

低周波音の家屋内外伝搬に関する縮尺模型実験

Scale-model experiment of low-frequency noise propagation from outdoor into house

学籍番号 47-156734
氏名 加美 梢 (Kami, Kozue)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1. はじめに

1.1 背景

近年、100 Hz 以下の音を指す低周波音に関する苦情件数は増加傾向にあり社会問題になっている。具体的には、戸や窓等の建具の揺れやがたつきといった「物理的現象」や、不快感・圧迫感を与える等の「感覚的現象」があり、遮音性能の確保が求められている。橋本は、家屋近傍の音源より生じる低周波音を対象として、家屋内外伝搬に関して壁・窓・隙間等の家屋各部の数値解析モデルについて基礎的な検討を行った^[1-4]。しかし模擬家屋を用いた実大実験と数値解析の結果の比較において、内外音圧レベル差の周波数特性に乖離が見られ、実現象の十分な把握には至っていない。

1.2 目的

以上の背景を踏まえ、本研究では家屋内外の低周波音伝搬に関わる要因の解明を目

指し、数値解析モデルの構築を進めると同時に、単純な構造の 1/4 縮尺模型を作成し実験を行い、数値解析モデルの妥当性、及び現象の把握を目指した。数値解析では外壁振動場での質量・減衰の影響、剛性の影響、床下空間の影響について観察し、縮尺模型実験では、窓の開閉・外壁質量・床下空間の条件変化に対する影響について観察した。

2. 数値解析モデルの構築

2.1 数値解析手法

低周波音の波動的な現象を考慮する為、波動音響解析の有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いた音響振動連成定常解析を行う。有限要素法は領域全体を節点と要素に分割し要素間の応力や変位を連立させて解く解析手法である。尚、有限要素法において、屋外音場のような開領域を模

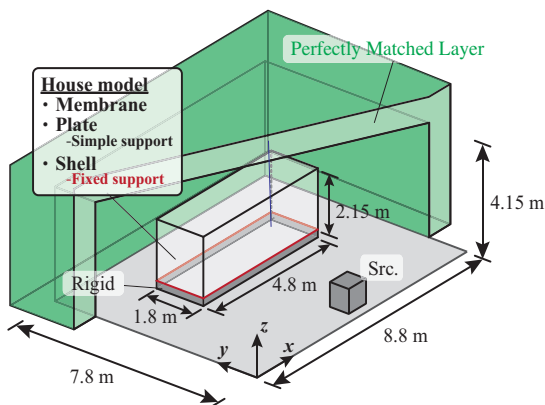


Fig. 1 Numerical model of a house.

Table 1 Physical properties and support conditions of the walls.

Membrane	Area Density	$m = 24,48[\text{kg/m}^2]$
	Support Condition	Free
Plate and Shell	Young's modulus	$E = 3.1 \times 10^9 [\text{N/m}^2]$
	Poisson's ratio	$\nu = 0.35[-]$
	Density	$\rho = 1200[\text{kg/m}^3]$
	Thickness	$t = 0.02, 0.04[\text{m}]$
	Support condition	Plate: Simple Shell: Fixed (floor perimeter)

擬する為に、人工吸音層（PML：Perfectly Matched Layer）を設定し領域を打ち切った（Fig.1）。

2.2 解析条件

解析モデル 半自由空間上に単純な形状の家屋が存在し、家屋の近傍に定常的な低周波音源が設置してある状況を想定する。家屋の大きさは、4.8 m×1.8 m×2.15m の中空直方体とした。床については床高が 0.4 m の完全剛な枠の上に家屋を設置した。音源は模型実験と比較するため、実験で用いるスピーカの大きさを模擬し、一面を振動面として、振動面で様の振動速度となるように設定した。家屋の長手方向の一面に対して 3m の位置に振動面が向かい合うように音源を設置した。

外壁モデル 床・天井を含む外壁には、質量のみを考慮した無張力膜要素と、質量と剛性を考慮した薄板要素、質量と剛性さらに家屋全体の剛性まで考慮したシェル要素を設定し、解析を行う。

各モデルについて家屋模型で使用したアクリル板の 20, 40 mm（面密度 24, 48 kg/m²）厚相当の物性値を与える。これは、外壁質量は一般的な木造住宅及び防音仕様^[5]の住

宅を想定したものである。各種振動場の物性値及び支持条件を Table 1 に示す。

2.3 解析結果

遮音性能指標値として、4~125 Hz 帯域の内外音圧レベル差 $\Delta L = L_{out0} - \bar{L}_{in}$ を算出した（Fig. 1）。屋外音圧レベル L_{out0} は家屋がない状態における前面点での音圧レベルとし、別途解析を行った。屋内音圧レベル \bar{L}_{in} は屋内全節点のエネルギー平均値を算出した。 ΔL が大きいほど、屋内領域の平均音圧レベルが小さいことを表す。

各要素で 40 Hz 以上の帯域で ΔL は同様な傾向が見られ、特に、63 Hz 以上の帯域では外壁の厚さによらず、同じ周波数で家屋内の音圧レベルが上昇している。これは室内の固有振動の影響だと考えられる。また、膜モデルの結果をみると、20, 40 mm 厚で共に 25 Hz 以下の帯域において大きく 2 つの落ち込みがみられる。これは、家屋内・床下空間の空気をバネ、壁・床を質量とする、2 質点の共振系の形成によるものと考えられる。2 つの共振の間では反共振も見られ、床下空間が大きく遮音性能に影響することが示された。40 mm 厚の結果をみると 20 mm 厚に比べ、外壁質量の増加により低域

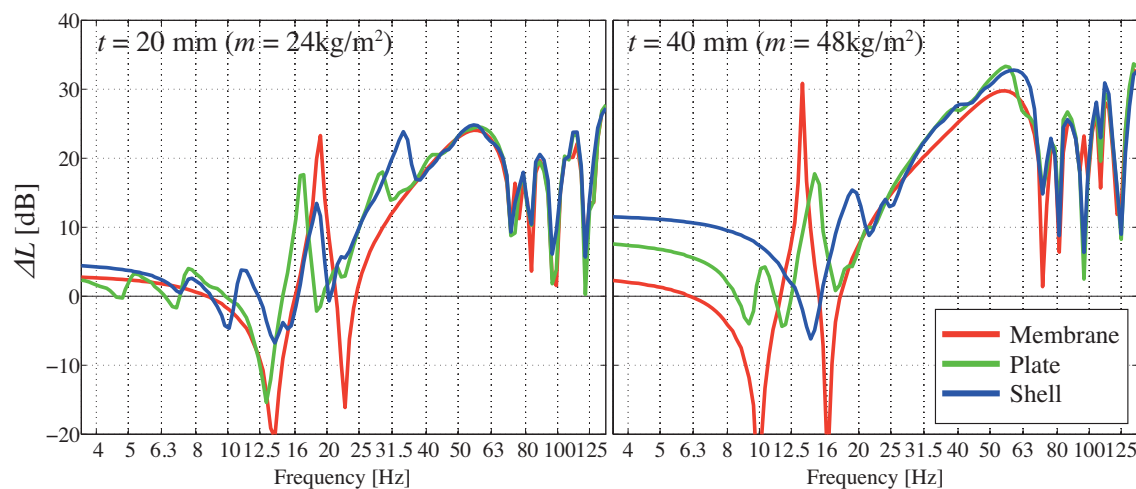


Fig. 2 Difference between L_{out} and \bar{L}_{in} calculated of the three elements.

側にディップが生じている。25~63 Hz の帯域では、質量制御による遮音性能の向上がみられる。

薄板要素やシェル要素の解析結果をみると 40 Hz 以下の傾向が膜要素の結果と異なっており、剛性の影響が支配的になっている。剛性を考慮すると、板共振による複雑なピークディップが生じているが、シェル要素では家屋全体が振動することにより、薄板要素よりもディップが少ない傾向が見られる。また、40 mm 厚では 1 次の板の固有周波数以下で剛性制御による ΔL の上昇がみられた。

3. 1/4縮尺模型実験と数値解析の比較

3.1 模型実験の概要

家屋模型の作成 模型家屋の内寸は 1,200 mm×450 mm×537.5 mm とし、アクリル板と角材 (30 mm 角) を用いて外壁と柱を模擬した。床高は 100 mm となるように木枠を設置し、基礎部分を模擬した。家屋長手方向の外壁一面の中央部に 450 mm 四方の開口部を設け、引き違い窓 (1.3 mm 厚ガラス, 実大面密度 13 kg/m²) を設置した (Fig.3, 4(a))。また、比較対象として、開口部なしの家屋模型も製作した (Fig.3, 4(b))。アクリル板は厚さ $t = 5, 10$ mm (実大面密度 24, 48 kg/m²) の 2 水準で測定した。

音源・測定条件 半無響室に模型家屋を設置し、開口部正面 750 mm に音源を配置し、40~500 Hz の帯域のピンクノイズを発生させ、模型の窓が設置されている面に対して正面方向に音源を配置した。家屋内の測定点は家屋内の長手方向 (x 方向) に 7 点、短手方向 (y 方向) に 5 点、高さ方向 (z 方向) に 5 点の全 175 点で音圧レベルを測定した (Fig.2)。

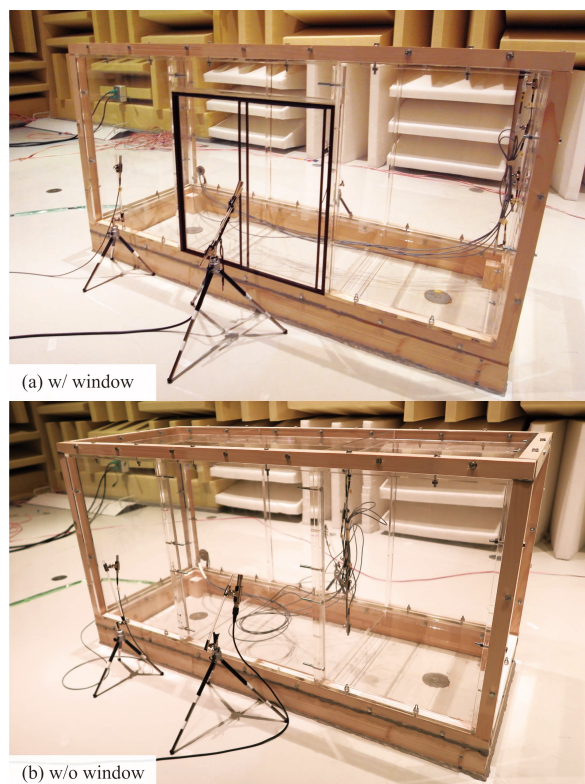


Fig. 3 Two house models with and without a window in the experiment of 1/4 scale.

3.2 数値解析モデルの条件

第 2 章で示した解析方法・モデルを用いて数値解析を行った。床・天井を含む外壁にはシェル要素を用い、窓部分には薄板要素を用いて 13 kg/m² 相当のガラスの物性値を与えた。

3.3 測定・解析結果

Fig. 4 に各条件での内外音圧レベル差の測定・解析結果を示す。尚、模型実験の結果は実大での周波数に変換して示している。窓有り条件 (Fig.4(a)) については、実大実験の結果^[4]を併記する。

窓有り条件での外壁質量 24 kg/m² の模型実験結果では、20 Hz 付近でディップが生じており、遮音性能が低下している。これは屋内の空気をバネ、窓・外壁を質量とした共振によるものと考えられる。48 kg/m²

厚では 10 Hz 付近に落ち込みが見られ、外壁質量の増加により低音域側にシフトしている。これに伴い 20~40 Hz では遮音性能の向上が見られるが、それ以上の帯域では外壁質量の影響はほとんど見られない。

一方、窓無し条件 (Fig.4(b)) では、外壁質量の増加によりほぼ全帯域で遮音性能の向上が見られる。従って、窓有り条件では窓を経由した音響透過が支配的であり、窓の遮音性能で家屋遮音性能が決定することが示唆される。また、80 Hz 以上では室内の固有振動により ΔL が低下しているが、窓の有無により 10 dB 程度の遮音性能の向上が確認できる。

25 Hz 以下の帯域で数値解析と実大実験は比較的良い対応が見られた。特に 20 Hz 付近の遮音性能が向上しており床下空間が影響している可能性が示唆された。25~63 Hz 付近の非共振帯域で模型実験と実大実験が対応しており、質量による影響が支配的な帯域だと考えられる。

4. おわりに

本研究では低周波音の家屋遮音性能に関する要因の解明を目指して、数値解析と模型実験により得られた内外音圧レベル差 (ΔL) を比較・検討した。低周波音の ΔL は、40 Hz 以上で質量の影響が支配的であり、それ以下の帯域では、剛性や床下の空間が大きく影響していることが数値解析の検討により明らかとなった。また、縮尺模型実験では、一部の帯域において外壁質量の遮音性能の向上が見込まれるが、基本的に全帯域において、開口部の対策が不可欠であることが確認された。

参考文献

- [1]橋本他, AIJ梗概集, 40095, pp.189-190, 2015.
- [2]橋本他, INCE-J講論集(秋),1-3-04, pp.47-48, 2015.
- [3]橋本他, 音講論(秋), 1-10-2, pp.795-796, 2015.
- [4]橋本他, 音講論(春), 1-9-4, pp.963-964, 2016.
- [5]防衛省地方協力局,演習場周辺住宅防音工事仕方書,平成25年12月.

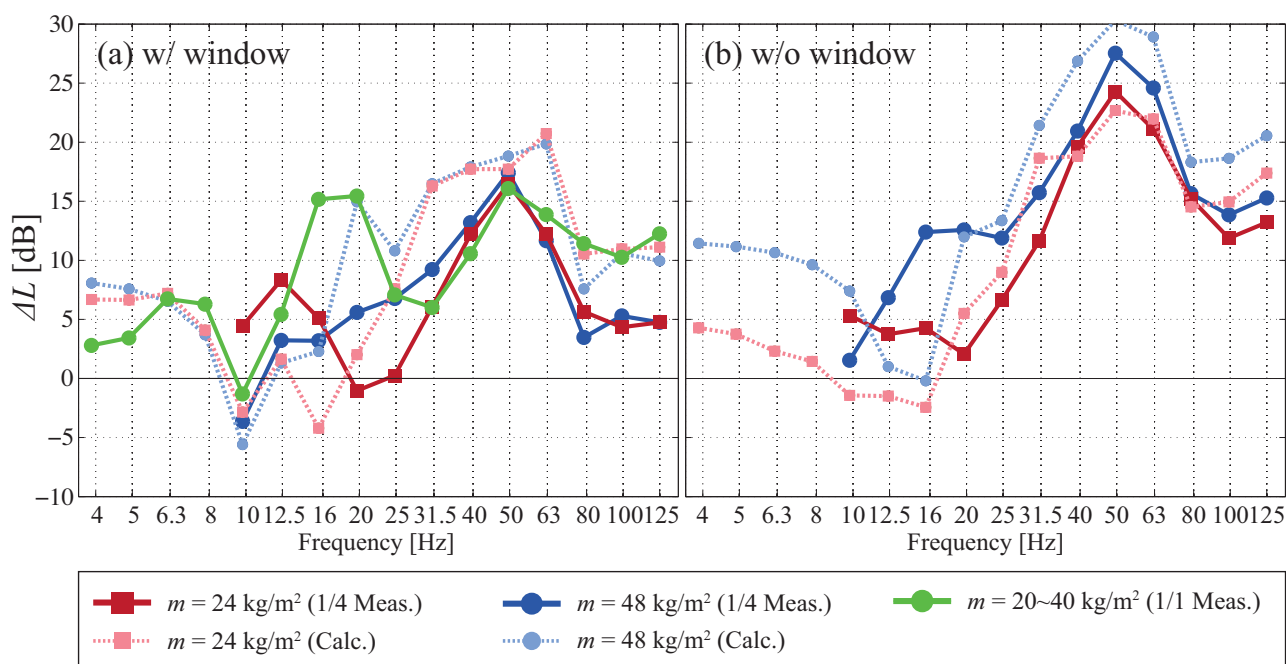


Fig. 3 Difference between L_{out} and \bar{L}_{in} measured and calculated for the two walls with different thicknesses.