

平成21年6月20日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560583

研究課題名（和文） 通気系消音用音響消散型共鳴器列の自動調整システムの開発

研究課題名（英文） Development of a tuning system of Helmholtz resonator arrays for sound dissipation of airflow ducts

研究代表者

寺尾 道仁 (TERAO MICHIHITO)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：40013198

研究成果の概要：ダクト系における共鳴器の音響特性制御システムに必要となる共鳴器の容積制御による共鳴周波数調整機能，渦巻きバネによる共鳴の鋭さ調整機能および絞り機構を用いた開口面積制御機構による音響消散率調整機能を組込んだ共鳴器チューナーを開発した。この共鳴器チューナー6体から成る共鳴器チューニングシステムを構築し，ダクト騒音試験装置に装着して複数の卓越周波数をもつ透過騒音の低減実験を行い，その有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1000,000	0	1000,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	1000,000	300,000	1300,000
総計	2500,000	450,000	2950,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築環境・設備

キーワード：(1) 建築環境・設備 (2) 騒音制御 (3) シミュレーション工学 (4) 共鳴器列 (5) 消音装置 (6) 計測工学 (7) 制御工学 (8) 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) 共鳴器最適パラメータの調整システムの不在

共鳴器は，その安定した音響的特性のほか必要スペースや対候性の面からも有力であるにもかかわらず，内燃機関のマフラーやターボエンジン・シュラウドのように他に手段がなく，音源側・負荷側ともにその音響特性が固定的でかつ量産により開発コストが許容される場合を除いては敬遠されてきた。その主要な理由として，共鳴器を実効あるものとするためには，対象システムごとに割の合わない試行錯誤による共鳴器パラメータ調整が不可避であることが挙げられる。

(2) 消散型騒音制御の必要性

従来のダクトシステムの共鳴器設計は，共鳴周波数を透過音の支配的スペクトルに一致させることを理念として行われてきた。それは共鳴器接続点で大きな反射を実現させて音響透過損失の最大化を目指す手法である。この場合，音響透過損失は大きくても，共鳴器位置で単にリアクティブに音源側に音波を跳ね返すだけでは，それが再度，音源側から跳ね返ってくるため，ダクト内の消散が小さい場合には挿入損失はほとんど期待できなくなる。

(3) フィードバック型共鳴器適応制御手法の優位性

1980年代，DSPの実現により，低周波数域について調整が難しい共鳴器よりもむしろ

能動音響制御にゆだねようとする期待が高まった。しかし、ダクト系騒音のデジタル適応制御は、主にフィードフォワード方式で、音源側・透過側マイクロホン、デジタル信号処理装置 (DSP)、二次音源、ハウリングキャンセラーなどに周期 0.1ms 程度の信号に対応可能な高度鋭敏システムから構成される。B. Widrow などの提唱以来四半世紀、国際会議等において毎年数百篇に上る活発な研究発表がなされてきたが、システムの耐久性、低音域の二次音源出力など実用化の課題が残されており、個々のメンテナンスが期待しにくいダクト系の騒音対策についてはパッシブな消音に頼らざるを得ない状況がある。

2. 研究の目的

(1) 共鳴器最適パラメータの調整システムの実装

本研究では、それぞれ 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz 及び 250Hz の 1/3 オクターブステップの中心周波数付近をカバーする 6 つの共鳴器からなる共鳴器列をプロトタイプとして構成する。各共鳴器について容積、抵抗、開口面積を連続可変パラメータに選び、その最適値の同定システム (調整システム) を開発する。この調整システムは、最適容積・抵抗探索・音響消散率調整機構を組込んだ調整用共鳴器列と透過進行波の音圧スペクトルを検出する透過音検出装置とで構成する。調整用共鳴器列は、透過波音圧スペクトルの主要ピーク値が低減する方向にその周波数付近に共鳴周波数をもつ共鳴器の共鳴周波数・抵抗・音響消散率制御機構を、順次、微調整させ、これを繰り返し行わせることにより、各共鳴器の最適パラメータ値を探索する。

(2) 消散型騒音制御の達成

共鳴器抵抗を積極的に利用し、共鳴器接続点での反射を低減し音響消散量を最大化して透過音 A 特性音圧レベルを低減することを基本理念とする。

(3) フィードバック型共鳴器の制御手法の確認

本調整手法は、共鳴器の容積と抵抗について、透過波の騒音レベルを最小化するフィードバック制御を行う。

3. 研究の方法

(1) 共鳴器の制御パラメータ調整方法

共鳴器の共鳴周波数 f_{res} および共鳴の鋭さ 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、

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

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

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、

$$\begin{aligned} r_{\text{HR}}^* &= r_{\text{HR}} / S_A Z_c \\ &= R_{\text{HR}} / Z_c \end{aligned} \quad (3)$$

に依存する。この基準化抵抗 r_{HR}^* を音響消散調整の目安として用いる。

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だとき共鳴周波数 f_{res} と共鳴の鋭さ Q を独立に制御して、 δ_{HR} は成行きであった。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 および比音響抵抗 r_{HR} は、

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

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

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、その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 $\Delta l_i = 0.82a$ および $\Delta l_i = 0.61a$ 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。

(2) 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 $Z_{\text{HR}} = p_{\text{HR}} / U_{\text{HR}}$ により表わせば、

$$\begin{aligned} p_i &= p_i^+ + p_i^-, \\ Z_c U_i &= p_i^+ - p_i^- \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{HR}} + U_2, \\ p_1 &= p_2 = p_{\text{HR}} \end{aligned} \quad (8)$$

入射波の単位面積の音響パワー $|p_{\text{in}}^+|^2 / 2Z_c^{(m)}$ 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

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

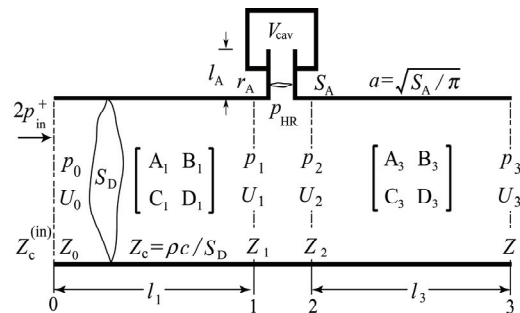


図 1 共鳴器を含むダクト区間の 1 次元モデル

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 $r_{HR}^* = 0.5$ となる。それは $\sigma = S_A / S_D$ とすれば比音響抵抗 $r_{HR} = S_A Z_c r_{HR}^*$ 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。

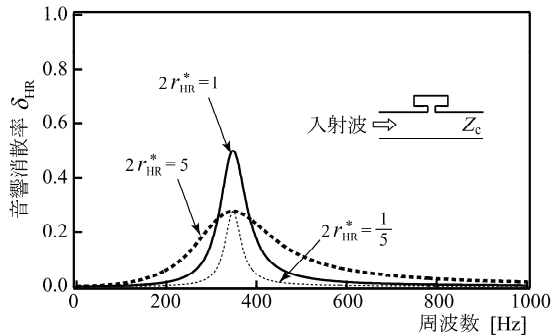


図 2 共鳴器の音響消散率

(3) 共鳴器チューナー単体特性

共鳴周波数 f_{res} の調整は式 (1) により共鳴器の容積 V_{cav} 制御、共鳴の鋭さ Q 調整には式 (2) によりネック部抵抗 r_{HR} 制御、また、音響消散率 δ_{HR} 調整には式 (3) により開口面積 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、図 3 および写真 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。その共鳴器チューナーを写真 2 に示す。容積 V_{cav} はステップモーターによりシリンダー内のピストンを上下移動することにより制御する。ネック部抵抗 r_{HR} は渦巻きバネの中心軸をステップモーターにより回転させバネ板間隙間 b を可変として制御する。この容積・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の終端に取付け、その音響特性について調べた。

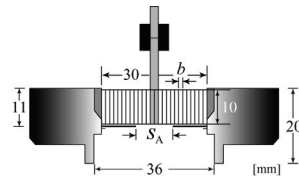


図 3 ネック部断面

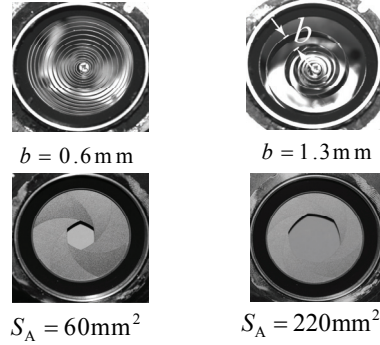


写真 1 渦巻きバネ、ネック開口面積調節機構

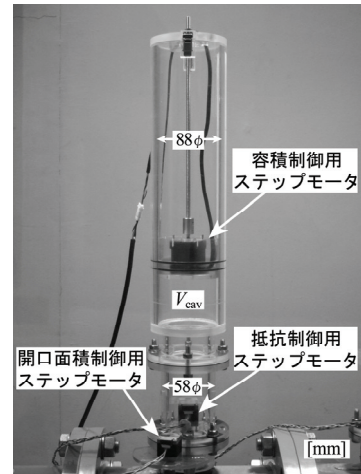


写真 2 開発した共鳴器チューナー (C 方式)

(4) 共鳴器チューナー列による透過騒音の低減実験

6 体の共鳴器チューナー (1/3 オクターブバンド中心周波数 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hz, 200Hz 及び 250Hz, ステップモータ 18 台) を組み立て、図 8 のダクト騒音試験装置に共鳴器チューナー I~VI をサイドブランチ配置でダクトに取付け、複数の卓越周波数をもつ透過騒音の低減実験を行った。なお、共鳴器チューナーはダクト軸方向に 50mm、ダクト断面方向に角度を 90° 変えて配置した。ダクトの終端はチューナーの基礎的性質を調べるため無反射条件に近い低反射端とした。

4. 研究成果

(1) ネック長による共鳴の鋭さ Q の制御

図 4 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 の調整過程の代表的なステップの数値解析結果を示す。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0 ($r_{HR} = \infty$) 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1と2は, l_e 制御による Q の調整過程の様子である。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5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3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。

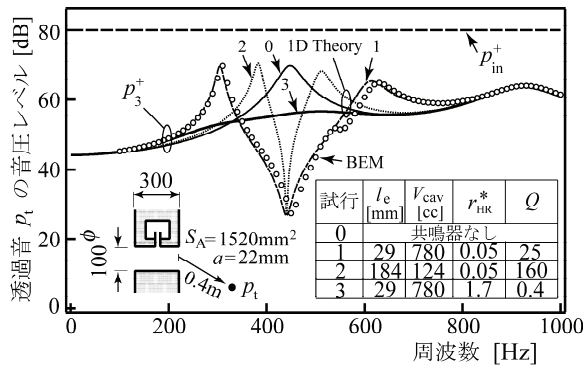


図4 壁貫通換気口における透過音制御用共鳴器のチューニング

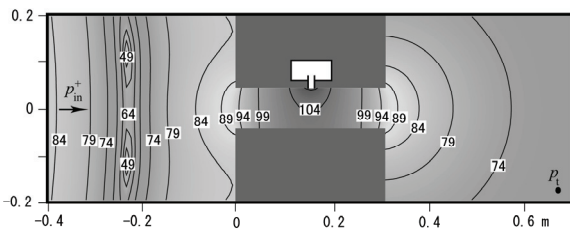
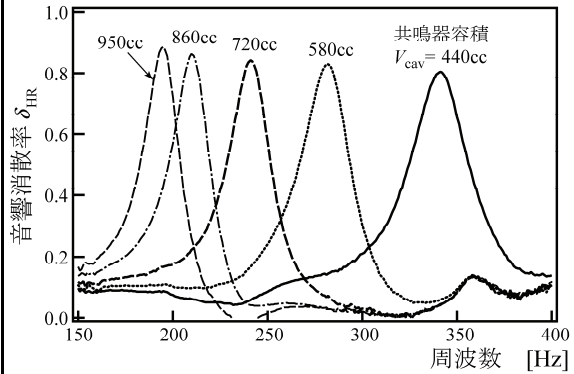


図5 反動的共鳴透過周波数(図4の310Hz)における音圧分布[dB]

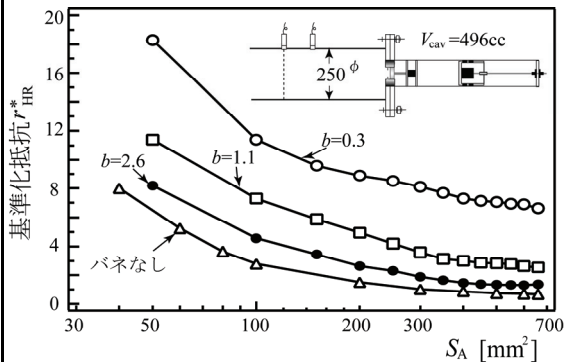
(2) 共鳴器チューナー単体特性

共鳴器容積, ネック部抵抗, 開口面積制御機能付き共鳴器チューナー単体(C方式)について, 直管ダクト(内径250φ, 長さ1.5m)の終端に共鳴器チューナーを取付け, a) 共鳴周波数 f_{res} および容積 V_{cav} と音響消散率 δ_{HR} との関係, b) 絞り面積 S_A およびバネ板間隙 b と基準化抵抗 r_{HR} との関係についてそれぞれ調べた。その結果を図6に示す。容積制御により十分な共鳴周波数の変化幅が得られている。また, バネ板間隙 b を一定とした時の

開口面積 S_A による基準化抵抗 r_{HR}^* の変化幅は大きい。同一断面上に同一共鳴器チューナーを複数配置するとき r_{HR}^* はその数に反比例することを考慮すれば十分な変化幅を持つといえる。同一 S_A における抵抗 r_{HR} についてもバネ板間隙 b の調整により実用上十分な変化幅を持つことがわかる。すなわち, このネック部機構を用いることにより δ_{HR} と Q の広範囲な調整ができる見通しが得られた。



a) 共鳴器容積制御による共鳴周波数の変化幅 ($b=2.6\text{mm}$, $S_A=660\text{mm}^2$, 250Hz用の場合)



b) 絞り面積, バネ板間隙と基準化抵抗の関係

図6 共鳴器チューナーの音響特性

(3) 計測・パラメータ調整プログラム

開発した共鳴器チューナーのパラメータは透過音や消散率にあわせて調整する必要がある。透過音スペクトルの計測とステップモータ制御を別々に行うプログラムはあるが, 調整の自動化を目指すためには両方の機能を有したプログラムが不可欠となる。ここでは透過音スペクトルと消散率をモニタリングし, 共鳴器パラメータの調整用のステップモータを制御するプログラムを開発した。開発環境は次のとおりである。主開発マシン(マザーボードに計測用A/Dボードとステップモータ制御用モーションコントロールボード3台設置, CPU:Pentium4 2.8GHz, メモリ2GB) OS:WindowsXP, 開発言語はMicrosoft Visual C++ 2005である。図7にプログラム使用時の画面を示す。4マイクロホン手法による透過波スペクトルを分離検出し, ダイアログ上部に透過波スペクトルのグラフを, 下

部に消散率のグラフを表示する。また共鳴器パラメータを調整するモータのステップ数をダイアログ右側のスタティックテキストに制御した分だけ表示させるよう設定した。このプログラムを実験に用いて調整作業を行う。

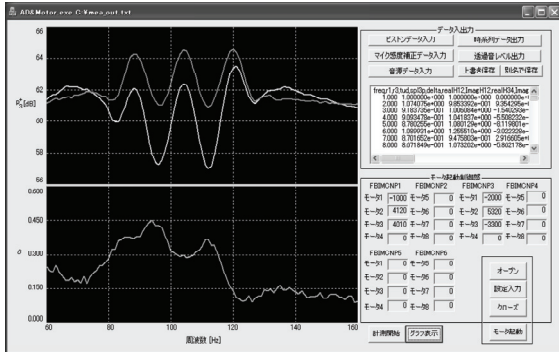
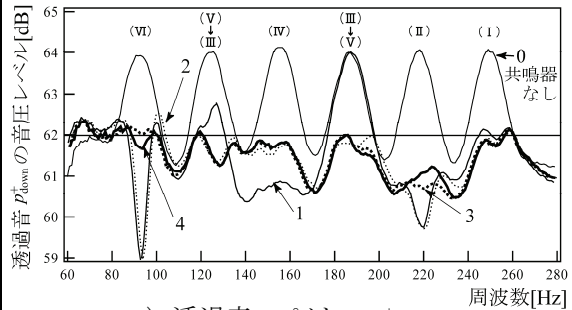


図7 透過音, 消散率の計測およびモータ制御画面

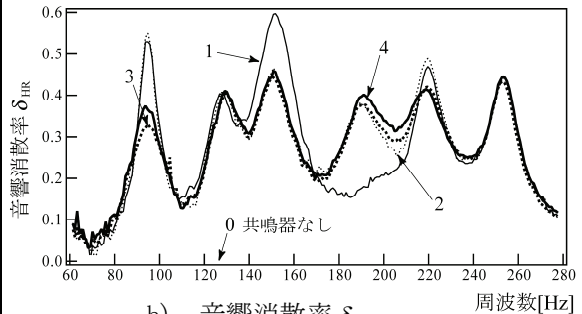
(4) 共鳴器チューナー列による透過騒音の低減実験結果

前項3の(3)で開発・試作した共鳴器チューナー(C方式, 共鳴器6体, ステップモータ18台)をサイドブランチ配置でダクトに取り付けチューニング実験を行った。その実験装置を図8に示す。表1および図9は, 周波数90Hz, 125Hz, 150Hz, 190Hz, 220Hz及び250Hz付近に6つの卓越ピークをもつ透過音スペクトル p_{down}^+ を62dB以下にすることを目標として, 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と透過音スペクトルおよび音響消散率である。試行1は音源側からダクト下流に向けて高い周波数から低い周波数に対応した共鳴器チューナーを配置して測定を行った結果である。HR(III)およびHR(V)

(それぞれ190Hz, 125Hz付近に調整)による透過音の低下が小さい。そこで, 試行2ではHR(III)とHR(V)の配置を交換し測定を行った。その結果目標スペクトル付近に低減したことが確認される。共鳴器チューナーの配置によっては調整感が悪い周波数帯域が存在するが, その場合にはこの帯域を別



a) 透過音スペクトル p_{down}^+



b) 音響消散率 δ_{HR}

図9 共鳴器チューナーによる調整

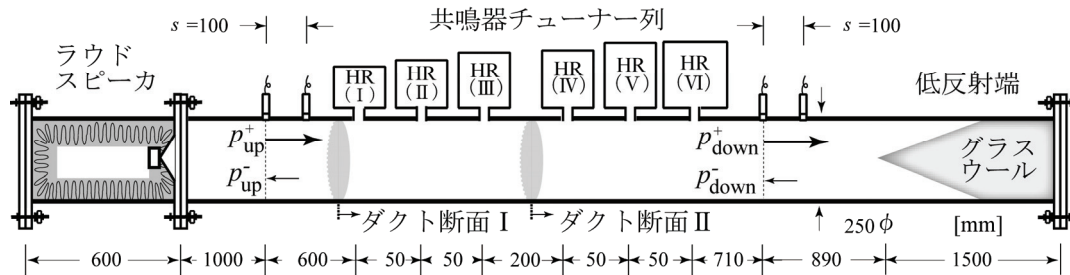
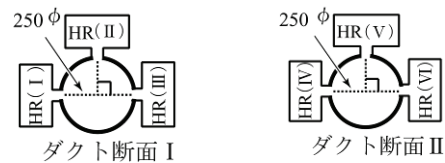


図8 実験装置

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	共鳴器チューナー (I)						共鳴器チューナー (II)						共鳴器チューナー (III)											
	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q			
0	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											
1	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											
2	255	400	2.6	660	1.4	0.44	12.0	220	630	2.6	660	1.4	0.46	9.2	190	890	2.6	660	1.4	0.41	6.4	—	—	
3						0.44	12.0						2.0	0.42						7.3	0.41			6.4
4						0.44	12.0						1.5	0.41						7.2	0.41			6.4
試行	共鳴器チューナー (IV)						共鳴器チューナー (V)						共鳴器チューナー (VI)											
	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q	f_{res} (Hz)	V_{cav} (cc)	b (mm)	S_A (mm ²)	r_{HR}^*	δ	Q			
0	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											
1	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											
2	150	2200	2.6	660	1.4	0.59	6.5	127	1300	2.6	660	1.4	0.41	9.2	90	2200	2.6	660	1.4	0.54	6.6	0.54	6.6	
3						0.45	5.0						0.39	7.9						0.34	6.4			
4						0.45	5.0						0.39	7.3						0.34	6.4			
4	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											
4	共鳴器なし						共鳴器なし						共鳴器なし											

の位置のチューナーにより調整することで制御可能になることを確認した。試行 3, 4 はそれぞれバネ板間隙間 b , ネック開口面積 S_A の調整による音響消散率 δ_{HR} と共鳴の鋭さ Q 制御の結果であり, その有効性も確認した。以上の結果はチューニング方式 C すなわち, 共鳴器の容積 V_{cav} , ネック開口面積 S_A および比音響抵抗 r_{HR} を制御パラメータとする共鳴器特性 (共鳴周波数 f_{res} , 音響消散率 δ_{HR} および共鳴の鋭さ Q) 調整手法の有効性を示すものである。

今後の展望としては, 現場のダクトシステムにおいて, 各共鳴器の最適パラメータの自動同定を行い, このパラメータにより構成した共鳴器列の実装を実現したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 寺尾道仁, ダクト系共鳴器調整用チューニング装置の開発, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 2009 年 3 月 17 日, 東京都.
- 2) 寺尾道仁, ダクト系共鳴器チューニング装置の開発, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 2008 年 9 月 26 日, 東京都.
- 3) 寺尾道仁, 通気ダクト系共鳴器チューニング装置に関する検討ー共鳴の鋭さの制御ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2008 年 9 月 18 日, 東広島市.
- 4) 寺尾道仁, ダクト系共鳴器チューニング装置の開発ーネック長による制御ー, 日本音響学会春季研究発表会, 2008 年 3 月 18 日, 習志野市.
- 5) 寺尾道仁, 共鳴器調整ツールによるダクト系騒音制御, 日本音響学会 2007 年秋季研究発表会, 2007 年 9 月 20 日, 甲府市.
- 6) 寺尾道仁, Prototype test of a resistance control device for Helmholtz resonators, Inter-Noise 2007, 2007 年 8 月 28 日, Istanbul.
- 7) 寺尾道仁, 共鳴器音響特性調整用抵抗可変機構の開発, 日本音響学会春季講演論文集, 2007 年 3 月 14 日, 東京都.

[その他]

<http://terawww.arch.kanagawa-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺尾 道仁 (TERAO MICHIHITO)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 40013198

(2) 研究分担者

関根 秀久 (SEKINE HIDEHISA)

神奈川大学・工学部・教務技術職員

研究者番号: 60409943