

# 自動車車室内騒音のヘルムホルツ共鳴器を用いた低減に関する解析

小机 わかえ<sup>1</sup>・角内 洋<sup>2</sup>・萩原 一郎<sup>3</sup>・宮地 秀征<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 機械工学科 (kozukue@me.kanagawa-it.ac.jp)

<sup>2</sup> 三菱電機

<sup>3</sup> 東京工業大学理工学研究科機械物理専攻(hagiwara@mech.titech.ac.jp)

<sup>4</sup> 機械工学科 (miyaji@me.kanagawa-it.ac.jp)

## Reduction Analysis of Vehicle Interior Noise Using Helmholtz Resonator

Wakae Kozukue<sup>1</sup>, Hiroshi Kakuuchi<sup>2</sup>, Ichiro Hagiwara<sup>3</sup>, Hideyuki Miyaji<sup>4</sup>

### Abstract

Reduction analysis of noise such as “booming noise” of a vehicle cabin by Helmholtz resonator is carried out by using the Finite Element Method (FEM). As the frequency response of the sound pressure at a passenger’s ear position is calculated for the case without a resonator and with a resonator it is shown that the peak at the second resonance frequency of the cabin is split and quite reduced. From the fact that the noise reduction is changed by tuning the length of the throat of a resonator it is proposed that a Origami structure is appropriate for a resonator. Finally it is suggested by the analysis that the large reduction is realized by attaching two resonators to the proper position of a cabin.

Key Words: Helmholtz Resonator FEM, Vehicle Interior Noise, Origami structure

### 1. はじめに

自動車や航空機、電車など居住空間を持つ機械構造物では、しばしばその内部騒音が重要な問題となる。なぜなら内部騒音は人間の精神、肉体に大きなストレスを与えるものであり、その機械構造物の商品性に大きく関わってくるからである。自動車車室内の騒音は通常、こもり音あるいはロードノイズとよばれ、300 Hz 程度までの周波数領域で発生する。車室内騒音の特徴は、エンジンや道路凹凸からの加振があり、サスペンションや車体を構成するパネルなどがそれぞれ共振周波数を持ち、車室内の空気とそれを取り囲むパネルが振動系を形成し、それらが互いに影響を及ぼしあって構造と音場の連成問題となることである。今日では吸音材料の性能が良くなっており、比較的高周波の騒音は低減させることができる。しかし、低周波域においては音の波長が吸音材料の厚さにくらべて長いため、吸音材の効果は小さい。車体を構成する要素の共振周波数で共振させないように工夫がなされているが、それでもなお車室内空気のもつ共鳴周波数域で大きな騒音が発生する。そこでこれらを低減させたいという要求がある。

本研究の一つ目の目的はヘルムホルツ共鳴器を用いて車室内騒音を低減させることである。そのためにヘルムホルツ共鳴器の「単一の周波数の音に鋭く反応する」と

いう特徴を利用する。また二つ目の目的は、共鳴器の共鳴周波数を可変とし、それを制御するために、折り紙構造を用いることができるかどうかを検証することである。三つ目の目的は、車室内の音圧レベルを下げるだけでなく、音質にも着目してより快適な車室内騒音を共鳴器により実現することである。

### 1. 基礎となる現象と理論

#### 2.1 こもり音

車室内で発生するこもり音は、エンジンや走行による地面からの振動など、車体に加振されることでおこる強制振動であり、その強制力による車室内空気の共鳴現象である。従って、これらの外力が存在する限り、こもり音をなくすことはきわめて困難である。一般にこもり音は 50Hz から 200Hz の比較的低い周波数帯で問題になることが多く、その共鳴周波数は車室寸法と車室形状によって決まる。

#### 2.2 ヘルムホルツ共鳴器

ヘルムホルツ共鳴器は小部屋 (chamber) と喉部 (throat) からなり、内部の空気が振動系をつくる。これを騒音低減の対象とする主室に喉部で結合する。共鳴器の空気振動系は主室の空気振動系に対し動吸振器と同じ

ような作用をする。したがって、ヘルムホルツ共鳴器を効果的に使うためには、共鳴器の共鳴周波数を目的の共鳴周波数に合わせて調整する必要がある。その共鳴周波数は、古くから空気振動系をバネ質点系としてモデル化することで導かれる<sup>(1)</sup>。

図 1 に示すように共鳴器の各寸法をとる。ここで、喉部にある空気が質点、小部屋部分の空気はバネとして働くものと仮定する。空気の密度を  $\rho$  とし、喉部の質量を  $m$  と置くと

$$m = \rho S l \quad (1)$$

喉部空気が図 1 の  $x$  方向に  $\Delta x$  変位したとき、小部屋部分の空気体積は  $V \rightarrow V + \Delta V$  に変化する ( $\Delta V = S \Delta x$ )。断熱変化を仮定すると喉部にかかる圧力は大気圧を  $P_0$ 、比熱比を  $\gamma$  として

$$\Delta P = \gamma \frac{P_0}{V} \Delta V = \gamma \frac{P_0 S}{V} \Delta x \quad (2)$$

となる。喉部の空気にかかる復元力は  $\Delta P \cdot S$  であることに注意して、これから 1 自由度バネ質点系の固有振動数が求まる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma P_0 S}{\rho V l}} \quad (3)$$

となる。ここで  $\sqrt{\gamma P_0 / \rho}$  は大気中の音速であるから、

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}} \quad (4)$$

しかし、この算出公式は、実際に作られた共鳴器の共鳴振動数とは一致しない。なぜなら、喉部の主室側出口、小部屋側出口の両方に存在する空気の影響を受けるからである。従来では、ここに開口端補正として、 $l$  に実験から求めた補正值  $\Delta l$  を加えて用いていた。ここで、共鳴器の共鳴周波数を計算から直接求めるためには連続体力学的扱いが必要になってくる。連続体力学的扱いをすることによって、開口端補正の量を求めることができる。そのために、本研究では有限要素法を用いる。

### 2.3 ヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数のチューニング

共鳴器の共鳴周波数を指定した周波数にチューニングする作業は次のように行う。作ったモデルの共鳴周波数が、音速、開口端面積、のど部の長さ、小部屋体積および開口端補正值から求められるものとして、まず補正值  $\Delta l$  を求め、のど部の長さを変える。チューニングに用いる共鳴周波数の算出式を、小部屋の体積  $V$ 、開口端面積  $S$ 、のど部の長さ  $l$  を用いて以下に示す。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(l + \Delta l)V}} \quad (5)$$

### 2.4 折り紙構造

折り紙構造と呼ばれる構造物がある。折りたたみ可能な、三角形からなる円筒の構造を考える。この円筒は同一の三角形から角度を適切な値にすることにより、少ない歪みや変形で展開が可能となる。折りたたみ可能な三角形からなる円筒の折り紙モデルについて、図 2 のように円筒が軸方向に折りたたまれていく。完全に折りたたまれると、底面は正六角形になる。

共鳴器の喉部の部分にこの構造を応用することにより、喉部の長さが可変となり、従って共鳴器の共鳴周波数も可変とすることができる。それによって、変化する車室内の音場に対応して、共鳴器による音場制御ができる可能性がある。

### 3 ヘルムホルツ共鳴器を用いたこもり音の低減解析

箱型の簡易車室モデルにヘルムホルツ共鳴器を取り付け、こもり音が低減されるかどうかを有限要素法を用いた解析で調べる。簡易車室モデルの寸法を 900mm × 750mm × 1800mm、共鳴器の小部屋の寸法を 100mm × 100mm × 100mm、のど部の断面を 25mm × 25mm、のど部の長さを 45.5mm とする。まず目的の共鳴周波数を決めるために、車室の固有値解析を行なう。次にその目的の周波数に合うヘルムホルツ共鳴器を作り、車室モデルに付け音圧レベルの周波数応答解析を行なう。今回は 1 次の共鳴周波数 (94Hz) より 2 次の共鳴周波数 (186Hz) の方が、音圧レベルが大きかったため、2 次の共鳴周波数でのピークをターゲットに応答が低減されるかどうかを検討する。

乗員耳位置での音圧レベルの周波数応答を図 3 に示す。ターゲットである 186Hz の 2 次の共鳴周波数でのピークは 73.5dB から 55.8dB まで、17.8dB だけ下がった。共鳴器なしの固有モードを図 4、共鳴器ありの固有モードを図 5 に示す。94Hz の 1 次の共鳴周波数でも応答が 49.3dB から 46.1dB まで、3.2dB だけ下がった。

車室内こもり音の共鳴周波数はヘルムホルツ共鳴器を取り付ける前は 186Hz であったが、共鳴器を付けることによって共鳴周波数が 183Hz と 190Hz の 2 つに分裂した。これは、共鳴周波数が 2 つに分かれるというヘルムホルツ共鳴器の特徴を示している。従って、ヘルムホルツ共鳴器は一種の動吸振器として車室内空気系に作用していることがわかる。

今回の解析では、振動系が空気のみから構成されていたが、さらに構造と音響の連成を考慮することも必要である。また、共鳴器を取り付けることにより、ピークが高周波側にずれるか、低周波側にずれるかは各振動系を構成する要素による。

### 4 共鳴器が 1 個の場合と 2 個の場合の比較

ヘルムホルツ共鳴器を 2 個付けた場合と 1 個付けた場合とを比較し、2 個のヘルムホルツ共鳴器を付ける事が

有効かどうか検討する。

2個のヘルムホルツ共鳴器を簡易車室モデルの左右後方に付け音圧レベルの周波数応答解析を行ない、ヘルムホルツ共鳴器を1個付けた場合の周波数応答と比較する。

ヘルムホルツ共鳴器のモデルは、3.で作成したものと同一のものを使用し、左右側面部中央、後部の片端上下、後方部両端に付けて周波数応答を計算した。これらの結果を図6に示す。

左右側面部中央に付けた場合は、186Hzで音圧レベルが上昇している。また後方部両端に付けた場合は、反応がみられなかった。後方部片端上下の場合は、1次の共鳴周波数のピークは大幅に低減したが、2次の共鳴周波数である186Hzのピークの音圧レベルが上昇している。

今回の解析では、ヘルムホルツ共鳴器を1個付けた場合と2個付けた場合で比較したが186Hzのピーク周波数における音圧レベルの低減はどれもヘルムホルツ共鳴器を1個付けた場合の方が上回っていた。しかし、他の周波数で応答が大幅に低減する現象も見られ、2つの共鳴器の配置を共鳴モードの形状を考慮して、適切に設定すれば、騒音の低減に大きく寄与すると考えられる。これは、最適化解析を援用することによって実現できると考えられる。

## 5 結論と今後の課題

車室にヘルムホルツ共鳴器を取り付けることにより、車室の共鳴モードが変化し、それによって、周波数応答も変化し、音圧が低減することが有限要素法を用いた解析により示された。また、図7に示すような折り紙構造をヘルムホルツ共鳴器に取り入れることにより、自由自在に共鳴周波数を調整できることを確認した。また、共鳴器を複数個取り付けることによって、音圧レベルの更なる低減が期待できることも示した。

今後は最適化解析による共鳴器取り付け位置の決定、実験室レベルの実験や実車実験等で上記の結果の検証などを行っていく必要があると考えられる。

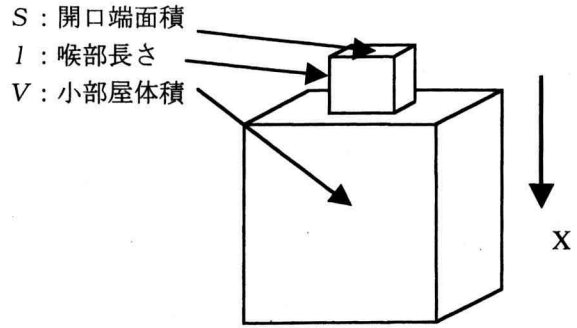


図1 共鳴器の各要素寸法

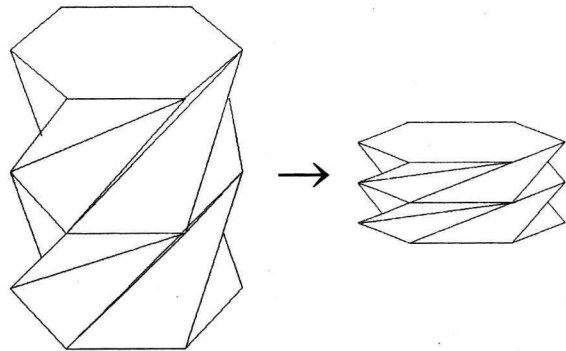


図2 折り紙構造の一例

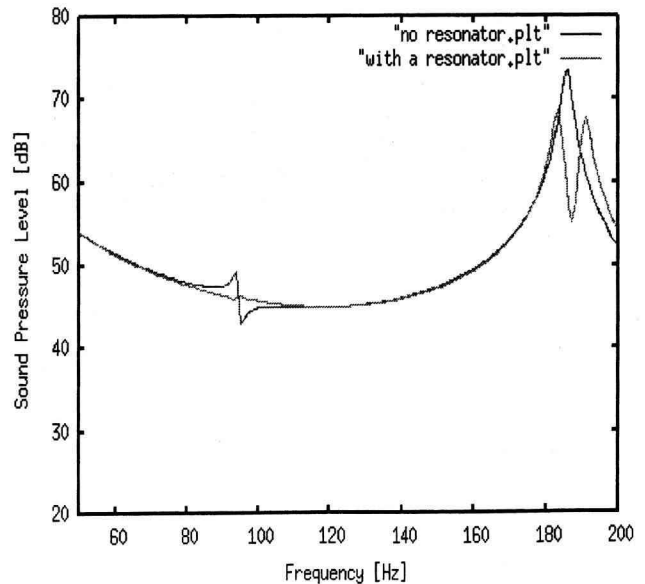


図3 共鳴器あり、なしでの乗員耳位置での音圧レベルの周波数応答の比較

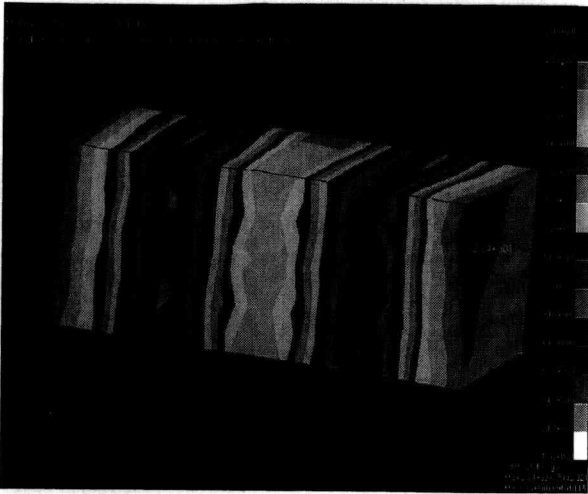


図4 共鳴器なしの2次の固有モード (共鳴周波数 186 Hz)

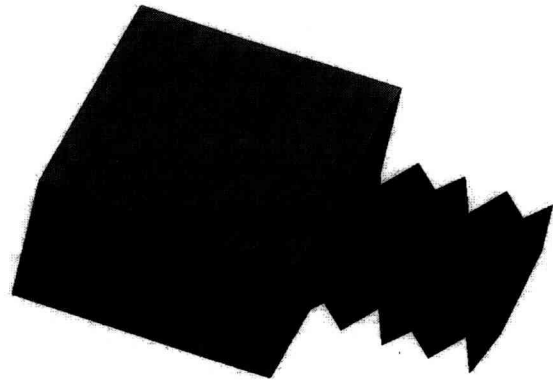


図7 折り紙構造ののど部を持つ共鳴器の例

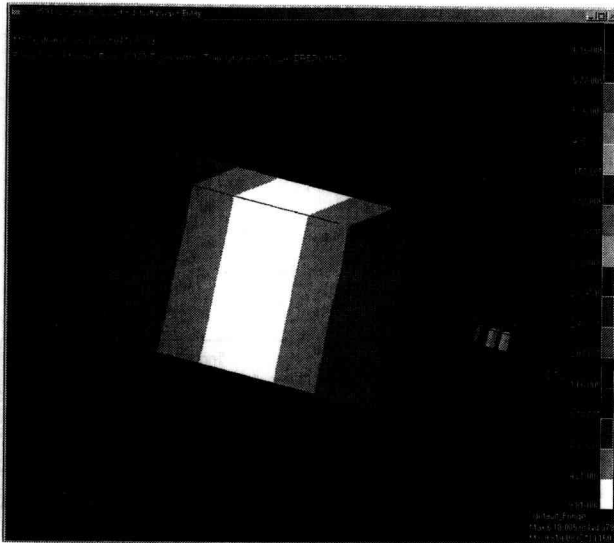


図5 共鳴器付の2次の固有モード (共鳴周波数 186 Hz)

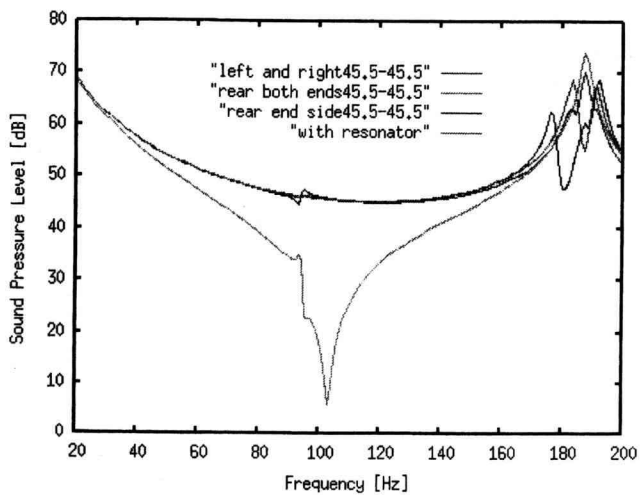


図6 共鳴器が1個の場合と2個の場合の乗員耳位置での音圧レベルの周波数応答の比較

#### 参考文献

- (1) 泉照之、成清辰生 “共鳴型消音器の頸部管端補正”、日本音響学会誌 46 巻 7 号、pp. 559-566(1990)
- (2) 深野徹、功能郁生、“ヘルムホルツ共鳴器による減音 (その 1、設計周波数の実験による検討)”、日本機械学会論文集 B 編 53 巻 494 号、pp. 3034-3037(1987)
- (3) 深野徹、功能郁生、“ヘルムホルツ共鳴器による減音 (第 2 報、減音周波数および減音効果におよぼすのど部形状と個数の影響)”、日本機械学会論文集 B 編 57 巻 538 号、pp. 2027-2031.(1991)