

○服部 康章, ☆寺尾 道仁, 関根 秀久, 佐々木 悠哉 (神奈川大・工)

1. はじめに

ヘルムホルツ共鳴器はダクト系騒音の低抵抗で精密な音質制御手段として知られているが、一般技術者には共鳴器パラメータ調整が容易でないため活用されていない。筆者らは、容積可変シリンドーによる共鳴周波数制御機能およびネック部抵抗可変渦巻バネによる Q 値 (共鳴の鋭さ) 制御機能を有する共鳴器チューナーを開発しその有効性を示した[1]。今回は、さらに共鳴器音響消散制御機能を追加する目的で、渦巻バネによるネック長可変機構および絞り (可変ネック開口面積) 機構を開発し、実験によりその有効性について調べる。

2. 共鳴器の制御パラメータ

共鳴器の共鳴周波数 f_{res} 及び共鳴の鋭さ Q は、共鳴器の容積 V_{cav} 、ネック開口面積 S_A 、比音響抵抗 r_{HR} 、等価ネック長 l_e の 4 つの幾何的パラメータにより決定される。すなわち、

$$f_{res} = (c/2\pi)\sqrt{S_A/l_e V_{cav}} \quad (1)$$

$$Q = 2\pi f_{res} \rho l_e / r_{HR} \quad (2)$$

一方、音響消散率 δ_{HR} は、共鳴器を取り付けるダクトが断面積 S_D 、 $Z_c = \rho c/S_D$ のとき、

$$r_{HR}^* = r_{HR} / S_A Z_c = R_{HR} / Z_c \quad (3)$$

に依存する。この r_{HR}^* を音響消散調整の目安として用いる。

文献[1]では方式 A、すなわち、 S_A と l_e を固定、 V_{cav} 及び r_{HR} を可変パラメータに選んで共鳴周波数 f_{res} と共鳴の鋭さ Q を独立に制御し δ_{HR} は成行きであった。今回は、方式 A に対し、 δ_{HR} の制御を加える目的で、次のような方式 B と C を試みた。方式 B では V_{cav} 、 r_{HR} および l_e 、一方、方式 C では V_{cav} 、 r_{HR} および S_A を連続可変パラメータとした。

ネックの等価長さ l_e 及び比音響抵抗 r_{HR} は、

$$l_e = l_A + \Delta l_M \quad (4)$$

$$r_{HR} = r_A + \Delta r_{HR} \quad (5)$$

ただし、 l_A はネックの長さ、 Δl_M はネック両開口端の付加質量補正長で、ネックの内側と外側のそれを Δl_1 及び Δl_2 とすれば $\Delta l_M = \Delta l_1 + \Delta l_2$ で、それぞれはネックの半径を a 、 $i=1,2$ として自由空間に対してはフランジ有無により $\Delta l_i = 0.82a$ 及び $\Delta l_i = 0.61a$ とされている。一方、 r_A はネック内表面の比音響抵抗で μ を空気の粘性抵抗係数として

$$r_A = (2\mu\rho\omega)^{1/2} (l_A/a) \quad (6)$$

により与えられる。 Δr_{HR} は開口端部抵抗及び可変抵抗渦巻バネなどによる付加抵抗である。

3. ダクト系における共鳴器の特性

図 1 に示すようにダクト系におけるヘルムホルツ共鳴器はサイドブランチ配置になる。そのポート i ($i=1,2$) の音圧、体積速度及び音響インピーダンスを p_i 、 U_i 及び $Z_i = p_i/U_i$ 、入射波及び反射波の複素音圧振幅を p_i^+ 及び p_i^- 、また、共鳴器開口における音圧、体積速度、音響インピーダンスをそれぞれ p_{HR} 、 U_{HR} 及び $Z_{HR} = p_{HR}/U_{HR}$ により表わせば、

$$p_i = p_i^+ + p_i^-, \quad Z_c U_i = p_i^+ - p_i^- \quad (7)$$

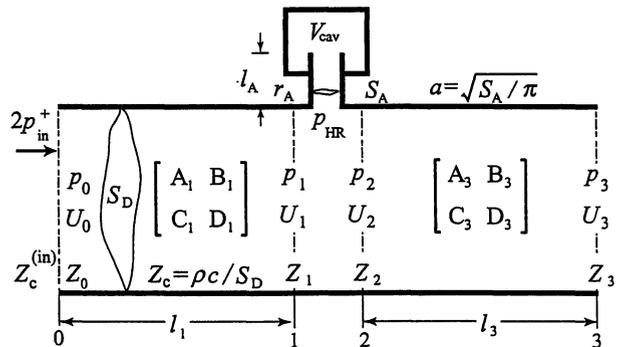


図 1 共鳴器を含むダクト区間の 1 次元モデル

* Investigation of Helmholtz resonator tuners for sound transmission control of air conditioning ducts. By Yasufumi HATTORI, Michihito TERAO, Hidehisa SEKINE and Yuya SASAKI(Kanagawa Univ.)

$$U_1 = U_{HR} + U_2, \quad p_1 = p_2 = p_{HR} \quad (8)$$

入射波の単位面積の音響パワー $|p_{in}^+|^2 / 2Z_c^{(in)}$ と透過音の音響パワー $R_3 |U_3|^2 / 2$ との比により音響透過率 $\tau_{3,in}$ を定義すれば

$$\tau_{3,in} = 4Z_c^{(in)} R_3 G_0 G_1 G_2 G_3 \quad (9)$$

ただし、 $G_0 = |Z_0^{(ex)} + Z_0|^2$, $G_1 = |C_1 Z_1 + D_1|^2$, $G_2 = |1 + (Z_2 / Z_{HR})|^2$, $G_3 = |C_3 Z_3 + D_3|^2$ である。共鳴器部のポートについては

$$1/Z_1 = 1/Z_{HR} + 1/Z_2 \quad (10)$$

一方、直管区間 ($i=1$ または $i=3$ としてポート $i-1$ と i の区間) では 4 端子定数を $A_i = D_i = \cos kl_i$, $B_i = jZ_c \sin kl_i$, $C_i = j(Z_c)^{-1} \sin kl_i$ として

$$Z_{i-1} = (A_i Z_i + B_i) / (C_i Z_i + D_i) \quad (11)$$

なお、入射波の音圧を p_{in}^+ 、共鳴器セクションから音源側をみたインピーダンスを $Z_0^{(ex)}$ として

$$2p_{in}^+ = p_0 + Z_0^{(ex)} U_0 \quad (12)$$

図 2 に音源側、透過側ともに無反射終端の場合の音響消散率を例示する。サイドブランチ共鳴器の場合、その整合条件、すなわち、消散率 δ_{HR} が最大となる条件は $R_{HR} = Z_c / 2$ となる。それは $\sigma = S_A / S_D$ とすれば比音響抵抗 $r_{HR} = S_A R_{HR}$ が $r_{HR} / \rho c = \sigma / 2$ のときである。それが音響消散最大化を目標にする場合の条件になる。そのときの音響透過損失は共鳴器単体の最大値 6 dB が限度であり、それを超える音響透過損失が求められる場合には複数個をダクト軸方向に多段配置する必要がある。

4. ネック長による Q の制御

図 3 は、換気口 (単純なダクト区間) について透過音の目標スペクトルを平坦特性としたときの f_{res} と Q の調整過程の典型ステップを示す。これは、 $Z_0^{(ex)}$ 及び Z_3 を半自由空間の放射インピーダンスとして式 (9) により求めたものである。ここでのチューニングは可変パラメータ l_e , r_{HR} 及び V_{cav} を試行錯誤により徐々に目標値に近づけていく単純な手法を想定している。試行 1 ($r_{HR} = \infty$) は共鳴器がない場合に相当する。そのときの気柱共鳴周波数 440Hz の透過音を共鳴器により調整した。試行 2 と 3 は、 l_A 制御 (したがって l_e 制御) による Q の調整過程の様子である。

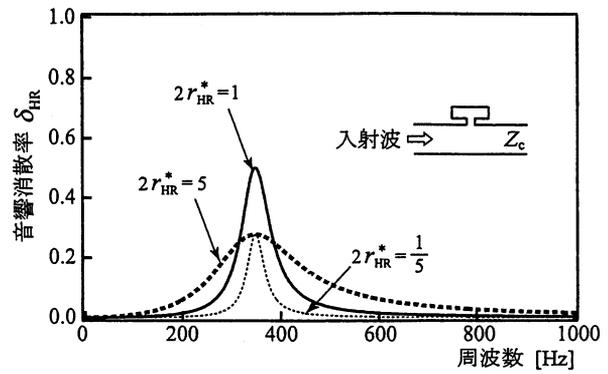


図 2 共鳴器の音響消散率

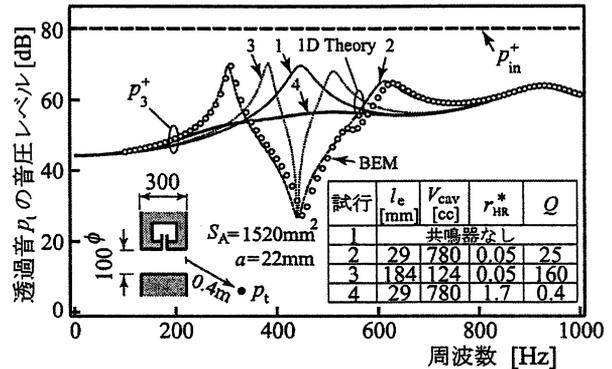


図 3 壁貫通換気口における透過音制御用共鳴器のチューニング

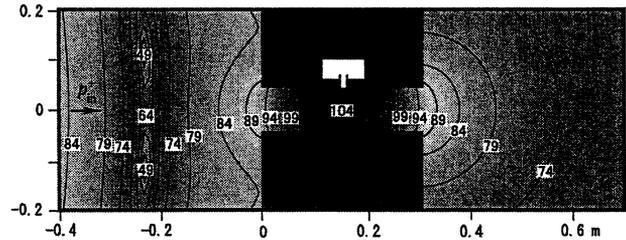


図 4 反動的共鳴透過周波数 (図 3 の 310Hz) における音圧分布 (dB)

透過音が低減する一方、その高・低両周波数側に強い反動的共鳴透過音が出現する。図 4 に 310Hz における音圧分布を示す。この周波数では共鳴器自体の共鳴は微弱である一方、共鳴器を含めた換気経路は強い共鳴状態になっている。この換気経路の共鳴の鋭さは式 (2) により r_{HR} を大きくとれば弱められ、試行 4 のようにこの反動的共鳴透過音は抑えられる。しかし、比較的 Q を大きくとる必要がある場合には、この反動的共鳴透過音の調整のため高・低両周波数側それぞれに対する共鳴器の追加が必要になる。

5. ネック長共鳴器チューニング装置の開発

方式 B について検討するため、渦巻バネによる l_A 可変チューブを開発した。それによる l_e 調整機能付共鳴器チューナーを低反射終端の直管ダ

クト（内径 250φ，長さ 5m）に取付けて実験した結果を図 5 に示す。試行 2 に対し試行 3 は l_A を 3.5 倍に制御した段階であるが Q はわずかし調整されない。その原因は、 Δr_{HR} をとくには付加せず、したがって $r_{HR} \propto l_A$ となる（式(4)，(5)および(6)参照）ため、式(2)により $Q \cong \text{const.}$ の傾向になってしまったこと、また、チューナーの l_A 可変範囲は 1cm から 4cm で a に対して十分大でないため式(4)において l_A に対し Δl_M が相対的に大きく、 l_e としての可変範囲が狭まってしまったことが挙げられる。 Q の調整範囲を大きくするためには、 $\Delta r_{HR} \gg r_A$ ，かつ、 $l_A \gg a$ が条件になるが後者には現実的制約が多く、方式 B は現実的でないと判断される。

6. ネック部抵抗および開口面積制御

方式 C について検討する。 Q 調整には式(2)によりネック部抵抗 r_{HR} 制御，また、 δ_{HR} 調整には式(3)により S_A 制御の導入をはかる。ネック部にその開口面積 S_A の制御のため写真 1 に示すような絞り機構を組み込み、これに渦巻きバネ可変抵抗機構を挿入したチューナーを開発した。ネック部抵抗 r_{HR} は渦巻きバネの中心軸をステップモ-

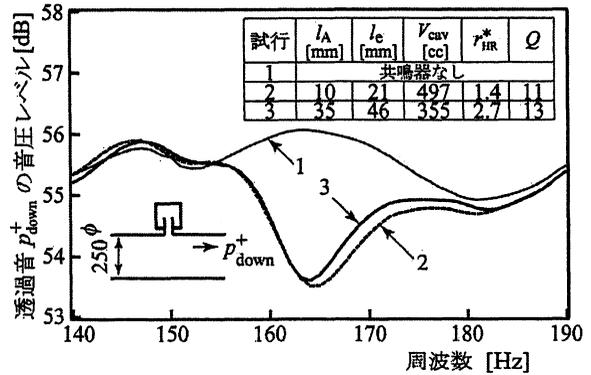
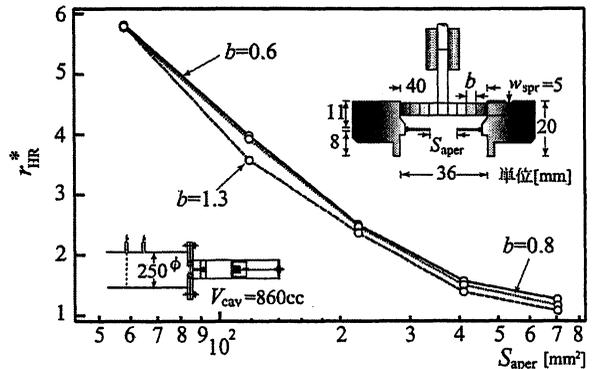
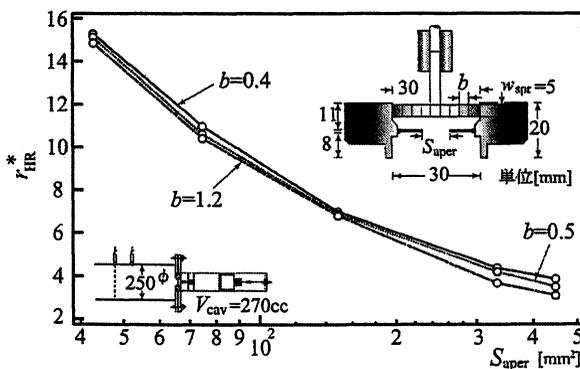
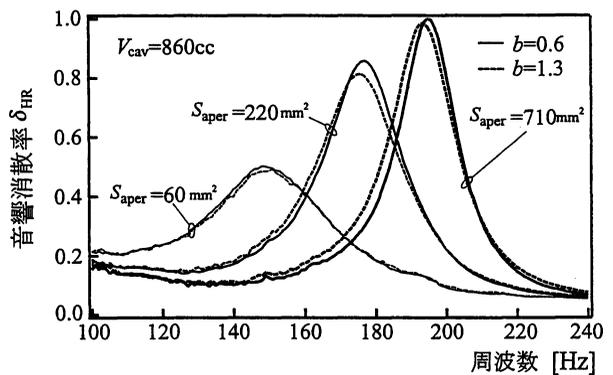
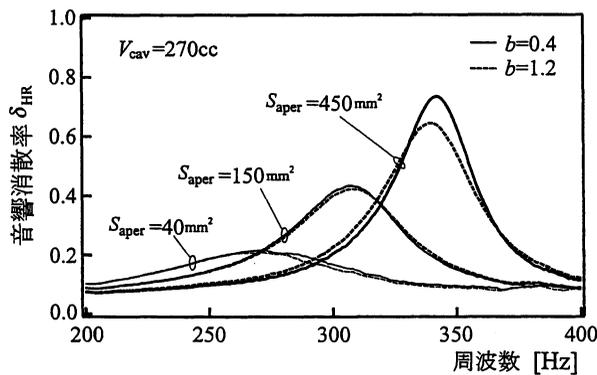


図 5 低反射終端ダクト内透過音制御における共鳴器のチューニング

タにより回転させバネ板間隙間 b を可変として制御される。このネック部抵抗・開口面積制御機構付共鳴器チューナーを直管ダクト（内径 250φ，長さ 1.5m）の終端に取付け，絞り面積 S_{aper} およびバネ板間隙間 b と基準化ネック部抵抗 r_{HR}^* および消散率 δ_{HR} との関係を調べた。その結果を図 6 に示す。チューナー I 及び II は，それぞれ絞り面積 S_{aper} の最大値が 450 mm² および 710 mm² である。絞り面積 S_{aper} 制御による基準化抵抗 r_{HR}^* および消散率 δ_{HR} の調整可変範囲が大きいことが確認された。しかし，バネ板間隙間 b による r_{HR}^* の可変範囲は期待に反してわずかではなかった。



(a) チューナー I

(b) チューナー II

図 6 ダクト終端取付条件における音響消散率およびネック部抵抗の測定値

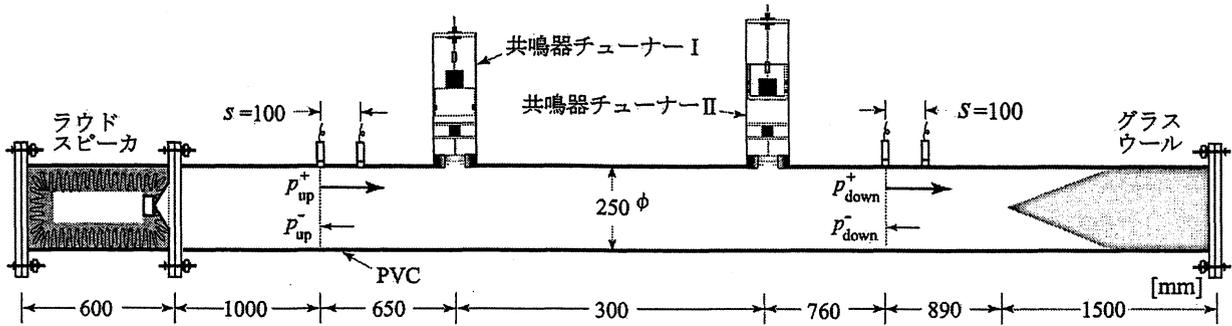


図7 共鳴器のチューニング実験装置

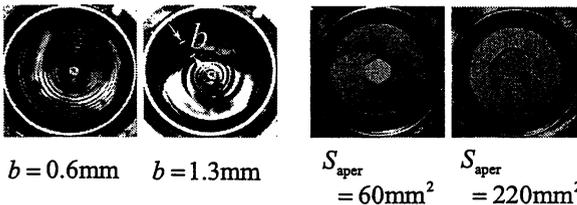


写真1 渦巻きバネ，ネック開口面積調節機構

その原因は，渦巻バネに対して絞り面積による抵抗が支配的になってしまったことが挙げられる。絞り羽根面と渦巻バネとの間の隙間を0.1mmの程度に小さく作成する必要がある。

7. ネック部抵抗，開口面積制御機能付き共鳴器チューナーの試行実験

前項6の共鳴器チューナーIおよびIIをサイドブランチ配置でダクトに取付けチューニング実験を行った。図7にその実験装置を示す。基礎的性質を調べるため低反射終端とし，音源側と透過波側の音圧スペクトルはそれぞれ2位置マイクロホン法により進行波を分離している。

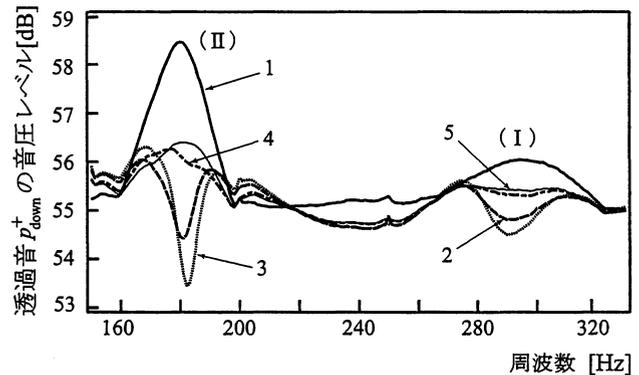
表1および図8は，180Hzおよび285Hz付近に2つの卓越ピークをもつ透過音スペクトル p_{down}^+ を56dB程度に平坦化することを目標として，方式Cに基づくチューニングを行ったときの代表的な試行段階の共鳴器パラメータおよび透過音スペクトルを示す。共鳴器パラメータ V_{cav} ， r_{HR} および S_{aper} の試行錯誤制御により透過音が目標スペクトルに近づいていく様子が確認される。これはチューニング方式C，すなわち， V_{cav} ， r_{HR} および S_{aper} を制御パラメータとする共鳴器特性 (f_{res} ， δ_{HR} 及び Q) 調整手法の基本的有効性を示すものである。

8. まとめ

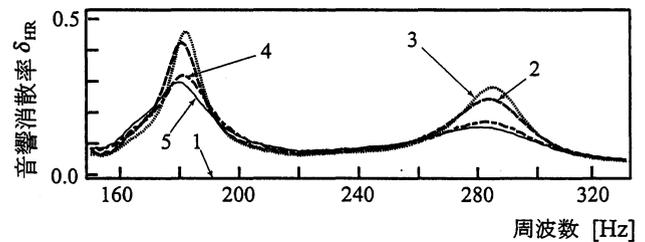
ダクト系におけるヘルムホルツ共鳴器音響特

表1 共鳴器チューナー制御パラメータと透過音特性

試行	チューナーI							チューナーII						
	V_{cav} (cc)	f_{res} (Hz)	S_{aper} (mm ²)	r_{HR}^*	δ	b (mm)	Q	V_{cav} (cc)	f_{res} (Hz)	S_{aper} (mm ²)	r_{HR}^*	δ	b (mm)	Q
共鳴器なし	共鳴器なし							共鳴器なし						
--2	340	285	450	3.9	0.24	0.4	7.3	930	181	710	1.3	0.42	0.6	10.6
--3	340	284	450	3.1	0.28	1.2	9.2	930	182	710	1.1	0.46	1.3	11.3
--4	300	283	150	6.8	0.17	1.2	6.3	810	181	220	2.4	0.32	1.3	6.5
--5	300	281	150	7.0	0.15	0.4	5.3	810	180	220	2.5	0.30	0.6	5.5



(a) 透過音スペクトル p_{down}^+



(b) 音響消散率 δ_{HR}

図8 方式Cによるチューニング

性の最適化調整に必要な共鳴器チューナーを開発し，実験によりその基礎的有効性が確認された。相互干渉をもつ多数の共鳴器から成る共鳴器列に対応するためには調整作業の自動化が必要であり現在その準備を進めている。

謝辞

本研究の一部は，平成19年度科研費補助金（課題番号18560583）による。深く感謝の意を表します。

参考文献

[1] 寺尾ほか，日本音響学会講論集，p815，平成19年3月。