229 可変長喉部をもつヘルムホルツ共鳴器による騒音の低減に関する実験 Experiment on Noise Reduction by Helmholtz Resonator with Variable Throat

○ 正 小机 わかえ (神奈川工科大)

正 森村 浩明 (東工大)

正 萩原 一郎 (東工大)

正 宮地 秀征 (神奈川工科大)

Wakae KOZUKUE, Kanagawa Institute of Technology, 1030 Shimo-ogino Atsugi-shi, Kanagawa

Hiroaki MORIMURA, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo

Ichiro HAGIWARA, Tokyo Institute of Technology

Hideyuki MIYAJI, Kanagawa Institute of Technology

In this paper it is investigated whether the resonance frequency of a Helmholtz resonator is changed and the noise in a vehicle cabin is reduced by fabricating the throat of a resonator with double steel tube and attaching it to the resonator. As the frequency response of sound pressure level at a passenger's ear position is measured by an experiment the reduction and splitting of a resonance peak is successfully obtained as shown from the analysis by the finite element method.

Key Words: Helmholtz Resonator, Booming Noise, Resonance, Vehicle, Sound Pressure Level

著者らは、すでにのど部の長さを可変とするために、折り紙構造をのど部に取り入れたヘルムホルツ共鳴器を用いて、自動車車室内の騒音であるこもり音の低減を試み、有限要素法による解析では、かなりの騒音低減が期待されることを示した。さらに、実験によって、こもり音が折り紙構造共鳴器で低減されるかどうかを検討した。共鳴器ののど部の折り紙構造を柔軟な材質 (ポリプロピレン) で試作したため、折り紙構造ののど部の長さを変化させても共鳴器の共鳴振動数の変化を得ることができなかった。有限要素法による解析ではのど部を剛な板からなる折り紙構造として境界条件を設定していたため、のど部を長さが可変にできる剛な構造で作成すればよいのではないかと考えた^{(1), (2), (3)}。

そこで、本論文では共鳴器ののど部を、Fig. A1 に示すような二重構造の可変長の鉄の管で作成し、それを共鳴器本体につけて、車室モデルに取り付け、共鳴器の共鳴振動数の変化と、車室内の騒音低減を実現できるかどうか調べた。車室内の乗員耳位置での音圧レベルの周波数応答を計測したところ、Fig. A2 に示すような、有限要素法による解析により得られる共鳴ピークの低減と分裂を明確に観測することに成功した。今後は、この二重管の長さの制御を実現し、実車でこもり音を低減できるかどうかの実験等を行っていく予定である。

Fig.A1 Helmholtz Resonator with Variable Throat

Fig.A2 Frequency Response of Sound Pressure Level with Resonator and without Resonator at Passenger's Ear Position

1. はじめに

近年の自動車車室内の静粛性の向上は著しく、騒音レベルについてはかなり低減されてきている。しかし、最近問題となっているのは、騒音レベルが下がる一方で、これまではあまり目立たなかったロードノイズや、風切り音などが目立つために快適性が損なわれることである。これは車内音を構成する「エンジン音」「こもり音」「路面からの音」「風きり音」の四つに分けられる要素的な音が静粛性や快適性の印象を左右するということである。

本研究では、四つの音の要素の中から「こもり音」に注目し、のど部を剛で可変長とするヘルムホルツ共鳴器を試作し、車室を模擬したモデルに取り付けて車室内騒音が低減されるかどうかを実験により検討する。

2. 基礎となる理論

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共鳴現象である。一般にこもり音は、周波数帯域 20～250Hz の低周波数で、耳を圧迫するような音である。またその共鳴周波数は、車室寸法と車室形状によって決定される。

2.2 ヘルムホルツ共鳴器 ヘルムホルツ共鳴器は Fig.1 に示すように、小部屋 (chamber) とのど部 (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のど部で結合する。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にモデル化することで導かれる算出公式が知られている。以下にその概要を述べる。

Fig. 1 に示すように共鳴器の各要素寸法をとる。ここで、のど部にある空気が質点、小部屋部分の空気はばねとして働くものと仮定する。まず、のど部の空気の質量を求める。空気の密度を ρ とし、のど部の質量を m とおくと

Fig. 1 Schematic Diagram of Helmholtz Resonator

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

次に小部屋部分の空気の等価合成バネを求める。のど部の空気が図の x 方向に Δx 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、のど部にかかる圧力は大気圧を P_0 、比熱比を γ 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。のど部の空気にかかる復元力は $\Delta P S$ であることに注意して、これから一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、

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

上式より、ヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数が算出される。

2.3 伸縮構造ののど部のヘルムホルツ共鳴器 本実験で使用するのど部を Fig. 2 に示す。Fig. 3 からわかるようにのど部は二種類の管を組み合わせている。

Fig. 2 Throat of Variable Length

Fig. 3 Size of the Throat of Variable Length

これにより、のど部の長さを一定の範囲内である程度自由に調節することができる。しかし、二種類の管を組み合わせているため、式 (4) が多少変更される。それぞれの管と管の段差を考慮した式が考えられるのでその式を以下にまとめて示す。

$$Sl = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d+D}{2} \right)^2 \times l = \frac{\pi}{16} (d+D)^2 l \quad (5)$$

共鳴器側ののど部の断面積の場合 $S' = \frac{\pi}{4} d^2$ である。よって、

振動数

$$f' = \frac{d^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi \gamma P_0}{\rho V_0 (d^2 a + D^2 b)}} \quad (6)$$

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

共鳴振動数は

$$f' = \frac{cd^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{V_0 (d^2 a + D^2 b)}} \quad (7)$$

となる。

2.4 車室モデルの固有振動数（空洞共鳴周波数）以下の式を用いて、車室モデルの固有振動数を求める。

$$f_x = \frac{c}{x}, f_y = \frac{c}{y}, f_z = \frac{c}{z} \quad (8)$$

f_x, f_y, f_z は縦方向、横方向、高さ方向を基準として求められる周波数、 c は音速、 x, y, z は縦方向、横方向、高さ方向の波長で長さは車室モデルの寸法の 2 倍である。

3. 実験方法と実験結果

実験用車室モデル内にスピーカとマイクロホンを設置し、ランダム波の音をスピーカから出し、乗員耳位置での音圧レベルを測定する。

3.1 実験用車室モデルについて 実験用車室モデルの寸法は

Fig. 4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

1800mm×900mm×750mm である。材料は、厚さ 15mm ベニヤ板で、木ネジ、アルミテープでベニヤ板を固定し箱形を作っている。

3.2 のど部が伸縮構造のヘルムホルツ共鳴器について Fig. 5 はのど部が伸縮構造のヘルムホルツ共鳴器である。共鳴器の寸法は 10mm×150mm×500mm で、材料は厚さ 9mm のベニヤ板で、粘着テープを用いて箱形にしている。伸縮構造ののど部の材質は機械構造用炭素鋼鋼材(S45C)である。寸法は、内径 $D=107\text{mm}$ 、厚さ 3.5mm と内径 $d=95.2\text{mm}$ 、厚さ 3.2mm であり、この二本を組合わせて使用する。

Fig. 5 Helmholtz Resonator with Variable Length Throat

開口断面積はそれぞれ $\pi D^2 / 4$ 、 $\pi d^2 / 4$ である。管と管のすき間には天然ゴム (NR、厚さ 2mm) を巻き、ビニールテープを用いてゴムを固定している。それぞれの長さは 150mm (可動範囲 160mm～290mm) であり、ターゲットとする周波数によってのど部の長さを決定する。なお、ヘルムホルツ共鳴器主室には内側の管を取付けている。

3.3 車室モデル内の音圧レベルの測定 音圧レベルを低減させるターゲットとする共鳴周波数を決めるため、車室モデル内の音圧レベルを測定する。Fig. 4 が実験装置の概要図である。測定は半無響音室内で行なう。まず、測定用 PC と FFT アナライザをつなぐ。マイクロホンはプリアンプを介して FFT アナライザの 1ch, 2ch につなぎ、マイクロホンを車室モデル内に設置する。次に、音源用 PC の出力をプリアンプを介してスピーカにつなぎ、スピーカを車室モデル内に設置する。また、マイクの校正のため、マイクの先端にマイクロホン校正器を差込む。その後、FFT を使用し、250Hz 時に 124dB となるようにする。

以上の準備が整ったら、車室モデルをアルミテープでふさぎ、音源用 PC を用いて 300Hz までのランダム波の音をスピーカから出力する。そして、FFT によって音圧レベルの周波数応答関数を測定する。

また、車室モデルの影響を確認するため、車室モデルがなくマイクとスピーカの位置関係が同じ状態での音圧レベルの測定を行なった。

音圧レベルのピーク (固有振動数) は 107.6Hz, 195.2Hz,

208.8Hz, 229.2Hz であることがわかった。

実験で使用している車室モデルの固有振動数を式(8)を利用して計算する。使用する x, y, z, c の値は以下の通りである。

$$x = 1.77 \times 2 = 3.54\text{m} \quad y = 0.72 \times 2 = 1.44\text{m}$$

$$z = 0.87 \times 2 = 1.74\text{m} \quad c = 344\text{m/s}$$

ここで、 x, y, z は縦方向、横方向、高さ方向の波長で、その長さは車室モデルの寸法の2倍、 c は音速である。これらを計算すると、

$$f_x = \frac{c}{x} = \frac{344}{3.54} = 97.2\text{Hz}$$

$$f_y = \frac{c}{y} = \frac{344}{1.44} = 238.9\text{Hz}$$

$$f_z = \frac{c}{z} = \frac{344}{1.74} = 197.7\text{Hz}$$

となる。

計算値と測定値では10Hz程度ピークにずれがある。これは車室モデルから音が漏れているからと推測される。これを改善するにはベニヤ板を厚くする、材質を変えるなどして剛性を高める必要があるが、現状では困難である。したがって、本研究では107.6Hzをターゲットとしていく。

3.5 ヘルムホルツ共鳴器を取り付けての実験 車室モデルにのど部が伸縮構造のヘルムホルツ共鳴器を取り付け、のど部の長さを調整することでターゲットとする音圧レベルのピークがどれだけ低減されるかを調べる。

共鳴器振動数の式は以下を用いる。

$$f = \frac{cd^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{V(d^2a + D^2b')}} \quad (9)$$

のど部の長さについては以下のような補正を考慮する。

$$\text{Plan1} \quad b' = b_1 + r \quad (10)$$

$$\text{Plan2} \quad b' = b_2 + 1.5r \quad (11)$$

$$\text{Plan3} \quad b' = b_3 + 1.3r \quad (12)$$

ここで、 f は共鳴周波数(107.6Hz)、 c は音速(344m/s)、 d, D はそれぞれの管の内径($d=0.0952\text{m}$, $D=0.107\text{m}$)、 V は共鳴器体積(0.0075m^3)、 a は内側の管の長さ[m]、 b' は補正したのど部長さ[m]、 b_1, b_2, b_3 は外側の管の長さ[m]、 r は開口端のど部半径($D/2=0.0535\text{m}$)である。

式(9)～(12)において、 $a=150\text{mm}$ で計算した場合 Plan2 ではのど部の長さが150mmよりも短くなってしまふ。そのため、新しく管の長さが100mmのものをそれぞれ作製する。

式(9)～(12)において、 $a=100\text{mm}$ で計算し直すと、Plan1では、162mm、Plan2では、135mm、Plan3では、146mmとなる。音圧レベルの測定で使用した車室モデルに Fig. 5 のようにのど部が伸縮構造ヘルムホルツ共鳴器を取り付ける。使用する実験装置は、音圧レベルの測定値と同様に設置する。のど部の長さは Plan1～3 の長さにそれぞれ調整し固定する。その後、

音源用 PC を用いて 300Hz までのランダム波の音をスピーカから出力する。そして、FFT によって周波数応答関数を測定する。

Plan1～3 の全てで有限要素法による解析結果のような、ピークが分裂する現象が見られ、ターゲットの周波数周辺の音圧レベルを低減することができた。

3.6 ヘルムホルツ共鳴器の固有振動数 上記の実験では車室モデルの共鳴周波数とヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数にずれが生じた。これにより効率よく低減が行われなかった。ここでは周波数のずれをなくするため共鳴器の固有振動数を求め、計算値と比較する。そして、ターゲットとする固有振動数のときののど部の長さを決定する。

のど部の長さは110mmから190mmまで10mmずつ変化させていくとターゲットである107.6Hzに対しては150mmから170mmの間にあることがわかる。よって次の実験はその範囲をより詳しく測定する。のど部の長さは150mmから170mmまで5mmずつ変化させていく。

ターゲットである107.6Hzのときの、のど部の長さは160mmであることがわかった。そこで、のど部の長さを160mmに固定して実験を行う。また、測定値は Plan1 の計算値に最も近かった。

3.7 車室モデルに取り付けての実験 ヘルムホルツ共鳴器ののど部の長さを160mmにし、車室モデルに取付ける。そして、ターゲットとするこもり音が低減されているかを調べる。測定結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から明らかなように、共鳴ピークは低減され2つに分裂している。これは有限要素法による解析により得られるヘルムホルツ共鳴器特有の現象を表しており、本実験がこの現象を明確に捉えたことを示している。

Fig.6 Frequency Response of Sound Pressure Level with Resonator and without Resonator at Passenger's Ear Position

4. 結論と今後の課題

実験の結果、車室モデル内の音圧レベルのピークを低減することに成功した。さらに、有限要素法による解析結果のような、ピークの低減及びピークが二つに分裂する現象もみられた。なお、のど部の管と管のすき間をより小さくすることができれば、さらに正確に計測が行えると考えられる。

今後は、車室モデルに共鳴器を複数個取付ける、共鳴器の取付け位置を変更した場合の計測を行うことが考えられる。また、様々な形状の共鳴器を作製し、どのような形状が効率良く騒音を低減できるのかを調べる実験を行うことも考えられる。

参考文献

- (1) 小机、毛利、萩原、宮地、折り紙構造ヘルムホルツ共鳴器による車室内騒音の低減、D&D2007, CD-ROM (2007)
- (2) Wakae Kozukue, Ichiro Hagiwara, and Yasuhiro Mohri, "Analysis for Vehicle Interior Noise Using Helmholtz Resonator", Proceedings of 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, CD-ROM (2005)
- (3) 小机わかえ、萩原一郎、"折り紙式ヘルムホルツレゾネータを用いた室内騒音低減解析"、日本応用数理学会 2005 年度年会講演論文集 (2005)