

24 時間換気給気口用サイレンサー 「T-Silent® Sleeve - 静換気 - 」の開発

富高 隆*¹・清水 悟*²・畠山 正樹*³

Keywords : 24-hour ventilation air supply port, air supply sleeve, silencer, resonator, zeolite

24 時間換気給気口, 給気スリーブ, サイレンサー, 共鳴器, ゼオライト

1. はじめに

タワーマンションをはじめとする、比較的利便性の高い場所に建設される集合住宅では、道路交通騒音や鉄道騒音に代表される外部騒音の居室内への侵入に対して、要求性能に応じた騒音対策を講じることが必要となる。外部騒音の居室への主な侵入経路であるガラス・サッシについては、外部騒音の程度に応じたガラス厚の選定や二重サッシの採用等による騒音対策がなされている。一方、別の外部騒音侵入経路として、外壁に設置される 24 時間換気給気口が挙げられる。多くの集合住宅で採用されている第 3 種換気方式の場合、図-1 に示すように居室の大きさに応じてφ100 やφ150 の径を有する給気口が外壁に設けられる。給気スリーブ両端部には室外側にはベントキャップ、室内側にはレジスターが設置される。外部騒音対策が必要な場合は、外壁側に防音ベントキャップを設置することが一般的である。防音ベントキャップとは、ベントキャップの内部に騒音低減に寄与する吸音材が組み込まれたものであり、一般ベントキャップと比較して寸法が大きくなるため、意匠性を損ないやすく、かつコストも高くなるという課題が存在していた。

そこで、24 時間換気給気口における外部騒音対策方法として、給気口の外壁側ではなく給気スリーブの内部に設置可能なサイレンサー「T-Silent® Sleeve - 静換気 (しずかんき) - 」を開発した。本報では、給気スリーブの遮音特性を示すとともに、開発したサイレンサーの遮音性能および通気量測定結果を報告する。

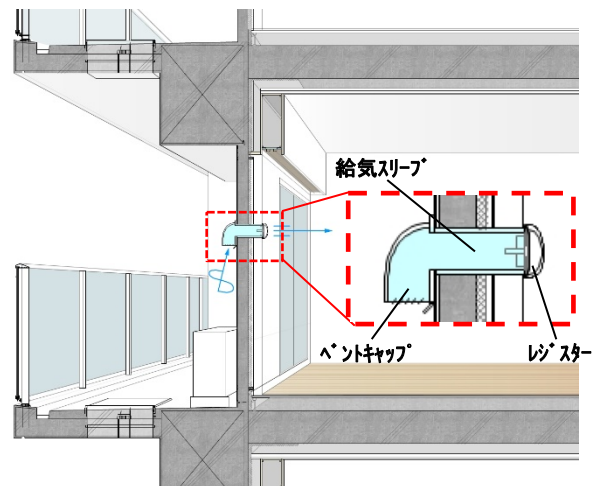


図-1 24時間換気用給気口

Fig.1 Air supply port for 24-hour ventilation

2. スリーブの遮音特性と設計方針

2.1 スリーブ単体の遮音性能

24 時間換気給気口として一般的に用いられるφ100 およびφ150のスリーブ単体の遮音性能を把握することを目的として、残響室でスリーブを対象として単位面積基準化音響透過損失¹⁾を測定した。スリーブ長さは300 mm である。

測定結果を図-2 に示す。スリーブ長に対応する軸方向の1次モードの共鳴透過²⁾により、φ100, φ150ともに500 Hz 帯域(oct.band)で遮音性能が大幅に低下していることがわかる。

*1 技術センター 先進技術開発部 AI連携技術開発室

*2 設計本部 建築設計第四部

*3 (株) みやちゅう

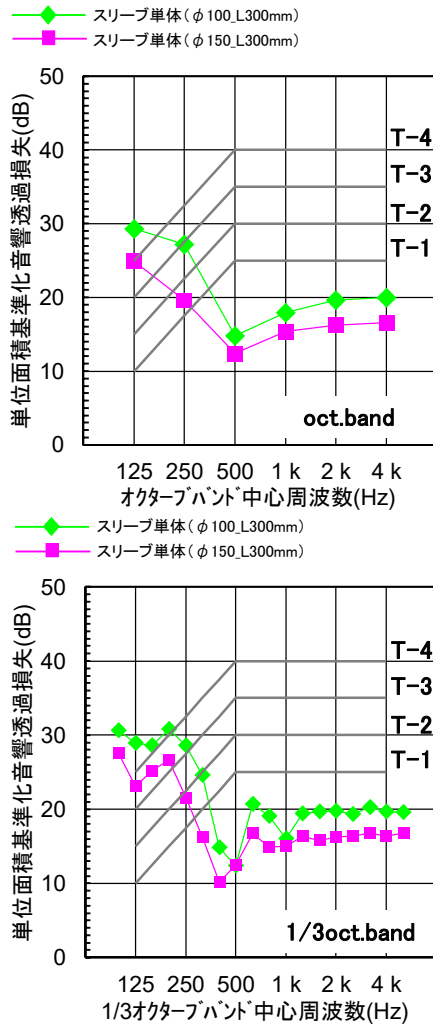


図-2 スリーブ単体の遮音性能
Fig.2 Sound insulation of single sleeve

ここで、防音バントキャップの中でも比較的高い遮音性能である「φ100：T-2 等級相当」，「φ150：T-1 等級相当」を遮音性能目標値と設定する。スリーブ単体の遮音性能は 500 Hz 帯域 (oct.band) において、目標値を φ100：15 dB 程度，φ150：13 dB 程度下回っている。また 500 Hz よりも高い周波数帯域でも，φ100：10～13 dB 程度，φ150：8～9 dB 程度，目標値を下回っている。この結果より，遮音性能目標値を確保するためには，500 Hz より高い周波数帯域での遮音性能向上が必須であり，特に 500 Hz 帯域では大幅な遮音性能の改善が必要であることが明らかとなった。

2.2 サイレンサーの設計方針

一般的な外壁厚さから想定すると，案件毎にバラツキはあるものの，給気スリーブの有効長さとして 170 mm 程度を遮音性能向上のために利用できると考えられた。そこで，給気スリーブ内 170 mm に納まるサイレンサーを開発することとした。遮音性能目標値を達成

するためには，500 Hz 以上の広い周波数帯域で遮音性能を向上させる必要があることから，サイレンサーには以下に示す 3 つの吸音構造を組み込むこととした。3 つの吸音構造が組み込まれたサイレンサーの構成を図-3 に示す。

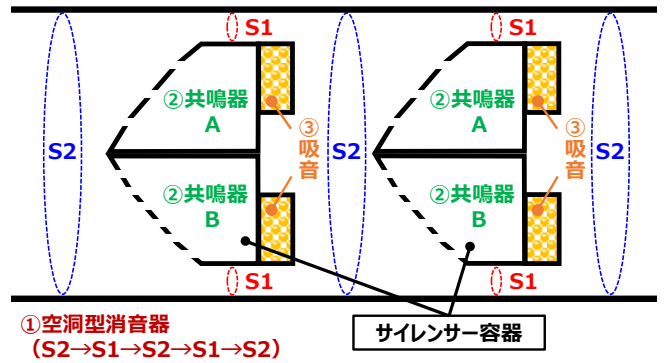


図-3 サイレンサーの構成
Fig.3 Composition of silencer

①空洞型消音器

空洞型消音器とは，図-3 に示すとおり流路の断面積を変化 ($S_1 \rightarrow S_2$ ， $S_2 \rightarrow S_1$) させることで，音響インピーダンスの不連続部を形成し，その部分で生じる音波の反射現象等により騒音低減を図るものである。自動車エンジンからの排気騒音を低減する目的で設置されるマフラーにはこの原理が用いられている。本検討では，スリーブ内にサイレンサー容器を一定の間隔をあけて 2 つ並べることで，流路の断面積変化を実現し，広い周波数帯域に対する騒音低減を目指すこととした。

ここで，拡張比： $m = S_2 / S_1$ ，波数 [m]： $k = 2\pi f / c$ とすると，挿入損失： R は 1 段拡張型 (図-4(a)) の場合は (1) 式，2 段拡張型 (図-4(b)) の場合は (2) 式で算出される³⁾。図-5 に挿入損失計算結果 (φ100) を示す。計算では，本検討におけるサイレンサー容器の寸法を考慮して， $l = 0.07$ m， $2l_0 = 0.03$ m， $m = 5.6$ としている。1 段拡張型よりも 2 段拡張型の挿入損失： R の方が大きくなることが予測される。一方で，大幅な遮音性能の改善が必要である 500 Hz 帯域では，空洞型消音器だけでは遮音性能目標値の達成は難しいことが想定される。さらに 1kHz より高い周波数帯域では，拡張部寸法： l と波長との関係から挿入損失： R が複数の周波数において大きく落ち込むことが想定されるため，遮音性能目標値を満足するためには，空洞型消音器とは別の騒音低減要素を組み込むことが必要であると考えられた。

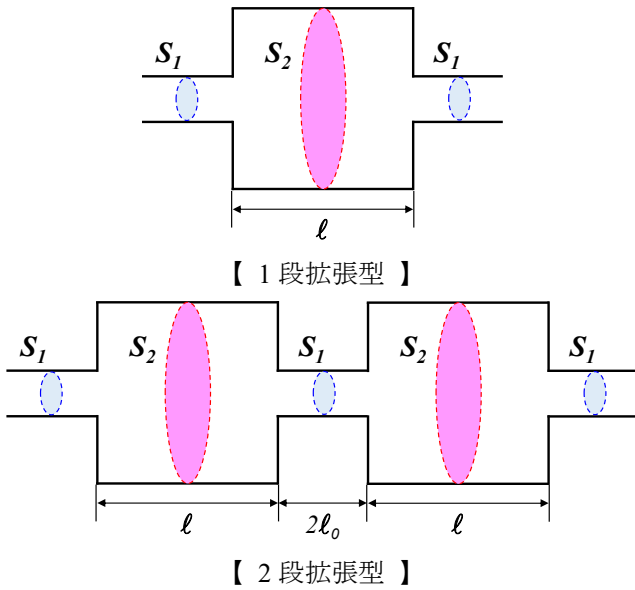


図-4 空洞型消音器 (1段/2段拡張型)
Fig.4 Expansion-chamber muffler (1step/2step expansion type)

<挿入損失 (1段拡張型) >

$$R = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right\} \quad \dots (1)$$

<挿入損失 (2段拡張型) >

$$R = 20 \log_{10} \frac{1}{16m^2} \left\{ 4m(m+1)^2 \cos 2k(l+l_0) - 4m(m-1)^2 \cos 2k(l-l_0) + i \{ 2(m^2+1)(m+1)^2 \sin 2k(l+l_0) - 2(m^2+1)(m-1)^2 \sin 2k(l-l_0) - 4(m^2-1)^2 \sin 2kl_0 \} \right\} \quad \dots (2)$$

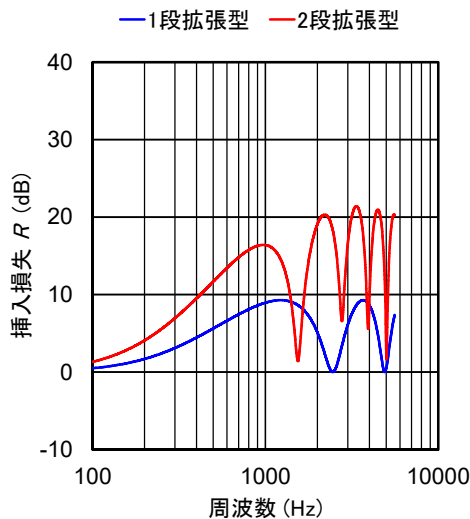


図-5 挿入損失計算結果
Fig.5 Insertion loss calculation result

②共鳴器

500 Hz 帯域の更なる騒音低減を可能とする吸音構造

として、サイレンサー容器前部に穴を設け容器空洞部とつなげることにより、共鳴器を構成することとした。共鳴器は、穴径や共鳴器のネック部に相当する板厚、そして背後の空洞部容積を調整することにより、共鳴周波数を特定の周波数にチューニングすることが可能である。共鳴器ネック部の空気が「質量」、共鳴器空洞部が「バネ」として作用するため、共鳴周波数付近では、共鳴器ネック部の空気が激しく振動し、音のエネルギーの一部が熱エネルギーに変換されることにより吸音効果が生じる。

③吸音

空洞型消音器では、高い周波数帯域において挿入損失：R が落ち込む可能性が予測されたため、サイレンサー容器後部に吸音材用空洞部を構成し、吸音効果を発揮できるよう容器表面には多数の穴を設けた。吸音材には、調湿や脱臭効果を有する無機系粒状体ゼオライトを採用した。ゼオライトは、サイレンサー容器後部の内側に通気性を有する不織布を挟んで封入した。

ここで、上記①～③の各吸音構造と制御対象周波数の関係を表-1 に示す。

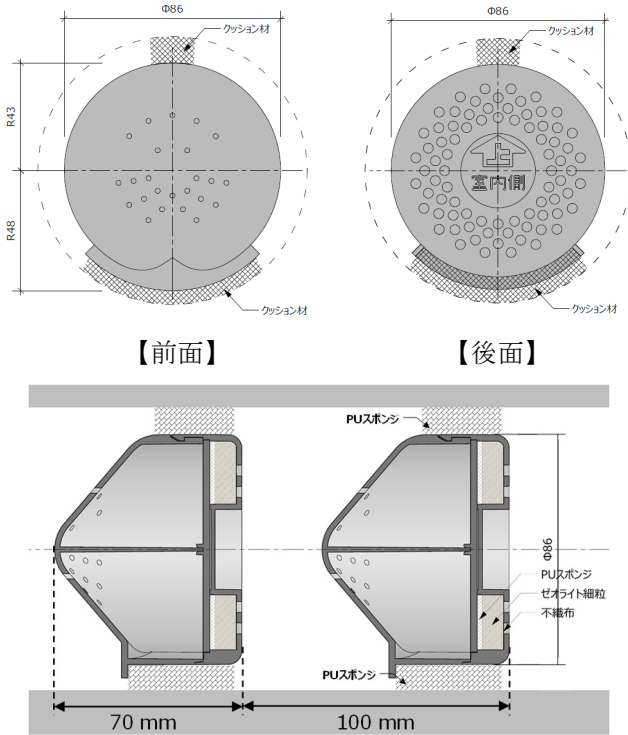
表-1 吸音構造と制御対象周波数
Table 1 Sound absorbing structure and controlled frequency

吸音構造	制御対象周波数 (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
①空洞型消音機	[Shaded area from 125 to 4000 Hz]					
②共鳴器	[Shaded area around 500 Hz]					
③吸音	[Shaded area from 1000 to 4000 Hz]					

低 [Shaded gradient] 高
期待する低減効果

2.3 サイレンサー容器形状

サイレンサーの設置場所は 24 時間換気給気口であり、通気量を確保することが大前提となる。そこで、サイレンサー容器形状を決定するにあたり、3D プリンターで製作したモックアップを用いた通気量試験による検討を繰り返した結果、図-6 に示すようなサイレンサー容器形状 (φ100 用) に決定した。サイレンサー容器の代表寸法は各スリーブ径よりひと回り小さい径 (φ100 : 86 mm, φ150 : 130 mm), 軸方向長さ 70 mm (φ100, φ150 共通) とし、容器前面側は円錐形状で容器外周側面とスリーブ管壁との間を空気が流れる形状とした。ただし、容器上部および下部の一部に容器の転



【サイレンサー容器内部断面（スリーブ内設置状況）】

図-6 サイレンサー立断面（φ100）
Fig.6 Vertical section of silencer（φ100）

び止めや止水機能を備えたスポンジを設けた箇所は、空気が流れにくくなっている。

3. サイレンサーの遮音性能に関する検討

3.1 空洞型消音器による低減効果

①空洞型消音器のみの効果を把握するため、サイレンサー容器の全ての穴を塞ぎ、②共鳴器（前面側）および③吸音（後面側）による効果を排除したサイレンサーの単位面積基準化音響透過損失の測定結果をスリーブ単体と比較して図-7に示す。

φ100、φ150ともに800 Hz以上の広い周波数帯域で空洞型消音器による大きな低減効果が得られている。一方で、500 Hz帯域に含まれる400～630 Hz帯域の遮音性能はいずれの周波数でも目標性能を10 dB程度下回っている。1つの共鳴器で低減できる周波数帯域は比較的狭いため、2つの共鳴器により400～630 Hz帯域の遮音性能改善を目指すこととした。容器前面側を軸方向に2分割し、前面側上部を400 Hz帯域用共鳴器、前面側下部を630 Hz帯域用共鳴器となるように検討を行った。

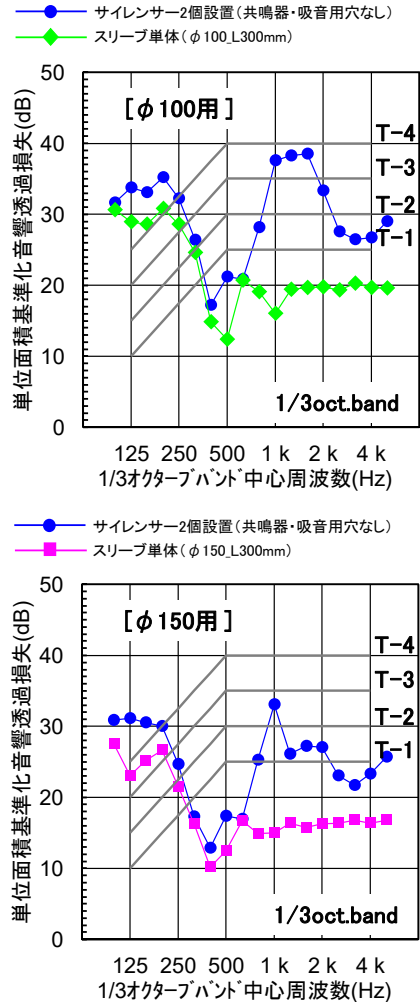


図-7 サイレンサー（共鳴器・吸音用孔なし）遮音性能
Fig.7 Sound insulation of silencer
(No resonator/sound absorption hole)

3.2 共鳴器の検討

共鳴器の検討は、穿孔板の共振周波数⁴⁾を参考として、共鳴器の容積（φ100：86.2 cm³、φ150：206.6 cm³）、孔径（φ100：2 mm、φ150：3 mm）、板厚：2mm（φ100・φ150共通）より400 Hz帯域および630 Hz帯域の共鳴器に必要な穴数をあらかじめ算出し、その後、単位面積基準化音響透過損失における500 Hz帯域の性能が最も改善する穴数の組み合わせを実験的に検討し、表-2に示す仕様を抽出した。共鳴器の性能検証（共鳴周波数および共鳴による低減効果）は、スリーブにサイレンサーを設置した状態で全帯域雑音を発生し、スリーブ両端部近傍で測定された1/12oct.band音圧レベル差によって確認した。

ここで、穴を設ける前と表-2に示す最終的に選定された穴数を設けた共鳴器のスリーブ両端部における1/12oct.band音圧レベル差（表示する周波数範囲：300

～900 Hz) を図-8 に示す。φ100 およびφ150 とともに狙った 2 つの周波数帯域に共鳴周波数が確認されており、穴なしと比較して遮音性能が大幅に改善している。

表-2 共鳴器の穴数条件と共鳴周波数実測値
Table 2 Condition of number of holes in resonator and measured value of resonance frequency

共鳴器仕様	φ100用		φ150用	
	穴数	共鳴周波数	穴数	共鳴周波数
400Hz帯域用	7	410 Hz	10	434 Hz
630Hz帯域用	17	610 Hz	20	580 Hz

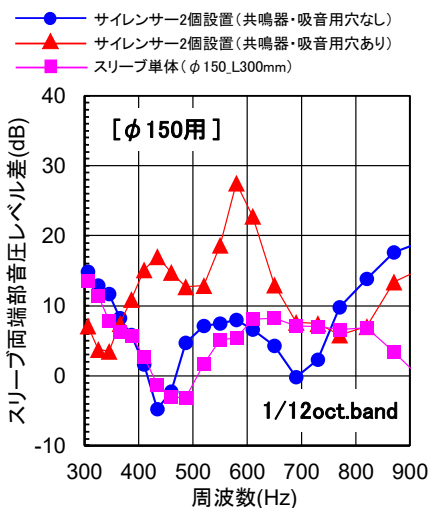
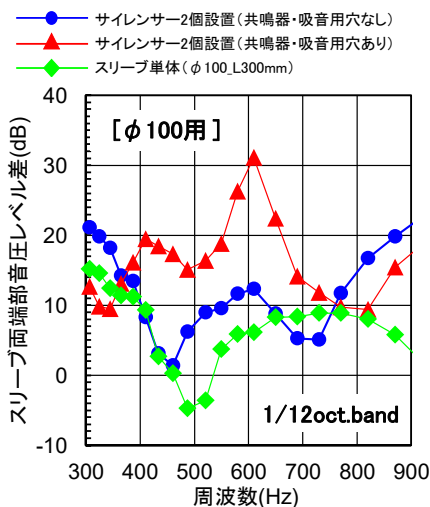


図-8 スリーブ両端部音圧レベル差測定結果
Fig.8 Sound pressure level difference measurement results at both ends of the sleeve

3.3 サイレンサーの遮音性能

表-2 に示す穴数条件により容器前面側上部を 400 Hz 帯域用共鳴器、前面側下部を 630 Hz 帯域用共鳴器とし、容器後面側には吸音材としてゼオライトを封入した最終仕様におけるサイレンサーをスリーブ内に容器 2 個

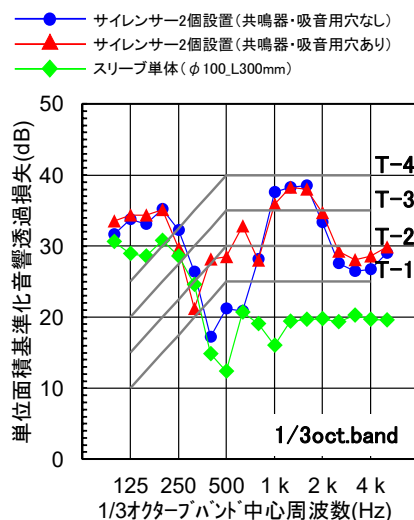
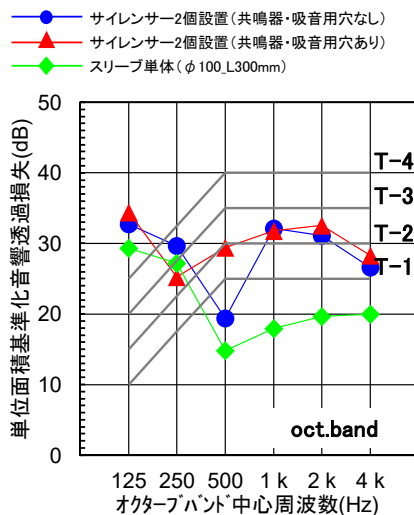


図-9 サイレンサー (φ100 スリーブ内 2 個) 遮音性能
Fig.9 Sound insulation of silencer (2 installed in φ100 sleeve)

設置した場合の単位面積基準化音響透過損失を図-9 (φ100)、図-10 (φ150) に示す。

図-2 に示したスリーブ単体や図-7 の空洞型消音器のみにあって遮音性能目標値に対して大きく下回っていた 500 Hz 帯域では、φ100、φ150 とともに共鳴器による低減効果が発揮され、10 dB 程度の大幅な遮音性能向上が確認された。また 2 kHz 帯域以上では、ゼオライトによる吸音効果が発揮され、2～3 dB 程度の遮音性能向上が確認された。その結果、サイレンサーの最終的な遮音性能は「φ100 : T-2 等級相当」、「φ150 : T-1 等級相当」となり、当初掲げた遮音性能目標値を達成した。

次に、スリーブ内にサイレンサーを 1 個のみ設置した場合の単位面積基準化音響透過損失を図-11 に示す。サイレンサー 2 個設置時と比較して低減効果は小さくなるものの、サイレンサー 1 個のみでもスリーブ単体より遮音性能が向上することが確認されており、φ100 につ

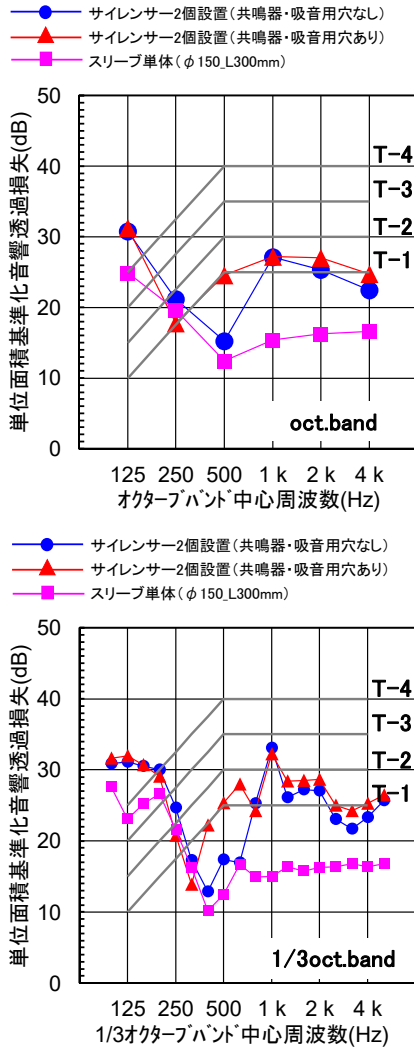


図-10 サイレンサー（φ150スリーブ内2個）遮音性能
Fig.10 Sound insulation of silencer
(2 installed in φ150 sleeve)

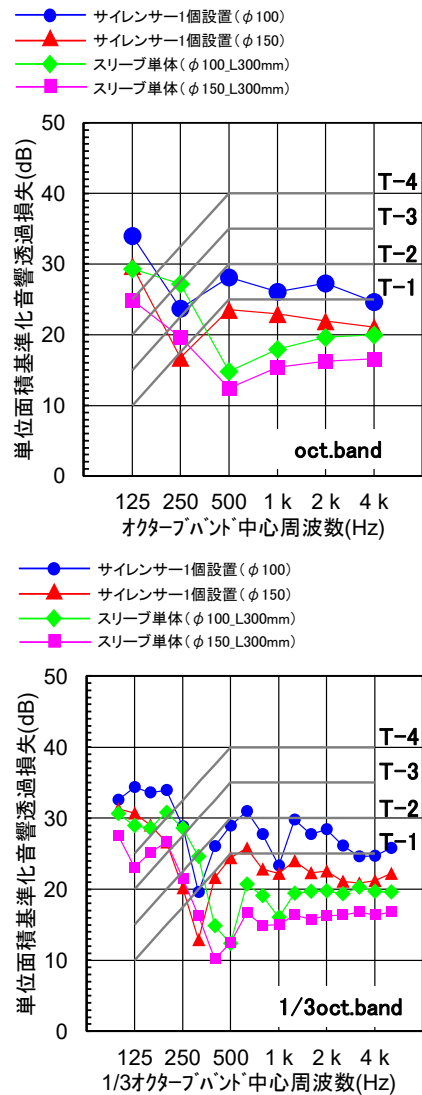


図-11 サイレンサー（スリーブ内1個）遮音性能
Fig.11 Sound insulation of silencer
(1 installed in sleeve)

いては「T-1 等級相当」を満足している。

建物周辺に存在する外部騒音の程度や、室内騒音の要求性能に応じて、サイレンサーの設置個数を変化させることにより遮音性能を調整出来るようになるため、拡張性が高まり、適用範囲を広げることが可能となる。

4. サイレンサーの通気量試験

サイレンサー設置時の通気量試験を行い、風量-静圧特性を求めた。通気量試験では、補助送風機の回転数を変化させながら風量と静圧を測定した。図-12 に試験装置概要を示す。風量-静圧特性を求める手順は以下の通りである。

(1) 試験体を補助ダクト内に設置した状態で、静圧測定点間の風量-静圧特性曲線を求める。この場合、静圧測定点間の差圧は、試験体と補助ダクトの静圧損失

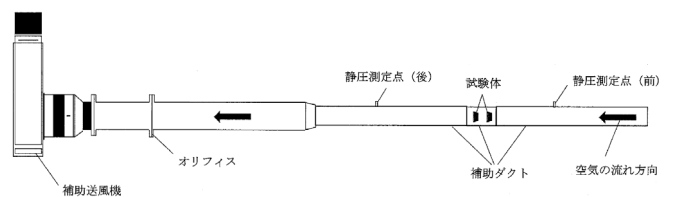


図-12 通気量試験装置
Fig.12 Airflow test device

の合計である。

(2) 試験体を補助ダクトに設置していない状態で、静圧測定点間の風量-静圧特性曲線を求める。この場合、静圧測定点間の差圧は、補助ダクトのみの静圧損失である。

(3) 上記(1)と(2)の差分より、試験体の風量-静圧特性を求める。

サイレンサーの通気量試験は、φ100×2個、φ100×1個、φ150×2個、φ150×1個の計4試験体を試験対象とした。測定結果を図-13に示す。測定結果には参考として、開発したサイレンサーと同等の遮音性能を有するA社製防音ベントキャップのカタログに記載された風量-静圧特性を比較して示している。

開発したサイレンサーは、スリーブ内への設置数が2個よりも1個の静圧損失の方が小さいことがわかる。また、防音ベントキャップ既製品と比較すると、いずれの条件においても開発したサイレンサーの静圧損失の方が小さくなっており、通気量性能が優れていることが示された。

5. まとめ

24時間換気用給気スリーブの内部に設置可能なサイレンサーに関する検討を行い、一般的な防音ベントキャップと同等の遮音性能「φ100：T-2等級相当」、「φ150：T-1等級相当」を達成した。また、通気量についても、防音ベントキャップ既製品と比較して静圧損失は小さくなっており、意匠性を損なわず高い遮音性能と通気量を確保できるサイレンサーを開発できたといえる。今後は、外部騒音の低減が要求される集合住宅やビジネスホテル、リニューアル案件への適用に向けて積極的に提案を行う予定である。

謝辞

(一財)ベターリビング 高橋央氏、菅哲俊氏には、遮音測定および通気量試験に際して多大なるご協力を頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) JIS A 1428:2006：実験室における小形建築部品の空気音遮断性能の測定方法
- 2) 大内孝子, 佐久翔一, 今井章久：スリーブ内の空洞による自然換気口の遮音性能の改善, 日本音響学会誌 68 巻 9 号, pp.455-460, 2012.09.
- 3) 大中逸雄：機械騒音の軽減について (その 2), 日本船用機関学会誌 4 巻 4 号, pp.13-14, 1969.06.
- 4) 前川純一, 森本雅之, 阪本公博：建築・環境音響学 (第 2 版), pp.86, 2000.

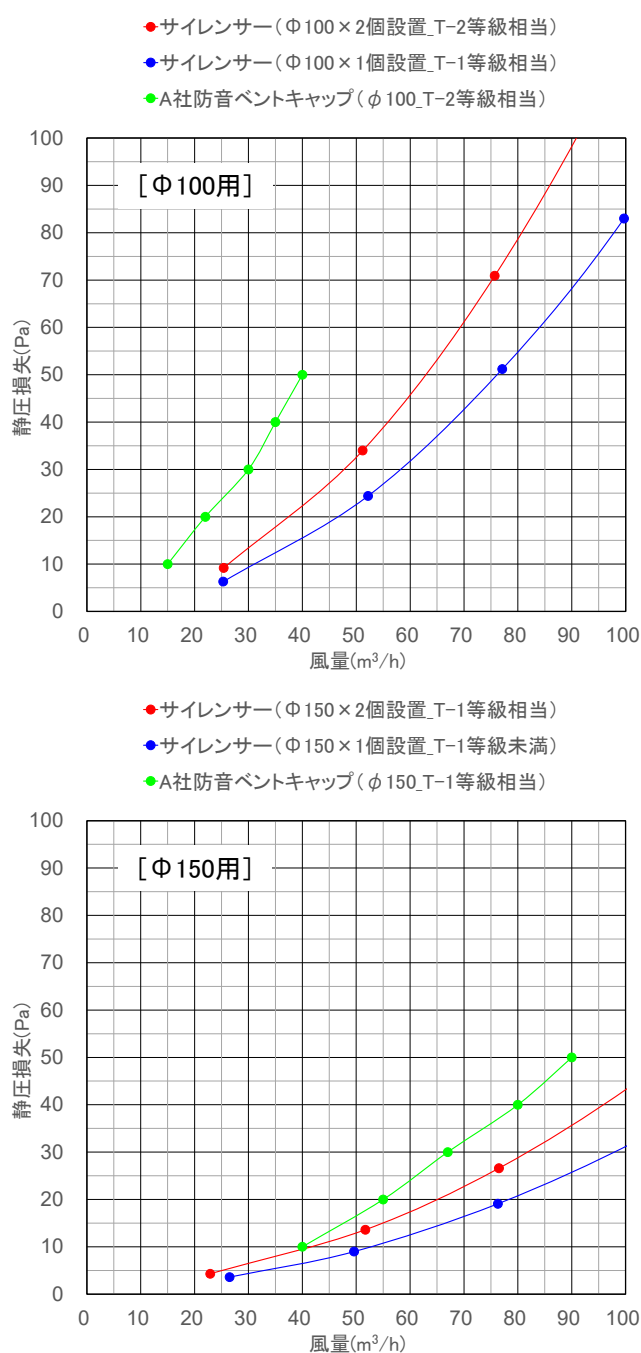


図-13 通気量試験結果
Fig.13 Airflow test result