

KYBにおける低騒音化技術

Noise-Reduction Technologies in KYB

矢加部 新 司 ・ 鈴木 一 成
Shinji YAKABE ・ Kazunari SUZUKI

要 旨

低騒音化に対する社会要求が高まる中、製品の騒音対策はこれまで以上に重要な位置づけになってきている。KYBにおいても低騒音化を考慮した製品設計は実施しているが、KYB製品を搭載するシステムの低騒音化も急速に進んでおり、システム搭載時に騒音問題として取り上げられることがある。騒音問題が発生した場合、その製品は商品性を損なってしまう可能性があるため、迅速に解決することが求められる。低騒音化を実施するためには、評価、予測、対策という3つの技術を効率よく回すことで、問題となる騒音の発生メカニズムを明確にすることが重要になる。

本報では、KYBにおける基本的な騒音対策の流れについて解説し、2つの低騒音化事例についても紹介する。更に、より迅速且つ効果的に低騒音化を実現するための今後の展望についても述べる。

Abstract

Along the strong demand of noise-reduction from the society, the noise-reduction of products are more important than ever. Certainly in KYB, our products are usually designed taking into account the noise-reduction. However, the systems to be equipped with our products are also rapidly improved regarding noise-reduction. Our products sometimes, therefore, are pointed out as the noise problem. Once the noise problem happens, the merchantability of the products will be damaged. So, it is necessary to solve the problem immediately. In order to the realization of noise-reduction, it is important to identify the generating mechanism of the noise, by efficient use of a series of flows that consists of three methods, an evaluation, a prediction and a measurement.

In this paper, the basic ways to approach for the noise-reduction in KYB are explained, and two instances of noise-reduction in regard to products development are also shown. Further, our future view are referred to realization of the rapid noise-reduction.

1 緒言

環境問題が深刻化してきた1990年代以降、世の中では省エネルギー化を目指した製品開発が年々増加している。その中で、KYB製品の多くが採用されている自動車、建設機械では、省エネルギー化の方策としてハイブリッド化、電動化が進められてきている。動力源のハイブリッド化や電動化は省エネルギー効果の他に、これまで騒音源となっていたエンジンを小型化、更には廃止することが可能であるため、静粛性を高める効果にも繋がる。このため近年

では、部品メーカーへの低騒音化要求が以前にも増して厳しくなってきている。

このような状況の中、KYBでは低騒音化を考慮した製品設計を日常的に実施している。しかし、その製品を自動車や建設機械などの母機に搭載した際、母機特性により騒音問題として取り上げられることがあり、低騒音化技術のニーズは高まっている。

低騒音化技術には、製品設計段階で行う予防的なアプローチと騒音問題が取り上げられた際に行う対策的なアプローチとがある。KYBにおいては予防的なアプローチとして油圧機器の内部圧力変動予

測¹⁾²⁾³⁾やキャビテーション抑制のための油路設計¹⁾⁴⁾などを行っており、対策的なアプローチについては母機特性などによって騒音問題が発生した際に、騒音の発生状況に合わせた対策を実施している。

本報では、KYBにおける低騒音化技術として、対策的なアプローチについて述べる。

2 低騒音化技術

2.1 騒音発生メカニズム

騒音とは、聞く人によって不快に感じ、好まないと思う音であり、騒音のほとんどは人間の心理や感覚に影響される。一例として自動車のエンジン音を挙げると、エンジン音を楽しみながら運転する人の場合、運転者の耳はエンジン音に集中する。しかし、エンジン音の中にエンジン音とは異なる周波数の音が混在している場合、例えばその音がきれいな和音だとしても運転者は不快な音、すなわち騒音として捉える。一方、自動車に静粛性を求める人の場合には、エンジン音そのものを騒音として捉える。

このような騒音問題が発生した場合、その製品は商品性を損なってしまう可能性があるため、低騒音化を迅速に行うことは非常に重要である。迅速に低騒音化を実施するためには、どの周波数の音が騒音として認識されているかを把握し、音の発生源を突き止めた上で、どのように伝播して最終的に騒音となるかというメカニズムを明確にしていくことが必要になる。

図1に一般的な騒音発生メカニズムを示す。例えば、油圧ポンプが発生する力として圧力による力(起振力)などがある。起振力の周波数特性が図1に示すような波形とした場合、これは振動として油圧ポンプの構成部品や油圧ポンプの取付治具、配管部品などの伝達系の特性(伝達ゲイン)により増幅、あるいは減衰され、車体等の放射系の特性(放射係数)に合わせて音となり、騒音として認識されることになる。この発生メカニズムは固体伝播音と呼ばれる騒音であり、機械系の騒音の多くはこの流れで発生する。

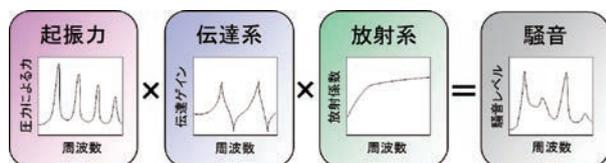


図1 騒音発生メカニズム

2.2 KYBにおける騒音対策の流れ

前節で示したような騒音発生メカニズムを解明し、迅速に製品の低騒音化を実施していくためには、評価(実験評価)・予測(解析)・対策という技術を効率良く回していくことが必要になる。本節では、KYBにおける騒音対策の流れについて解説する。

表1にKYBで実施している評価技術及び予測技術を示す。また、騒音対策の流れを図2に示す。騒音問題が発生した場合、最初のステップとして、問題となっているシステム全体での原因調査のため、システム全体評価を実施する。原因調査の際に放射

表1 KYBにおける評価・予測技術

	起振力	伝達系	放射系
評価	・内部状態計測	・実験モーダル解析 ・実稼働モーダル解析	・騒音計測 ・音源探査
予測	・起振力解析 ・CFD解析	・モーダル解析 ・周波数応答解析 ・管路解析	・(音響解析)

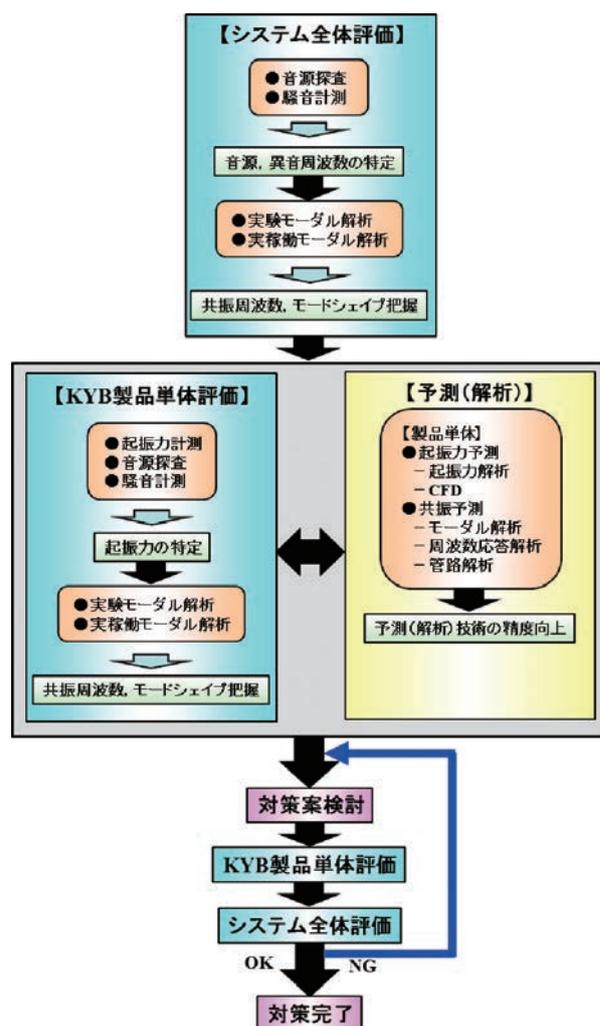


図2 騒音対策の流れ

系に対して実施する計測・評価方法としては、騒音計測、音源探査等がある。騒音計測結果に対しては、騒音の大きさの尺度となる騒音レベル評価の他に、オクターブ分析⁵⁾を行い、騒音の中で問題となる周波数帯域を求め、FFT分析⁵⁾によって問題の周波数を特定する。また、音源探査では音響インテンシティ⁵⁾やマイクロホンアレイ⁵⁾を用いた計測により、騒音の指向特性（ベクトル図）や音圧分布（コンタ図）を求めることで音源を特定する。これらの実験的アプローチにより、問題の周波数と騒音発生源を特定することができる。

次に伝達系の評価を行うため、実験モーダル解析、実稼働モーダル解析等を実施する。周波数領域の振動解析手法の一つである実験モーダル解析では、インパクトハンマや一定の加振力を与えることができる加振器を用いて対象物を加振し、応答加速度を測定することで入力に対する応答の比（周波数応答関数）を求める。この周波数応答関数を分析することで共振周波数や周波数領域におけるモノの動き（モードシェイプ）、更には振動を受けてからモードシェイプが消えるまでの減衰の大きさ（モード減衰）などのモーダルパラメータと呼ばれる動的特性を実験的に把握することができる（図3）。

また、実稼働モーダル解析では、システム稼働状態でのモーダルパラメータを把握することができる。対象物が振動していない状態で強制加振を行う実験モーダル解析とは異なり、実稼働モーダル解析ではシステム稼働時に計測するため、対象物が振動している状態であり、問題発生時の運転状況下での共振の変化を見ることが可能になる。

上記の分析結果から、問題の周波数が共振周波数と一致する場合、一般的にモードシェイプから振れやすい部位を把握し、剛性を変えることにより、周波数特性を変化させる伝達系の対策を行うことが多い。しかしながら、システム全体では多数の共振周波数を有するため、そのみでの騒音問題解決は非常に難しい。騒音問題を解決するためには、共振対策も当然実施しなければならない重要な手段ではあるが、図1に示したように振動騒音の発生源となる起振力を特定し、対策することが最も有効な手段と

なる。KYBの製品には、油圧ポンプのように起振力を発生する起振源となる機器が多い。また、このような機器を搭載する自動車や建設機械等のシステム全体での計測は、時間や回数に制限がある場合が多い。

従って、図2に示すように騒音対策の流れとしては最初のシステム全体評価以降、KYB製品単体評価（起振力の調査・対策）を行うことになり、KYBでの主な騒音対策がこれに当たる。製品単体での起振力を特定するための実験評価は、システム全体評価と同様に、騒音計測、音源探査、各部振動計測（実験モーダル解析、実稼働モーダル解析）を実施する。更に内部圧力のような製品内部状態の計測やトルク変動などの起振力と成り得る特性値の計測も行い、これらの結果を詳細に分析することで起振力を特定する。しかしながら起振力は発生メカニズムが多様であり、騒音対策もそれぞれに異なる。

前述のような油圧ポンプが発生する圧力による力が起振力である場合、対策対象となる部品がポンプの他の性能にも影響を及ぼすことがあるため、実験的アプローチのみでは対策案の検討や試作・評価に多大な時間を要する。このため、KYBでは実験的アプローチと並行して、製品単体での内部圧力解析¹⁾、流れ解析、構造解析（モーダル解析、周波数応答解析）等のシミュレーションを実施することで対策を行っている。また、実験結果との相関分析を行い、シミュレーションの精度を上げることで、対策品の計算検討を行うようにもしている。このようにシミュレーション技術は、対策案の検討時間の短縮や試作・評価数の削減ができるというメリットがあり、騒音問題解決を迅速に行うためには、重要な技術となっている。

最後に、製品単体において起振力の特定、対策を行った後、システムに製品を搭載し、騒音計測を実施する。しかしながら、現状の課題としてKYBでは自動車や建設機械などの母機の伝達特性や放射特性を詳細に把握できないことが多く、システム全体でのシミュレーション予測・対策が難しい。従って、製品単体予測とシステム全体評価による効果確認を繰り返し行う必要があり、対策に時間を費やす場合がある。

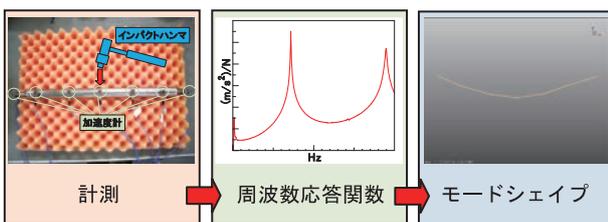


図3 実験モーダル解析の流れ

3 低騒音化事例

3.1 電動油圧ポンプモータの騒音低減

最初の事例として、電動油圧ポンプモータユニットの低騒音化について紹介する。本事例は、母機搭載時に電動油圧ポンプモータユニットの騒音レベル

が問題になった例である。電動油圧ポンプモータユニットは電動機、油圧ポンプモータ、減速機によって構成されており、概略図を図4に示す。

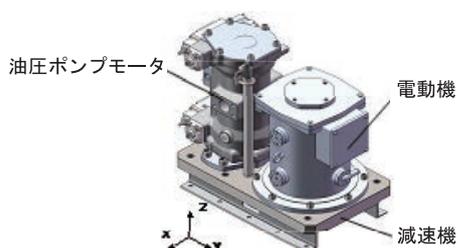
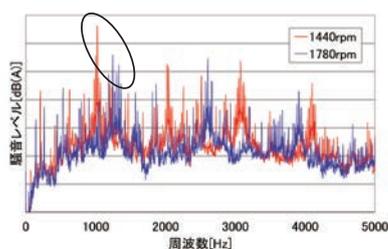


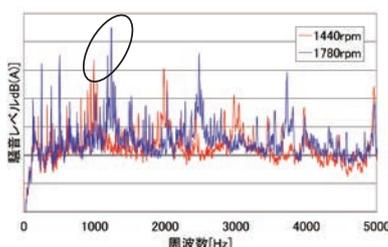
図4 電動油圧ポンプモータユニット

本事例では、最初に電動油圧ポンプモータユニットの騒音計測を行い、音の発生原因の推定を行った。

図5-Aにポンプ作用時の騒音FFT分析結果例を、図5-Bにモータ作用時の分析結果例を示す。



A: ポンプ作用



B: モータ作用

図5 騒音スペクトル

システムの騒音レベルは、(1)式で示す各周波数における音圧レベルを、A特性と呼ばれる人間の聴覚を考慮した周波数重み付け特性で補正し合算することで表すことができる。騒音レベルは突出した周波数成分に大きく寄与するため、この周波数成分を低減することで騒音レベルを下げるのが可能になる。図5より、ポンプ作用時、モータ作用時共に○部で囲った周波数成分が突出していることが確認できる。回転速度が異なる2つの波形(図中青線と赤線)を比較すると、油圧ポンプモータの回転速度の変化に伴い、この周波数成分も変動することが確認できた。

構造共振による騒音の場合、油圧ポンプモータの

回転速度に依存することはなく、一定の周波数が突出する形となるため、今回は構造共振が原因ではなく、(2)式で表される回転機械特有の周波数成分が原因であることが分かった。電動油圧ポンプモータユニットの場合、(2)式の z は、油圧ポンプモータのピストン本数や減速機の歯数、モータの極数やスロット数等が該当する。(2)式を用いて計算した結果、今回の突出した周波数は油圧ポンプモータのピストン本数と減速機の歯数による周波数成分に近いことから、騒音レベルの悪化要因は油圧ポンプモータ、若しくは減速機であることが推定できた。

$$L = 20 \log_{10} (P/P_0) \quad (1)$$

ここで、

- L : 音圧レベル [dB]
- P : 各周波数における音圧 [Pa]
- P_0 : 基準音圧 [$20\mu\text{Pa}$]

$$f = nzN/60 \quad (2)$$

ここで、

- f : 周波数 [Hz]
- n : 次数
- z : ピストン本数等
- N : 回転速度 [rpm]

次に騒音源特定のため、電動油圧ポンプモータユニットの音源探査を実施した。図6に電動油圧ポンプモータユニットの外観写真と突出した周波数(1.3kHz)における音源探査結果(コンタ図)を示す。

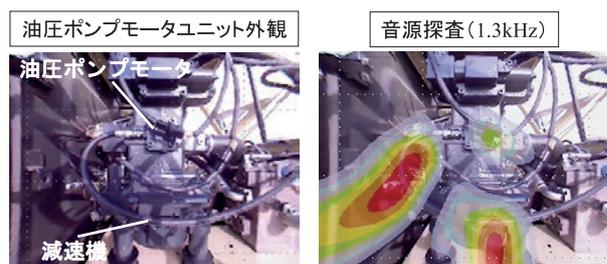


図6 音源探査結果 (1.3kHz)

コンタ図は色によって音の強弱を表しており、レベルが大きい箇所は赤色で示される。結果より、電動油圧ポンプモータユニットの左側壁面と下部が赤くなっている様子が確認できた。壁面の音については、壁面近傍に音源と成り得るものがないことから、油圧ポンプモータユニットからの放射音が壁面で反射され色濃く表示されていると推定できたため、騒音源ではないと判断した。一方、ユニット下部の音については減速機の位置に当たることから、減速機

からの放射音であると推測できた。以上のことから今回の騒音要因は油圧ポンプモータユニットの減速機であることが分かった。

次に減速機による騒音要因をより詳細に調査するため、実稼働モーダル解析を実施し、実稼働状態におけるモーダルパラメータを確認した。図7に解析モデルと加速度計の取付位置（図中の黄色点）を示す。

解析の結果、抽出した周波数は油圧ポンプモータの回転次数成分と減速機のかみ合い次数成分に一致し、これらのモードシェイプが実挙動に影響を与えることが分かった。この中で実挙動に寄与の大きいモードシェイプは1.3kHzにおける減速機のかみ合い次数成分であり、抽出された周波数の中で最も減衰し難い特性を持つことが分かった。同周波数における電動油圧ポンプモータユニットは図8に示すような挙動を示し、減速機プレートによる曲げ挙動に伴い、油圧ポンプモータと電動機が近接または離間することが分かった。この挙動は図9に示す減速機内に並列に設置されている3つの歯車の歯当たりが悪く、正確なトルク伝達を行うことができないことによって引き起こされていると推定されたため、歯車の歯当たり確認試験を行った。その結果、歯当たり不良が確認されたため、これが騒音要因と特定された。

一般的に歯車騒音に有効な対策としては、以下の2つが挙げられる。

- ①歯車のかみ合い率の向上
- ②支持剛性向上による歯当たりの改善

これらの対策を行うことでトルク伝達を行う歯の接触面積を確保することが可能となり、更にかみ合う時間を長くできるため、トルク変動が小さくなり騒音低減に繋がる。今回は対策として、対策案①の

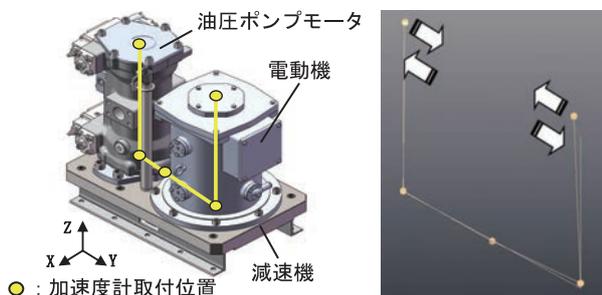


図7 解析モデルと加速度計取付位置

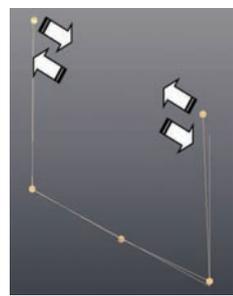


図8 モードシェイプ (1.3kHz)

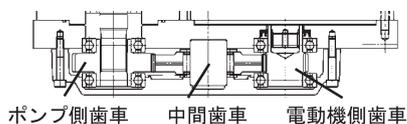


図9 減速機構造

歯形変更による歯車のかみ合い率の向上と対策案②の中間歯車の支持方法変更による歯当たり改善の両案を行った。図10に歯車軸受構造の変更点を、図11に対策後の騒音FFT分析結果（1780rpm）を示す。対策前と比較すると○部で囲った周波数成分（かみ合い次数成分）がポンプ作用時、モータ作用時共に大きく低減し、騒音レベルで約5dB(A)の低減効果があることが確認できた。

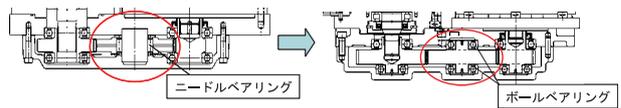
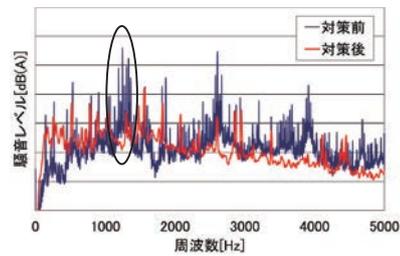
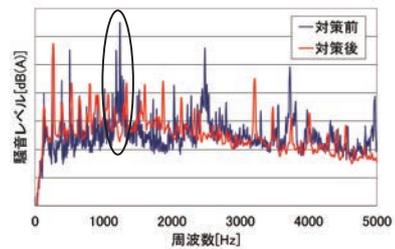


図10 歯当たり改善構造



A：ポンプ作用



B：モータ作用

図11 騒音スペクトル比較

3.2 電動パワーステアリングの異音低減

次に、電動パワーステアリング（以下EPS）における、ステアリング操作時の異音の原因推定を行った事例について紹介する。本事例は、実車のステアリング操作時の異音が問題となったものである。なお、異音周波数は事前の実車評価にて特定されており、この特定周波数に対して対策案の検討を行った。EPSの模式図と加速度計取付位置を図12に、モーダル解析用の解析モデルを図13に示す。

まずは異音がEPSの共振に起因するかを確認するため、実験モーダル解析を行った。実験モーダル解析では、EPS単体における共振周波数と車体取付時における共振周波数を確認した。得られた周波数応答関数を図14に示す。結果より、共振周波数では波形が突出する形になるが、異音周波数域において突出した波形がみられないことから、EPSの共振が異音の要因ではないことが分かった。

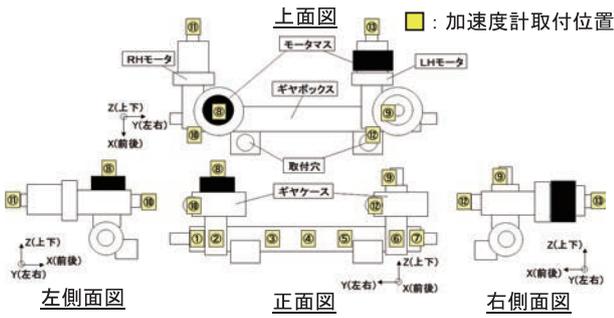


図12 EPS模式図

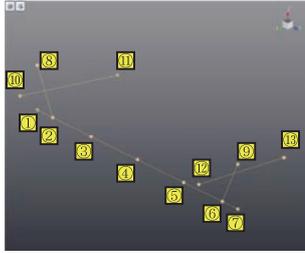


図13 EPS解析モデル

続いてステアリング単体操作時における実稼働モーダル解析を行った。図15に実稼働モーダル解析より得られた周波数応答関数を示す。解析の結果、異音周波数域で実験モーダル解析では確認されていない突出した波形をもつことが確認された。このモード周波数はモータ回転高次成分に極めて近い周波数であったことから、異音周波数域におけるモードシェイプはモータ回転成分に起因することが推定された。なお、図15の異音周波数領域にて抽出されたモードシェイプはRH, LHのギヤケースの動きが

大きく、Y方向の動きは同位相、Z方向の動きは逆位相であることが分かった(図16)。また、図17の加速度主成分分析結果では、抽出されたモードシェイプに対しての各部振動の寄与度を示しており、数値が高いほど寄与度が高いことを示す。結果として、異音周波数域におけるモードシェイプはRHモータギヤケース上端の左右方向(加速度No.8-y方向)の振動に大きく寄与することが分かった。

以上のことから、このモードシェイプを抑制することが異音低減につながると考えられたため、対策として、モータ質量を低減することやギヤボックスの剛性を上げることが有効であると推定された。よって、本対策では以下の2点を実施した。

- ①制振用モータマスの質量変更
- ②ギヤボックス上部への補強プレート取付

上記の2点の対策を施し、異音周波数域のモードシェイプに大きく寄与しているRHモータギヤケース上端左右振動の加速度レベルに着目して比較した結果を図18に示す。この結果より、両対策案とも異音周波数域において振動レベルは約3.5dB低減しており、同程度の改善効果が確認できた。なお、対策

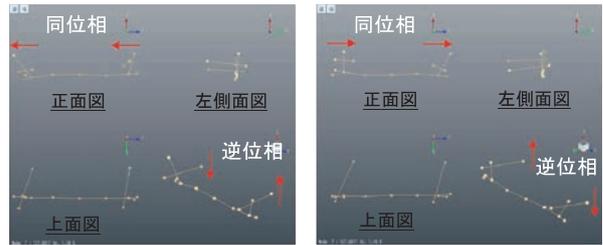


図16 モードシェイプ(異音周波数)

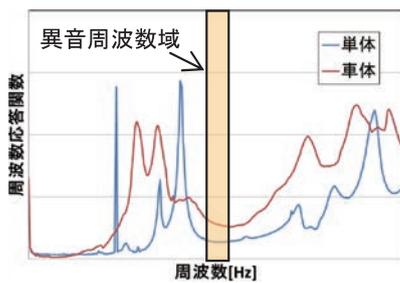


図14 周波数応答関数(実験モーダル解析)

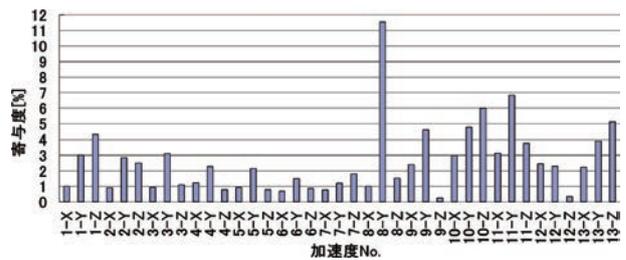


図17 加速度主成分分析結果

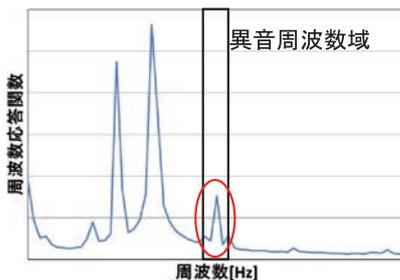


図15 周波数応答関数(実稼働モーダル解析)

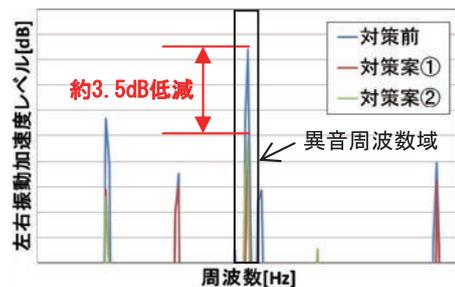


図18 振動加速度レベル比較

案①のモードシェイプは、RHモータの上下挙動が大きく、モータからギヤケースにかけての左右挙動が小さくなる傾向になることが確認された。また、対策案②では、RHモータからギヤケースにかけての上下左右の挙動が小さくなる傾向が確認された。

この他、本対策ではシミュレーションによるモード解析を用いて、対策効果の予測も行った。解析例を図19に示す。

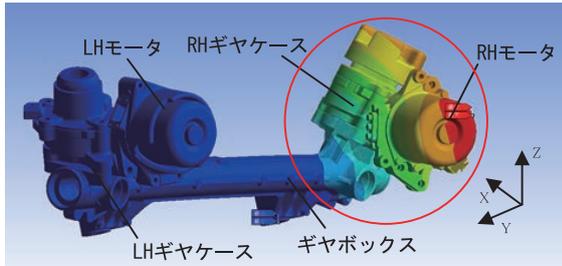


図19 モード解析結果例

○部で示される部分はモードシェイプにおいて動きのある部位であり、モード解析の結果より、RHギヤケースが振れやすい構造であることが実験結果と一致した。前記2つの対策を施すことで共振周波数が高くなることから、剛性が向上することが確認できた。

以上の結果を基に実車にて2案の効果を確認したところ、聴感評価にて異音は低減され、お客様からも異音が改善しているとの評価を頂いた。

4 今後の展望

図2でKYBにおける基本的な低騒音化の流れを示したが、近年の製品開発期間短縮の流れに乗るためには、より迅速に低騒音化を実施する必要がある。前述のように、現状の騒音対策で時間を費やしている部分は、KYB製品単体での対策とシステム全体評価とのループを数多く回さざるを得ないところにある。これは、KYB製品を搭載するシステム特性（伝達特性、放射特性）を我々が把握できていないことに問題があると考えられる。システム特性を母機メーカーから提示され、システム全体を構成しているメーカーが協力し合い、低騒音化を実施していくことが理想ではあるが、事実上困難であるため、別のアプローチが必要になる。

上記課題を解決し、更なる迅速な低騒音化を実現するためには、次の2つの技術が必要であると考えられる。

- ①システム振動伝達特性の把握技術（TPA）
- ②放射音予測技術

システムの伝達特性は、伝達経路間の寄与度を求めることができる伝達経路解析（TPA：Transfer Path Analysis⁶⁾を用いることで把握することができる。しかし、KYBではTPAに関して、過去に自社開発した計測システムが存在するが、システム全体の伝達経路を把握できるだけの多数の加速度計情報を入力できない等の課題があり、現在は有効に活用できていない。これが1つ目の課題である。

また、KYBでの騒音予測は、起振力予測による推定となっているのが現状であり、問題となる放射音を予測することは困難である。近年、市販の放射音予測ソフトも高精度化されてきていることから、KYBとしても放射音予測技術を確立することが急務であり、これが2つ目の課題である。

これら2つの技術を確立することができれば、騒音対策の流れは図20のようになる。

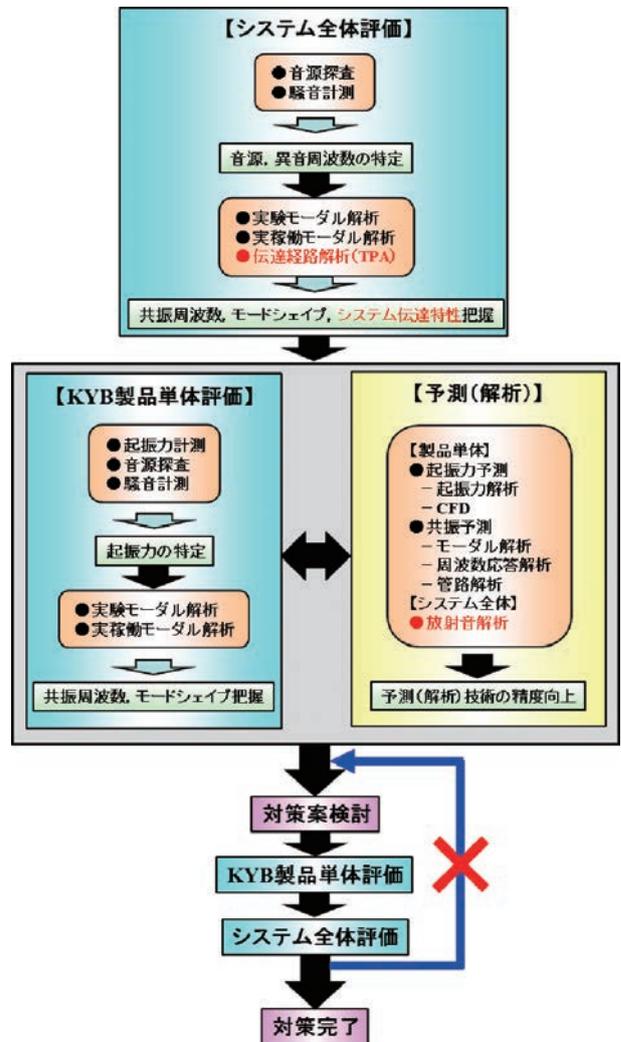


図20 騒音対策の流れ（今後の展望）

最初のステップであるシステム全体評価の際に、システム全体の振動伝達経路を明確にする。これにより、KYB製品単体の起振力予測やモーダル解析結果などを用いて、システム全体の振動伝達系の予測が可能になる。また、放射音予測技術を合わせることで、システム全体の騒音までが予測可能となるため、問題の周波数に対する対策を高精度に実施できるようになる。更にこの流れで騒音対策を実施すると、システム全体評価を最終評価の1回だけに削減することができるため、騒音問題の早期解決に繋げることも可能となる。その上、システム特性を把握することによって、そのシステムに合った新規製品の開発・提案にも繋げることも可能になるため、これらの2つの技術確立は今後の重要課題になると考える。

5 結言

本報ではKYBにおける低騒音化技術として、騒音発生メカニズムやKYBで行っている低騒音化のアプローチについて、事例を交えて解説した。

対策技術とは騒音問題が取り上げられた後で適用されるものであり、何よりも迅速な対応が求められ、

このための取り組みについては今後の展望として述べた通りである。将来的には、問題の発生を未然に防ぐことのできる低騒音化技術への発展を目指し、KYB製品の品質と付加価値の向上に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 伊藤, 矢加部: 車載用ポンプ性能向上のための解析技術, KYB技報, No. 40, pp 28-34, (2010)
- 2) Nagata, K., A Simulation Technique for Pressure Fluctuation in a Vane Pump, 8th Bath International Fluid Power Workshop, (1995)
- 3) 永田: カムリングの変形を考慮したベーンポンプの内部圧力シミュレーション, 油圧と空気圧, 26巻, 6号, pp 163-169, (1995)
- 4) 野口, 矢加部: 車載用ベーンポンプ低騒音化技術, 油空圧技術, vol. 49, No. 12, pp 48-52, (2010)
- 5) 飯田一嘉, 大橋心耳, 岡田健, 麦倉喬次: 実用騒音・振動制御ハンドブック, エヌ・ティー・エス, (2000)
- 6) Peter Akos Gajdatsy: 伝達経路解析の基礎から応用, エルエムエスジャパン, (2012)
- 7) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, (1993)

著者



矢加部 新司

1995年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室主幹研究員。振動騒音関連業務ならびに油圧機器の研究開発に従事。



鈴木 一成

2008年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。振動騒音関連業務ならびに油圧機器の研究開発に従事。