

実稼働時エンジンマウント点振動予測手法の確立

Establishment of a Method for Predicting Powertrain Vibration
at Engine Mounting Points under Running Conditions

関 泰 彦* 鈴木 敏 文*
Yasuhiko SEKI Toshibumi SUZUKI
神 村 直 毅* 高 橋 幸 敬*
Naoki KAMIMURA Yukitaka TAKAHASHI

要 旨

パワープラントの振動特性はこもり音等の車室内騒音に影響する重要な指標として広く認識されている。中でも、エンジンマウント点での振動はその主要因の一つであることから、今回実稼働時のエンジンマウント点振動を精度良く予測する手法を開発した。本手法はメインベアリングにおける非線形油膜特性、エンジンマウントの非線形特性をそれぞれ考慮したシミュレーションモデルを採用しており、その結果、実用上十分な精度で実稼働時のエンジンマウント点振動を予測することが可能となった。本手法を開発初期段階のパワープラント基本構造検討に適用することにより、効率的なパワープラント振動特性の評価を可能とした。

ABSTRACT

A precise analytical method for prediction of powertrain vibration under running conditions was developed for the purpose of reducing the vibration level at engine mounting points, which is one of the paramount factors in rumbling and other cabin noise. This method uses simulation models that take into consideration the nonlinear characteristics both of the main bearings and of the engine mounts. This makes it possible to predict the vibration level at engine mounting points while preserving a practical level of accuracy. Application of this method to engine design will enable efficient evaluation of powertrain vibration characteristics.

1. まえがき

近年、自動車の振動騒音に対する消費者の上級志向化、また、環境問題からの車外騒音低減への対応から、低振動及び低騒音を兼ね備えた、静粛性の高い自動車に対するユーザー要求が高まる傾向にある。車室内騒音に影響を与えるパワープラント振動を低減することはもはや高級車のみならず、全てのカテゴリーに位置する自動車の要求事項となっている。市場動向に迅速に対応し、限られた自動車開発期間の中での、従来にも増した間違いのない開発を行うためには、より正確な予測技術の確立が必要である。パワープラント基本構造の検討は、現在 FE モデル(有限要素法モデル)を用いた固有値解析が主体である。しかしながら、固有値解析ではパワープラント全体の固有振動数は予測可能であるが、実稼働時のパワープラントの振動レベルを予測することは困難である。そこで、本稿では実稼働時エンジンマウント点振動の予測手法を確立し、その手法をパワープラントの振動特性評価に適用した例を報告する。

2. 予測手法概要

2.1. 解析手順

本予測手法の解析の流れを Fig. 1 に示す。解析は以下の手順で行った。

- (1)STEP1 : パワープラント振動伝達特性算出
 - ・実装状態のパワープラント FE モデルの作成
- (2)STEP2 : クランク系起振力算出
 - ・クランク系 FEM モデルを通した起振力の算出
- (3)STEP3 : エンジンマウント点振動算出
 - ・実稼働時エンジンマウント点振動の算出

2.2. パワープラント振動伝達特性算出(STEP1)

2.2.1. パワープラント FE モデル

実稼働時のエンジンマウント点振動の予測精度は、各エンジンマウントブラケットでの FRF(伝達関数)に大きく依

存することから、パワープラント振動伝達特性精度は極めて重要なポイントである。パワープラント FE モデルは実装状態のものであり、シリンダブロック、シリンダーヘッド、ギアボックス、ミッションケース、インテークマニフォールド、エキゾーストマニフォールド、補機類、エンジンマウントブラケットから構成されている。Fig. 2 に構築したパワープラント FE モデルを示す。

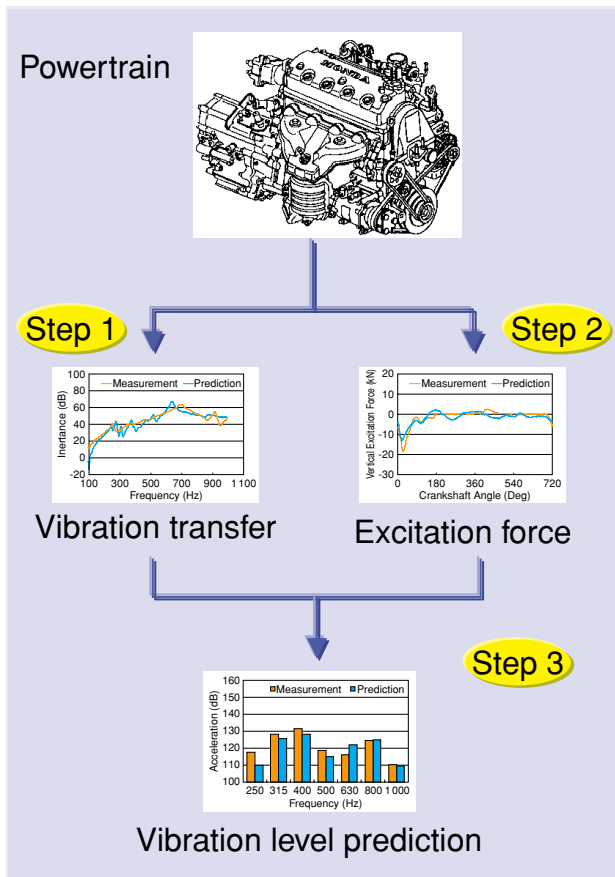


Fig. 1 Analysis procedure

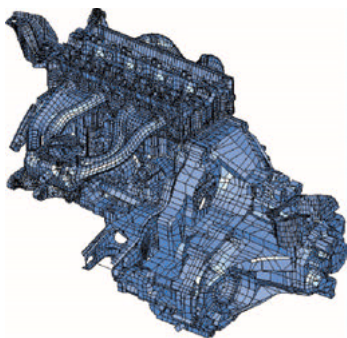


Fig. 2 FE model of powertrain

2.2.2. 振動伝達特性算出

初期作成パワープラント FE モデルの FRF と実測結果との相関性が低いことから、パワープラント FE モデルのアップデートを実施した。アップデートに際しては、エンジ

ンマウントブラケットのローカル共振周波数及び FRF を目的関数として行った。Fig. 3 に示す様に算出された FRF は実測結果と良好な相関を示しており、パワープラント FE モデルは実用上十分な精度を確保している。

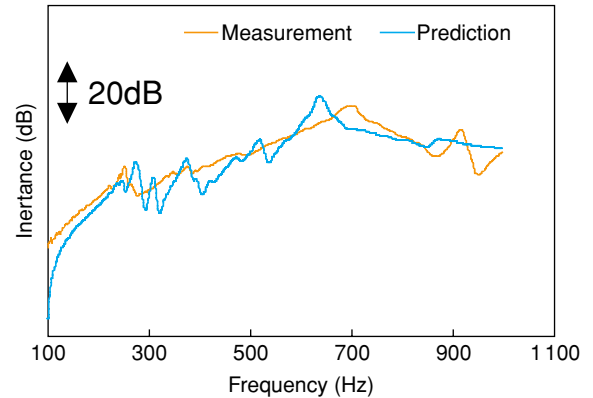


Fig. 3 Comparison of powertrain FRF

2.3. クランク系起振力算出(STEP2)

2.3.1. クランク系 FE モデル

クランクシャフトの挙動が、クランク系起振力に大きな影響を与えることから、精度の高い FE モデルが必要とされる。Fig. 4 にクランク系 FE モデルを示す。このモデルはクランクシャフト、プーリー類、フライホイール、クラッチディスクカバーから構成されている。より精度の高いクランク系 FE モデルが必要とされることから、固有振動数、FRF、モード相関係数(MAC)を目的関数としてクランク系 FE モデルのアップデートを実施した。Fig. 5, Fig. 6 に算出した FRF 及び MAC のテスト結果との比較を示す。固有振動数誤差 $\pm 3\%$ 以内、MAC 0.7 以上と非常に高い相関性を示すことから、良好な FE モデルを構築することができた。

2.3.2. クランク系起振力算出

各燃焼室内に作用する筒内圧は、ピストンおよびコンロッドを通して、クランクシャフトに伝達される。ピストンとシリンダライナーの間で生成される側面力(サイドフォース)、およびピストンに作用する慣性力、これらの合力は、パワープラントに対して起振力としてコンロッドを通し、点火順序毎に各クランクピンに作用する。クランク系起振力は、非線形油膜特性を考慮に入れたクランク挙動解析を通して算出される。Fig. 7 に算出された第2メインベアリングにおけるクランク系起振力を示す。条件はエンジン回転数1600rpm、全負荷(WOT)である。算出された起振力は実測結果と良好な相関を示している。

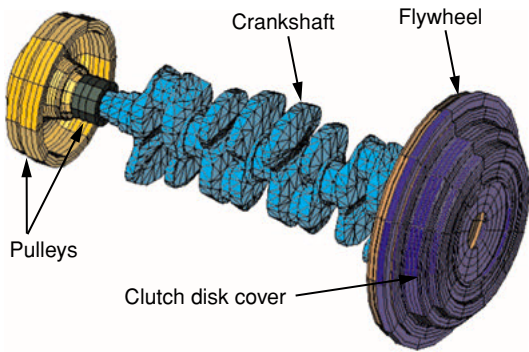


Fig. 4 FE model of cranktrain

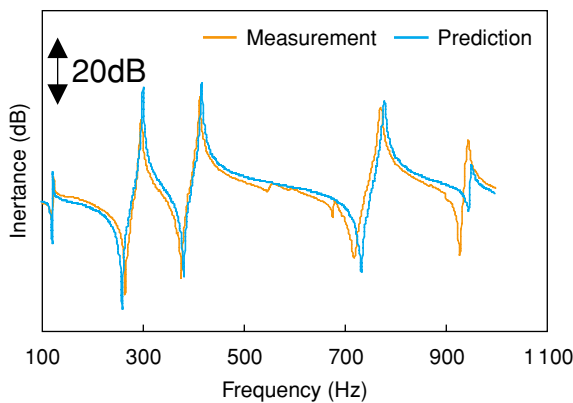


Fig. 5 FRF verification result of cranktrain

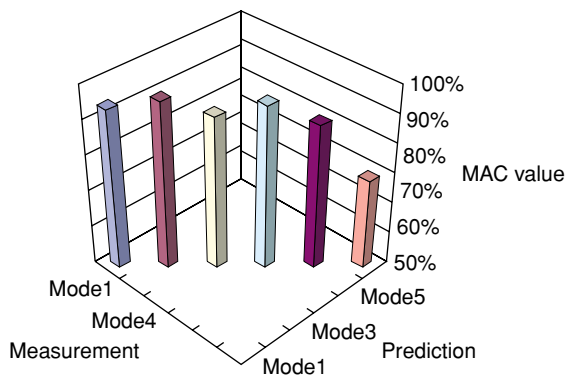


Fig. 6 MAC verification result of cranktrain

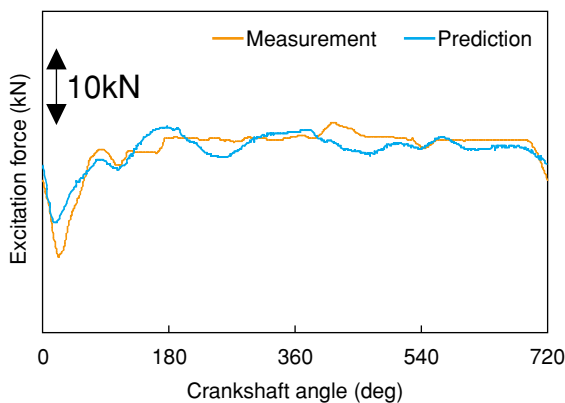


Fig. 7 Verification result of excitation force

2.4. エンジンマウント点振動算出 (STEP3)

2.4.1. エンジンマウントモデル

エンジンマウントは、ラバータイプ、液封タイプが一般的に使用されるが、周波数及び変位に依存した動的剛性及び減衰は各マウントタイプでそれぞれ大きく異なり、実稼働時パワープラントモデル化の際に、極めて重要な精度要因となる。そこで、今回エンジンマウントのモデル化に際して、従来の Kelvin-Voigt モデルから、上述した非線形特性を表現できる MOM(ミニオシレータモデル)に変更することにより精度向上を図った。双方のエンジンマウントモデルを Fig. 8 に示す。実測マウント特性をできるだけ厳密に表現することができるよう、パラメータ同定を行い、最終的にエンジンマウント特性は、テストベンチセット状態と同一な条件とした。

2.4.2. エンジンマウント点振動算出

STEP1, STEP2 より実稼働時のエンジンマウント点振動レベルを算出した。Fig. 9に前述の2タイプのエンジンマウントモデルを適用した、実稼働時のエンジンマウント点振動の予測結果を示す。条件はエンジン回転数 3 200rpm, 全負荷(WOT)である。Kelvin-Voigt モデルから MOM に変更することにより、1 kHz 迄のほぼ全周波数帯域において、マウント点振動予測精度を向上することができた(最大 15dB)。また、実測との誤差が $\pm 3 \sim 5$ dB程度であることから、本論文の MOM を適用したエンジンマウント点振動予測手法が、実用上十分な予測精度を確保していることを示している。

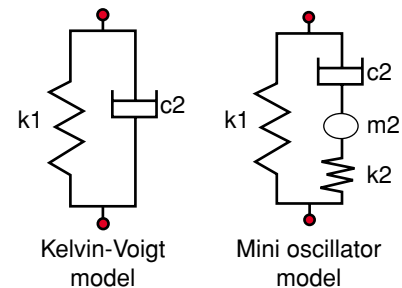


Fig. 8 Engine mount model

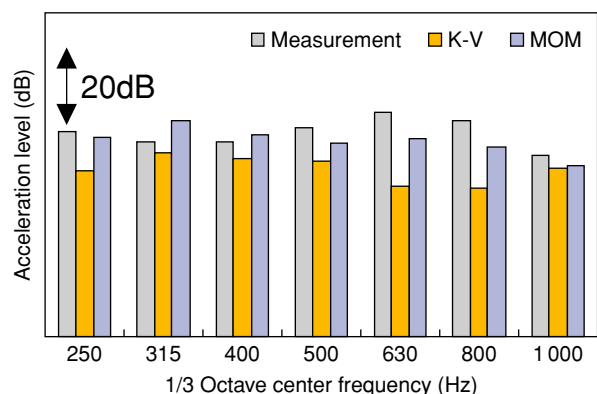


Fig. 9 Verification result of each mount model

3. 実機適用性検証

本予測方法のエンジン設計への適用可能性の検証を、FF横置き直列4気筒エンジンへの適用を通して検討した。

3.1. オイルパン仕様変更

構造変更時の効果量予測精度の検証を、オイルパン仕様の変更により実施した。供試オイルパン材質はスチールプレートとアルミとした。Fig. 10に検討に用いたアルミオイルパン及びスチールプレートオイルパンFEモデルを示す。

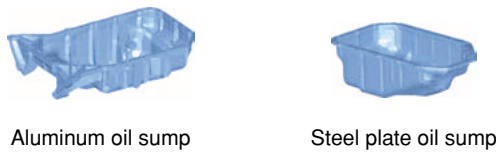


Fig. 10 FE model of the two oil sump specifications

Fig. 11に各アルミオイルパン仕様の予測結果を、Fig. 12にアルミオイルパン仕様の実測結果との比較を示す。また、Fig. 13にスチールプレートからアルミオイルパンへの仕様

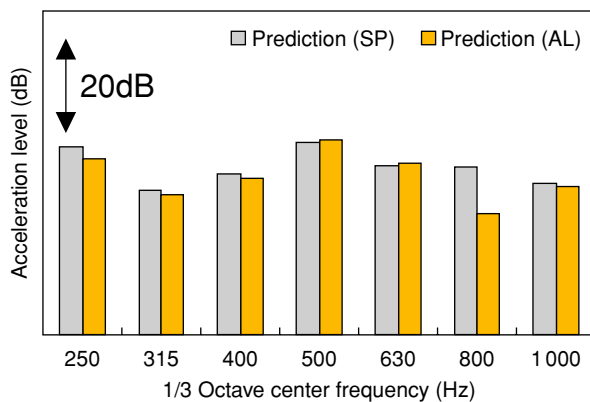


Fig. 11 Comparison of the oil sump specifications

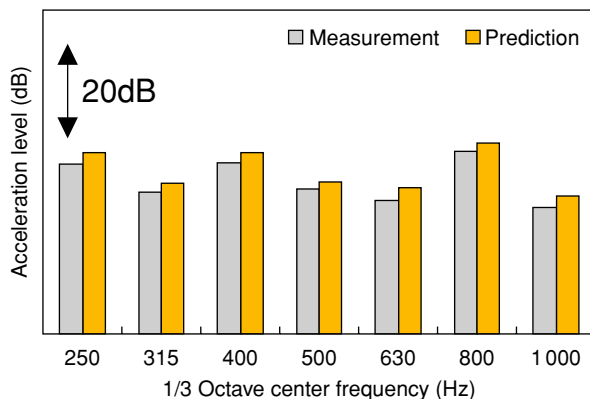


Fig. 12 Verification result of aluminum oil sump

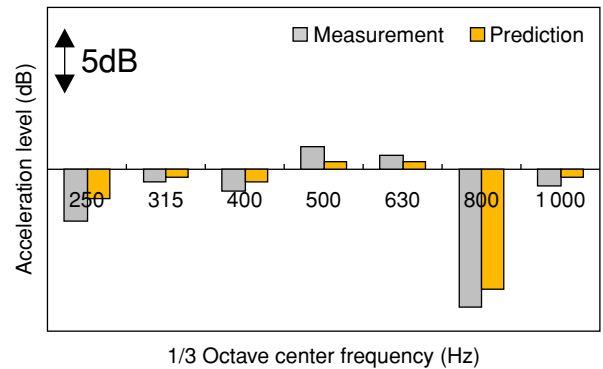


Fig. 13 Verification result of the effective amount

変更による、エンジンマウント点振動効果量の実測との比較を示す。条件はエンジン回転数4 000rpm、負荷40Nmである。本手法の実測結果との誤差は±3 dB程度であることから、エンジンマウント点振動予測精度及び、仕様変更時の効果量は実用上十分な精度を確保していることを確認した。

3.2. クランク仕様変更

ここでは、クランク仕様変更時の効果量予測精度の検証を、クランクシャフト仕様の変更により実施した。供試クランクシャフト仕様はフルエイトウェイト、セミエイトウェイトの2仕様とした。Fig. 14に検討に用いた2仕様のクランクシャフトを示す。

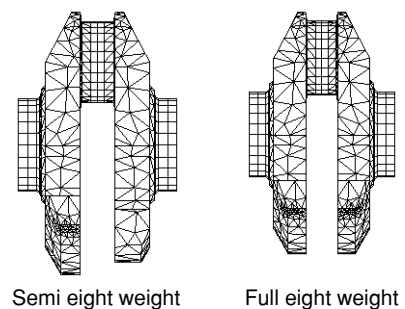


Fig. 14 Crankshaft specification

Fig. 15 にフルエイトウェイト仕様の結果を示す。また、Fig. 16にセミエイトウェイトからフルエイトウェイトへの仕様変更による、エンジンマウント点振動効果量の結果を示す。条件はエンジン回転数4 000rpm、負荷40Nmである。実測との誤差が±3dB程度であることから、オイルパン仕様変更時と同様、クランク仕様変更時の予測の追従性は実用上十分な精度を確保していることを確認した。

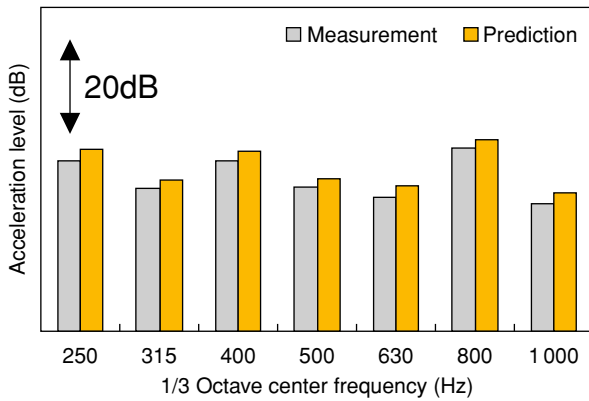


Fig. 15 Verification result of the two crankshaft specifications

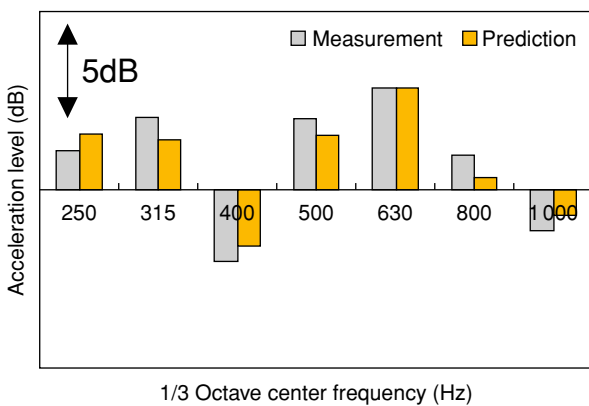


Fig. 16 Verification result of the effective amount

上述2例の適用可能性検討の結果から、本エンジンマウント点振動予測手法が実用上十分な予測精度を確保していることから、実際のエンジン設計への適用を行った。

4. 実機適用事例

本予測手法の実機エンジン基本構造検討への適用例として、FF横置き直列4気筒のパワープラント振動低減を目的とする、構造変更を通した適用事例を紹介する。

4.1. シリンダブロック構造変更

パワープラント振動低減のためには、シリンダブロック本体の剛性確保が重要となる。その中でも振動低減効果はリブの付加位置に大きく依存することから、本手法適用を通したリブ位置の検討を行った。Fig. 17に検討を行った各仕様のシリンダブロックFEモデルを示す。SPEC-A, SPEC-B, SPEC-C, SPEC-D の計4仕様の検討を実施した。

Fig. 18 にエンジンマウント点振動のバンド和(600 ~ 800Hz)の各仕様ごとの予測結果を示す。条件はエンジン回

転数3 000rpm、全負荷である。予測結果より、最もエンジンマウント点振動バンド和の低減に効果的な仕様であるSPEC-Cを採用した。

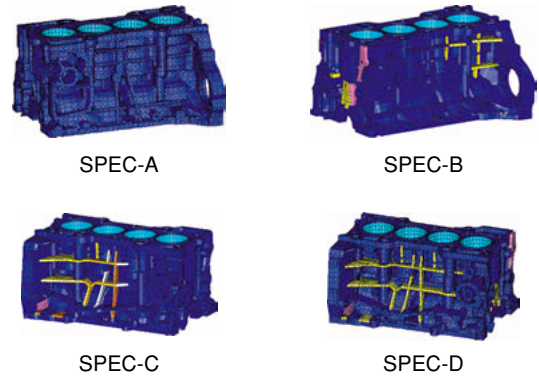


Fig. 17 Structural modification of cylinder block

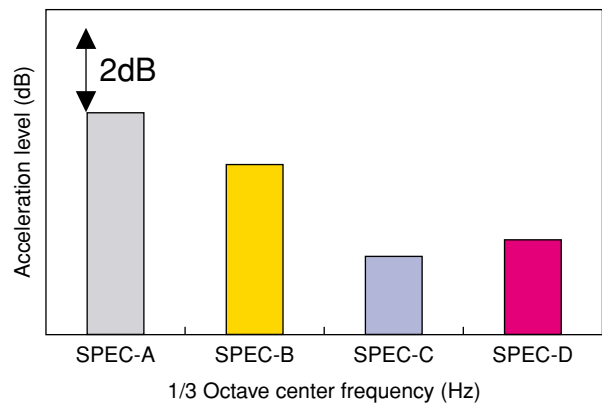


Fig. 18 Comparison of the summation value of the vibration level for each specifications

4.2. ガセツスティフナ効果

パワープラント振動低減には、シリンダブロック本体の剛性に加え、パワープラントの結合部剛性も極めて重要である。そこで、エンジンマウント点振動予測を通した、ガセツスティフナによるパワープラント剛性向上の検討を実施した。Fig. 19に検討に用いたガセツスティフナFEモデルを示す。



Fig. 19 FE model of gusset stiffener

Fig. 20にガセットスティフナを付加したエンジンマウント点振動の予測結果を示す。条件はエンジン回転数3000rpm, 負荷40Nmである。ガセットスティフナを付加することにより, 加速エンジン騒音の中周波域におけるエンジンマウント点振動の低減効果が予測され, 設計での検討を推進した。

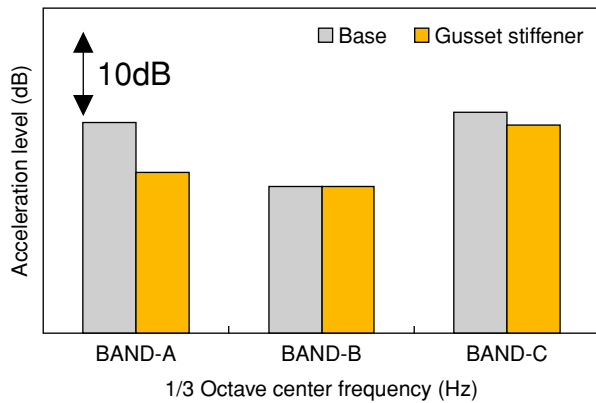


Fig. 20 Comparison of vibration level between with and without gusset stiffener

よって, 以上の実機適用事例より, 本予測手法を実機エンジン設計へ適用することにより, 効率的に振動低減のための設計指針を得ることができ, 効果的な仕様検討が可能となった。

5. まとめ

- (1) クランク挙動, 油膜特性, エンジンマウント非線形特性を考慮することにより, 実用上十分な精度で実稼働時のエンジンマウント点振動予測を可能とする手法を確立した。
- (2) FF 横置き直列4気筒エンジンへの適用検討結果より, 本予測手法は効率的なパワープラント振動特性の評価を可能とし, パワープラント基本構造検討のための有効な手法であることを確認した。

6. 参考文献

- (1) Takahashi,Y., Suzuki,T., Tsukahara,M. et al.: A Method For Identification of Powerplant Joint Properties Using FRF Data and FEM Model, ASME Paper DETC97VIB4247 (1997)
- (2) Heiner,Storck., Hartono,Sumali.: Characterization of a Vibration Damping Mount, SAE Paper 99012816
- (3) Mctavish,D,J., Hughes,P,C.: FE modeling of Linear Viscoelastic Structures the GHM Method, AIAA Paper

No.92 - 2380.

- (4) Suzuki,T., Takahashi,Y. et al.: How to Measure the Internal Forces of a Combustion Engine, NCA-VOL.26, p.61- 65 (1999)
- (5) Taylor,C.: The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice Volume 2, Combustion, Fuels, Materials, Design Revised Edition 'MIT Press, p.240-305 (1985)
- (6) Mctavish,D,J.,Hughes,P,C.: Modeling of Linear Viscoelastic Space Structures, Journal of Vibration & Acoustics-Transactions of the ASME, Vol.115, p.103-110 (1993)
- (7) Raub,Jonathan., D,Jones,Jeffrey.: Analytical Investigation of Crankshaft Dynamics as a Virtual Engine Module SAE Paper 99011750
- (8) 高橋勝雄, 高橋幸敬, 銭場克巳: パワープラント振動解析への大型計算機の利用, 自動車技術会学術講演前刷集 No.901, p.65-68 (1990)
- (9) Nehl,J., Wilhelm,M., Gauch,P., Travert,M.: Evaluation of Crankshaft Clearance Influence on Specific Roughness Noise Concern SAE Paper 1999-01-1771
- (10) Takahashi,Y., Suzuki,T., Tsukahara,M.: Prediction of Powerplant Vibration Using FRF Data of FE Model 'SAE Paper 971959
- (11) Seki,Y., Suzuki,T., Tsukahara,M., Takahashi,Y.: How to Predict Powertrain Vibration at the Engine Mounting Points Under Running Conditions SAE Paper 2001-01-1592

■ 著 者 ■



関 泰 彦



鈴木 敏 文



神村直毅



高 橋 幸 敬