

試作車レス開発を考慮した 自動車空調用ホース振動伝達予測

Method for Predicting Vibration Transmission of Car Air-conditioning Hose
in Light of Prototype-less Development

深 澤 将 弘*

Masahiro FUKAZAWA

雲丹亀 真 剛*

Shingo UNIGAME

要 旨

加速時におけるエンジン振動が発生原因となる室内こもり音やエンジン音の低減検討を目的とした、空調用ホースの振動伝達予測技術を構築した。ホース単体モデルについては、補強層の異方性を考慮した多層構造を再現した。封入された冷媒ガスにより受ける内圧の影響については、解析精度に寄与しない影響因子を省略することで解析時間を短縮した。さらにボデーのモーダルモデルとモード合成法にて結合することで車両状態のモデルを作成し、エンジンからボデーへの振動伝達関数を算出した。その結果、周波数誤差 2%、伝達関数レベル誤差 3 dB の精度で算出することができた。加えてモデリング手法や計算条件の工夫により、総解析時間を 24 時間以内とすることができた。以上により、試作車レスで空調用ホースの振動伝達を予測することができるようになった。

ABSTRACT

A method for predicting the transmission of vibration by air-conditioning hose was devised for the purpose of examining the reduction of booming noise in the cabin and of engine noise caused by engine vibration during acceleration. For the stand-alone model of the hose, a multi-layered structure was recreated to take into account the anisotropy of the reinforcing layer. With regard to the internal pressure exerted by coolant gas sealed inside, influence factors that do not contribute to analytical precision were omitted, thereby shortening the time taken by analysis. A model of the vehicle state was created by joining a modal model of the body by the mode synthesis method, and vibration transfer function from the engine to the body was calculated. Calculation successfully yielded results with an error of 2% in the frequency and an error of 3 dB in the transfer function level. In addition, measures devised for the modeling method and calculation conditions enabled the total analysis time to be kept within 24 hours. With this prototype-less approach, the vibration transfer in air-conditioning hose can now be predicted.

1. まえがき

自動車の静粛性に対する要望は高まりつつあり、エンジン振動の主次数成分からなるこもり音や、高次数成分からなるエンジン騒音の低減は、お客様に与える車両の印象を大きく左右する重要な課題である⁽¹⁾。このエンジン振動の固体伝播が主となる約 100 Hz から 1000 Hz の周波数帯域にはさまざまな伝達経路がある。その一つに、エンジン振動が Fig. 1 で示す空調用ホース（以下、ホース）から伝達し、室内音となる経路がある。

試作車が作成された段階で、室内こもり音やエンジン音

の要因がホース伝達であることが判明した場合には、エンジンルーム内の部品レイアウトは決まっていることが多い。そのため、ホースの配索を大幅変更することは容易ではなく、ホース伝達に対する騒音対策にコストや質量の追加を要していた。

また近年、開発日程短縮や開発コスト低減を目的とした手戻りの少ない開発への移行により、モデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE) を用いた試作車レスの開発プロセスの必要性が高まっている。しかしホースの振動伝達に関する研究事例はあるが⁽²⁾、エンジンからボデーまでの振動伝達関数（以下、伝達関数）をシミュレーション予

*四輪 R&D センター

測する技術は見当たらない。その原因は、Fig. 2 で示すようにホースは材質の異なる多層構造であることや、冷媒ガスにより受ける内圧の影響のモデル化や、計算時間増大等の技術的課題がある。そこで本研究の目的はそれらの技術的課題を解決することにより、MBSE を用いた試作車レス開発に向けた車両搭載状態のホース振動伝達関数のシミュレーションを実現することとした。

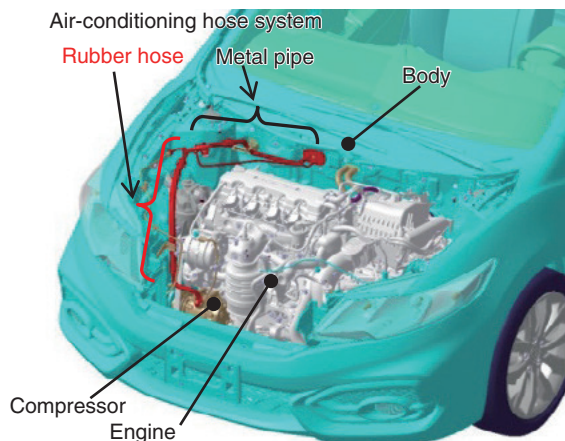


Fig. 1 Car air-conditioning hose system

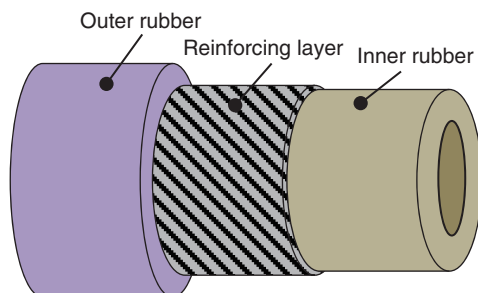


Fig. 2 Structure of air-conditioning hose

2. 開発のねらい

本研究のねらいは、試作車レス開発に対応するためのホースの伝達関数予測技術を構築することである。

現物を忠実にモデリングすることで計算精度は高まると考えられるが、必要以上に詳細にすることはモデリング時間と計算時間の増大に直結する。本稿の技術は商品開発に適用させることを目的としており、高い予測精度と短い解析時間という、背反する二つの要求を両立させることが要求される。

まず最低限必要な伝達関数予測精度の目標を設定した。ホースは Fig. 1 で示すように空調用コンプレッサに接続されるが、コンプレッサの共振周波数は一般的に 100 Hz から 1000 Hz であり、ホースの共振周波数と近接するため、

ホースとコンプレッサの共振周波数の分散を検討する必要がある。そのため、ホースの共振周波数の予測には $\pm 5\%$ 程度の精度が必要と考えた。また開発において支障のない仕様検討を可能とするには、 ± 3 dB の精度で伝達関数のピークレベルを算出する必要がある。よって本技術の目標予測精度は、車両状態の伝達関数にて周波数誤差 $\pm 5\%$ 、伝達関数レベル ± 3 dB とした。

またモデリング時間や計算時間を含めた総解析時間は、一日の作業時間を 8 時間と想定した際に、解析開始から三日以内に結果を取得できれば開発日程に支障なく設計作業ができると考え、合計 24 時間以内を目標とした。

3. 構築技術概要

空調用配管は Fig. 3 で示すように高压配管と低压配管の二系統が存在し、一般的に低压配管はエンジンとボデーとを直結することになるため構造上振動が伝達しやすい。低压配管はエンジンに搭載されている空調用コンプレッサと、ボデーに取付けられているエバポレータを接続しており、大部分が金属製のパイプで構成されるが、中間には振動遮断を目的としてゴムホースが採用されることが多い。本技術は、以上の理由から振動伝達において重視される低压配管のホースを対象とした。

対象車両は中型セダンモデルとし、伝達関数を予測する際のホースの状態は、Fig. 4 に示すように実際の状態を忠実に再現した。

また、車両搭載状態の空調用低压ホースを流れる冷媒ガスの圧力は約 1 MPa である。ホースはその圧力を受け止めるために繊維の補強層を含む多層構造となっている。また Fig. 4 で示す測定点における伝達関数の、内圧有無の実測結果を比較すると、Fig. 5 で示すように最大で 10 dB 以上レベルが変化し、また約 150 Hz から 1000 Hz の広範囲にわたり伝達関数に変化していることがわかる。これは内圧の大小によってホースのヤング率や形状が変化したことに起因すると考えられ、ホースの伝達関数把握には内圧を考慮する必要があることがわかった。よって伝達関数予測においても内圧を付加した状態を再現することとした。

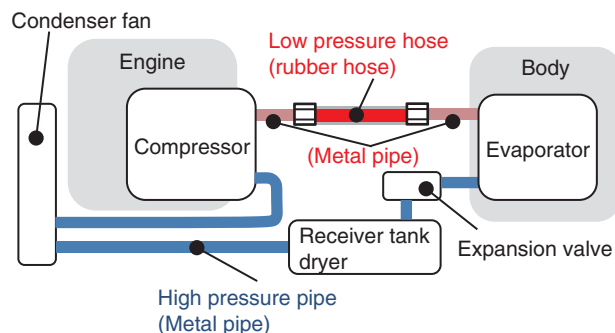


Fig. 3 Overview of car air-conditioning hose system

そこで、本技術のステップは下記とした。

- (1) 内圧のない状態で、ホース単体のモードを再現するのに必要な物性値やメッシング条件を検討する
- (2) (1)で作成したホースに、内圧の影響を付与したモデルを構築する
- (3) 車両搭載状態を再現するため、パイプ、ボデー、コンプレッサ等の周辺部品を付与したモデリング技術を構築する

なお、特にステップ(3)で結合するボデーに関しては、既存の他の解析目的で作成されたFEMボデーモデルのリソースを利用することで、新規で大規模なモデルの構築を不要とし、解析時間を短縮させることとした。また、中型セダンのモデルを用いて技術構築した後に、小型SUVモデル車両にて技術の汎用性を検証した。

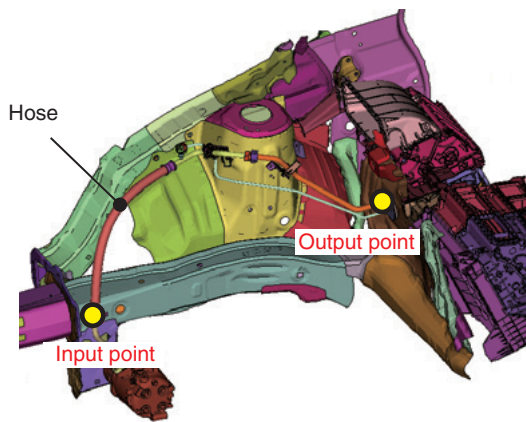


Fig. 4 Measuring points in sedan model

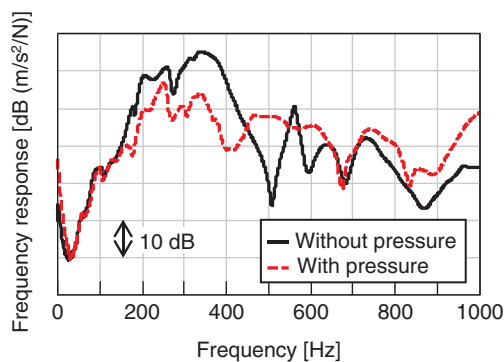


Fig. 5 Test results produced with and without pressure

4. 構築技術詳細

4.1. 多層構造をもったホース単体予測モデル構築

先述の通りホースは多層構造となっているため、各層の物性を考慮したCAEモデルを作成した。

直径約20 mmのホースに対し、モデル全般のメッシュサイズは5 mmとしたが、各ゴム部のラジアル方向のメッシングに関しては、Fig. 6に示すように各ゴム層ごとに3

層メッシュとなるようにサイズを細かく変更した。それにより、ホースのラジアル方向で変形するモードを精度良く再現することができた。

また中間に位置する補強層に関してはホースのヤング率に対する影響が大きいので、引張りと圧縮方向の異方性を設定することで、モードの再現性を向上させた。

次に固定されていない状態でストレート形状であるホースを、90°曲げたモデルを作成しFig. 7で示す測定点における伝達関数を算出した。Fig. 8にその結果を示すが、実測との再現精度は共振ピークにおいて伝達関数レベル誤差が2 dBであり、ホースの繊維を含む多層構造のモデルを、ホースの曲げも考慮して再現することができた。

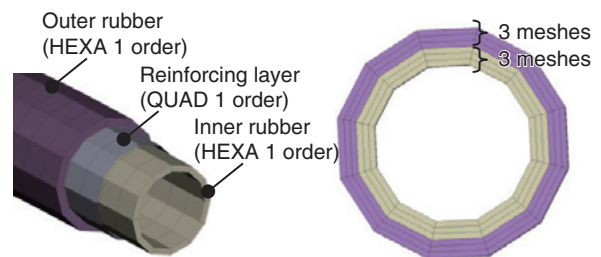


Fig. 6 Modeling of multi-layered hose

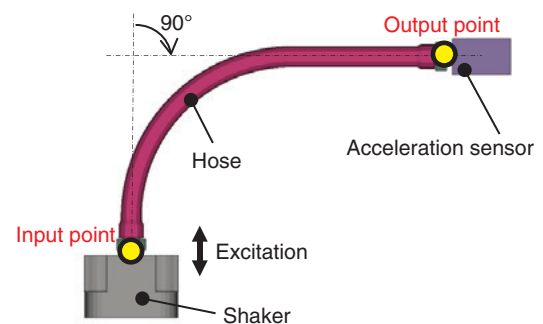


Fig. 7 Way to bend hose and measuring points

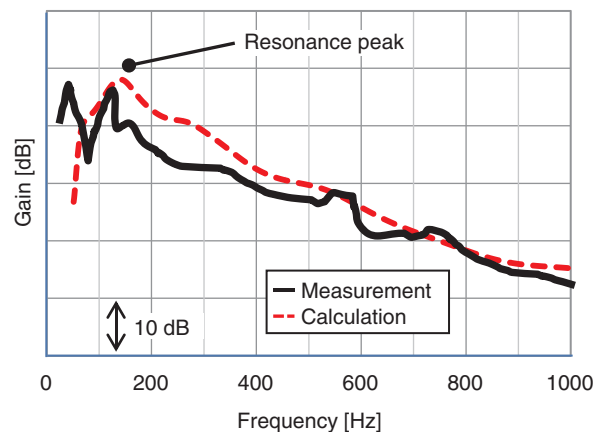


Fig. 8 Frequency response accuracy under conditions without pressure

4.2. ホース内圧影響のモデル化

内圧を付加することによる影響因子には大きく二つ挙げられる。一つ目は、ホースが高分子材料のゴムでできているため応力とひずみの関係が非線形であることにより、ヤング率が変化する影響である。二つ目は、ホースが内側からの圧力によって膨らむことで、直径や全長が変わる形状の変化によるものである。

まずゴムホースのヤング率と形状の変化の、二つの影響因子を省略することなく詳細に考慮したモデルを作成した。手法としては冷媒ガスに触れるホースの最も内側の面を指定し、その面に対し圧力を付加することで内圧影響を再現した。そして非線形解析にてヤング率と形状の変化を算出し、内圧付加する前と比較した結果が Fig. 9 (a), (b) である。内圧付加によりヤング率と形状が共に変化しており、二つの影響因子が再現できていることがわかる。この詳細モデルは実現象を忠実に再現できていると考えられるが、ホース単体モデルにも関わらず計算に4時間以上を要した。

本技術は計算精度と時間短縮の両立をねらいとしているため、計算精度を維持できるならば、解析時間短縮のため考慮する影響因子は必要最小限としたい。ここでホースの内圧付加による、直径や全長の寸法変化率の計算結果を

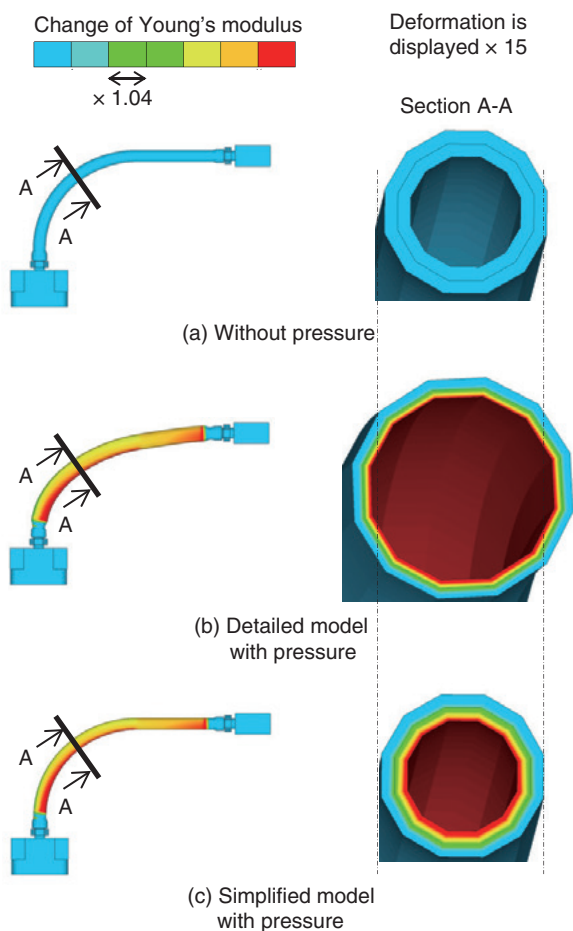


Fig. 9 Pressure effect result for each model

Fig. 10 に示すが、それぞれ 1.9% と 0.3% と微小であることがわかる。そこで変形を無視した状態でも計算精度を維持することができるかどうか検証をおこなった。

ゴムホースのヤング率変化のみを考慮し、形状変化を無視する簡易モデルを作成するにあたり、内圧の付加方法は先述の詳細モデルと同様とした。そして静解析にて内圧によるヤング率と形状の変化を算出したが、その後伝達関数を算出するための動解析は、Fig. 9 (c) で示すようにヤング率の変化のみを取り込み、ホースの直径と全長が変化する情報は取り込まずにおこなった。この簡易モデルは線形解析となるため、1 時間以下で計算結果を得ることができた。

伝達関数の詳細モデルと簡易モデルにおける算出結果の差は、Fig. 11 に示すように共振ピーク周波数にて 1%, 伝達関数レベルにて 1 dB 以下の差であった。一方、計算時間は詳細モデルに対して、簡易モデルにて約 4 分の 1 に短縮することができた。そこで本研究では、必要最低限の計算精度を維持したまま計算時間を短縮するため、ホースのヤング率変化のみを考慮した簡易モデルを採用することとした。Fig. 12 にて簡易モデルと実測との再現精度をみると、共振ピークにて伝達関数レベル誤差が 3 dB であり、内圧

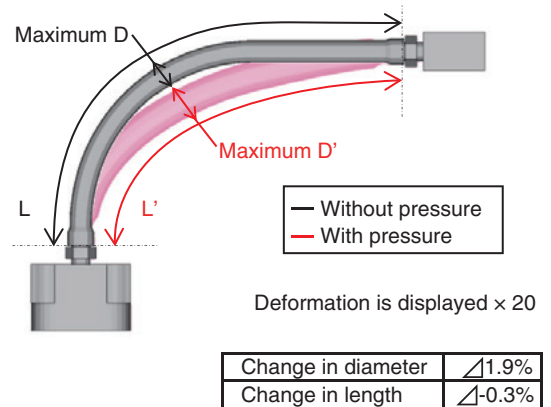


Fig. 10 Change in hose dimensions by pressure

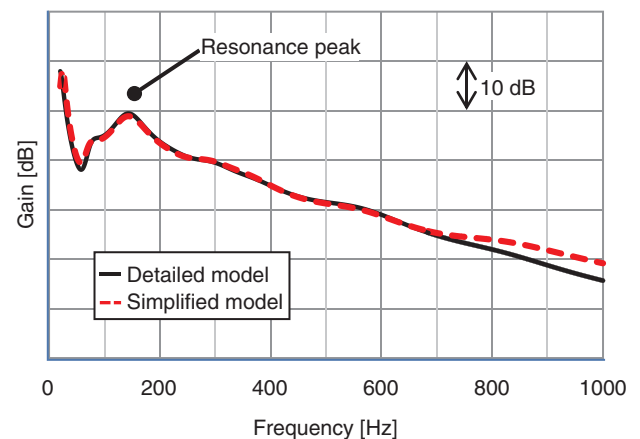


Fig. 11 Frequency response results for each model

が付加されたホースの伝達関数を予測する技術を構築することができた。

4.3. 車両搭載状態の再現

前節までで構築したホース単品のモデルを用いて、車両に搭載された状態の伝達関数予測をおこなった。

車両状態の再現には、ホースに接続されるパイプやクリップの追加をおこなった。またボデーは先述の通り新規での大規模モデル作成を不要とするため、既存のモデルを使用した。その際、本技術は約 100 Hz 以上のホース周辺のみがローカルで振動する周波帯域を対象としており、エンジンルームから離れた車両後部は影響が小さいため、車両前部のみのカットボデーモデルとした。またボデーやエンジンのモダルモデルと、部分モード合成法 (CMS)^{(3), (4)}により結合することでモデル構築した。それらにより、解析に要する時間を短縮させることができた。

Fig. 13 に伝達関数結果を示す。共振ピークにて実測との再現精度は周波数誤差が目標 $\pm 5\%$ に対し再現精度 2%, 伝達関数レベル誤差が目標 ± 3 dB に対し再現精度 3 dB

と目標を満足した。また総解析時間は目標 24 時間以内に 23.75 時間であり、目標を達成することができた。

以上により、車両搭載状態におけるホースの伝達関数を予測する技術を構築することができた。

4.4. 汎用性の検証

本技術を小型 SUV モデルに適用し、汎用性を検証した。前節までで対象としていた中型セダンモデルとはエンジン、ホース、配管パイプ、ボデーのすべてが異なるモデルとなるが、同様のモデリング手法を用いて解析をおこなった。Fig. 14 に測定点、Fig. 15 に伝達関数結果を示す。

共振ピークにて、実測との再現精度は周波数誤差が 2%, 伝達関数レベル誤差が 2 dB と目標を満足した。また総解析時間は 23.25 時間であり、目標を達成することができた。

よって本技術にてサンプルとしたような一般的なホースレイアウトであれば、十分汎用性があると考えられ、構築した予測技術の有用性が検証された。

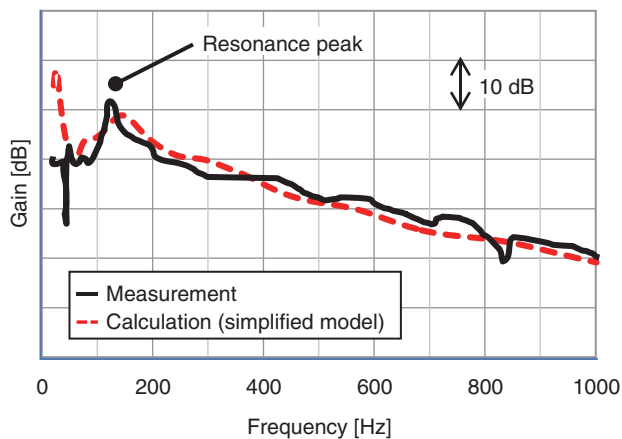


Fig. 12 Frequency response accuracy under conditions with pressure

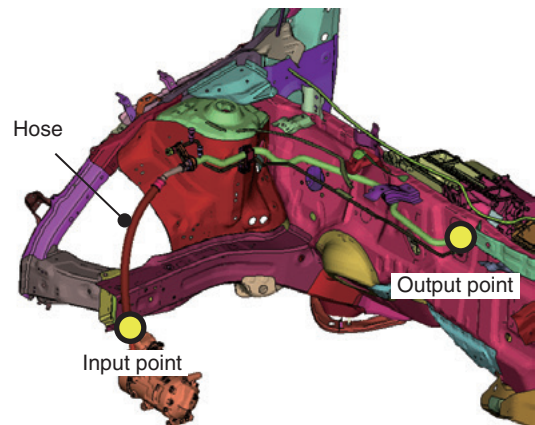


Fig. 14 Measuring points in compact SUV

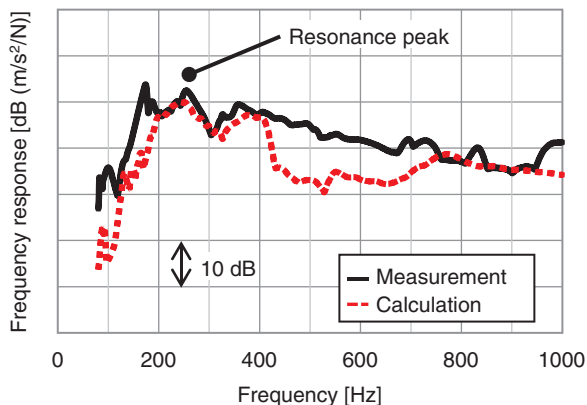


Fig. 13 Frequency response accuracy of hose model installed in sedan

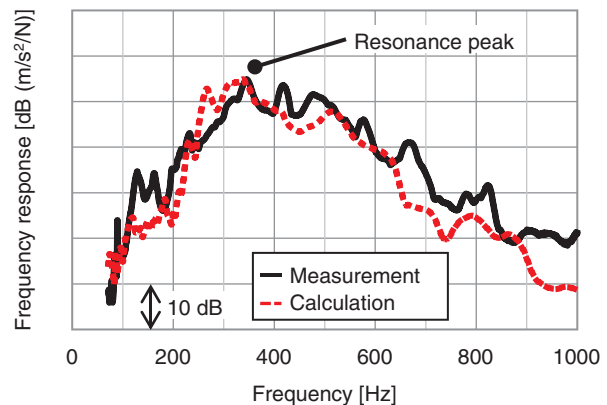


Fig. 15 Frequency response accuracy of hose model installed in compact SUV

5. まとめ

加速時におけるこもり音や、エンジン音の伝達経路の一つである空調用低圧ホースに関し、試作車レスの開発初期段階に対応するため振動伝達予測技術を構築し、その汎用性も検証した。

その際、車両開発に適用できるよう検討をおこない、以下の成果を得た。

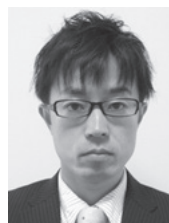
- (1) 車両状態において、共振ピークの周波数誤差 2%, 伝達関数レベル誤差 3 dB とし、車両開発で支障のない精度でホースによる振動伝達を再現することができた。
- (2) モデリングの簡略化や解析手法の工夫により、合計解析時間を 24 時間以内とし、(1)の計算精度を維持したまま、解析時間を短縮できた。
- (3) ボデー大規模モデルに関しては、既存の FEM モデルのリソースを活用することにより、時間を短縮することができた。

以上より、MBSE を用いた試作車レス開発に向け、車両搭載状態におけるホースの振動伝達関数を十分な精度で予測する技術を構築することができた。

参考文献

- (1) 松本聖司, 角賢治, 山本憲一, 大西有紀子:CAE によるシリンダブロック・オイルパン系の放射音解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.962, p.229-232, (1996)
- (2) 角田克彦:自動車用ホースの現状と将来動向, 日本ゴム協会, 日本ゴム協会誌, 第 80 巻, 第 10 号, p.375-379, (2007)
- (3) 深澤将弘, 村尾剛史, 雲丹亀真剛:液封マウント振動伝達予測手法, Honda R&D Technical Review, Vol.27, No.1, p.111-116
- (4) 長松昭男, 大熊政明:部分構造合成法, 培風館, p.103-105, (1991)

■ 著 者 ■



深澤 将弘



雲丹亀真剛