

ダクト系共鳴器チューニング装置の開発* —ネック長による制御—

○寺尾道仁, 関根秀久, 服部康章 (神奈川大・工)

1 はじめに

ダクト系における騒音制御手段としてヘルムホルツ共鳴器 (以下単に共鳴器と呼ぶ) を利用する際には, 共鳴器パラメータの調整が不可欠である。前報^[1]において, 容積制御による共鳴周波数調整及び渦巻バネ制御によるネック部抵抗調整の機能を有する共鳴器調整装置を試作しその基本的有効性を示した。今回はネック長制御による共鳴の鋭さ調整 (ネック断面制御不要) の可能性について調べる。

2 共鳴器の制御パラメータ

共鳴器の共鳴 (角) 周波数 ω_{res} 及び共鳴の鋭さ Q は, 共鳴器の容積 V_{cav} , ネック開口面積を S_A , 比音響抵抗を r_{HR} , 等価ネック長さ 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,

$$\omega_{\text{res}}/c = \sqrt{S_A/l_e V_{\text{cav}}}, Q = \omega_{\text{res}} \rho l_e / r_{\text{HR}} \quad (1), (2)$$

一方, ω_{res} における音響散逸率 δ_{HR} は, 共鳴器を含むダクトが断面積 S_D , $Z_c = \rho c / S_D$ のとき,

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

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。ダクトが無反射終端の場合, $r_{\text{HR}}^* = 1/2$ において $\delta_{\text{HR}}^{(\text{res})}$ (ω_{res} における δ_{HR}) は最大値 0.5 をとる。

前報では 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 ω_{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 $\delta_{\text{HR}}^{(\text{res})}$ も制御対象に加え r_{HR}^* を規定するが, S_A は固定としたため r_{HR} も規定される (式 (3) 参照)。 V_{cav} 及び l_e を連続可変パラメータとして, それぞれ共鳴周波数 ω_{res} と共鳴の鋭さ Q を独立に調整する。

3 等価長さ及び共鳴器の音響抵抗

ネックの等価長さ l_e 及び比音響抵抗 r_{HR} は,

$$l_e = l_A + \Delta l_M, \quad r_{\text{HR}} = r_A + \Delta r_{\text{HR}} \quad (4), (5)$$

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, そのそれぞれはネックの半径を a , $i=1,2$ としてフランジ有無により $\Delta l_1 = 0.82a$ 及び $\Delta l_1 = 0.61a$ 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金網などによる付加抵抗である。

4 ダクト系における共鳴器の特性

Fig. 1 は共鳴器を含むダクト区間 (0-3 区間) の一次元波動モデルを示す。その入射波の音響パワー $|p_{\text{in}}^+|^2 / 2Z_c^{(\text{in})}$ 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 $\tau_{3,\text{in}}$ を定義すれば^[1]

$$\tau_{3,\text{in}} = 4Z_c^{(\text{in})} R_3 G_0 G_1 G_2 G_3 \quad (7)$$

ただし, $G_0 = |Z_0^{(\text{ex})} + Z_0|^{-2}$, $G_1 = |C_1 Z_1 + D_1|^{-2}$, $G_2 = |1 + (Z_2/Z_{\text{HR}})|^{-2}$, $G_3 = |C_3 Z_3 + D_3|^{-2}$ である。また, 各ポート ($i=0,1,2,3$) について $p_i = Z_i U_i$, 共鳴器部のポートについては

$$1/Z_1 = 1/Z_{\text{HR}} + 1/Z_2 \quad (8)$$

一方, 直管区間 ($i=1,3$ 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

$$Z_{i-1} = (A_i Z_i + B_i) / (C_i Z_i + D_i) \quad (9)$$

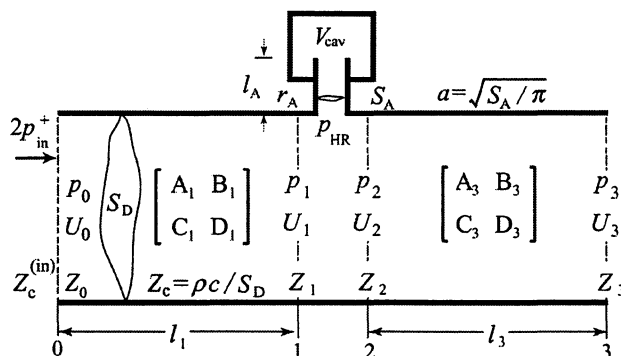


Fig. 1 1D wave model of a simple duct section with a Helmholtz resonator

* Sound transmission control of duct systems by Helmholtz resonator tuners, by TERAOKA, Michihito, SEKINE, Hidehisa and HATTORI, Yasufumi (Kanagawa university).

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

$$2p_{in}^+ = p_0 + Z_0^{(ex)}U_0 \quad (10)$$

5 ネック長による Q の調整

Fig. 2 に、換気口（単純なダクト区間）透過音が l_c 、 r_{HR} 及び V_{cav} により ω_{res} と Q が調整される様子を示す。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 (7) により求めたものである。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 制御による Q の調整結果である。440Hz の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。その原因は現在検討中であるが、 G_0 及び G_1 の項によるものとみられる。その鋭さは式 (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 を大きくとりたい場合には、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。

6 共鳴器チューニング装置の試作

試作した Q 調整機能付共鳴器チューナーを Fig. 3 に、これを低反射終端の直管ダクト（内径 250φ、長さ 5m）に取り付けて実験した結果を Fig. 4 に示す。試行 2 と 3 とで l_A を 3.5 倍に制御しても Q は僅かしか調整されていない。その主たる理由は、 Δr_{HR} を特には付加せず、したがって $r_{HR} \propto l_A$ となる（式(4)、(5) 及び(6)参照）ため、式(2)により $Q = \text{Const.}$ の傾向になってしまったこと、また、試作チューナーの 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_c 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、 r_{HR} 制御を主体に位置づけざるを得ない。それには r_{HR} 制御に連動して δ_{HR} 調整のための S_A の制御が課題になる。

7 おわりに

ダクト系透過音の共鳴器による最適化調整

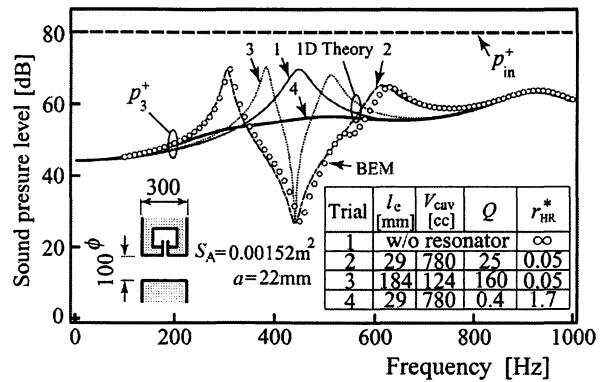


Fig. 2 Resonator tuning for transmitted sound of a ventilation aperture

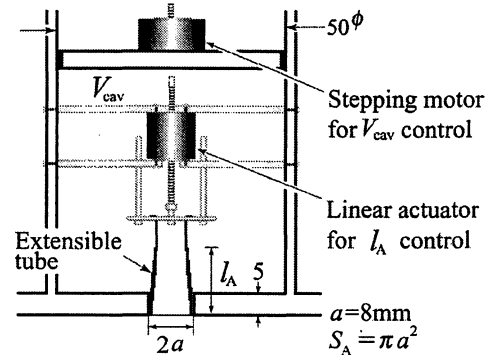


Fig. 3 Resonator tuning device with an extensible neck-length

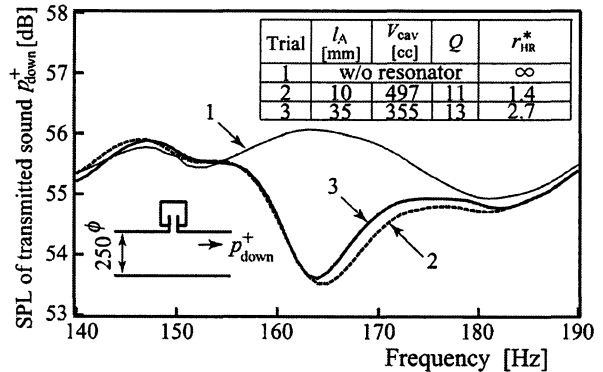


Fig. 4 Resonator tuning for transmitted sound in a simple duct

について、そのためのチューナーを試作してネック長制御による共鳴の鋭さ Q の調整の可能性を調べた。その結果、ネック長制御単独では Q 調整上限界があり、調整装置は抵抗制御を主体に開発せざるを得ないことがわかった。

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、音講論（秋）、923-924、2007。