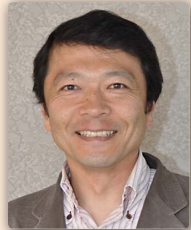


# 音と振動の世界



吉村 卓也

Takuya Yoshimura

首都大学東京 理工学研究科  
機械工学専攻 教授

【専門分野】振動工学, 機械力学

音と振動は密接な関係にあり、物体が振動することにより音が発生し、また音が物体に伝わることにより振動が発生します。このように一方が他方を励起し、互いにエネルギーのやり取りをすることを「連成」と言います。この連成には、さまざまな度合や程度があり、両者の関係を調べることは、現象を把握するために欠かせません。例えば、機械の低騒音化を考えるときに、この連成のメカニズムを理解しておくことは大変重要です。本稿では、箱型構造の振動と内部空間の音の連成を取り上げ、連成をとらえる方法と騒音低減の取り組みの考え方を紹介します。

## 音と振動の相互関係

一般に、物体が振動すると音を発生します。これは、物体表面が振動することにより空気の粒子がある方向に速度を持って運動し、これが粗密波となって空間を伝わり「音」となるからです。このように振動は音の原因となる外乱であり、振動による空間の排除体積を外力と見なすことができます。

一方、振動の原因は物体に作用する力です。音による粒子の振動は圧力変化(音圧)となって伝播するため、物

体表面には音圧による加振力が作用します。すなわち、音は振動の原因にも成りうるわけです。

## 音と振動の連成特性

構造物や閉じられた音響空間(閉空間)は、それぞれの特性として固有振動数や固有振動モード(※参照)といった固有特性を持ちますが、音と振動が連成する場合には、どのような特性を

示すでしょうか？

図1のようなモデルを考えてみます。これは、5つの面が剛な硬い壁に囲まれており、一面だけが比較的柔らかい弾性パネルに接している直方体の閉空間です。このとき、パネルと空間は連成特性を示します。すなわち、閉空間はそれ自体で共鳴特性を持ち、構造物はそれ自体で共振特性を持っていますが、このモデルでは、それぞれが相互

### ※ 固有振動数, 固有振動モード

構造物は、特定の周波数の外力に対して共振し、大きな振動応答を示します。この周波数を共振周波数もしくは固有振動数と呼び、その時の振動形態を固有振動モードと言います。また、閉空間にも構造と同じように共鳴周波数があり、特定の周波数の音が伝わり、音が大きく成長します。すなわち、閉空間にも同じように固有振動数、固有振動モードが存在します。これらを総称して、固有特性と呼んでいます。

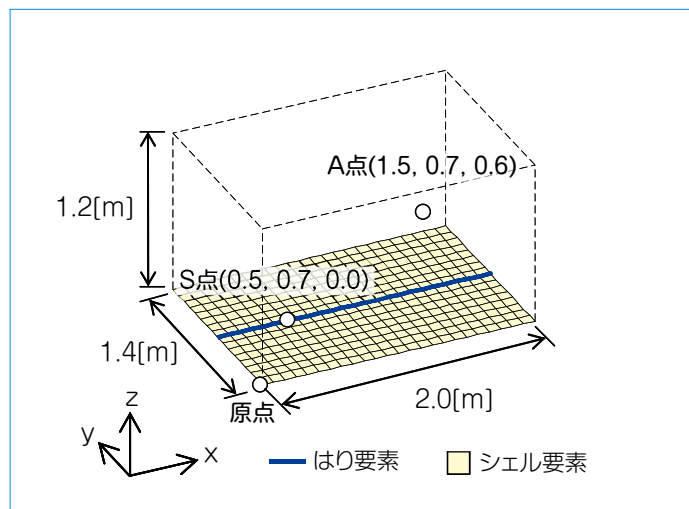


図1 剛壁とパネルで囲まれた空間モデル

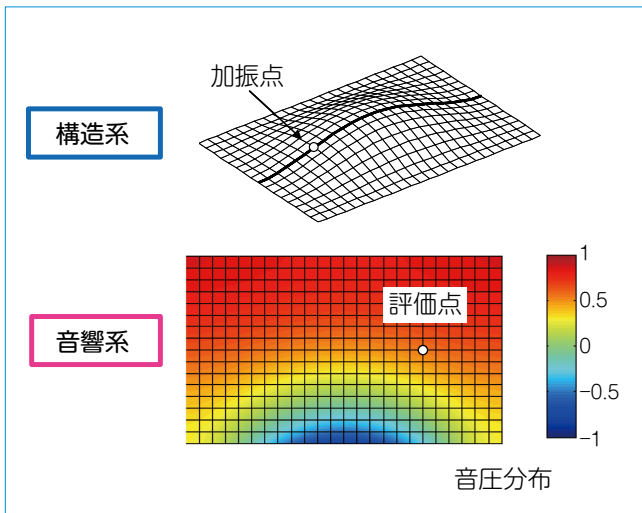


図2 構造主体の連成固有モード (73.4Hz)

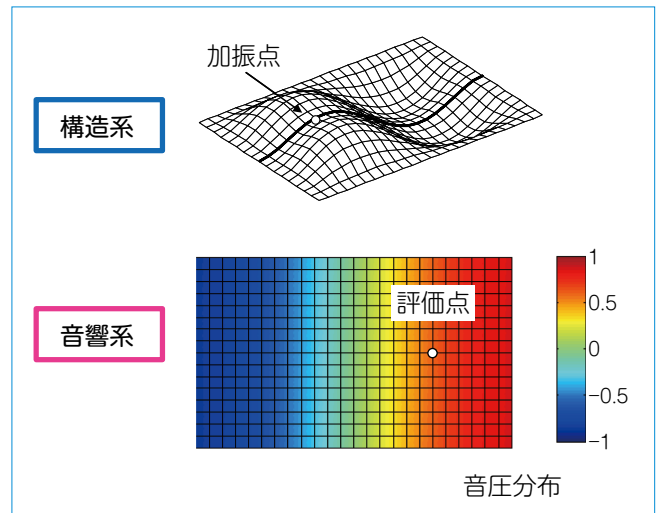


図3 音響主体の連成固有モード (85.8Hz)

に影響を与えながら固有の特性を示します。

図2, 3にその例を示します。図2は共振周波数におけるパネルの振動とそれに伴う空間の音圧分布を示しており、パネルの振動によって空間に音が放射されている様子が分かります(下図は空間の中心を通る鉛直(X-Z)断面における音圧分布を示します)。

次に図3は、空間の共鳴を示す周波数付近における空間の音圧分布とそれに伴う振動モードを示しています。音圧分布をみると中央部に音圧の変化しない節が存在し、左右に対称な音圧分布になっています。ここでは、共鳴による音圧変化に伴ってパネルの振動が励起されていることが分かります。

このように連成系では、構造もしくは音響が主体となりながら系全体としての特性を示します。この関係は、厳密には車両とその室内の間にも成り立っており、車室内の音は空間の共鳴と車両の共振によるそれぞれの固有振動数の影響を受けています。

### 低騒音化

それではここで、空間内の騒音を低減する方法を考えてみましょう<sup>1)</sup>。例えば、図1に示したパネル中心線上の

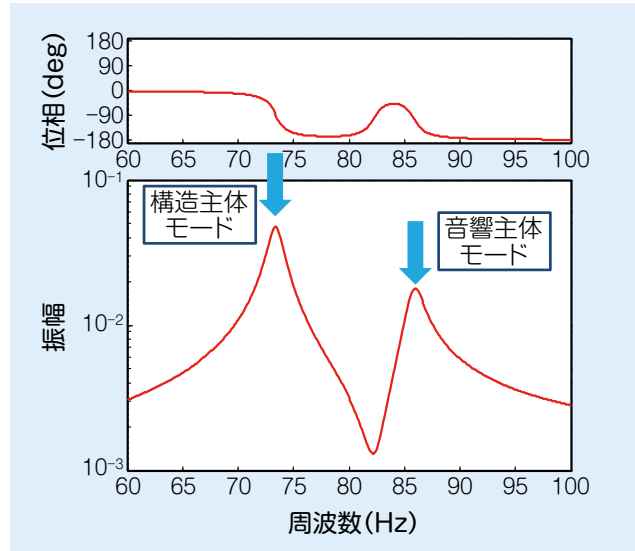


図4 構造-音響連成系における周波数応答関数の例

点Sを加振点とし、点Aを騒音評価点とします。この時の周波数応答関数(参照)を図4に示します。これは加振点Sを単位力で加振した時に、どのように評価点Aで音が発生するかを示しています。ここで、例えば73Hz付近はパネルの共振が主体となるピーク(構造主体モード)、86Hz付近は共

鳴が主体となるピーク(音響主体モード)であることが図2, 3の固有モードの分析結果から理解されます。騒音を低減するには、具体的にはこのようなピークの振幅を小さくすることが有効です。

評価点の音を低減するためには、次のいずれかの方法を考えることにな

#### 周波数応答関数

対象物を加振したとき、加振力と応答の比を加振する周波数の関数として示したものを周波数応答関数(Frequency Response Function: 通称FRF)といいます。応答量は振動の場合は加速度を計測し、音響の場合は音圧を計測すれば、加速度/力、もしくは音圧/力の特性を得ることができます。

ります。[1]パネルの振動を小さくする。[2]パネルの振動が音として伝わりにくくする。[3]パネルから放射された音が評価点に伝わりにくくする。(表1参照)

ここで[1]は、パネル自体の振動を小さくすることで達成でき、正攻法といえる方法です。通常はこの方法でまず対策をして騒音を小さくしますが、振動をゼロにすることは現実には不可能なので、これだけでは不十分な場合も多いと言えます。これは構造特性の改善です。

次に、[3]は空間の形状や特性を変えることを必要とし、車両では大きな変更は困難ですが、吸音材などによって音を減衰させる対策が可能です。これは音響特性の改善と言えます。

最後に[2]ですが、音になりやすい振動を抑制するという方法で、これは振動成分に着目した対策となります。この過程で対策を誤ると、振動は下げたのに、音は小さくならないという事態が生じます。これが連成特性の改善であり、騒音対策の中でも難しい重要な技術と言えます。

パネル共振による固有振動数(73.5Hz)においては、[1]の構造対策が主な対策となりますが、共鳴による固有振動数(85.8Hz)では、[2]の連成特性の対策が重要となります。

### 音響主体モードの構造対策

このように騒音対策では、共鳴に基

#### 音響加振

スピーカーを用いて音で加振することにより、周波数応答関数を計測することが可能です。応答量は、構造の加速度、もしくは音響の音圧を計測することにより、加速度/体積加速度もしくは、音圧/体積加速度の特性を得ることができます。

表1 構造-音響連成系における騒音低減方法

- |                     |           |
|---------------------|-----------|
| 1. 構造の振動を小さくする      | 【構造特性の改善】 |
| 2. 振動が音として伝わりにくくする  | 【連成特性の改善】 |
| 3. 放射音が受音点に伝わりにくくする | 【音響特性の改善】 |

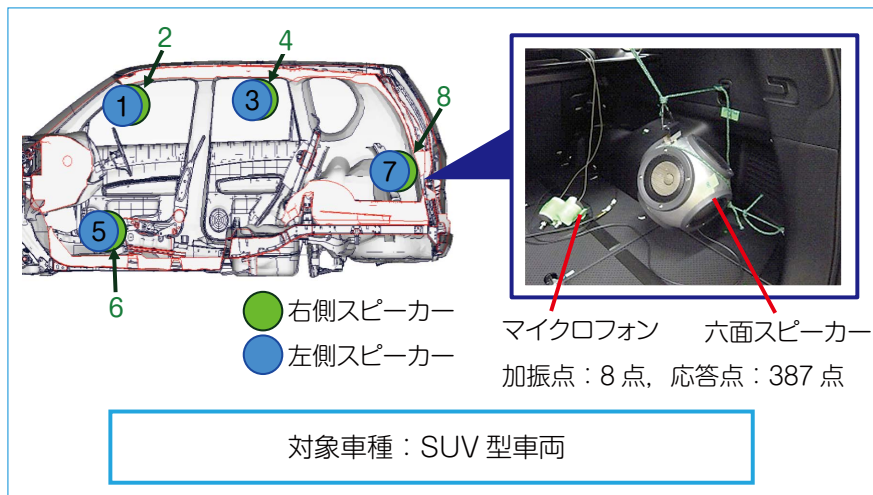


図5 スピーカーを用いた音響周波数応答関数の測定

づく連成の固有モードを正しく把握し、それに基づいた対策が重要となります。

この方法として、音響加振(参照)が利用されています。すなわち、音響加振点にスピーカーを設置し、音により加振して周波数応答関数を計測します。ここで空間内部の音圧を計測すれば、音響モードを知ることができ、同時に構造の応答を計測すれば、この音響モードに連成する構造モードを知ることができます。

例えば、図3に示す音響主体の固有モードに対する騒音対策を考えると、音響加振による振動応答から、図3の構造モードを知ることができるので、この構造振動を低減する構造対策が、騒音低減には有効であることが分かっています<sup>2)</sup>。

#### 音響加振実験

自動車の車両開発段階においては、車室内騒音を精度良く予測する必要が

あり、そのモデル検証のためにも車室内の音響特性を詳細に把握する必要があります。以下に、SUV型乗用車を対象にした音響主体モードの同定例を示します<sup>3)</sup>。

図5は音響加振用スピーカーと車室内のスピーカー設置位置を示しています。スピーカーを車室内8ヶ所に設置し、車室内の境界部付近の周波数応答関数を多点で測定します。この周波数応答関数は図6に示すようなもので、減衰が大きいため明確なピークはなく、固有モードを精度良く抽出するのは難しいと言えます。200Hzまでの周波数範囲には、構造主体モードが少なくとも数百個あるのに対して、音響主体モードはせいぜい20個程度存在すると言われています。したがって、ここでの固有モードは音響主体モードに絞って観察、同定することが重要です。そのために、音圧の周波数応答関数だけを用いて応答曲線をカーブフィット

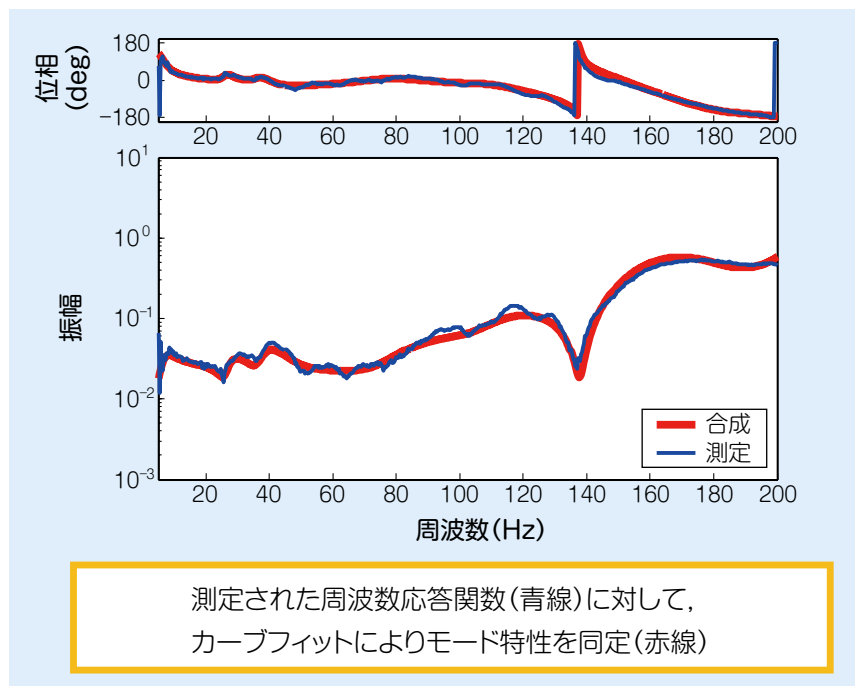


図6 測定された音響系周波数応答関数の例

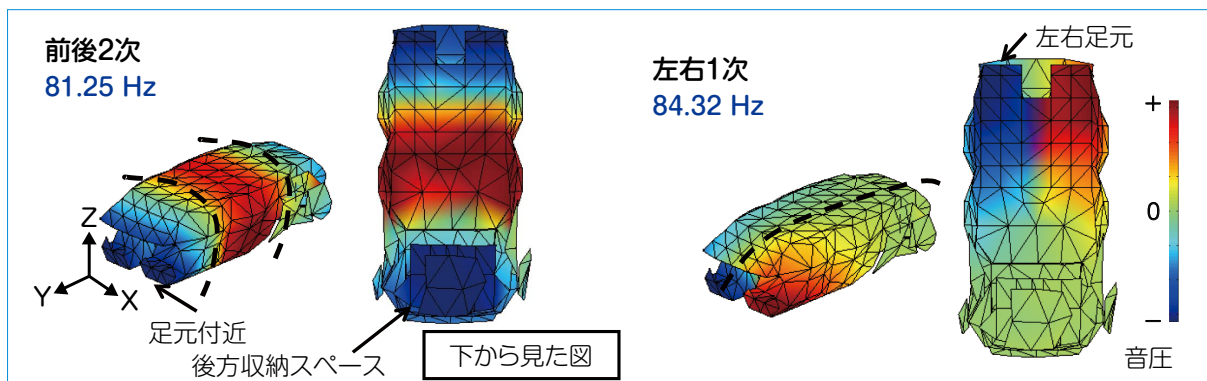


図7 実験により同定された音響主体モードの例(ボディ表面付近の音圧分布)

することにより、音響主体のモード特性を同定します。

### 抽出された音響主体モード

図7には車両内部の音圧分布で表した音響主体モードを示します。これらを見ると、車両の前後方向や左右方向にさまざまな共鳴が起きていることが分かります。このような音圧分布を正確に把握することが、車両内部の騒音レベルの正確な予測やその対策につながります。

### おわりに

本稿では箱型の構造物を対象として、音と振動がどのように連成しているかについて説明し、騒音対策のために求められている技術を紹介しました。

実構造物における振動騒音対策には、これらの知見が欠かせませんが、まだまだ解き明かすべき課題が多く残されています。音と振動の現象を解き明かし、その特性を踏まえた先進的な構造設計につなげることができるよう、少しでもお役に立てればと思っています。**RRR**

### 文献

- 1) 古屋耕平, 吉村卓也, 須藤晶, 成國星哉: 振動音響連成系の音圧最小化問題に対する最適性の考察とそれに基づく構造最適化, 日本機械学会論文集(C編), 72-14, pp.3767-3774, 2006
- 2) 丸山新一, 呉小山, 山本崇史: 構造・音響連成モードの実験法および計算との比較, 自動車技術会, 2006秋季講演会前刷集, 95-6, 63-2006564, pp.1-6, 2006
- 3) 吉村卓也, 丸山新一, 伊庭周作: 車室内音場を対象とした多入力音響加振実験とモード解析, 自動車技術会, 2012春季大会学術講演会前刷集, No.45-12, pp.19-23, 2012