

エンジンマウントにおけるギヤ振動伝達予測技術

Prediction Technique for Gear Noise Transfer in Engine Mounting Systems

禧 久 和 臣*
Kazuomi KIKU

関 根 明 子*
Akiko SEKINE

両 方 雅 行*
Masayuki RYOUKATA

要 旨

ギヤノイズなどの高周波振動のエンジンマウント伝達による悪化を、開発初期段階で予測するための技術構築を目的とし、FEM解析を用いて予測する手法を検討した。マウントは通常ラバーをはさみパワープラント側と車体側の金属のブラケットで構成されており、高周波振動伝達ではその金属部分も含んだ連成振動が問題となる。本研究により、マウント振動伝達特性を、それぞれの金具単品の応答特性を合成し、そのレベルの高さにより簡易的に評価し車室内音悪化を予測できることがわかった。また金具が締結されている車体フレーム、ケースのモデル化、さらに締結部の締め付け剛性についてバネ要素を用いてモデル化することにより、精度の良い周波数応答計算(共振周波数誤差5%程度)が可能となった。

ABSTRACT

Prediction methods using finite element method (FEM) analysis were investigated to construct technology for predicting aggravation of gear noise and other high frequency vibrations due to engine mount transfer in the initial development stages. Engine mounts are normally comprised of rubber clasped between metal brackets on the power plant and chassis sides, and coupled vibration including these metal parts is a problem for high frequency vibration transfer. This study showed that the mount vibration transfer characteristics are a composite of the response characteristics of each metal part, and that simple evaluation by the response level can be used to predict the aggravation of noise in the front seat. In addition, modeling the chassis frame and case to which the metal fittings are joined, and modeling the clamping rigidity of the joints using spring elements made it possible to accurately calculate the frequency response (error of resonance frequency: approximately 5%).

1. はじめに

自動車の商品性向上の観点で、トランスミッションのギヤノイズの低減は重要な課題である。ギヤ音の車室内への経路としては、マウント、ケーブルなどの固体伝播とケースから放射される空気伝播に分けられる。現状の開発でギヤノイズのマウントからの伝達は寄与が大きく、対応するために多くの開発工数を必要としている。これまで、マウントのラバーを保持しているパワープラント側と車体側の金具の共振により、マウント系の振動減衰量が小さくなり結果的にある周波数で振動伝達、車室内ギヤ音が悪化してしまうことが分かっている。ただし事前に、悪化量を定量的に予測することは困難であった。近年の開発期間短縮、試作回数削減により精度の良い予測手法が望まれている。これに対し本研究では以下の項目について検討を行った。

(1)マウントによるギヤ振動伝達に対して計算により伝達レベルの可否を評価する手法

(2)簡単で精度の良い計算のためのモデル作成手法

2. 計算による評価法検討

2.1. ギヤ振動伝達解析

ギヤで発生したかみ合い振動はケースを伝わり、その一部はトランスミッションに固定しているブラケット、ラバー、それからラバーを固定している金具を経て車体に伝達される。従ってミッションケース、マウント系、車体フレームのトータルの伝達特性が問題となると考えられる。そこで走行中の振動ピーク時にギヤ振動が伝達される状態と、トランスミッション側ブラケット先端部をハンマリング加振により励起した振動モードを Fig.1 で比較する。また Fig.2 にマウントのレイアウトの例を示す。

グラフには各ポイントの走行中におけるギヤ振動成分の大きさと、パワープラント側先端を加振した時の同じポイントでの応答を示している。これよりハンマリングによる

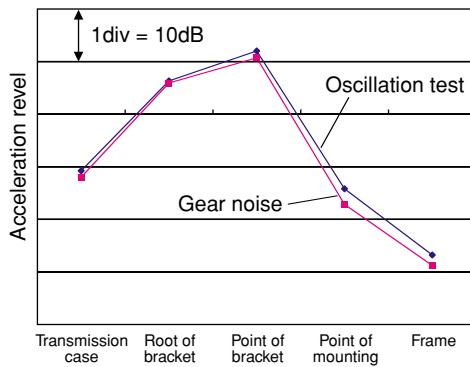


Fig.1 Shapes of mode of mounting

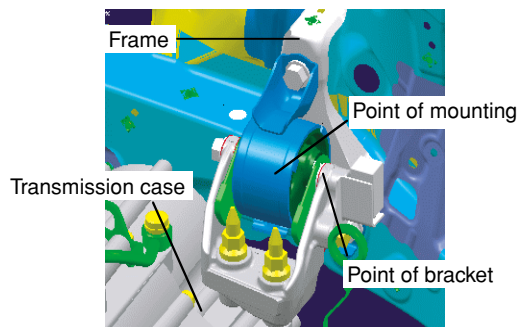


Fig.2 Layout of mounting systems

連成振動と走行中のギヤ振動伝達はほぼ同じモードである事がわかる。また Fig.3 にハンマリングによる周波数応答特性(トランスミッション側先端加振車体側先端応答), 走行中の車体側のギヤ振動レベル, 車室内のギヤ音レベルを示す。

グラフは、あるマウントシステムで未対策のベース仕様、共振周波数変更用ウエイト追加、ブラケット剛性変更など3種類の仕様を比較している。未対策の仕様はブラケットとマウント金具の共振のため音、振動、応答特性とも鋭いピークがあるが、各対策仕様では、共振周波数が離れるため応答特性が改善され同様に音、振動ともピークが低減されている。以上よりマウント系の周波数応答特性とギヤ音は相関がありこの応答レベルでギヤ振動伝達が評価できると言える。したがってこの周波数応答特性(トランスミッション側先端加振車体側先端応答)をシミュレーションにより算出することとした。

2.2. モデルの簡単化

2.1. で述べた様に走行中のマウント振動と車室内ギヤ音は相関がある。そのギヤ振動は伝達経路トータルの振動モードが問題と考えられる。ところが系全体のモデル化はシステムリソースなど制限があるので、ラバーを境に車体側とトランスミッション側それぞれ計算をすることとした。そこでまず、ブラケットとマウント金具との結合状態をハンマリング

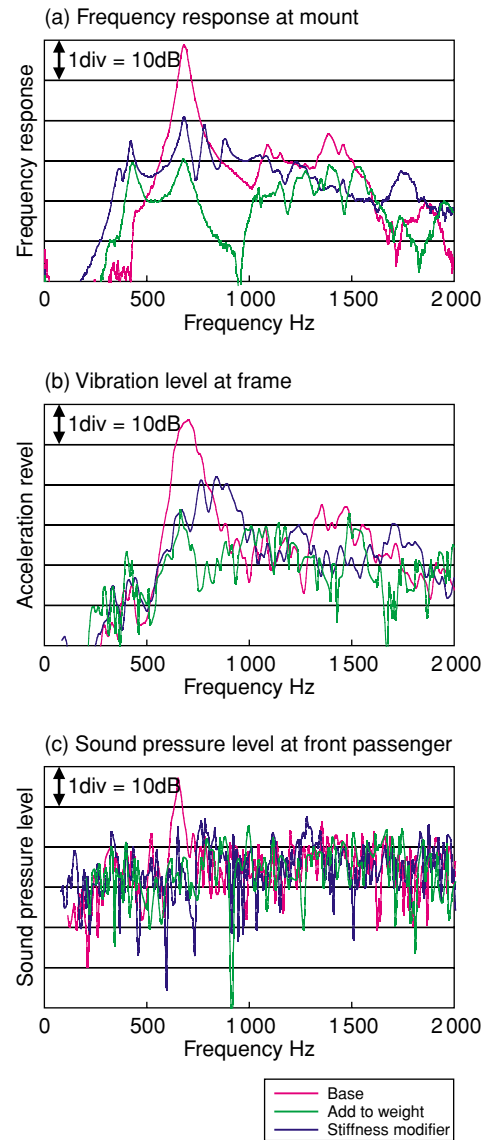


Fig.3 Sound and vibration level reduction effect of improvement of frequency response

加振テストにより解析した。Fig.4にトランスミッション側、車体側それぞれ単品の応答(a), (b)とブラケット先端加振マウント先端応答による全体の応答特性(d), それから単品の応答を合成したもの(c)の比較を示す。

それより、トランスミッション側ブラケット先端加振に

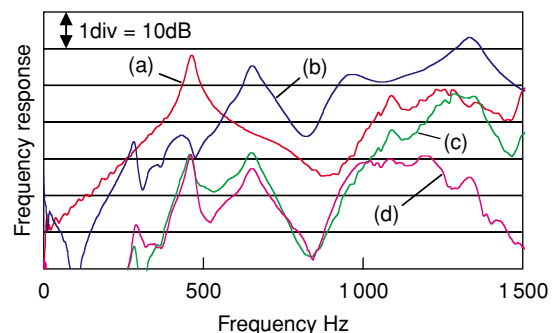


Fig.4 Analysis of frequency response

よるトータルの応答特性(d)は、ブラケットとマウント金具単品の応答(a), (b)の特徴を示しており、その二つを合成(掛け合わせた)した特性(c)とほぼ一致していることがわかる。すなわちラバーの減衰は周波数に対して比較的フラットな特性であり、また金具に比して充分ラバーの剛性が低いのでトランスミッション側と車体側の金具のモードは独立である。したがって金具間では荷重のみが伝わると仮定できる。これよりブラケット、マウント金具単品の周波数応答特性(ポイントイナータンス)を算出し、それを合成することによりトータルの周波数応答特性を簡易的に予測することができると言える。

2.3. 合成したイナータンス計算結果

2.1. の Fig.3 で述べた3仕様について、計算で算出したそれぞれのブラケット、金具のイナータンスを掛け合わせるにより求めたもの(以後合成イナータンス)を Fig.5 に示す。合成イナータンスのピークレベルの関係も音、振動、ハンマリングによる周波数応答と同様に未対策仕様はピークが大きく対策仕様はそれぞれ低減しており、計算により求めた合成イナータンスが低ければギヤ音も低減することが確認できた。

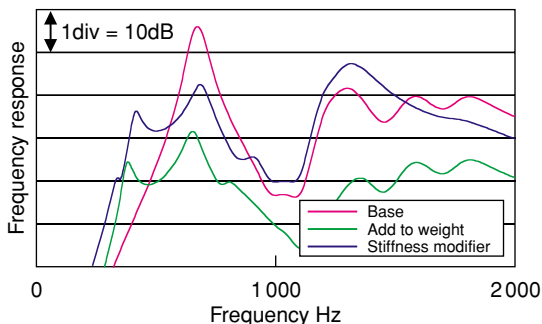


Fig.5 Total frequency response function

2.4. 合成イナータンスレベルの評価基準

これまで述べたように合成イナータンスのレベルでギヤ音悪化が予測できるので、実際の開発においては、従来開発した各量産機種のマウントの合成イナータンスレベルを基準に車体の音響特性、加振源の大きさ、要求性能を考慮しそれぞれその目標レベルを定めることができる。

3. ブラケットの周波数応答解析

3.1. 境界条件による結果の違い

固有値解析、応答解析を行う場合 Fig.6 の様な単品のフリー状態(拘束していない、付加物もついていない)では、Fig.7 に示す様に十分な精度で計算可能である。



Fig.6 Bracket model

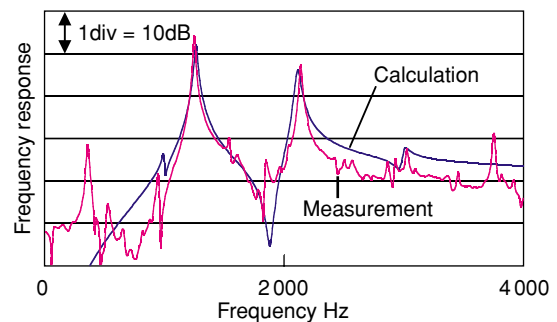


Fig.7 Frequency response of bracket

Solver : CATIA FEM
Auto mesh : CATIA FEM
Mesh size : 5 mm ~ 10 mm
Damping ratio : 0.05

ところが、車載状態(ケース、車体フレームについた状態)では、拘束条件などで大きく結果が変わる。Fig.8において各機種の単品(締結部拘束)、ケース付き、ケースとブラケットをバネ要素で結合、それぞれのモデルでの3種類の拘束条件における計算結果とハンマリング加振による実測の共振周波数を比較する。

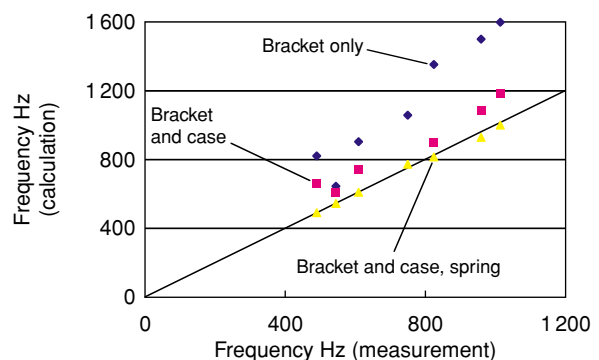
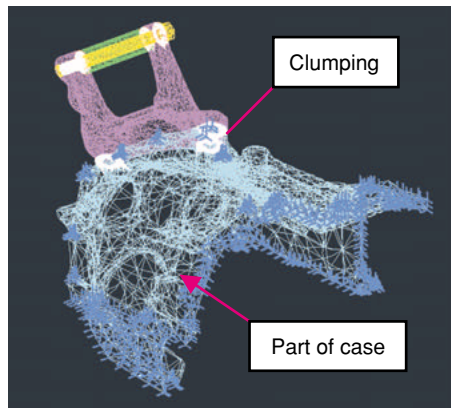


Fig.8 Resonance frequency

これより、精度の良い結果(誤差5%以内)を得るためにはブラケット金具だけのモデルでは実測値と合わず、Fig.9に示すようなケースや車体フレームのモデル化またその接合部分のモデル化が必要であることが分かる。

(1) Case and bracket



(2) Frame and mounting

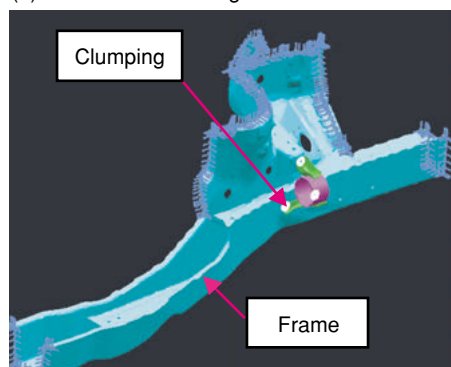


Fig.9 FE model

3.2. ボルト締結部拘束条件

3.2.1. バネ結合の考え方、バネ定数の値

マウント、ブラケットの金具は、車体フレームやミッションケースにボルトで締結される。その様な結合部は、一般的に通常構造物より剛性が低下するとされている。⁽¹⁾

今回は、ボルトの剛性と締め付け部の剛性に対して等価のバネが接触面に存在すると仮定しモデル化を行った。ボルト締結部の静的バネ定数 k はボルトのバネ定数 k_t と被締め付け部のバネ定数 k_c とすると $k=k_t+k_c$ と仮定し、 k_t と k_c は近似式⁽²⁾より $10^5 \sim 10^6 \text{N/mm}$ 程度(ボルト、締め付け部の材料特性と形状で決定される)とした。

3.2.2. バネ結合の範囲、板厚による違い

またボルト締結部の接触面をバネ要素でモデル化する場合、結合する範囲が重要である。締め付け部の形状により実際の接触面積と図面上の接触面とが異なる場合がある。そ

こで簡単な形状でFEMによる接触解析を行い、被締め付け部の厚さと締め付けた時の接触面積について検討した。Fig.10 に計算に用いたモデルを示す。

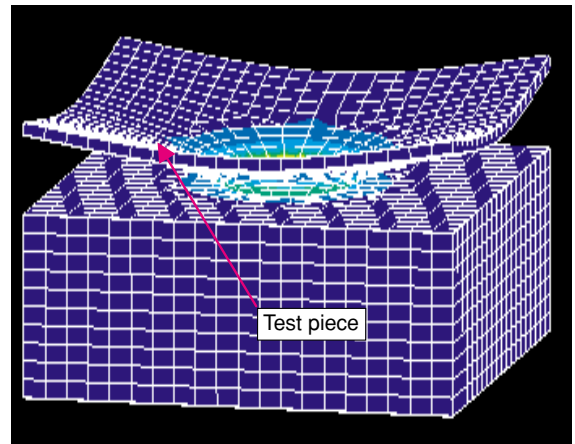


Fig.10 FE model of contact analysis

計算は厚い板とテストピースを接触要素でつなぎ、下方向にワッシャ径程度の面積で圧力をかけ、接触の状態を解析した。Fig.11に被締め付け板の厚さと接触直径を示す。図の様に厚さが薄いほど、皿状に変形し接触面積が狭くなる。したがって本計算では2mm程度の鉄板の場合は図面上の接触面積が広い場合でも、バネ要素で結合する範囲は締め付けワッシャ径程度とした。

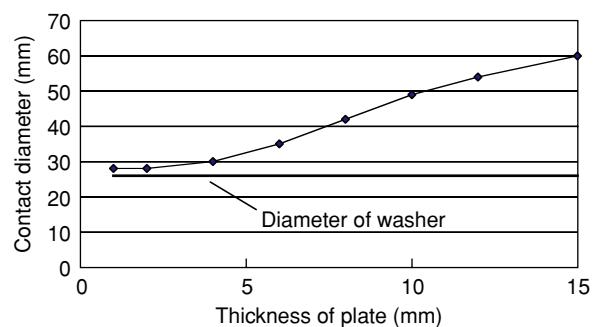


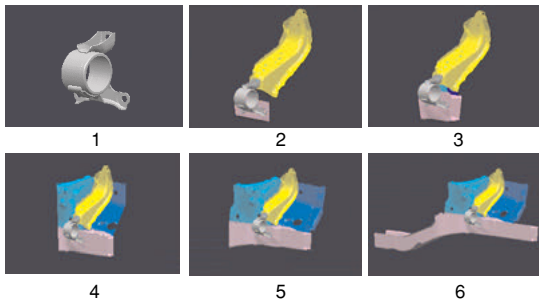
Fig.11 Diameter in contact

3.3. モデルの範囲

Fig.12にモデルの範囲、各モデルによる計算上の共振周波数と実測値の比較を示す。

このように金具単体の計算(モデル1)では、前述したように共振周波数が高めに出てしまうが、車体フレームが少しでもモデル化されていると(モデル2)かなり実測値に近づくことがわかる。これより本検討では充分の広さと思われる Fig.12 のモデル4以上の範囲で計算を行った。

(1) Extent of FE model



(2) Comparison of resonance frequency

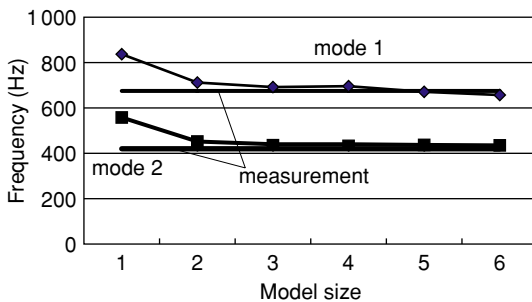


Fig.12 Relation resonance frequency and model size

3.4. 応答解析結果

Fig.13 に上記条件で解析した結果と、ハンマリングによる実測値との比較の一例を示す。また Fig.14 に固有値解析の結果の例を示す。

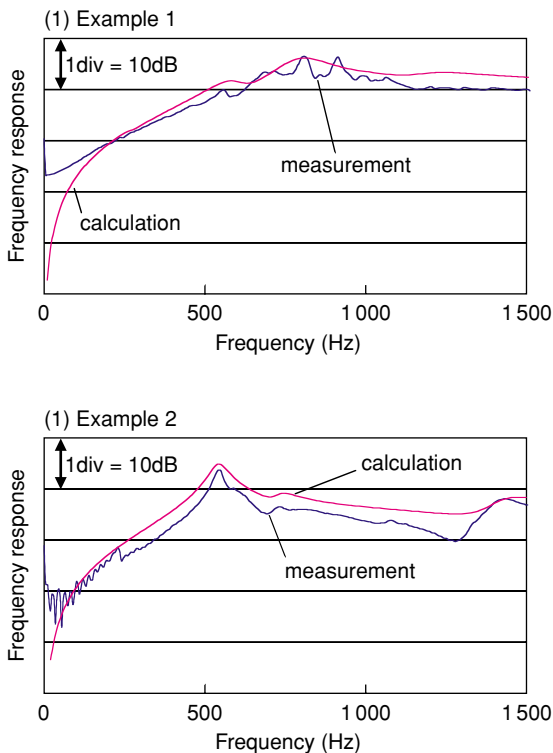


Fig.13 Comparison between calculation and measurement for frequency response

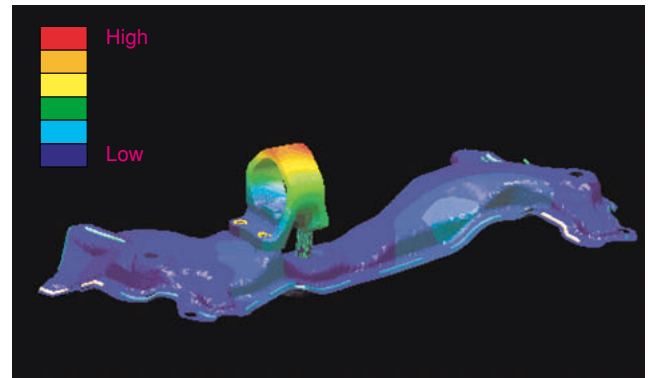


Fig.14 Displacement of mounting at resonance frequency

この様に、ブラケット、マウント金具のポイントイナータンスの計算結果はハンマリング加振による実機テスト結果とほぼ一致する。このそれぞれの結果を用いてFig.5に示したような合成イナータンスが精度よく算出できる。また製品図である CATIA の 3D モデルより直接、メッシュ作成、計算を行うことにより、一日程度で解析ができることが確認された。したがって早いタイミングでマウント伝達特性の精度良い予測と最適化が計れるようになった。

4. まとめ

本研究により以下のことが言える。

- (1) マウント系のブラケット、マウント金具単品それぞれの応答解析結果の合成値レベルより簡易的にマウントのギヤ振動伝達を評価できることが分かった。
- (2) 必要なモデル範囲、ボルト締結部のバネ要素によるモデル化等により比較的簡単に充分な精度の計算(誤差5%以内)が出来るノウハウが得られた。
- (3) 従来問題となっている特定車速におけるギヤ音のピークは今回述べたようなマウントをはじめとする固体伝播によるものがほとんどである。今後は開発初期段階より本検討による予測手法を用いて、各部の伝達特性を予測し大幅な開発効率の向上をはかることができる。

CAEが発達し、誰もがFEM解析を行える環境になりつつあるが、開発の現場で実際の音振動問題にFEM解析を適用し効果を上げるのは意外と難しいものである。本検討内容は振動学的、計算技術的にはレベルの高いものではないが、開発期間短縮のニーズの中で開発現場における工数削減に貢献できる適用例として報告した。今後のシミュレーションを用いた開発効率向上の参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) 田中基八朗, 三枝省三: 振動モデルとシミュレーション, 東京, 応用技術出版, 1984, p.281-289
- (2) 山本晃: ねじ締結の理論と計算, 東京, 養賢堂, 1970, p.55-65

■著 者■



禧久和臣



関根 明子



両方雅行