

技術紹介

モーダル解析活用による治具共振低減手法

藤 掛 光 彦 ・ 遠 藤 朋 貴

1 はじめに

近年、BEV（Battery Electric Vehicle）、HEV（Hybrid Electric Vehicle）の普及により車両静粛性が大幅に向上している。車室内の暗騒音低下に伴い周辺部品の騒音が顕在化することで、一段と厳しいNVH^{注1)}低減要求が予想される。今後の製品開発において低騒音・低振動化は、必要不可欠であり高精度なNVH評価が求められる。

従来のベンチ評価方法では、試験治具に製品を取付けるため、製品と試験治具による共振が発生し、製品本来のNVH特性を把握することが非常に困難であった。そこで、実稼働時の振動モードの把握ができるように、モーダル解析を活用し治具共振を排除した設計手法を構築した。本報ではその手法を紹介する。

注1) Noise, Vibration, Harshness（騒音、振動、ハーシュネス）の略。

2 製品紹介

電気自動車の普及により主機モータやバッテリーを冷却・潤滑する電動オイルポンプの需要が高まっている。機電一体となった電動オイルポンプはエンジン回転数に依存しないため、使用用途が広い。カヤバでは、これまでのポンプ設計技術を活用することで小型化・高効率な電動オイルポンプの開発を行っている。図1に冷却潤滑用電動ポンプの一例を示す。

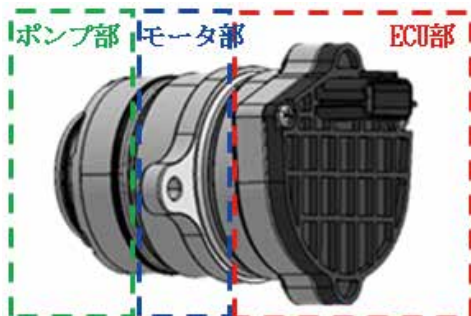


図1 冷却潤滑用電動ポンプ

3 NVH評価設備の課題

従来の評価設備では、実車を模擬した評価環境を構築しておりベルト駆動やスプロケットを介してのチェーン攪拌など、複雑な治具構成により外乱を含んだ状態で評価を実施してきた（写真1）。しかし純粋なポンプのNVH評価をする上では、外乱要素が多く含まれるため、振動改善アイテムの信頼性の評価、ばらつき把握など困難な状況も発生していた。

外乱要素の主な影響は、以下3要素に分類される。

- ①チェーン駆動による駆動側振動の伝達
- ②作動油の攪拌によるポンプ内部エア混入
- ③試験治具共振

これらの外乱を排除することで純粋なポンプのNVH評価が可能になると考え、直結仕様の性能試験機をベースとした新たなNVH評価設備を製作した（写真2）。従来のチェーン駆動方式から直結駆動方式となり3要素の内、①と②の2要素は排除されたが、③の試験治具共振は改善されなかった。理由として、ポンプは要求される流量に合わせて回転数を変化させるため、発生する振動周波数も数Hzから数kHzと幅広く、試験治具の固有振動数との共振が発生しやすい。共振が発生するとポンプの振動レベルが大幅に増加するため、純粋なポンプのNVH特性を把握することが難しくなる。そこで試験治具共振対策としてモーダル解析を活用した解析技術の

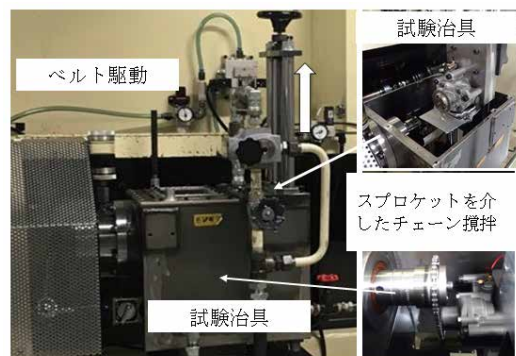


写真1 従来のベルト駆動評価設備

構築，共振を排除した試験治具の設計を行った。

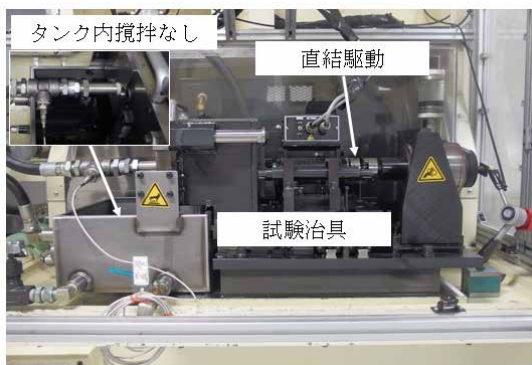


写真2 直結駆動評価設備

4 共振周波数，共振試験治具の特定

4.1 試験治具共振周波数の特定

図2に示すカラーマップは直結駆動評価設備でポンプNVH評価を行った結果である。横軸に周波数，縦軸にポンプ回転数，色彩はポンプ振動の大きさを表している。放射状に伸びる線は，ポンプの回転次数成分であり，ポンプ回転に依存しない一定の周波数帯で大きく振動している赤枠箇所は試験治具共振が発生している周波数帯である。共振周波数は1.3kHz～1.6kHz，3.5kHz～4.5kHzの2箇所である。ポンプ周りのいずれか（もしくは複数）の試験治具が有している固有振動数がポンプ次数成分^{注2)}と重なることで共振が発生し，ポンプ振動に影響を与えている。

注2) ポンプ次数成分

ポンプ1回転あたりを1周期として1回発生する現象をポンプ回転1次成分，そのn倍をn次成分という。

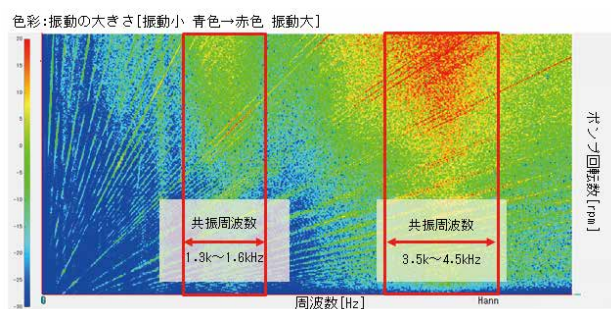


図2 ポンプNVH評価時のカラーマップ

4.2 試験治具の細分化

共振治具の特定にあたり，各試験治具をポンプ含め9つの治具に細分化した（図3）。

実験による固有値解析によって共振治具を特定するために各試験治具及びポンプに3軸加速度センサを取付け，加振させたときの周波数応答を計測・解析する。実験による固有値解析精度向上に向けて実稼働モード解析，実験モード解析の2通りの計測・

解析を実施し共振治具特定の高精度化を図っている。

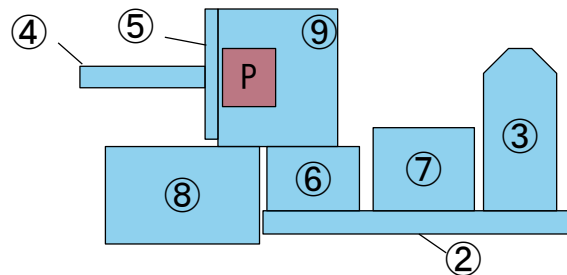


図3 各試験治具をポンプ含む9治具に細分化

4.3 実稼働モード解析

実稼働モード解析は，ポンプNVH評価時の振動モードを解析する手法である。実際の試験条件で計測できるため実環境に沿った解析結果が得られる。各試験治具のパワースペクトル^{注3)}及びクロススペクトル^{注4)}を計測し共振周波数帯での振動モードを可視化した試験治具モデルを図4，図5に示す。色彩は，カラーマップ同様振動の大きさを表しており，振動大が赤色となっている。

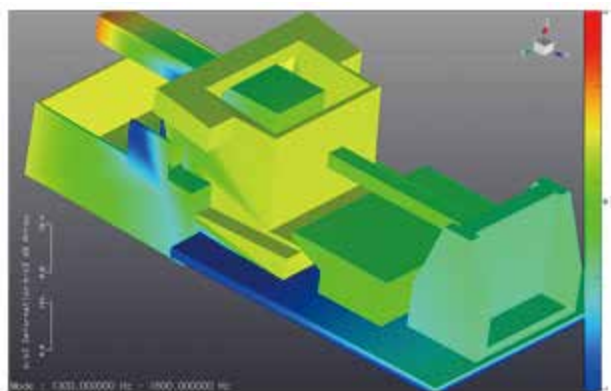


図4 1.3kHz～1.6kHzの試験治具振動モード

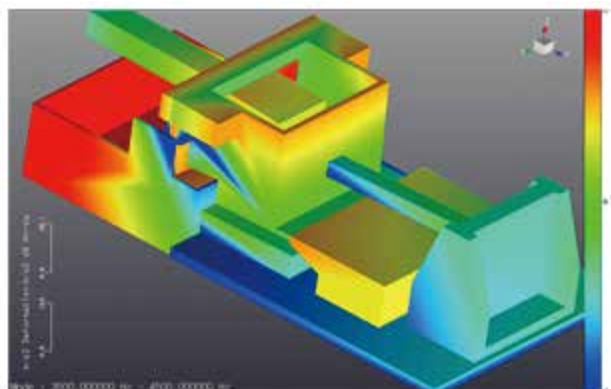


図5 3.5kHz～4.5kHzの試験治具振動モード

注3) パワースペクトル (power spectrum)

信号のパワーを一定周波数帯域ごとに分割し，その帯域ごとのパワーを周波数関数として表したもの。

注4) クロススペクトル (cross spectrum)

2 信号のスペクトルの周波数成分どうしを掛け合わせて平均したもの。

4.4 実験モデル解析

実験モデル解析は加振試験によって求めた周波数応答関数から振動モードを解析する手法である。試験治具を組付けた状態と単体の状態で異なる振動モードが出てくる可能性があるため、それぞれの状態で加振試験を実施し解析した。

表1は実稼働モデル解析と実験モデル解析の結果から、共振周波数帯に固有振動数を有している可能性がある治具をまとめたものである。解析結果を総合的に判断すると赤枠の試験治具番号⑦⑧⑨について共振対策が必要であると判断した。

表1 共振治具特定結果

治具番号	実稼働モデル解析	実験モデル解析	
	治具 ASSY	治具 ASSY	治具単体
②	×	○	×
③	×	×	×
④	×	×	×
⑤	×	×	×
⑥	×	×	×
⑦	○	○	○
⑧	○	○	○
⑨	○	○	○

○：共振周波数帯に固有振動数を有する可能性あり

×：共振周波数帯に固有振動数を有する可能性が低い

5 試験治具の最適化

5.1 試験治具形状検討方法

共振治具の特定により試験治具形状・材質などを変更し治具の固有振動数を変動させる、もしくは剛性を高め振動レベル（以下イナータンス）の低減を図る。また、コスト低減を目指し複雑な形状を避け、効率的な試験治具を設計する。対策治具の解析には FEMソフトである ANSYS® を使用し、シミュレーション（以下 SIM）によるモデル解析を実施、試験治具形状違いによる固有振動数を予測した。

しかしながら剛性の低い治具形状では、モデル解析結果に多くの固有振動数が算出されてしまうため、解析精度が低下する。解析精度を向上させるため低剛性治具には、実験モデル解析を実施し、実測の振動モードを把握して対策を講じた。図6に対策手順のフローチャートを示す。試験治具の剛性に合わせて解析手法が分かれ、最終的な試験治具形状に対し SIM モデル解析で対策効果を確認する。対策効果が不十分であれば、治具形状を変更し目標達成まで対策プロセスを繰り返す。SIM モデル解析にて目標達成後、対策治具を製作し実験モデル解析を実施。実測での対策効果を確認する。

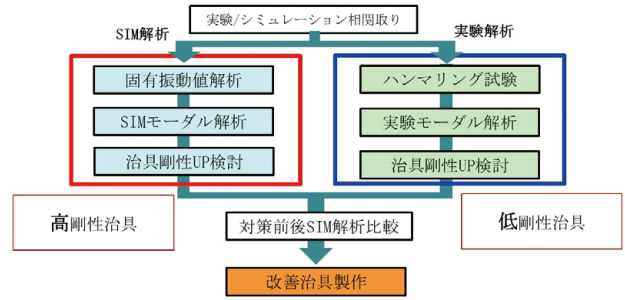


図6 対策手順フローチャート

対策効果の目標値として、試験治具共振周波数帯におけるポンプ吐出方向のイナータンスを50%低減する設定とした。次節より対策手順について、詳細を説明する。

5.2 実験/SIMモデル解析のコリレーション

図6で示したフローチャートの実験モデル解析及びSIMモデル解析の精度向上を図るため、両解析手法のコリレーション^{注5)}が必要である。コリレーションとして、比較的単純形状で高剛性な治具番号⑤をコリレーション対象とした（図7）。

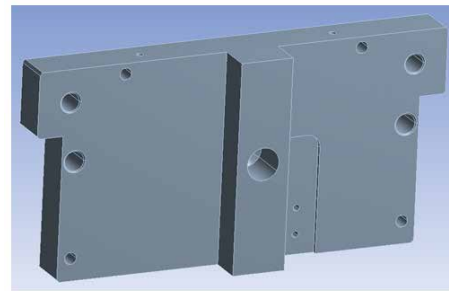


図7 治具番号⑤の形状

図8はコリレーション前の実験/SIMモデル解析で得られた周波数応答の結果である。コリレーション前の波形では、固有振動数の周波数は実験/SIMでおよそ一致しているが、そのイナータンスには大きな差異が見られる。原因として、実験/SIMモデル解析の解析条件の違いが考えられ、以下が挙げられる。

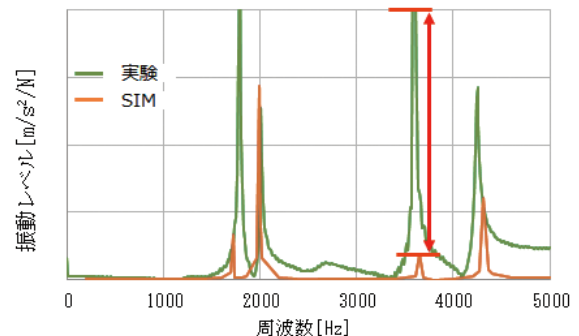


図8 コリレーション前の周波数応答

- ・治具の支持方法
- ・加振点、応答点の位置
- ・SIMモデル解析の減衰比設定

試験環境や試験方法、解析パラメータ条件を擦り合わせることで再度コリレーションを行った。図9に条件摺り合わせ後のコリレーション結果を示す。コリレーション前後を比較すると固有振動数の周波数に加え、イナータンスの値も同等となる。この結果から実験/SIM解析の高いコリレーションが確立され、高精度な解析が実現された。

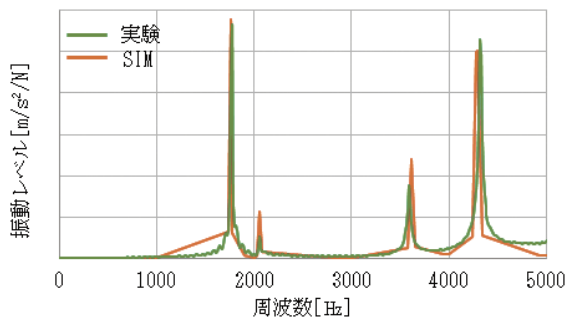


図9 コリレーション後の周波数応答

注5) コリレーション (correlation, 相関)

二つの変量や現象がある程度相互に規則的な関係を保って変化すること

5.3 SIMによる振動モード検証

図10は共振周波数である3.5kHz～4.5kHzの振動モードを可視化しており、治具横方向に波打つような振動モードである。特に上両側端が大きく振動しており、上側の治具剛性を高めることで、共振対策が望める。またSIMモデル解析において多数の固有振動数が算出された場合は、治具剛性が低い可能性がありSIM解析精度の低下が考えられる。その場合は、実験モデル解析へ解析手法を切り替える必要がある。

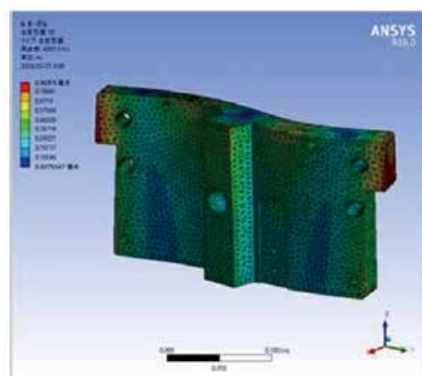


図10 治具番号⑤の振動モード解析

5.4 実験による振動モード検証

SIMモデル解析にて治具剛性が低い結果が得られた治具番号⑨に対し、実験モデル解析を行った。図11は、共振周波数である1.3kHz～1.6kHz及び3.5kHz～4.5kHzの振動モードを可視化した結果である。色彩は、カラーマップ同様振動の大きさを表しており、振動大が赤色となっている。いずれも開口面と背面の剛性不足により共振が発生している結果が得られた。このことから、各2面の剛性を高めた設計をすることで、共振対策が望める。特に開口面右上から対角線上の剛性向上が有効的であることが分かる。

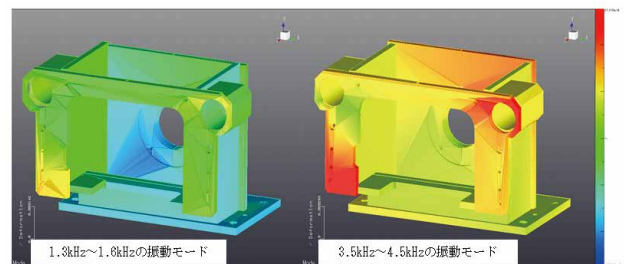


図11 治具番号⑨の振動モード解析

5.5 対策治具の検討

5.2項で得られた治具番号⑤の共振周波数3.5kHz～4.5kHzのイナータンスを低減するため、振動モードに対して変形を抑制する形状を検討した。設計検討では、試験治具製作時の加工可否やコスト、試験時の作業性を考慮した治具設計が重要であるため、上記を考慮し、治具番号⑤に対して図12に示すような治具横方向にリブを追加する形状とした。

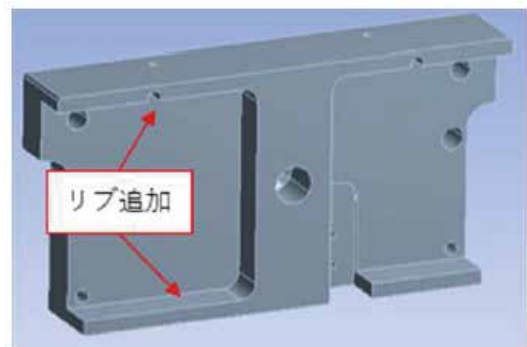


図12 対策検討後治具

5.6 対策治具モデルの解析

SIMモデル解析より、対策前後の周波数応答を比較した結果、対策前に対し対策後ではイナータンスが64%低減した。この段階で目標のイナータンス50%低減を達成。さらに解析ばらつきを考慮したイナータンス低減を目指し、リブ高さ・幅の変更を繰り返し行い、イナータンス低減とコストを両立するリブ形状を検討した。図13が検討した最終形状であ

り、イナータンスが97%の低減となった周波数応答結果を図14に示す。

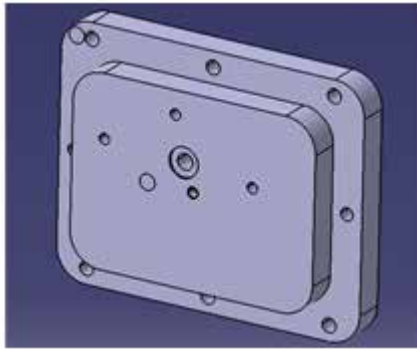


図13 治具番号⑤の最終形状

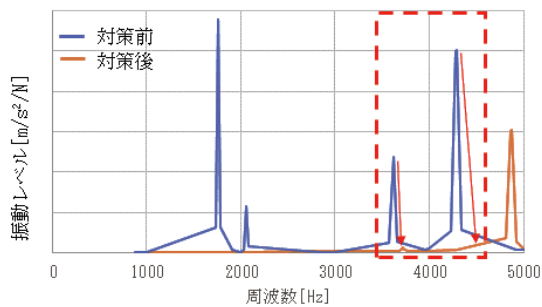


図14 対策前後のSIM周波数応答比較

5.7 実験モデル解析による対策治具検証

対策治具モデルより、治具設計に移行し対策治具を製作した。SIMモデル解析により治具共振が低減された対策治具にて実験検証を実施。SIMによるイナータンス予測低減率に対し、実験での実測低減率は93%でありSIM解析と同等レベル。実験/SIMの高いコリレーションも再検証された。実験/SIMによる周波数応答結果を図15に示す。

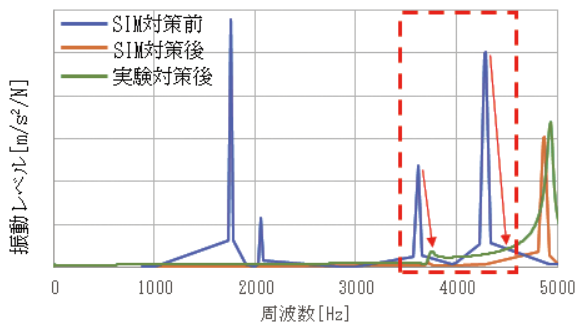


図15 対策後治具の実験/SIM周波数応答比較

次に実験モデル解析による、対策前後の周波数応答を比較した結果を図16に示す。対策前に対し対策後では、イナータンスが93%低減した結果が得られた。SIMモデル解析で得られた対策治具の固有振動数とそのイナータンスが実測においても、同等レベルであることが確認された。

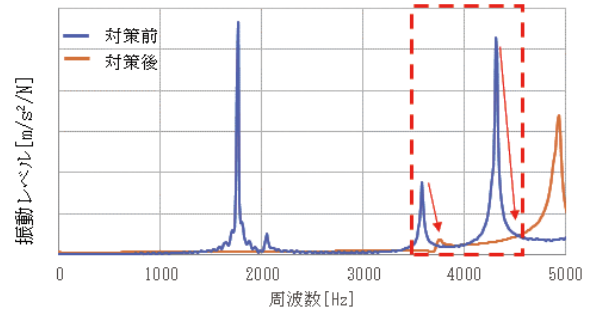


図16 対策治具前後の実験周波数応答結果

5.8 共振治具対策前後の試験治具比較

対策前後の試験治具形状を図17に示す。共振を抑え、複雑な治具構成を単純化したことで構成治具点数を減らし、高剛性な低コスト治具を製作することができた。

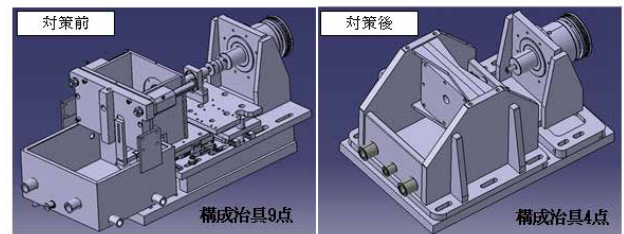


図17 対策前後の試験治具

6 共振対策治具の検証結果

共振対策前後での試験治具を使用したポンプNVH評価結果を図18に示す。対策後カラーマップより共振周波数帯であった3.5kHz～4.5kHzでは試験治具共振の発生はなく、1.3kHz～4.5kHzの周波数帯では、ポンプの次数成分振動が明確に確認できるようになった。この結果より試験治具の共振が改善さ

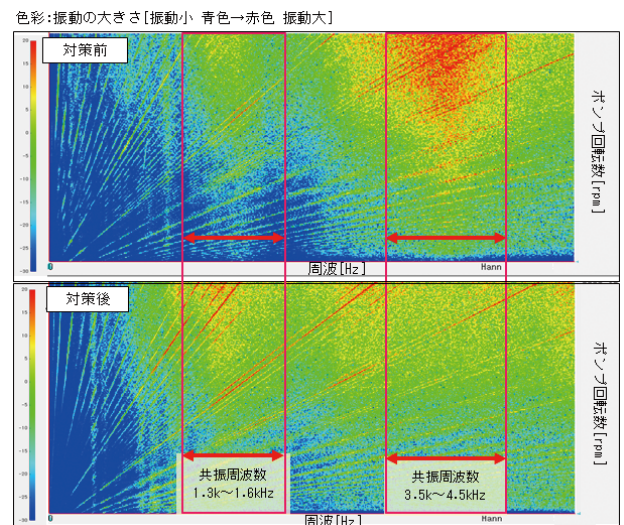


図18 対策前後のポンプNVH評価結果

れ、ポンプに影響を及ぼす外乱要因が全て排除されたため、高精度なポンプNVH評価が可能となった。

7 今後の展望

自動車部品開発において、NVH評価は必要不可欠であり車両静粛性が今後さらに向上していく中、高精度なNVH評価をするための環境構築が急務である。今回の解析手法及び技術知見を各製品へ水平展開することで、製品のNVH評価精度向上が図れる。また試験治具の設計段階から製品共振を変動させた治具を製作することで評価の手戻り、異常振動発生時の原因究明工数低減が期待できる。高い低騒音化が求められる電動ポンプ開発においても、今回の手法を活かしていく所存である。

8 おわりに

本報ではモーダル解析を活用した試験治具共振対策に取り組んだ活動を紹介した。これまでの実験/SIMモーダル解析に加え、実稼働モーダル解析を取り入れたことで、実際のNVH評価条件での試験治具振動モードが可視化された。このため共振治具の特定及び治具の共振部位が明確になり解析精度の向上に繋がった。また実験/SIM解析の高いコリレーションを確立したことで、精度の高い共振治具対策が実施できた。本取り組みにより共振治具対策プロセスが明確化され、より精度の高い試験治具解析技術の蓄積が期待される。更なる精度向上に取り組んでいくと共に、日々新しいNVH評価技術を高めることが重要である。

最後にモーダル解析技術構築にあたり、ご指導、ご協力をいただいた関係者の方々にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。

著 者



藤掛 光彦

2011年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部開発実験室に所属。電動ポンプの開発に従事。



遠藤 朋貴

2018年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部開発実験室に所属。電動ポンプの開発に従事。