

多孔部からの透過音制御のための簡易予測モデルの構築

Construction of Simple Prediction Model for Transmitted Sound Control from Porous Part

精密工学専攻 49 号 宮崎裕太
Yuta Miyazaki

1. はじめに

近年、解析ソフトの高度化によって製品開発速度が向上している。透過音などの解析は振動・音響モードの影響が大きいため、設計完成後に解析および評価をすることが多い。しかしながら、多孔部のような形状は複雑であるため CAD 上でモデリングして解析を行うことは時間コストが大きい。そのため設計プロセスの初期段階で、多孔部のような複雑形状の透過音を予測して設計することは、製品完成前の解析の負担を減らし、効率的な開発につなげることができる。

そこで本研究では、多孔部の透過損失予測に着目し、面積や厚みなどを考慮した様々なパターンでの透過音の数値シミュレーションから要因分析と心理音響評価による影響把握を行う。また、数値シミュレーションの結果を用い、重回帰分析によって、設計初期段階で用いる多孔部透過損失の簡易予測モデルを構築する。

2. 単一の円形開口部における透過損失および傾向分析

多孔部における透過損失を考察するため、本章ではまず、基本的な透過損失の理論と、単一の円形開口部における透過損失の一般的に使用されている理論を説明する。

2.1 透過損失について

音が物体に入射すると、反射、吸収、透過の現象が生じる。透過損失は、入射した音と物体を透過した音との音圧レベル差を示すものであり、式(1)で表すことができる。また、透過率は入射する音響パワーと透過する音響パワーの比で表すことができ、式(2)で求めることができる。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (2)$$

ただし、TL [dB]: 透過損失、 τ [-]: 透過率、 W_i [W]: 入射する音響パワー、 W_t [W]: 透過する音響パワーとする。

2.2 質量則およびコインシデンス効果について⁽¹⁾

無限に大きく均一な材料でできている板の透過損失は、その板の単位面積当たりの質量と音の周波数により求めることができ、その関係を質量則という。質量則は単位面積当たりの質量が大きく、高周波数になるほど透過損失が大きくなる。また板を移動する曲げ波と入射する音の波長が一致すると、透過損失が著しく減少するコインシデンス効果が生じる。20℃の音速におけるコインシデンス効果を考慮した透過損失を式(3)に示す。

$$\begin{aligned} TL &= 20 \log_{10}(mf) - 48 & f < 0.5f_{cr} \\ TL &= 20 \log_{10}(mf) + 10 \log \left[\eta \left(\frac{f}{f_{cr}} - 1 \right) \right] - 44 & f \geq f_{cr} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 m [kg/m²]: 単位面積当たりの質量、 f [Hz]: 周波数、

η [-]: 音響損失係数、コインシデンス効果が発生する周波数は入射角 θ によって、多数存在する。この中で、最も低い周波数を限界コインシデンス周波数 f_{cr} ($\theta = 90^\circ$) とする。

2.3 単一の円形開口部の透過損失理論

本節では、Wilson and Soroka の単一の円形開口部における透過損失理論⁽²⁾を示す。単一の円形開口部が開口部以外に音の透過の無い板に存在する場合に、開口部の両端に質量のないピストンが存在し、ピストンが振動し音を放射するとして透過損失近似解を求めるものであり、単一の円形開口部における透過率を式(4)に示す。

$$\tau = \frac{4\rho^2 c^2 R_0}{(\rho c)^2 [4R_0^2 (\cosh k - X_0 \sinh k)^2 + \{(R_0^2 - X_0^2 + 1) \sinh k + 2X_0 k h\}^2]} \quad (4)$$

$$R_0(x) = \left\{ 1 - \frac{2J_1(x)}{x} \right\} = \frac{x^2}{2 \cdot 4} - \frac{x^4}{2 \cdot 4^2 \cdot 6} + \frac{x^6}{2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} - \dots$$

$$X_0(x) = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{x^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right\}$$

ただし、 ρ [kg/m³]: 空気密度、 c [m/s]: 音速、 k [m⁻¹]: 波数、 h [m]: 開口厚み、 a [m]: 開口半径、 $x = ka$ 、 J_1 : 第一種ベッセル関数とする。

式(1)および式(4)を使用して、単一の円形開口部の透過損失の影響把握を行う。厚み一定で半径を大きくした場合は、単一の円形開口部内の共鳴周波数によるピークは低周波数に移行し、透過損失は周波数領域でフラットな傾向になる。また、半径一定で厚みを増加した場合は、共鳴周波数による透過損失のピークは低周波数に移行し、鋭いピークを持つような傾向になる。

2.4 板に単一の円形開口部が存在する場合の透過損失

板に単一の円形開口部が存在する場合の透過損失は、開口による透過音と板からの透過音の両方に等しく依存するため、両方の経路を同時に検討する必要がある⁽¹⁾。そのため総合透過損失は、2.2 節における質量則およびコインシデンス効果を考慮した板の透過損失と 2.3 節における単一の円形開口部における透過損失の面積重み付けによって計算することができる。総合透過損失を式(5)に示す。

$$\begin{aligned} TL_{total} &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_{total}} \right) \\ &= TL_{panel} + TL_{aperture} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{S_{total}}{S_{panel} 10^{-\frac{TL_{panel}}{10}} + S_{aperture} 10^{-\frac{TL_{aperture}}{10}}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 TL_{total} [dB]: 総合透過損失、 τ_{total} [-]: 総合透過係数、 TL_{panel} [dB]: 板の透過損失、 $TL_{aperture}$ [dB]: 開口部の

透過損失, S_{panel} [m^2]:板の面積, S_{aperture} [m^2]:開口部の面積, $S_{\text{total}} = S_{\text{panel}} + S_{\text{aperture}}$:総面積とする。

3. 総合透過損失の予測値と構造からの透過音計測実験の比較

本章では, 2 章で説明した総合透過損失の予測値が, 実験による構造内部の音響モードを持つ場合と比較し, どのような違いがあるか検討する。

3.1 透過音計測の実験条件

音源の条件を Table 1 に示し, 実験セットアップを Fig. 1 に示す. 計測には完全無響室を使用し, 透過音の計測には無指向性マイクを使用する. 音源は箱の内部にスピーカを設置する. 箱の大きさは一辺が 203 mm の立方体で材料は MDF (Medium Density Fiberboard) を使用する. 評価面の中心に単一の円形開口部を空け, 開口部の中心軸上で箱の一辺と同じ距離の場所にマイクを設置する. 単一の円形開口部は半径 1.6 mm の開口面積 C1 から始め, 半径を 1.6 mm ずつ大きくしていった場合の透過音を評価する. (以下, 単一の円形開口部の大きさを, C1, C2, ... C16 と記す)

3.2 単一の円形開口部の透過音計測実験

マイクによって計測した透過音を周波数分析した音圧レベル (Sound Pressure Level, 以下 SPL と記す) より, 箱内部の音響モードによる多くのピークが確認できる. また, 総合透過損失の傾向と同様に 3000 Hz 付近から大きな透過音の変化を確認できた. 次に, マイクの SPL を 1/6 オクターブバンド分析し, 単一の円形開口部の面積が大きく, 板の面積が小さくなることによる透過音の影響を比較する. 式(6)を用いて C1~C16 の透過音と円形開口部の無い状態の透過音の差分を Fig. 2 に示す.

$$\Delta \text{SPL}_i = \text{SPL}_i - \text{SPL}_{\text{No}} \quad (6)$$

ただし, ΔSPL_i [dB]:透過音の 1/6 オクターブバンドの差分, SPL_i [dB]: 外部マイクの透過音計測 SPL 1/6 オ

クターブバンド値, i :開口部の状態 (C1~C16), SPL_{No} :開口部が無い状態の SPL とする。

3.3 総合透過損失の予測値と実験値の比較

実験と同条件における総合透過損失を, 式(7)を用いて 1/6 オクターブバンド分析した開口部の無い総合透過損失から, C1~C16 の単一の円形開口部を考慮した総合透過損失の差分を求め, Fig. 3 に示す.

$$\Delta \text{TL}_i = \text{TL}_{\text{totalNo}} - \text{TL}_{\text{total}i} \quad (7)$$

ただし, ΔTL_i [dB]:総合透過損失の 1/6 オクターブバンドの差分, $\text{TL}_{\text{total}i}$ [dB]: 総合透過損失の 1/6 オクターブバンド値, i :開口状態 (C1~C16), $\text{TL}_{\text{totalNo}}$:開口部が無い状態の総合透過損失とする。

Fig. 2 と Fig. 3 を比較して, 特に高周波数帯域においては, 構造内部の音響モードによる開口部への入射音圧の差や構造の共振変化によるランダムな透過損失の減少よりも単一の円形開口部の変化による透過音への影響が大きいと考えられ, 実験における透過音の差分 ΔSPL_i の値が大きい領域には, 総合透過損失の差分 ΔTL_i も大きく, 同様の傾向が確認できる。

しかしながら, 低周波数帯域においては, 基本的にコインシデンス効果を考慮した透過損失が板振動の共振によって透過損失がランダムに減少するような帯域を予測できないことや, 単一の円形開口の大きさの変化によって板の剛性が変化して共振周波数が変化するため, 総合透過損失の差分との良い一致が見られない. また, 単純な板ではなく箱内に音源を持つ構造であるため, 音源側からの透過音が開口部以外からも存在し, 特に低周波数帯域の音は回折しやすいため, 透過側での影響が大きくなることが考えられる。

これより, 構造内部の音響モードを持つ場合でも高周波数帯域で, 総合透過損失の予測値との傾向の一致が見られることが確認できる。

Table 1 Source condition

Sample Rate [Hz]	65536
Sample Time [s]	1
Number of averages [-]	10
Burst rate [%]	80
Source Type	Chirp
Frequency range [Hz]	500-10k

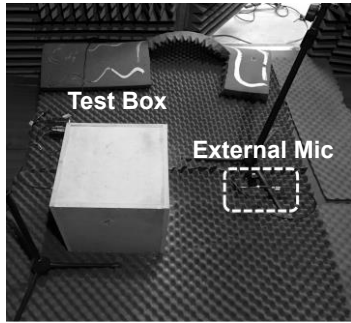


Fig. 1 Experiment condition

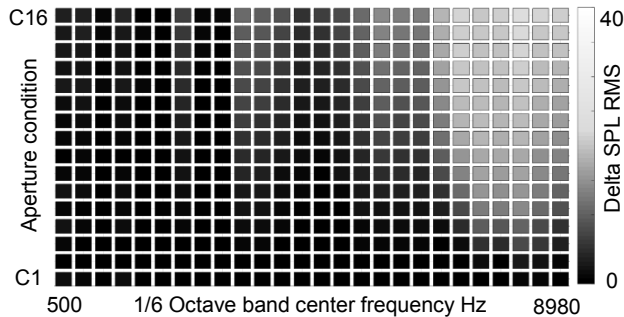


Fig. 2 Delta SPL of each aperture radius

4. 多孔部の透過音影響把握

本章では単一の開口部ではなく, CAD でのモデリングが複雑な多孔部に着目し, 有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM と記す) を用いて様々なパターンでの透過音の数値シミュレーションから要因分析を行う. また, 心理音響評価の観点より, 多孔部からの透過音に対するラウドネスおよびシャープネスへの影響把握を行う。

4.1 FEM での多孔部における透過音解析条件

FEM を用いて透過音解析を行う. また, 多孔部は Table 2 および Fig. 4 のように各パラメータ, 一つの開口面積 S , 開口数 n , 総開口面積 S_n , 近接する開口の中心間距離 $L1$, 近接する開口のエッジ間距離 $L2$, 厚み h を設定し, 各パラメータ

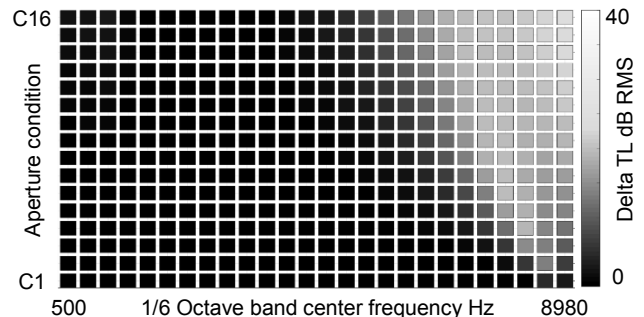


Fig. 3 Delta TL of each aperture radius

を変更した場合の透過音の周波数変化を算出する。解析で使用する CAD モデルの音源側には、半径 90 mm の半球、透過側も同様の半球をモデリングする。多孔部の評価面は、縦横 100 mm の正方形評価面を設定し、評価面での影響を一定にするために評価面の外枠から最も近い円形開口部の中心までを一定もしくは外枠に円形開口部のエッジが接する条件で、多孔部の全ての円形開口部を等間隔にモデリングする。

FEM の透過音解析は構造内部の音響モードなどの多孔部以外の影響をなくするため、音源側および透過側の半球の球面すべてに無反射境界条件 (Automatically Matched Layer, 以下 AML と記す) を定義する。また、多孔部以外の音源側から透過側への透過音は無いように定義して解析を行う。各要素に定義する空気要素は、質量密度: 1.2041 kg/m³, 音速: 343.21 m/s を使用する。

4.2 透過損失計算および平均音圧計算

FEM の透過音解析の結果を使用して、透過損失および平均音圧を算出する。透過損失は音源側の音響パワーを入射側の音響パワー、透過側の AML 半球面を透過する音響パワーを透過音響パワーと定義して、式(1)と式(2)を使用して透過損失を求める。また、心理音響尺度計算で使用する透過側の平均音圧は透過音響パワーを使用して、式(8)によって求める。

$$P_t = \sqrt{\frac{\rho c W_t}{S}} \quad (8)$$

ただし、 P_t [Pa]: 平均透過音圧, ρ [kg/m³]: 空気の密度, c [m/s]: 音速, W_t [W]: AML を透過する音響パワー, S [m²]: 面積 (ここでは、透過側の AML 定義表面であり、半球の球面: $S = 2\pi r^2$, 半球の半径: r) とする。

4.3 パラメータスタディによる透過音の影響把握

Table 3 の①~④のように✓のついている各パラメータを変更した場合の透過音を、式(8)の平均音圧から SPL を算出して比較を行う。

結果より、①の Sn および h 一定では、 $L1$ や $L2$ が小さくなるにつれて、透過音の周波数領域において干渉の影響によるピークが多くみられる。また、②の S および h 一定や③ n , $L1$ および h 一定では、 Sn が大きくなるにつれて透過音が大きくなり、 $L2$ が一定以上大きくなることで干渉などがおきず、単一の円形開口部の透過損失と同様な傾向がみられる。④の h 以外一定では、Fig. 5 の多孔部 $S = 78.5 \text{ mm}^2$, $n = 81$, $L1 = 11.25 \text{ mm}$, $L2 = 1.25 \text{ mm}$ で h 変更を示す音圧レベルのように、 h が増加するにつれて共鳴周波数による透過音の

Table 2 Parameters

Parameters	
One aperture area [m ²]	S
Numerical aperture [-]	n
Total opening area [m ²]	Sn
Center distance [m]	$L1$
Edge-to-edge distance [m]	$L2$
Thickness [m]	h

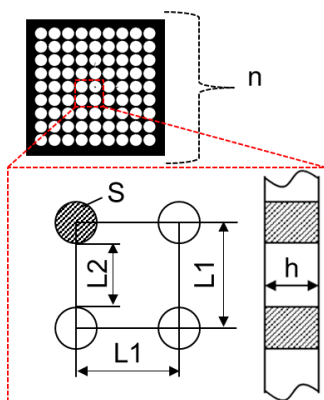


Fig. 4 Porous Part

Table 3 Parameters change

Name	S	n	Sn	$L1$	$L2$	h
①	✓	✓		✓	✓	
②		✓	✓	✓	✓	
③	✓		✓		✓	
④						✓

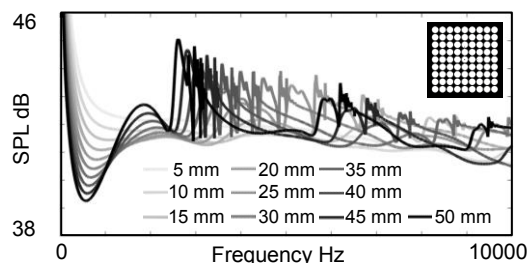


Fig. 5 Sound pressure level

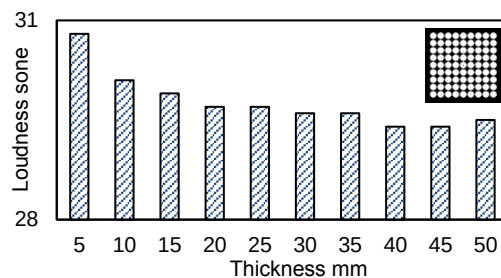


Fig. 6 Loudness

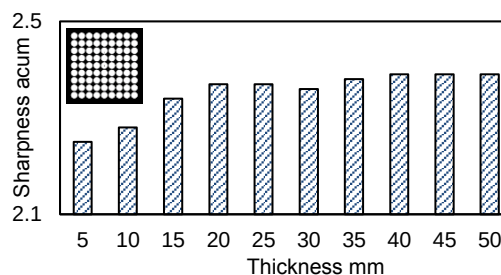


Fig. 7 Sharpness

ピークが低域にシフトする。また、他のパラメータと比較して、 h 変更で透過音の周波数変化が大きいことを確認した。

4.4 心理音響評価

多孔部における透過音を、人の聴覚特性を考慮したうるささのレベルであるラウドネス (ISO 532-1) とシャープネス (DIN 45692) を使用して評価を行い、多孔部設計での着目すべき点を明確にする。ここでは特に 4.3 節における周波数変化が大きい④の h 変更の平均音圧を使用して評価を行う。

Fig. 6 のラウドネスでは、多孔部の厚みの増加による減衰の影響によって、透過側での音響パワーが減少するため、ラウドネスの減少が確認できる。しかしながら、ラウドネスとは対称に Fig. 7 のシャープネスは増加していく傾向がみられる。これは、Fig. 5 のように厚みが増加するにつれてフラットな SPL の周波数特性から、局所的な増加のある周波数特性に変化するためである。

一般的にこのようなシャープネスの増加は快適な音へ負の相関があるため、ある周波数帯域の局所的な増加などは多孔部の設計において着目する必要がある。また、他の多孔部のパターン変更においても同様に心理音響評価における多孔部からの影響を確認した。

5. 多孔部からの透過損失の簡易予測モデルの構築

本章では多孔部における透過損失の簡易予測モデルの構築を行う。構築したモデルで使用する各偏回帰係数の自由度修正済み決定係数を用いて、簡易予測モデルの有用性の検討と改善を行う。また、FEMの解析結果より算出した透過損失と簡易予測モデルより算出した透過損失の比較を行うことによって、使用する簡易予測モデルの各パラメータにおける有効範囲を決定する。

5.1 多孔部からの簡易予測モデルの構築

4章で各パラメータを変更した場合のFEMの透過音解析から計算した計84パターンの透過損失を用いて、目的変数を説明変数が複数存在する回帰式を使用して予測する重回帰分析⁽³⁾によって、多孔部からの透過損失の簡易予測モデルを構築する。

簡易予測モデルは、各周波数帯域における透過損失の予測を行うことを目的とするため、目的変数を透過損失の1/3オクターブバンドの各周波数帯域の値(以下、TL_{1/3 Oct}と記す)とする。説明変数は多孔部の設計に必要であり、透過音への影響の高いパラメータS, n, Sn, L1, L2, hを使用し、各TL_{1/3 Oct}での重回帰式を作成し、簡易予測モデルを構築する。

5.2 簡易予測モデルの評価および高精度化

重回帰分析によって構築した簡易予測モデルの有用性を、自由度修正済み決定係数より検討する。決定係数は回帰式の予測精度を0~1の値で示したものであり、予測精度が高いほど1に近く、予測精度が低いほど0に近くなる。決定係数は一般的に0.1を下回る場合は目的変数と説明変数が無関係であり、0.7を上回る場合は関係性が高い回帰式といえる。また、説明変数の増加に伴い1に近づく特徴を持つため、説明変数が多い場合や説明変数を増加して回帰式を比較する場合は、この点を補正した自由度修正済み決定係数を使用して評価を行う。

まず、5.1節の説明変数による各周波数帯域の自由度修正済み決定係数をApとしてFig. 8に示す。また、4章のFig. 5のように、hの変化に対しての周波数変化は他のパラメータと比較しても大きいと考えられるため、hにおいては2乗、3乗、4乗に対応した説明変数を適応した新たな回帰式である式(9)を作成する。その自由度修正済み決定係数をAqとしてFig. 8に示す。

結果より、Apは全周波数帯域で、0.7を超えているがTL_{1/3 Oct}の中心周波数5040 Hzにおいて他の中心周波数と比較して精度が低い。Aqは全ての自由度修正済み決定係数が0.85以上であり、予測精度がApよりも向上したことが分かる。特に中心周波数5040 Hzでの精度向上が確認でき、5040 Hzの透過損失へのhの影響が大きいことがわかる。よって、各帯域においてAqの各偏回帰係数を代入した回帰式を簡易予測モデルとして使用する。

$$\begin{aligned} TL_{1/3 Oct_i} = & a_{Sn_i} x_{Sn} + a_{S_i} x_S + a_{n_i} x_n \\ & + a_{h_{1_i}} x_h + a_{h_{2_i}} x_h^2 + a_{h_{3_i}} x_h^3 + a_{h_{4_i}} x_h^4 \\ & + a_{L1_i} x_{L1} + a_{L2_i} x_{L2} + b_i \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、i:1/3オクターブバンド周波数帯域、 $a_{Sn_i} \sim a_{L2_i}$:偏回帰係数、 $x_{Sn} \sim x_{L2}$:説明変数、TL_{1/3 Oct_i} [dB]:目的変数、 b_i :定数項とする。

5.3 FEM解析と簡易予測モデルの比較

FEMを使用した透過損失と簡易予測モデルの結果を比較し

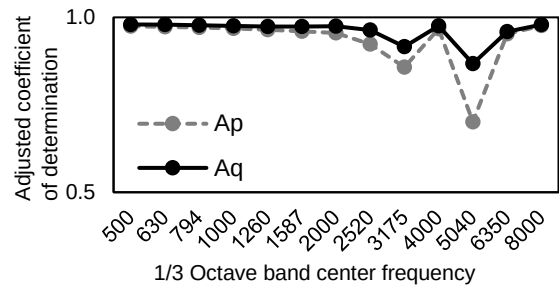


Fig. 8 Comparison with Adjusted coefficients of determination

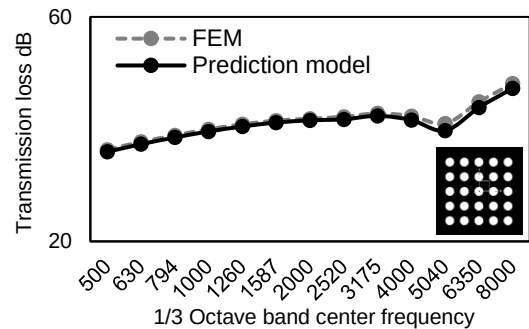


Fig. 9 Comparison with FEM and Prediction model

て、 $L2 > 10$ mmの条件で、誤差が3 dBを超える場合がある。これはL2が大きくなることで干渉などの影響が起きず、多孔部の透過とは別に単一開口のみの傾向に近い結果となる。この特性は、Wilson and Sorokaの単一開口の透過損失の公式⁽²⁾によって予測できるため、簡易予測モデルは、 $L2 < 10$ mmに限定する。

Fig. 9に $S = 78.5 \text{ mm}^2$, $n = 25$, $L1 = 16.5 \text{ mm}$, $L2 = 6.5 \text{ mm}$, $h = 30 \text{ mm}$ の多孔部のFEMを使用した透過損失と簡易予測モデルの透過損失の比較を示し、傾向が十分な精度で一致していることが確認できる。

6. 研究成果

- (1) 単一の円形開口部と板の総合透過損失の予測が実験と比較して、高周波数帯域では、構造内部の音響モードの影響があっても十分に透過損失の傾向を予測できることを確認した。
- (2) 多孔部からの透過音のパラメータスタディによって、透過音の特徴把握を行い、ある周波数帯域の局所的な透過音の増加によるシャープネスの増加を確認した。
- (3) 重回帰分析を用いて、多孔部からの透過損失の各1/3オクターブバンドの回帰式を作成し、近接する開口のエッジ間距離に対する制約はあるが、解析結果との十分な精度での一致を確認して設計初期段階における簡易的な予測として用いるモデルが構築できた。

参考文献

- (1) V.Honsisto, Sound Insulation of Doors-Part1: Prediction Models for Structural and Leak Transmission, Journal of Sound and Vibration, (2000)pp.133-148.
- (2) George P. Wilson and Walter W.Soroka, Approximation to the Diffraction of sound by a circular aperture in a rigid wall of finite thickness, Journal of the Acoustical Society of America, vol.37, (1965)pp.286-297.
- (3) 内田 他, 多変量解析ガイド, (2011)pp.24-31.
- (4) 宮崎 他, 多孔部からの透過音制御のための簡易予測モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2019)1-7-12.