

電磁接触器が励振する電動車騒音の予測技術

Technology for Prediction of Contactor Noise for Electric-powered Vehicle Batteries

下村 章人¹

Akito SHIMOMURA

川辺 正道¹

Masamichi KAWABE

外山 直基¹

Naoki TOYAMA

佐藤 嘉實²

Yoshimi SATO

要 旨

電動車には高電圧バッテリーユニットが車体に搭載されており、このユニット内の電磁接触器の作動音は乗員にとって不快に感じられる。この騒音を、高電圧バッテリーユニット単体の加振力と車体の構造音響伝達特性から予測する手法を構築した。コンポーネントベース伝達経路解析を採用することで、振動源と伝達系を切り離し、高電圧バッテリーユニット単体の車体側へ伝達する荷重と車体構造伝達とキャビン音響伝達を複合した伝達関数を用いることで完成車状態の騒音を予測できるようにした。さらに、サブユニットであるジャンクションボードの荷重から高電圧バッテリーユニット単体の荷重を予測する CAE モデルを構築し、高電圧バッテリーユニットの図面段階で加振力を予測できるようにした。以上の技術により、完成車状態における騒音の評価が、性能設計の段階で検討できるようになった。

ABSTRACT

Electric-powered vehicles have a high-voltage battery unit mounted in the vehicle body, and the sound made by operation of the electromagnetic contactor inside the unit can be unpleasant for vehicle occupants. A method was created for predicting this noise from the excitation force of the high-voltage battery unit on its own and from the acoustic transmission characteristics of the vehicle body structure. The adoption of component-based transfer path analysis made it possible to separate vibration sources from transfer systems and predict noise in the fully assembled vehicle state by using the load transferred from the stand-alone high-voltage battery unit to the vehicle body side and a transfer function that combines the vehicle body structure transfer and the cabin acoustic transfer. A computer-aided engineering model was also created for predicting the load from the stand-alone high-voltage battery unit based on the load from the junction board, which is a sub-unit of it. This made it possible to predict the excitation force of the high-voltage battery unit at the drawing stage. By means of the above technology, it has become possible to consider noise evaluation in the fully assembled vehicle state at the performance design stage.

1. まえがき

近年、自動車への環境負荷低減に対する要求はさらなる高まりを見せている。各自動車メーカーは、CO₂ 排出量削減のための燃費性能向上や、電動車両の開発、普及に取り組んでいる。

Honda は電動車両を普及させるために様々な電動車両を開発しており^{(1),(2)}、それらの電動車両には、バッテリーに電気エネルギーを貯蔵するための高電圧バッテリーユニット（以降ユニット）を搭載している⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。そのユニット内には、電力供給のために電流の ON-OFF をおこなう

制御機器である電磁接触器が搭載されており、車両の始動時と停止時に作動する。始動時には、エンジンが停止していることが多く、暗騒音レベルが低いためにその作動音が不快な騒音として感じられる。この騒音は完成車の状態で評価されるために、開発後期に課題が顕在化することが多く、開発の手戻りや追加対応を余儀なくされる。そのため開発初期に騒音を予測する技術構築が求められている。

このような騒音を解析する手法として伝達経路解析 (Transfer Path Analysis: TPA) が挙げられる。振動源であるユニットからの入力と、応答系となる車体側の構造音響伝達関数を掛け合わせると、完成車状態における騒音予測

¹ 本田技研工業株式会社

² 株式会社エステック

ができる。入力系と応答系が剛結に近い場合、従来の TPA では応答系の伝達関数マトリクスと実稼働時の応答を用いて入力を同定する手法が一般的である。しかし、実際の車体とユニットを用いて計測するため、ユニットの試作物がない設計初期にこの手法が適用できない。

そこで本稿では、コンポーネントベース TPA を活用することで、ユニットと車体を切り離して評価し、完成車状態の騒音性能を予測する手法を構築した。本手法に併せて、CAE の活用をおこないユニットからの入力を、試作物を用いずに予測する手法を構築した。

2. 電磁接触器の作動騒音

2.1. 電磁接触器による励振

電磁接触器は大電流の ON-OFF をおこなう制御機器の一つである。この電磁接触器の概略図を Fig. 1 に示す。電磁力によって可動鉄心を移動させて、接点部の開閉をおこなうことで電流の ON-OFF を制御している。この時の接触が振動源となっており、ユニットから車体へと振動が伝搬して騒音を引き起こす。

2.2. 高電圧バッテリーユニットの構成

ユニットの構成例を Fig. 2 に示す。電磁接触器は、電気的な接続や電流を遮断する安全機能を備えるジャンクションボードに搭載されている。このジャンクションボードはバッテリーフレームに取り付けられ、これを含むユニットは車体フレームに取り付けられる構成をとる。

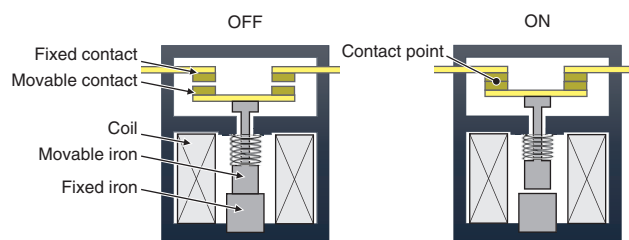


Fig. 1 Schematics of electromagnetic contactor

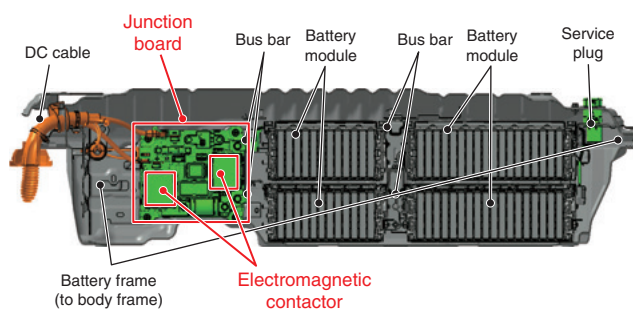


Fig. 2 High-voltage battery unit components

2.3. 完成車における作動騒音

完成車における電磁接触器の作動騒音は、継続時間が短い衝撃騒音である。この作動騒音の乗員耳位置における周波数解析結果を Fig. 3 に示す。100 Hz から 600 Hz あたりにピークを持っていることがわかる。このピーク近傍帯域と、可聴範囲下限がおおむね 20 Hz であることを考慮し、解析対象の周波数領域は 20 Hz から 1000 Hz までとした。

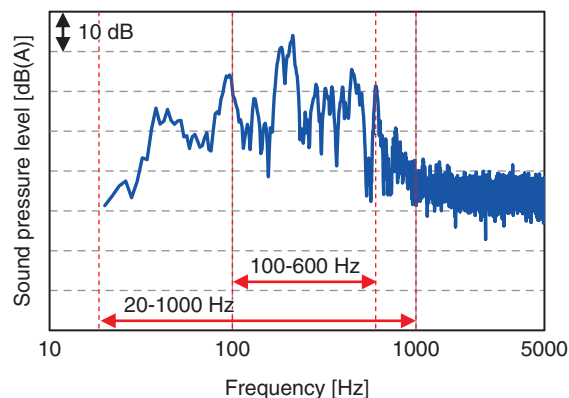


Fig. 3 Cabin noise of electromagnetic contactor

3. コンポーネントベース TPA

3.1. 従来 TPA との違い

従来から音・振動の解析に TPA がよく用いられてきた。これはエンジンやモータなどの振動源からの入力と、車体などの応答系となる構造音響伝達特性から各伝達経路や音源の寄与度を解析する手法である^{(6),(7)}。

ユニット単体を車体側の応答系から分離して入力計測できる手法として、コンポーネントベース TPA がある⁽⁸⁾。従来の TPA ではユニットの入力計測をユニットと車体が結合した状態にて計測する必要があった。コンポーネントベース TPA においては、構造音響伝達特性の計測はユニット単体と車体が結合された状態でおこない、ユニットの入力計測は車体側から分離してユニット単体で計測をおこなうことができる。従来の TPA との比較を Table 1 に示す。ユニット単体で目標荷重値を設定することができるために、モデルベース開発の加速化の流れも重なり、近年活発に活用される解析手法である。

3.2. ユニットからの伝達力

コンポーネントベース TPA の入力荷重の計測方法には主に三つの手法が知られている⁽⁹⁾。一つ目は Direct Force 手法で、ユニット単体を剛に設置して振動源から伝搬する荷重を直接計測する手法である。二つ目は Hybrid 手法で、ユニット単体を治具に設置し伝搬する荷重を計測して、そ

Table 1 Traditional TPA and component-based TPA

Method	Input force (F)	Transfer function (H)
Traditional TPA	Contact force	Unit separation
Component-based TPA	Blocked force	Unit combine

の系の伝達応答と合わせて等価な荷重を同定する手法である。三つ目はFree Velocity手法で、ユニット単体をフリーな状態で振動源から伝達したその応答を計測し、荷重に変換する手法である。図式で表したものをFig. 4にて示す。後者二つの方法はよく用いられる方法ではあるものの、別途測定系の伝達関数取得する必要性があり、計測荷重を等価外力に変換するための手順が必要になる。前者のDirect Force手法であれば、ユニット単体を剛に設置することが課題とはなるが、計測した設置反力がそのまま等価外力になるために簡易な計測手順で済む利点がある。

このDirect Force手法におけるコンポーネントベースTPAの理論を説明する。入力系と応答系によるシステムの運動方程式を動剛性表記にて考える。この動剛性は伝達の経路ごとに定まり、例えば D_{sr} の表記であれば、source側加振時のresponse側応答によって求まる動剛性を意味する。Fig. 5に示すような、結合状態、結合時実稼働状態、接地時実稼働状態を考え、各運動方程式より接地時実稼働状態での設置反力を求める。

結合状態においては下記の式になる。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r \\ f_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

D : Dynamic stiffness s : Source

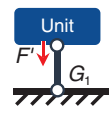
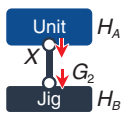
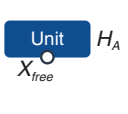
x : Displacement r : Response

結合時実稼働状態においても同様に式を立て展開する。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ra} \\ x_{sa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

s_a : Source in operating state

r_a : Response in operating state

(1) Direct Force	(2) Hybrid	(3) Free Velocity
		
$F' = G_1$	$F'^{eq} = G_2 + H_A^{-1} \cdot X$	$F' = H_A \cdot X_{free}$

G : Response force
 X : Receiver

Fig. 4 Force measurement of component-based TPA

$$x_{sa} = D_{ss}^{-1} (f_s - D_{sr} x_{ra}) \quad (3)$$

$$D_{rs} D_{ss}^{-1} f_s = D_{rs} D_{ss}^{-1} x_{ra} - D_{rr} x_{ra}$$

接地時実稼働状態においても同様に式をたて展開する。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ x_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{r0} \\ f_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

s_0 : Source in rigid state

$$f_{r0} = D_{rs} D_{ss}^{-1} f_s \quad (5)$$

式(4)より式(5)が導かれる。式(5)に式(3)を代入することで、設置反力 f_{r0} が求まった。

$$f_{r0} = (D_{rs} D_{ss}^{-1} D_{sr} - D_{rr}) x_{ra} \quad (6)$$

次に、Fig. 6に示すような結合時実稼働状態の応答を再現する等価外力を考える。

動剛性表記による運動方程式を立て、等価外力に対する式(7)を導く。

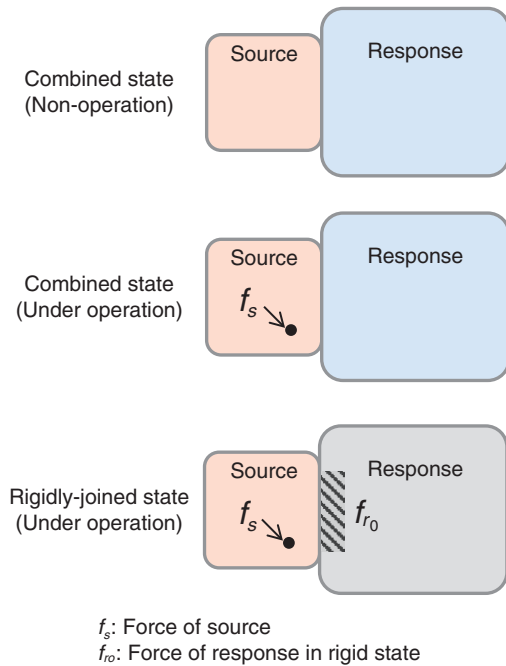


Fig. 5 Equation of motion

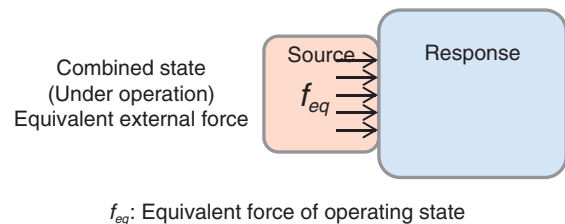


Fig. 6 Equation of motion by equivalent external force

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ra} \\ x_{sa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{eq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$f_{eq} = -(D_{rs} D_{ss}^{-1} D_{sr} - D_{rr}) x_{ra}$$

この等価外力は式(6)の設置反力と向きが逆で大きさが等しいことがわかる。したがって、結合時伝達関数マトリクスから算出した等価外力は、結合点で振動源を設置した場合の反力と等しい。

Direct Force手法を活用する場合には、ユニットを治具に剛結に固定しユニットからの入力荷重を計測することで、コンポーネントベース TPA の入力値として設定できる。

3.3. 電磁接触器の作動騒音への適用

電磁接触器の作動騒音の伝達経路から説明する。Fig. 7 に示す通り、電磁接触器の作動時の振動はサブユニットになるジャンクションボードからユニットへと伝達する。ここまでを入力側とする。ユニットは車体フレームにボルトで締結されている。この締結部から振動が車体、室内空間へと伝達する。ユニットからの入力特性と、車体および室内空間の構造音響伝達特性がわかれば、TPA によって室内音が予測できる。締結部における荷重は、前節の通り剛結された状態でのユニット荷重により代用ができる。

3.4. 試験構成

電磁接触器の作動騒音におけるユニット単体の試験構成について説明する。ユニットと車体側で分離して検証できることを確認するために、ユニットの車体への搭載位置が異なるものを試験対象とした。ユニット単体計測の様子を Fig. 8 に示す。ユニットは治具にボルトで固定されており、車体側に締結する規定トルク条件にて治具へ締結した。用いた固定治具は、剛性を大きくすることで最低次の固有周波数を 1000 Hz より 3 倍以上高くなるような設計とし、治具の振動が解析対象周波数 20 Hz から 1000 Hz に影響が出ないようにした。そして、ユニットのフレーム締結部と治具の間に荷重センサーを設置して、電磁接触器が作動した時のユニットから治具への設置反力を計測した。

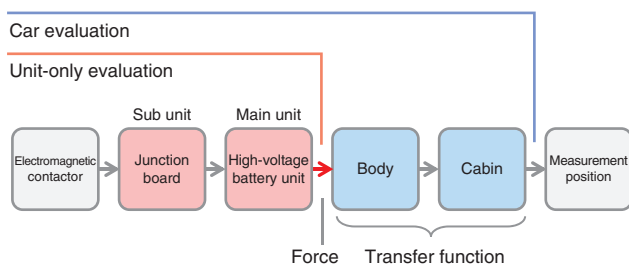


Fig. 7 Transmission path of contactor noise

3.5. 試験結果

ユニット単体評価の検証結果を説明する。Fig. 9 にユニットの車体への搭載位置別におけるユニット荷重の計測結果を示す。ユニット内の荷重伝達の違いによって異なる荷重の周波数特性が得られた。

続いて、Fig. 10 と Fig. 11 にはユニットの車両への搭載位置別において、ユニット単体計測から騒音予測をおこなった結果を完成車での騒音結果と比較している。予測騒音は搭載位置別によらず、完成車騒音における 100 Hz から 600 Hz までの音のピークを表現できていることが確認できた。また、解析対象周波数の 20 Hz から 1000 Hz で騒音レベルを確認した。

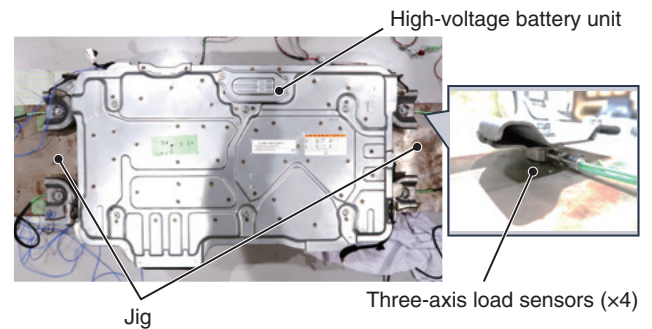


Fig. 8 Force response test of high-voltage battery unit

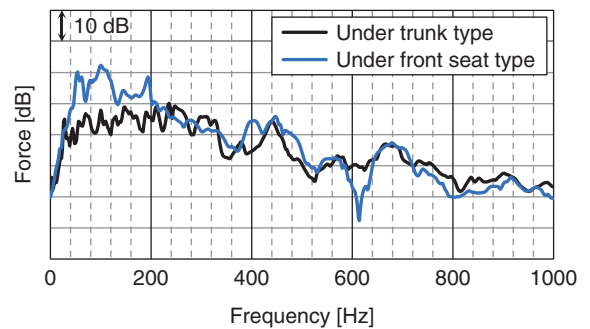


Fig. 9 Input force from unit

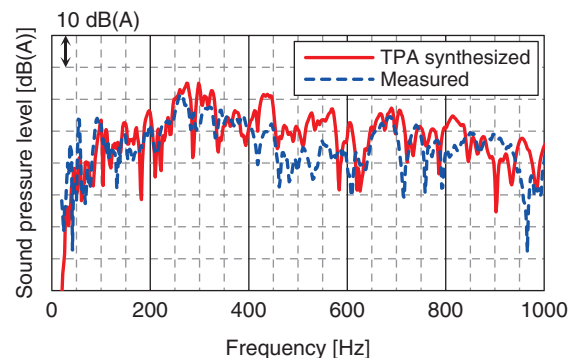


Fig. 10 Sound pressure level (Under trunk type)

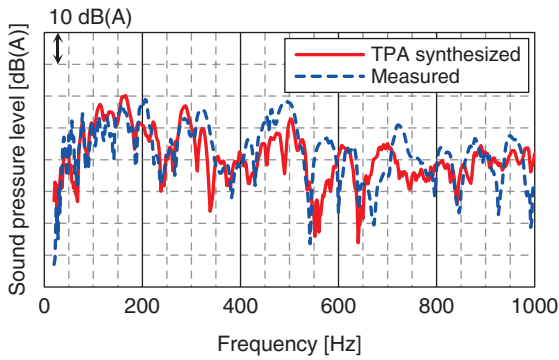


Fig. 11 Sound pressure level (Under front seat type)

4. CAE によるユニットの伝達力

4.1. CAE モデリング手法

完成車状態における電磁接触器の作動騒音においては、TPA の結果を基に室内音の目標値から逆算することで、ユニット単体の荷重を目標値にできる。このユニットの設計段階において、その荷重特性を CAE によって予測することができれば、試作レスによる効率的な開発が推進できる。そこで、ユニット単体から車体に伝達する荷重を算出する CAE モデル構築をおこなった。入力条件においては、ジャンクションボードからユニットに伝達する荷重の実測値を用いた。

有限要素法 (Finite Element Method: FEM) によるモデルを Fig. 12 に示す。複雑な形状をもつジャンクションボードは計算負荷低減のために集中質量成分によって表現し、剛に固定されたユニットの締結部分の境界条件は完全拘束とし、周波数応答解析を実施した。

ジャンクションボードからの入力に実測値を用いて、構造が異なる二つのユニット A および B の荷重伝搬の解析をおこなった。主な構造の違いは、ジャンクションボードのバッテリーフレームへの取り付け位置の違いである。概

略図を Fig. 13 に示す。ユニット A はジャンクションボードが車体締結部に近いユニット側面に取り付けられ、ユニット B はジャンクションボードがユニット後部に取り付けられる。妥当性を検証するために、CAE に対応する試験はユニット単体試験 (Fig. 8) と同等の剛体結合にて実施し、この結果を比較した。

4.2. CAE による検証結果

同一の入力条件による異なるユニットの荷重 CAE 解析結果と、実測結果とを比較したものをそれぞれ Fig. 14 と Fig. 15 で示す。ユニット A とユニット B は、ジャンクションボードの搭載位置の違いから、電磁接触器作動時におけるバッテリーフレームの振動モードが異なる。ユニット A は 200 Hz 近傍に共振によるピークを有し、ユニット B は

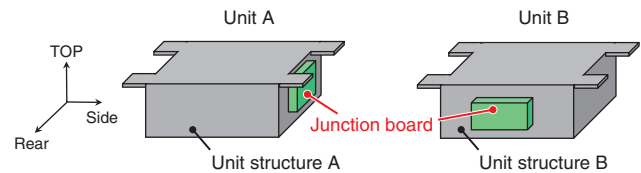


Fig. 13 Junction board mounting position

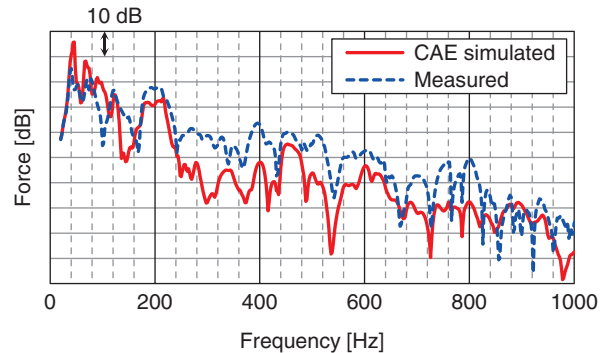


Fig. 14 Force CAE-analysis (unit A)

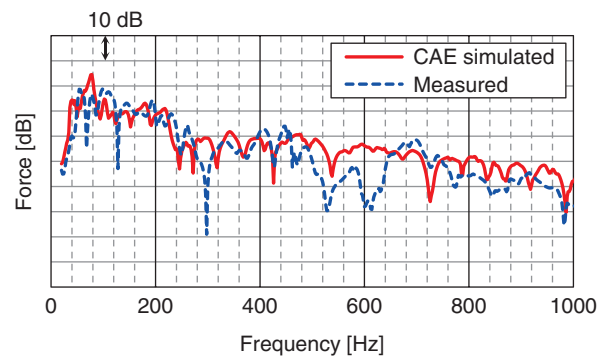


Fig. 15 Force CAE-analysis (unit B)

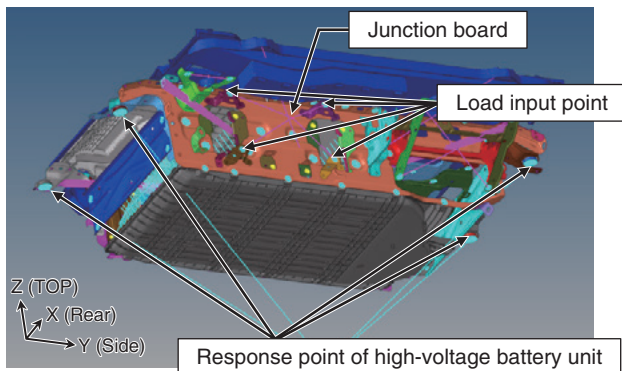


Fig. 12 CAE modeling of high-voltage battery unit

同様に 200 Hz 近傍に共振点を有するものの、全体的に広範囲に分布した振動特性を有する。この差が、ユニットの締結部荷重値の周波数特性にも現れている。CAE での結果はこの特徴をよく再現しており、本 CAE モデル化の妥当性が確認された。

さらに、CAE によって解析したユニットの荷重値を用いて、完成車状態での騒音予測をおこなった。車体の構造音響伝達関数は同クラスの車両の実測値を用いている。完成車状態での騒音と、ユニット単体試験から算出した予測騒音、加えて CAE によりユニット予測荷重値から算出した予測騒音の結果を比較する。青の破線が完成車状態で実測した騒音値を示し、緑の破線がユニット単体試験からの予測騒音値を示し、赤の実線が CAE によるユニット単体荷重からの予測騒音値を示す。Fig. 16 のユニット A での結果では 200 Hz 近傍の共振点の再現ができており、Fig. 17 のユニット B での結果では 200 Hz から 700 Hz までのブロードな分布を再現していることがわかる。各周波数帯における音圧レベルの検証ができることから、騒音に対する設計検討における CAE モデル活用の妥当性が確認できた。

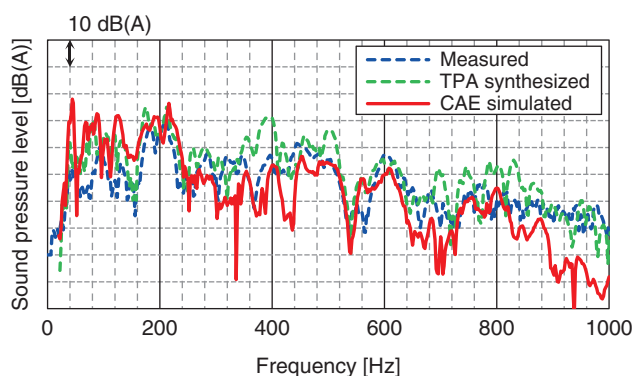


Fig. 16 CAE simulated noise (unit A)

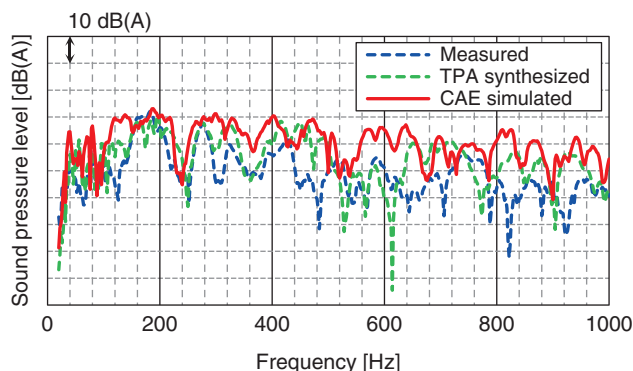


Fig. 17 CAE simulated noise (unit B)

5. まとめ

- (1) コンポーネントベース TPA の Direct Force 手法を用いて振動源のユニットを車体側から分離し、ユニット単体の荷重計測と車体の構造音響伝達特性を用いることで、完成車状態での騒音を予測することができた。
- (2) CAE を活用したユニット単体の伝達力を解析するモデル構築をおこない、ジャンクションボードの荷重計測結果から完成車状態での騒音を予測することができた。

本検討によって、完成車が存在しないユニットの開発初期段階において、完成車状態の騒音の目標値からユニット単体での荷重に目標値を置き換えて開発を進めることができるようになり、そのユニット単体の荷重を予測する CAE によるモデル構築をおこなった。ユニットの試作物がない段階で、ジャンクションボードの荷重の計測結果から完成車状態での騒音を予測できるようになり、より早期に設計検討ができるようになった。

参考文献

- (1) Yamagishi, T., Ishikura, T.: Development of Electric Powertrain for CLARITY PLUG-IN HYBRID, SAE World Congress Proceedings, SAE Int. J. Engines 7(3), 323-333, doi: 10.4271/2018-01-0415, (2018)
- (2) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1 p. 1-7
- (3) Fukazu, T., Matsuo, Y.: Development of Electric Powertrain for New Model Hybrid Sports Utility Vehicle, SAE World Congress Proceedings, SAE Technical Paper, doi: 10.4271/2017-01-1158, (2017)
- (4) 小林紀久, 金森伊織: SPORT HYBRID i-DCD 用 IPU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 1, p. 22-26
- (5) 町田淳, 圓眞義, 早瀬章吾: 2018 年モデル Accord Hybrid 用 Intelligent Power Unit, Honda R&D Technical Review, Vol. 30, No. 2, p. 72-75
- (6) LMS International, Transfer Path Analysis: The Qualification and Quantification of Vibro-Acoustic Transfer Paths, LMS International, Application Notes, (1995)
- (7) 能村幸介, 吉田準史: 主成分回帰法を用いた車内音の伝達経路解析手法, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 136-141
- (8) Almirón, J. O., Bianciardi, F., Corbeels, P: Structure-Borne Prediction on a Tire-Suspension Assembly Using Experimental Invariant Spindle Forces, SAE

Noise and Vibration Conference & Exhibition, SAE
Technical Paper 2019-01-1541, doi: 10.4271/2019-
01-1541, (2019)

- (9) Seijs, M. V., Klerk, D., Rixen, D. J.: General
framework for transfer path analysis: History, theory
and classification of techniques, Mechanical Systems
and Signal Processing, Vol. 68-69, p. 217-244, (2016)

■ 著 者 ■



下村 章人



外山 直基



川辺 正道



佐藤 嘉實