

実稼動振動可視化技術の構築

青柳大志・狩野幹大*・新井宏章**

Development of operational deflection shape visualization method.

Hiroshi AOYAGI, Motohiro KANO, Hiroaki ARAI

内部に加振源をもつ機械や構造物の振動状態は、動特性だけでなく運転中の加振特性にも依存する。振動や騒音、さらには破損に至ったとき、どのような振動状態で運転していたのかを把握することによって問題点を特定し、改善につなげることが期待できることから実稼動振動技術の構築を行った。

キーワード：実稼動モード解析

Vibration state of industrial machines such as prime movers depends on not only dynamic characteristics but also exciting properties. We developed operational deflection shape (ODS) visualization method to identify causes of vibration, noise and failure.

Keywords : operational deflection shape, operational mode analysis(OMA), vibration

1 はじめに

群馬産業技術センターでは従来から機械や構造物の振動試験を行っている。振動台に対象物を設置し、規格等に応じて実使用環境での振動状態をシミュレートすることで耐久性を評価することができる。振動試験の対象はこのように、外部からの加振によって評価することが妥当なものが前提である。

一方、エンジンやモータなどの原動機、タービンなどの回転部をもつ機械のように、外部から加振されるのではなく内部に加振源をもつ製品もある。運転状態において自身の加振力による振動や騒音の発生だけでなく、繰り返し荷重による破損が生じる場合もある。基本的な振動特性は対象物の動特性に依存する。動特性とは固有振動数、固有モード（モード：振動形状）、モード減衰比の3つである。特に加振振動数が固有振動数に一致し、振動が増幅される状態を共振と呼び、平成29年度の試験分析高度化研究で予測技術構築を行った¹⁾。外部/内部から加振される場合ともに、事前に固有振

動数や固有モードを把握し対策を打つことで諸々の問題を未然に防止することができる。ただし、動特性はあくまで対象物が持つ固有の性質であり、加振特性は考慮していない。実際の運転状態で生じる振動は加振力の周波数特性にも依存する。そこで本テーマでは、運転状態でどのような振動をしているのかを可視化する（実稼動振動可視化）手法の構築を行った。可視化によって振動問題がどのように生じているか理解が容易になるだけでなく、改善案の導出が期待できる。

2 手法

実稼動振動を分析する手法を一般に実稼動モード解析と呼ぶ。これはいわゆる打撃試験により行う実験モード解析に対する対比としての呼称と思われる。両者の違いは、実験モード解析がインパルスハンマで励起する加振力と、加振に対する加速度応答を加速度ピックアップで測定するのに対し、実稼動モード解析ではすべて加速度ピックアップによる加速度応答のみで行う点であ

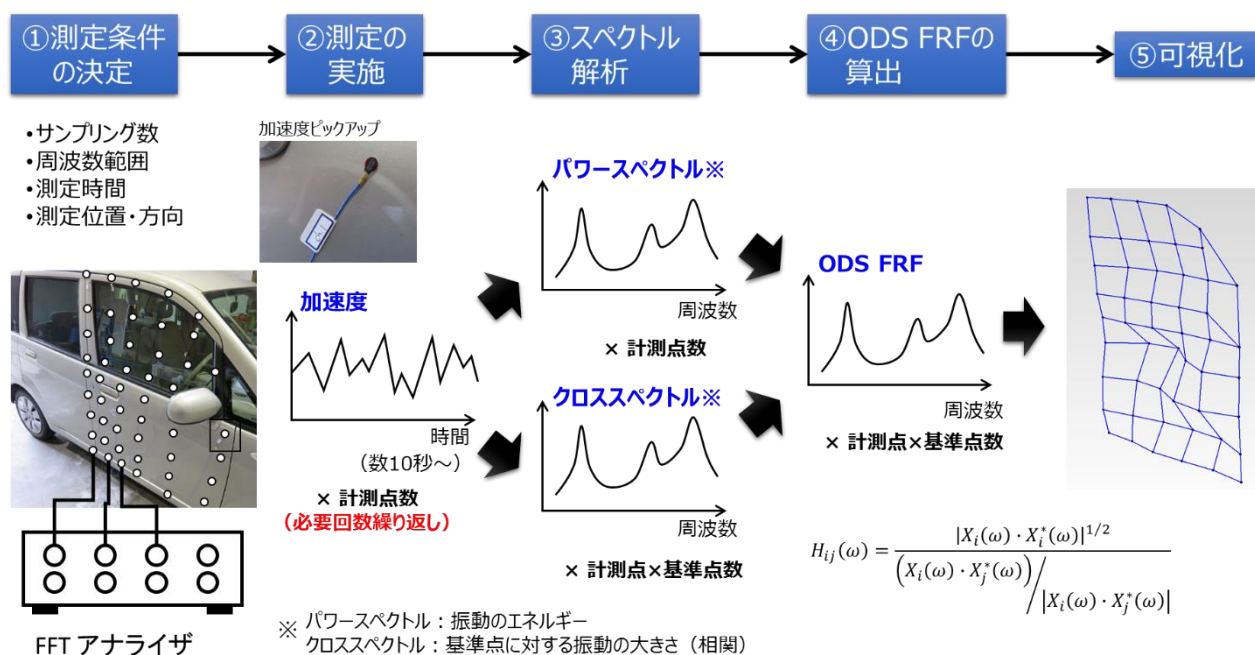


図1 実稼動モード解析の流れ

る。前者は加振力 (F) と加速度応答 (A) から周波数応答関数 (A/F) を求め、固有振動数を同定することができるが、実稼動モード解析では加速度のみ測定するため周波数応答関数を求めることができない。そこで、加振力に代わるものとして基準点の加速度応答を使用する。そのため、基準点の加速度を加振力に相当するものと見なせるよう機械の加振源に近い箇所に設置することが多い。例えば扇風機であればモータが加振源であるので、モータの表面や近くに基準点を設けることが好ましい。応答点については対象物に万遍なく分布させることで実稼動モードの可視化分解能を確保することができる。基準点と応答点の比を取ることによって擬似的な周波数応答関数（一般に伝達率と呼ばれる）を計算することができるが、加振力が大きければ応答点の応答も大きいことが多いため、共振点でフラットな特性になってしまう。そこで次式で定義される実稼動周波数応答関数 (ODS FRF) を用いて評価することとした²⁾。

$$H_{ij}(\omega) = \frac{|X_i(\omega) \cdot X_i^*(\omega)|^{1/2}}{(X_i(\omega) \cdot X_j^*(\omega)) / |X_i(\omega) \cdot X_j^*(\omega)|}$$

ここで X_i は応答点、 X_j は基準点のフーリエスペクトル、 ω は角周波数を表す。すな

わち ODS FRF は振幅を各点のパワースペクトル (分子の 2 乗)、位相を基準点と応答点のクロススペクトルとする関数である (分母はクロススペクトルの大きさを 1 に正規化している)。基準点との比を取らないため、伝達率とは異なり共振点の把握に適している。

3 実稼動モードの可視化

実稼動モードの可視化手順を図 1 に示し、以下にそれぞれの詳細を述べる。

①測定条件の決定

主な項目はサンプリング数、周波数範囲、測定時間、基準点及び応答点の配置、測定方向である。解析の目的に応じてそれぞれ設定するが、事前の実験モード解析やモーダル解析 (CAE) を行うことでより適切に設定することができる。測定時間については③スペクトル解析で詳細を述べるが、ノイズ低減のため数十秒以上とすることが望ましい。

②測定の実施

対象物に加速度ピックアップを取り付けた後、対象の機械を定常運転させた状態で加速度の時間データを取得する。応答点の数は数十点以上となることが多い一方で、計測器 (FFT アナライザ等) のチャンネル数

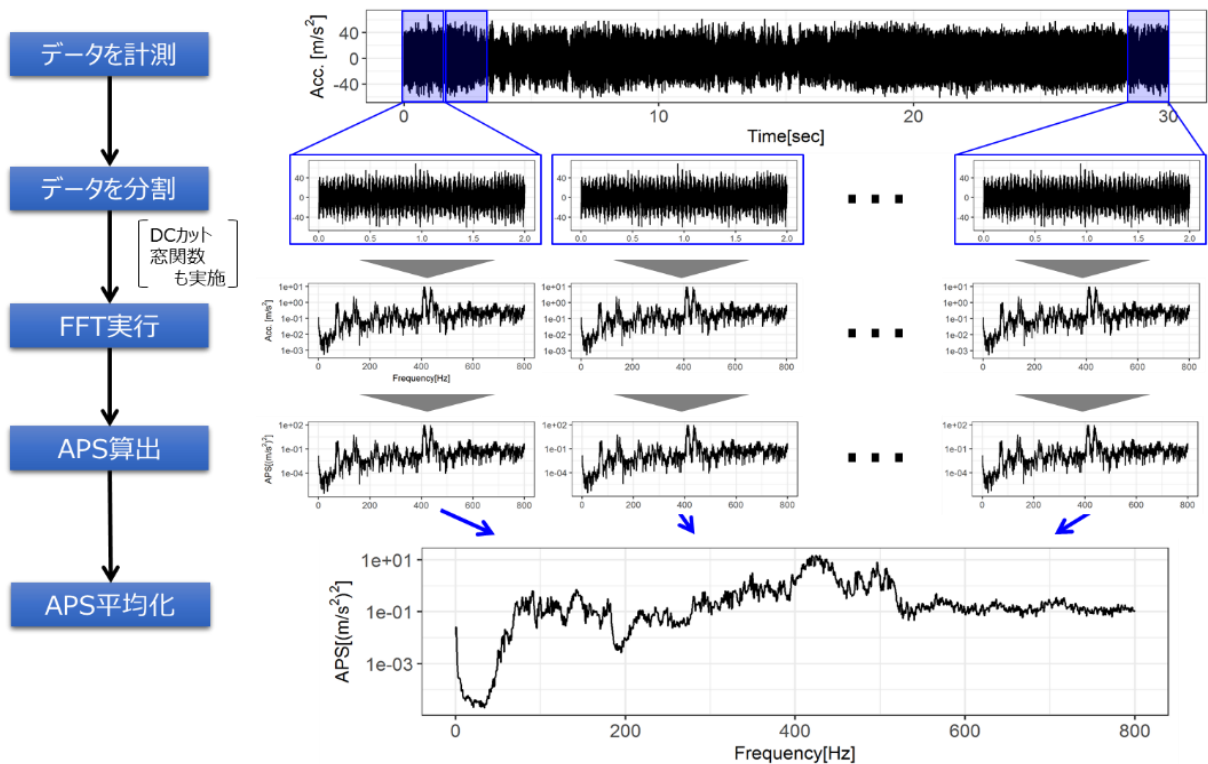


図2 スペクトル解析の流れ (APS : パワースペクトルの例)

は限られているため、回数を分けて測定することが多い。各回の測定結果は本来独立なものであるが、基準点の応答を毎回測定し、④の ODS FRF 算出で測定回ごとの差をスケールリングすることにより同等のデータとして扱うことができる。

③ スペクトル解析

ODS FRF を算出するためには全応答点のパワースペクトルと基準点に対するクロススペクトルが必要である。スペクトル解析の流れを図2に示す。ノイズを極力低減して信号成分を際立たせるため、計測時間を長めに設定して測定した後（例えば30秒とする）、分析周波数とサンプリング数で決まる分析時間ごとに分割する。例えば周波数領域を0~2000Hz、サンプリング数を2048点とすれば、計測時間は0.4秒となる。30秒を0.4秒ごとに分割すると $30 / 0.4 = 75$ 個のデータセットが得られる（ここでは詳細を省くが、オーバーラップすることでさらにデータセット数を増やせる）。各データセットに対してFFTをかけた後、パワースペクトル、クロススペクトルを算出すると、それぞれ75セットのスペクトルデータが得られ

る。これらを平均化することによりノイズ成分を低減したスペクトルが得られる。

④ ODS FRF の算出

③で求めたパワースペクトル、クロススペクトルから ODS FRF を求めることができるが、測定回ごとの加振力の差が生じるため、スケールリングを行う（振幅を基準点応答の平均値で正規化する）。

⑤ 可視化

ODS FRF を各応答点で求めた後、ワイヤフレームモデルに振幅と位相をマッピングすることにより、各点の振動を3次的に可視化する。

本テーマでは小野測器製 FFT アナライザ (DS-3000) 及び加速度ピックアップ (NP シリーズ) を用いて測定②を行った。③~⑤については当初 ME' ScopeVES³⁾で行うことを検討した。しかしデータ点数の増加とともに③のスペクトル解析の手順が煩雑となり、時間を要するだけでなく手順を間違えやすいため、プログラミング言語 R⁴⁾を使用して作業を効率化した。その結果、正確にスペクトル解析を行えるだけでなく工数を 1/30~に減らすことができた。また窓関数等の信

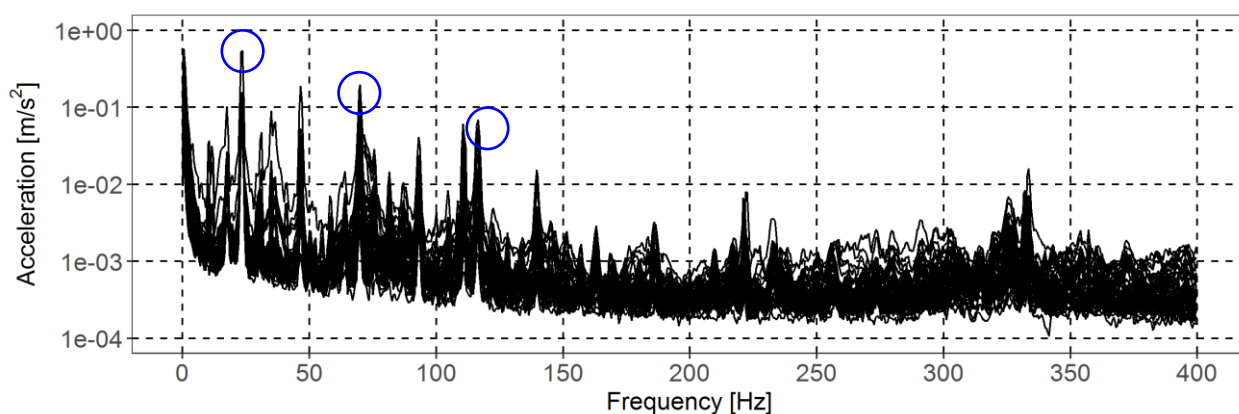


図3 軽自動車ドアの ODS FRF 測定結果（全点の結果を重ね合わせ。○は図6に対応）

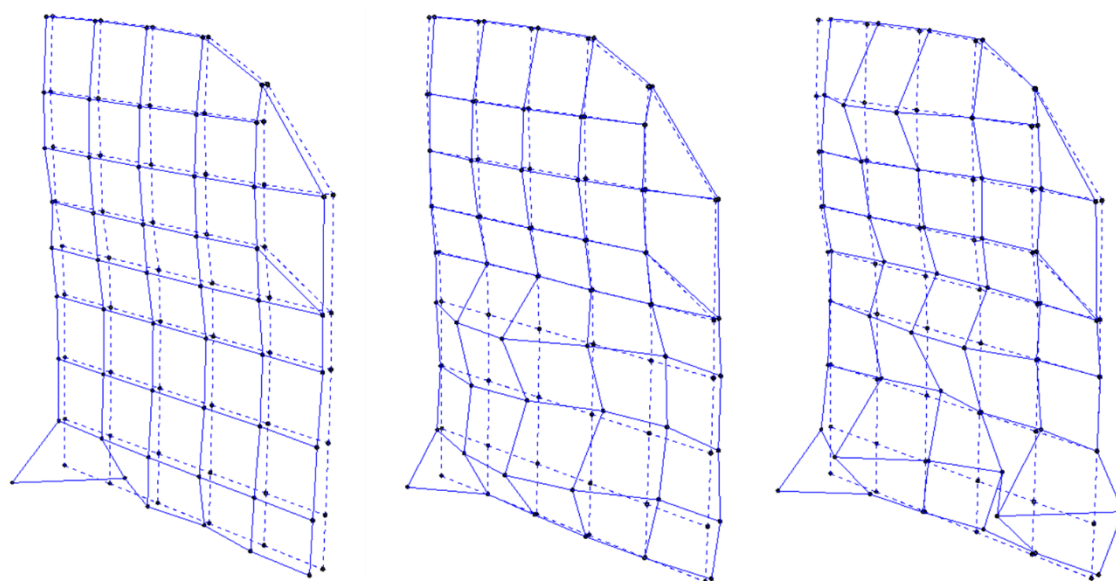


図4 軽自動車ドアの可視化結果（左から 23, 70, 116.5 Hz）

号処理を自由の実装できる点もプログラミングの利点である。このような工夫により、「その場、そのときに可視化したい」という企業ニーズに対応でき、効率良く実稼動解析を行うことができる。

4 事例

まず手法の検証のため振動試験機に設置した梁の振動の可視化を行った後、さまざまな対象を想定してサーキュレータ、ドローン、軽自動車のドアの可視化を行った。ここでは紙面の都合上、自動車の事例について取り上げる。図1に示す全51点について、1回当たり6点の加速度を測定し、10回に分けて各回30秒間測定した。サンプリング数は2048点、オーバーラップ率を50%

とすると、平均回数は29回となる。ドアの振動は面外方向が支配的と考えられることから単軸ピックアップにて測定した。十分に暖機後のアイドリング状態を定常運転と見なした。ドアの振動はエンジン振動によると考えられることから、最もエンジンに近いドアミラー下部を基準点とした。ODS FRFを図3に示す。150Hz以下で約24Hz間隔のピークが見とめられ、アイドリング回転数とその整数倍のピークと思われる。図4はODS FRFをワイヤフレームにマッピングし可視化した結果の例である。23Hzではドア左下の1点のみ振幅が目立つが、ドア裏側に支持部が無く剛性が相対的に低い箇所に対応している。周波数が高くなるとドア鋼板(70Hz)、さらにガラス窓(116.5Hz)の振動モードが目立つようになることが分

かる。このように、各周波数で振動の腹と節を確認することにより、機械の問題箇所の特特定や、改善案を考えるヒントを得ることができる。このほかにも県内企業の課題にも適用を開始しており、振動問題の技術支援に積極的に活用していく予定である。

参考文献

- 1) 青柳，群馬県立産業技術センター研究報告 平成 29 年度，「共振点予測技術の構築」(2017)。
- 2) ME' scope VES チュートリアル編(2017)。
- 3) <https://www.vibetech.com/mescope/>
- 4) <https://www.r-project.org/>