

住居内騒音暴露量軽減を目的とした換気性能を有する環境配慮型防音窓の開発

所属： 熊本高等専門学校 制御情報システム工学科

助成対象者：西村 勇也

共同研究者：Thu Lan Nguyen, 西村 壮平, 田中 裕一

概要

近年、化石エネルギー依存型の社会・経済構造の変革が迫られ、我が国では循環型社会形成のために環境負荷低減政策の基盤が確立されている。そこで我々は、東南アジア諸国で深刻な社会問題となっている道路交通騒音に対して、居住環境改善によるQOL (Quality of Life) の向上を目的とした「換気性能を有する環境配慮型防音窓の開発」を行っている。防音窓は採光部と防音ユニットに大別され、本研究の最重要部である防音ユニットは遮音性能と換気性能を兼備していることが最大の特徴である。遮音は電力を必要とするアクティブ制御手法では無く、自動車マフラーの消音原理と同様に音の直進性を逆手に取った消音チャンバーの構造を採用し、吸音材を併用することにより高い遮音性能を実現する。つまり、本研究では窓従来の換気性能を維持しつつ、かつ電力を使わず騒音を低減できるという点に特徴があり、近年増加する騒音対策および建物の高气密化や新型インフルエンザ感染対策等に伴い重要性が指摘されている換気対策のため必要性は非常に高く、早期実用化が望まれている。

abstract

In recent years, there has been a need to change the social and economic structure that is dependent on fossil energy, and the infrastructure for environmental load reduction policies has been established in Japan for the formation of a recycling-oriented

society. In order to improve the quality of life (QOL) by improving the living environment against road traffic noise, which has become a serious social problem in Southeast Asian countries, we are developing environmentally considerate soundproof windows with ventilation performance. The soundproofing window can be divided into two parts: the lighting part and the soundproofing unit. The soundproofing unit, which is the most important part of this study, has the most important feature of having both sound reduction performance and ventilation performance. The sound reduction is not done by an active control method that requires electric power, but by adopting the structure of a sound reduction chamber that is based on the linearity of sound, similar to the sound reduction mechanism of automobile mufflers, and by using sound absorbing materials to achieve high sound reduction performance. In this study, it is possible to reduce the noise without using electricity while keeping the ventilation performance of windows. In recent years, the importance of ventilation systems has been pointed out due to the increasing noise and new types of influenza infection, and the need for early practical use of these systems is very high.

研究内容

1. 背景

ベトナム社会主義国を含む東南アジアの発展途上国では熱帯地域に属しているものの、所得格差や電力事情の一因もあり各家庭のエアコン普及率が極めて低い。このため日中も窓を解放し、室内の空気を循環させ生活をしている。しかし、近年急激な人口増と経済成長に伴い自動車・バイクの保有台数が爆発的に増加している。さらに慢性的な交通渋滞により無秩序に発せられるクラクションの鳴動音も重畳し、騒音が深刻な社会問題となっている。図1はベトナムの首都ハノイの通勤時間帯の道路状況と、主要幹線道路の騒音レベルを24時間計測した結果^[1]である。午前7時から午後10時まで平均75dBという非常に高い騒音レベルに曝されている様子が分かる。この劣悪な騒音が窓を通じて各家庭の住居

内に伝搬するため生活の質が著しく低下している。

2. 目的

本研究ではこの問題に着目し、サステナブル建築による居住環境の向上を目的とした「換気性能を有する環境配慮型防音窓の開発」に着手している。この防音窓は図2に示すような採光のための単層ガラス部と換気用の開口部から成るガラリ状であり、開口部には”防音ユニット”と称した騒音対策用の筐体により構成されている。防音ユニットにより屋内の外来交通騒音を低減する防音機能を備え、これにより従来東南アジアで多用されている木製観音開き窓使用時の居住環境と遜色ない換気を得ることが可能である。

ここで防音ユニットの体積と内部共振の発生には線形な関係があるため、トレードオフの問題を解消するためにはユニット内の音波伝搬を理論解析し、共振発生の関係式から対策を講じる必要がある。つまり、ユニット内部の共振周波数の発生メカニズムを解明するため、三次元波動方程式を基とした防音ユニットの形状に応じた音圧の関係式を得ることが不可欠である。

3. 手法

本研究では数値解析の trial and error による工数を削減すべく、換気口を有する窓の特に防音ユニット形状及び開口位置による減音効果に着目し、理論計算と実験検証を行っている。減音効果は、ユニット内部の共振周波数の発生に注目し、三次元波動方程式を基に解析モデルの境界条件に応じた音圧の関係式を得ている。共振周波数に焦点を当てることにより、筐体の共振による音圧レベル増のメカニズムを理論計算から解明することができるため、騒音の対処療法的対策ではなく、根本的な原因対策が可能となる。つまり、形状やユニット寸法を決定することにより筐体内の共振発生を知ることが可能となり、減音効果である挿入損失を得ることが最大の利点である。

図3に最も簡便な直方体の防音ユニットを例として、筐体内部を伝搬する音圧成分の低減に関する関係式(1)を導出した^[2]。

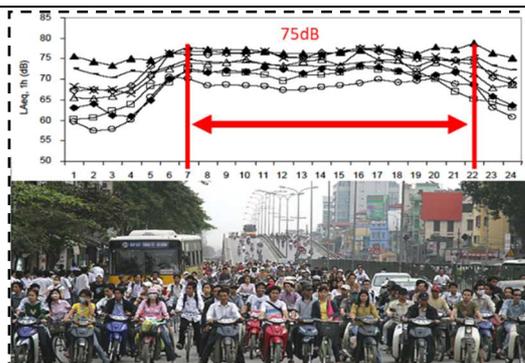


図1 ハノイの道路状況と等価騒音レベル

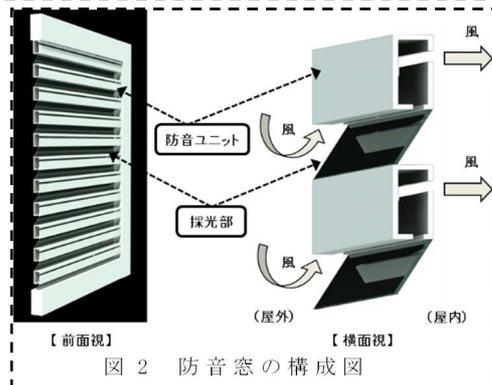


図2 防音窓の構成図

$$P_L = j Z_w \left[-\frac{1}{\sin(kL)} \{ U_0 - U_L \cos(kL) \} + \sum \left\{ \frac{1}{\mu_{m,n} \sinh(\mu_{m,n} L)} U_0 D_{m,n}^a + \frac{\cosh(\mu_{m,n} L)}{\mu_{m,n} \sinh(\mu_{m,n} L)} U_L D_{m,n}^b \right\} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right] \quad (1)$$

上式の第一項は平面波音圧成分，第二項は高調波音圧成分を表している．式中の a, b および L はユニットの寸法であり， U_0 及び U_L は入出孔の開口面積に関する定数である．この音圧の関係式から防音ユニット内の平面波音圧成分および高調波共振周波数の発生メカニズムの関係式を得ることができる．研究結果を図 3(a)(b)に示す．共振周波数とは実験で得られた図 3(b)における \times, \circ, \bullet の記号で示す周波数であり，これらは理論計算から得られた図 3(a)の各曲線がゼロクロスとなる周波数に対応している．ユニット寸法や開口率および入出口の各種パラメータを変更することにより発生する共振周波数は変化するため，限られた寸法の制約の下，如何に多くの共振周波数を低減させるかが必要となる．この

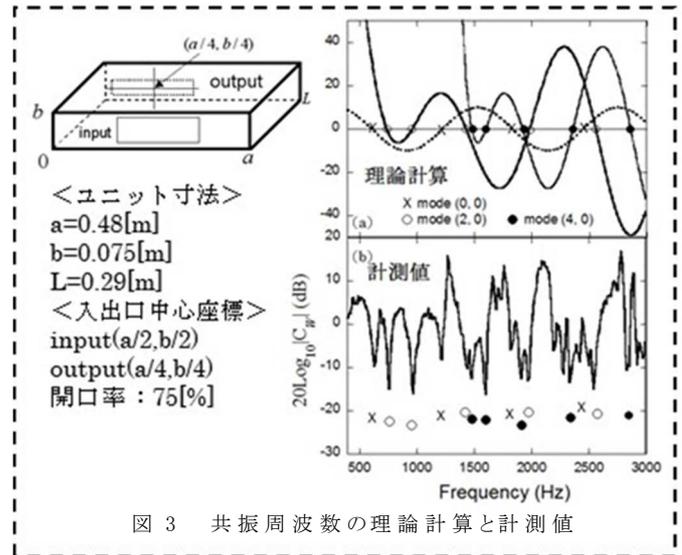


図 3 共振周波数の理論計算と計測値

上記関係式と検証結果により，理論計算による共振発生を防ぐ手法が確立しており，防音効果が飛躍的に向上している．

4. 結果

本助成による防音ユニットもモデルを楕円形状とし，一対の入出孔を持つ図 4 に示すモデルを用いて理論計算及び計測を実施した．楕円筒体内の音圧の一般式 $P(\xi, \eta, z)$ を以下に得た^[3]．

$$P(\xi, \eta, z) = j k \rho c \Phi = j k \rho c \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{H_{2m,i}}{\mu_{2m,i} \sinh \mu_{2m,i} L} U_i + G_{2m,i} U_0 \right) \times \cosh \mu_{2m,i} (L - z) C e_{2m}(\xi, S_{2m,i}) c e_{2m}(\eta, S_{2m,i}) \quad (2)$$

ここで ρ は媒質の密度， U_i は入力側の体積速度， U_0 は出口側の体積速度である．上式より出口側の平均音圧 \bar{P}_0 は以下を得た．

$$\bar{P}_0 = j k \rho c \left[\left(\frac{-Q_{0,0}}{k \sin k L} U_i + R_{0,0} U_0 \right) \frac{\cos k(\ell - L) \sin k(h/2)}{k} + \sum \left(\frac{Q_{2m,i}}{\mu_{2m,i} \sinh \mu_{2m,i} L} U_i + R_{2m,i} U_0 \right) \left(\frac{\cosh \mu_{2m,i}(\ell - L) \sinh \mu_{2m,i}(h/2)}{\mu_{2m,i}} \right) \right] \quad (3)$$

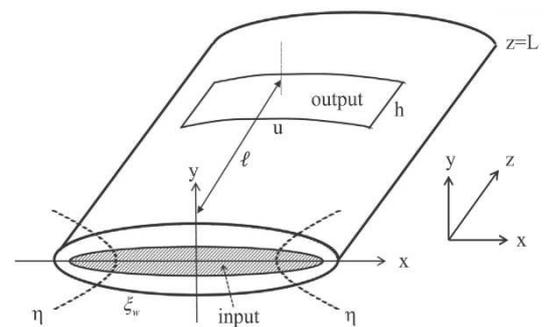


図 4 楕円形ユニット

理論計算の検証並びに楕円形防音ユニットの性能を検討するため JIS A1416 に基づく音響透過損失試験法を用いて実験を行った。図 5 に示されるように 98[m³]の音源拡散室と 179[m³]の受信残響室の間の開口に防音ユニットを取り付けて透過損失の測定を行った。音源室および受信室にそれぞれマイクロフォン 5 本を設置し、これらの平均出力から室内の音圧とした。防音ユニットの性能評価は、ユニットの出力側座標 $l=L$ の際及び座標 $l=L/2$ それぞれの減衰量を比較する。理論計算の結果を図 6、音響透過損失試験による測定結果を図 7 に示す。

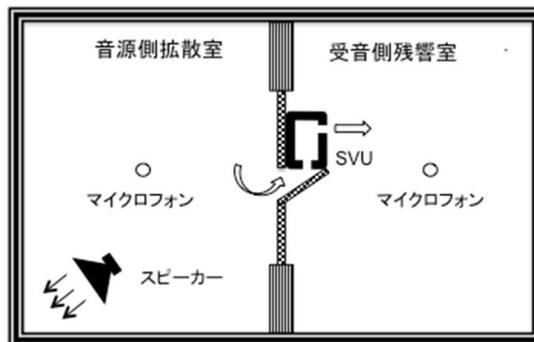


図 5 音響透過損失試験

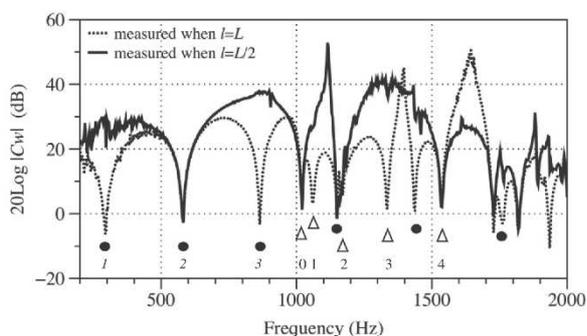


図 6 出力箇所による挿入損失

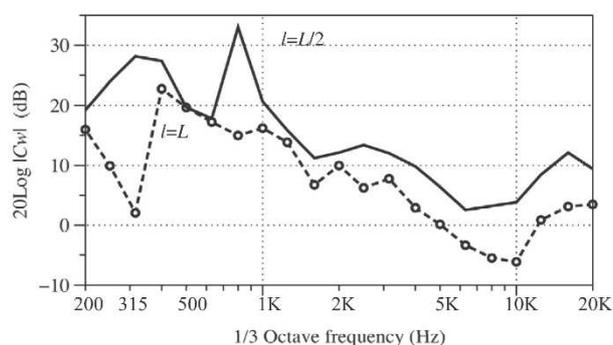


図 7 音響透過損失試験

5. まとめ

防音ユニットの通気機能を生かすために広い面積を有する楕円形の面に出口を設置し、かつ出口の音圧が入口から伝搬してくる直進波成分に直接影響されないよう、入出孔の配置を直行位置とする防音ユニットを提案した。さらに、この防音ユニットに関する理論計算および実験検証結果について述べた。理論計算では波動方程式に基づき、無損失の仮定で出口の平均音圧を求め、次に高次波の音圧成分を低減するために入口および出口の形状や設置について検討を行った。最後に、透過損失の計測法を用いて防音ユニットの性能を実験的に検証した。

本研究で示した計算値や実験値は、防音ユニット内部に吸音材を使用していない。実用的化の段階では吸音材の使用が必要であり、さらなる減衰効果を得るためには自動車マフラーのように仕切り板、穴あき板などの導入が必要と考えられる。これにより 10dB~15dB 程度の減衰量を得ることが可能となる。防音と通気の両者はトレードオフの関係にあるためユニットの設計に当たり適切な注意を払わなければならない。

最後に、この研究は熱帯地域に属する発展途上国における交通騒音の防止対策として考案したが、日本国内のあらゆる通気孔や工場の排気ダクトなどにも適用が期待できる。

引用文献

[1] H. Y. T. Phan, T. Yano, H. A. T. Phan, T. Nishimura, T. Sato, Y.

Hashimoto : Community response to road traffic noise in Hanoi and Ho Chi Minh City, Applied Acoustics, 71, pp. 107-114, 2010.

[2] Y. Nishimura, S. Nishimura, T. Nishimura, T. Yano : Sound propagation in soundproofing casement windows, Applied Acoustics 70, pp. 1160-1167, 2009.

[3] Nishimura Sohei, Nishimura Yuya, Thulan Nguyen,

"Acoustic performance of an elliptical cavity on the application for soundproof ventilation units installed in dwelling walls", Applied Acoustics 168 (2020) 107418,

本助成に関わる成果物

[論文発表]

Nishimura Sohei, Nishimura Yuya, Thulan Nguyen,

"Acoustic performance of an elliptical cavity on the application for soundproof ventilation units installed in dwelling walls", Applied Acoustics 168 (2020) 107418,

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107418>

Yuya Nishimura, Sohei Nishimura,

"Four-Poles Parameter of an Elliptical Cavity Having the Outlet on the Body",

European Journal of Engineering Research and Science, Vol 5, Issue 7, pp. 763-pp. 766,

<http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.7.1998>