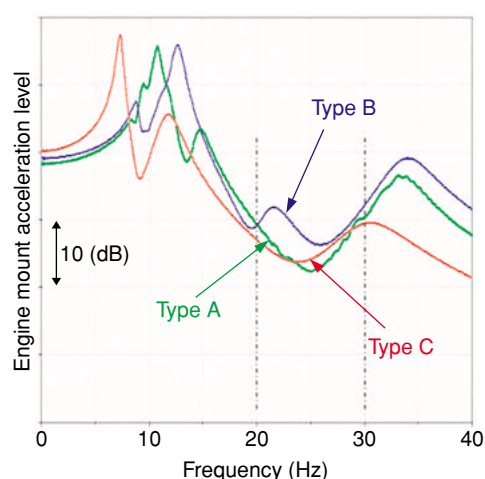


Fig. 3 Level of engine mount vibration with CAE

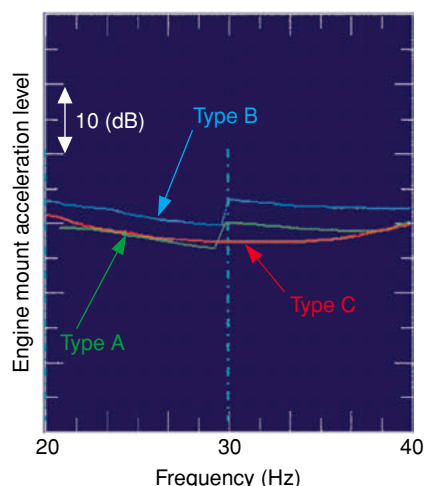


Fig. 4 Experimental level of engine mount vibration

今回設定した連成度基準では 1～1.4 程度では、アイドル時のエンジンマウント点振動に悪影響は及ぼさないが、Fig. 4 から 6 では影響が大きくなり、1.4 が守るべき指数であることがわかった。

3.2. 前後入力に対する乗心地

エンジンマウント上下入力に対する乗心地事象に対して

は、ここ 10 年では液封マウントの適用が一般的になっている。本報告では、液封マウントの上下方向減衰特性で制振することが難しい前後、左右入力応答に対して試みた。

前後、左右入力の場合は主並進成分に対し回転成分を連成させることにより振動レベルを低減できることが既にわかっている^{(2)～(4)}。

前後入力乗心地に対する連成度は下記ようになる。C 基準では Fig. 5 のとおり。

$$[D_{longi}] = \frac{d_{53}}{d_{33}} \quad (6)$$

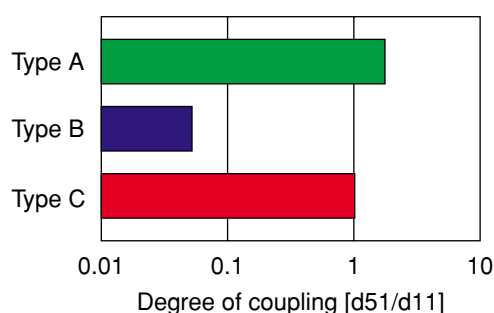


Fig. 5 Degree of coupling for ride comfort

Cタイプに対してAタイプはほぼ 1.1 倍の値であり、Bタイプはほぼ 0.07 倍の数値である。

次に CAE モデルとして Fig. 6 のようなモデルにより実機乗心地前後振動モードをシミュレートした。すなわちアイドルモデルと同様にエンジン諸元、マウント特性をモデル化し、さらに乗心地評価のために、ボディ、タイヤ、シェーカーをモデル化している。このシェーカーを前後もしくは左右に加振することによって起こるボディ応答力、加速度を評価する。また実機でもこれと同じ構成の加振設備にて評価している。シミュレーション結果を Fig. 7 に示す。

Fig. 5 から判るようにBタイプは 10Hz の前後固有振動と、回転成分との連成度が低いため、振動のレベルは他の

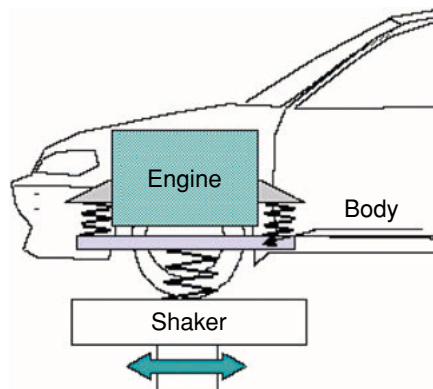


Fig. 6 CAE model for ride comfort

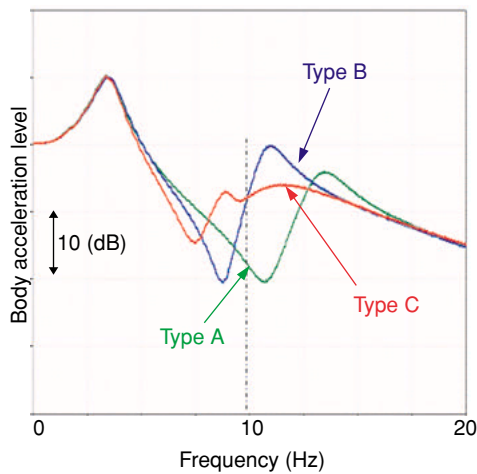


Fig. 7 Level of body vibration with CAE

2つと比較して高い。対してA, Cタイプは前後と回転成分の連成度が高く、レベルが低い。またAタイプは前後固有値が高いためCタイプと比較して 10Hz 付近の振動は低い。

今回設定した連成度基準において 1～2 程度では、乗心地 Body 前後振動に悪影響は及ぼさないが、Fig. 8 から 0.07 では振動レベルが大きくなり、1 が守るべき指数であることがわかった。

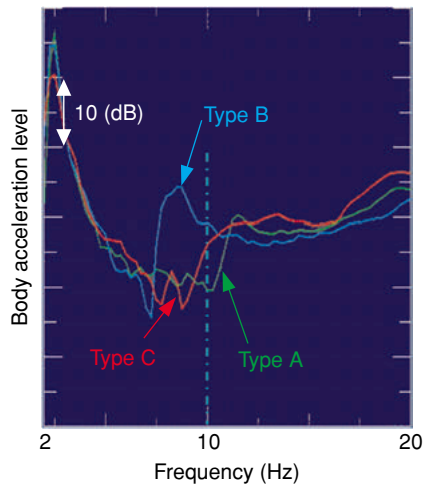


Fig. 8 Experimental level of body vibration

3.3. 左右入力に対する乗心地

左右入力の場合は前後成分同様に連成度は下記のようになり、C基準で Fig. 9 のとおり。

$$[D_{\text{horizo}}] = \frac{d_{42}}{d_{22}} \quad (7)$$

Cタイプに対してAタイプはほぼ 1.3 倍の値であり、Bタイプはほぼ 0.3 倍の数値である。Fig. 10 から、Bタイプは 10Hz の左右固有振動と、回転成分との連成度が低いため、振動のレベルは他の2つと比較して高い。対してA, C

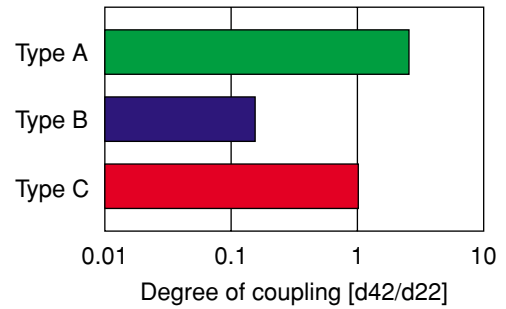


Fig. 9 Degree of coupling for ride comfort

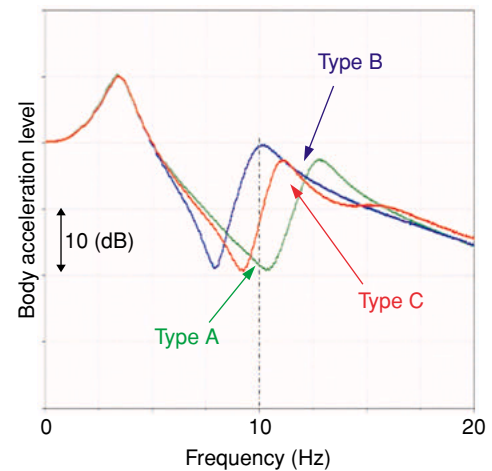


Fig. 10 Level of body vibration with CAE

タイプは左右と回転成分の連成度が高く、レベルが低い。またAタイプは左右固有値が高いためCタイプと比較して 10Hz 付近の振動は低い。

今回設定した連成度基準では 1～3 程度では、乗心地 Body 前後振動に悪影響は及ぼさないが、Fig. 11 から 0.2 では振動レベルが大きくなり、1 が守るべき指数であることがわかった。

完成車トータルで見た場合にはAタイプが最も優れたパッケージだと言える。

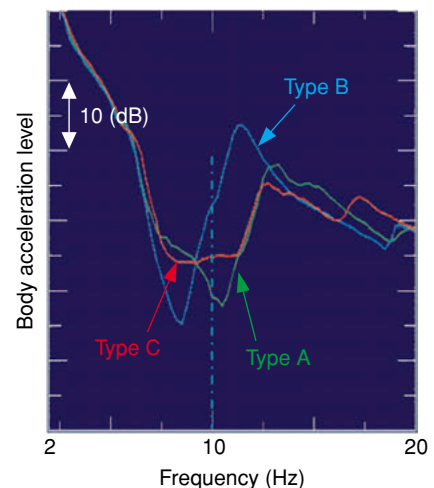


Fig. 11 Experimental level of body vibration

7. まとめ

エンジンマウントレイアウトに対する CAE 検討、実機テストから、今回試みた連成度と完成車性能の間では高い相関性を示すことが検証された。今回設定した連成度は、特性行列から簡単な行列演算により求めることが可能であり、設計者がレイアウトをしている段階で、乗心地、アイドル振動騒音といった低周波事象に対する性能がどのようなものかを把握することが容易である。質量行列と剛性行列を加算した行列の非対角項のうち、主モードに対する関連モード項の除算によって表されるため、指標自体の意味も設計者にわかりやすく、CAE 計算のスキルがない設計者でも性能の評価が可能であり、本格的な CAE 検討を開始する前段階での絞り込みにも使用できる。

参考文献

- (1) 戸原春彦編：防振ゴム，社団法人日本鉄道車両工業会，p.72-94 (1975)
- (2) 酒井竜英他：起振力応答シミュレーションによるエンジンマウントレイアウト性能評価，自動車技術 Vol.47, No.6, p.65-70 (1993)
- (3) 酒井竜英他：エンジンマウントレイアウトシステム開発における CAE 展開，JMAC8 (1994)
- (4) 酒井竜英他：駆動系挙動解析への機構解析ソフトウェア適用，HONDA Technical Review Vol.2, p.171-178 (1990)
- (5) T.SAKAI, Ludo Gielen : Development procedure for Interior Noise Performance by Virtual refinement, SAE Noise & Vibration conference, Traverse City, Michigan, USA (2001)
- (6) 酒井哲也他：エンジンマウントレイアウト設計の理論的考察，いすゞ技報，No.102, p.40-52 (1999)

■ 著 者 ■



久世正文



渡辺 賢



酒井 竜英