

低周波音の家屋内外伝搬に関する数値解析

Numerical analysis of low-frequency noise propagation from outdoor into house

学籍番号 47-146754
氏名 橋本 悌 (Hashimoto, Dai)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1 はじめに

1.1 研究の背景

低周波音は一般的に 100 Hz 以下の音のことを指し、近年は低周波音に起因する問題が増加傾向にあり、社会問題となっている。騒音源の中には、家庭用ヒートポンプ給湯機や空調室外機のような建築設備機器もあり、一般家庭に広く普及しているものも含まれている。低周波音による影響としては、戸や窓ガラスのような建具の揺れやがたつき等の「物的影響」、人に圧迫感や振動感を与える、睡眠妨害を引き起こす等の「心身に係る影響」が代表的なものとして挙げられる。このような低周波音問題の多くは、家屋内で発生しており、低周波音の予測・制御が求められている。

1.2 研究目的

以上のような状況を踏まえ、低周波領域の家屋の遮音性能に関わる要素の把握を目的として、低周波音の家屋内外伝搬に関する数値解析を行う。本研究から得た知見から、低周波音による物理現象を把握し、低周波音の予測・制御への一助となることを目指す。

2 研究手法概要

2.1 検討対象

半自由空間上に単純な形状の家屋が存在し、近傍に定常的な低周波音を発生する設備機器が設置されている状況を想定する。

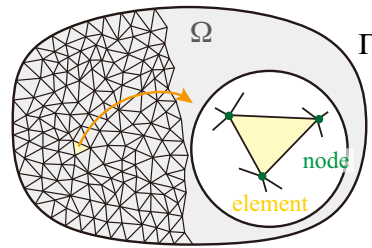


Fig.1 Conceptual diagram of FEM.

2.2 数値解析手法

定常的な低周波音源を対象とし、低周波音の波動的な性質の影響を考慮するため、数値解析手法は、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数値解析手法である(Fig.1).

3 窓からの透過・伝搬に関する検討

3.1 検討内容

家屋の遮音性能を決定づける要因の 1 つであり、音波の透過が顕著な窓からの透過・伝搬現象に関する検討を行う。窓は振動場として扱い、屋外音場-振動場-屋内音場の音響振動連成系で定常解析を行う。

3.2 解析条件

解析モデル 家屋モデルは一辺 3 m の剛な中空立方体とし、その一面に 1.8 m × 1.8 m の窓を設定する。なお、有限要素法において、屋外音場のような開領域を模擬するために、家屋モデルから 2 m 離れた周囲に人工吸音層(PML: Perfectly Matched Layer[1])を

設定し、領域を打ち切った (Fig.2). 音源としては、家庭用ヒートポンプ給湯機のヒートポンプユニットを想定し、大きさを模擬した直方体の一面を振動境界としたユニットを、開口部正面の 1.5 m 離れた位置に振動面が対向するように配置し、振動面で一律の振動速度を設定した。

窓の解析モデル 窓には、質量のみ考慮する(a)無張力膜要素と、質量と剛性を考慮する(b)板要素を設定し、解析を行う。窓の質量や剛性が屋内音場に与える影響について検討をする。各モデルにおいて 3, 5, 10 mm の板ガラス相当の物性値を与える。

3.3 解析結果

家屋配置前後の屋内領域の平均音圧レベルの挿入損失(IL [dB])を 4 ~ 125 Hz で算出した。(Fig.3)。挿入損失が小さいほど、家屋内の音圧レベルが大きな値になっていることを表す。各条件において、63, 80, 125 Hz 付近の帯域で、家屋内に固有モードが発生し、屋内の音圧レベルが上昇している。また、20 Hz 以下の帯域では、家屋内空気をばね、窓を質量とする共振系により、家屋内の音圧レベルが著しく上昇している。

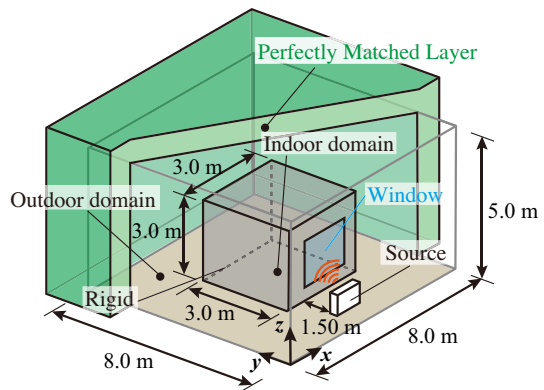


Fig. 2 Numerical model of a box-shaped house.

窓の質量の影響 窓の質量が大きいほど、挿入損失が上昇しており、遮音性能が向上している。また、20 Hz 以下の帯域におけるディップは質量が大きいほど低域側にシフトする傾向にある。

窓の剛性の影響 窓の剛性を考慮することにより、板厚によってディップの周波数が異なっている。板の固有周波数に近接する帯域において、家屋内に音波が顕著に透過する影響だと考えられる。また、20 Hz 以下の帯域では挿入損失が上昇している。これは剛性制御の影響であり、板の一次の固有周波数以下の帯域では、剛性が支配的になっている。

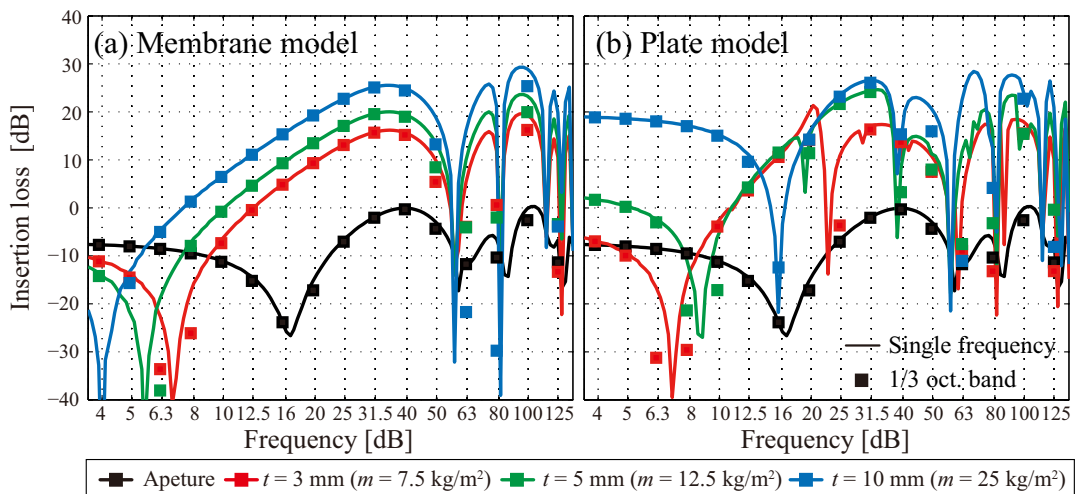


Fig.3 Insertion loss of the house model with changing area density of the window.

4 模擬家屋を用いた低周波音に対する家屋の遮音性能の測定

4.1 実測概要

低周波音源を家屋の近傍に配置し、家屋内の多数点で音圧レベルを計測した。測定は小林理学研究所の敷地内で実施した。

模擬家屋 模擬家屋の大きさは、内寸が 4.8 m×1.8 m×2.15 m であり、家屋の一面に 1.8 m×1.8 m の引き違い窓(ガラス厚 5 mm, アルミサッシ)が設置されている。家屋の外壁は外壁材, 石膏ボード, 吸音材, 合板等で構成されている。

低周波音源 低周波音源には、4~20 Hz の帯域を超低周波音源[2]を使用してスイッチャー純音を発生させ、25~125 Hz の帯域を市販のサブウーファー, スピーカーを使用してピンクノイズを発生させた。家屋の窓が設置されている面に対して正面方向, 斜め方向に音源を配置した(Fig.3)。

家屋内の測定点 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, 測定点を配置し, 全 175 点で音圧レベルを計測した(Fig.4)。

4.2 測定結果

算出指標 評価指標として, 内外レベル差 $L_{out0} - \bar{L}_{in}$ を算出する。屋外音圧レベルは, 家屋がない状態における家屋前面の音圧レベル L_{out0} とし, 別途, 各種音源の距離減衰を測定した結果から, 音源を点音源と仮定して算出した。屋内音圧レベルは, 全測定点 175 点のエネルギー平均値 \bar{L}_{in} を使用した。

窓開放の影響 家屋の引き違い窓の開放条件として, (1)全面開放(窓なし), (2)5 cm 開放, (3)窓閉じの 3 条件で測定し, 内外レベル差 $L_{out0} - \bar{L}_{in}$ を算出した(Fig.5(a),(b))。窓を開放するほど内外レベル差が低下しており,

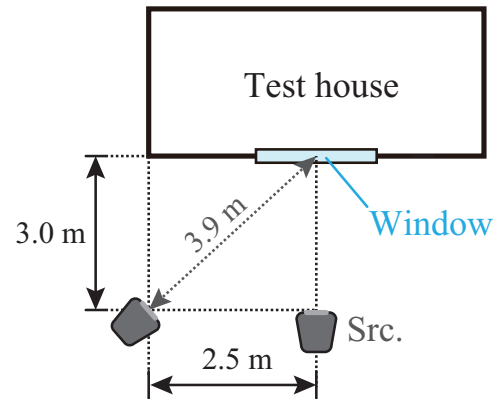


Fig.3 Arrangement of sources and a test house.

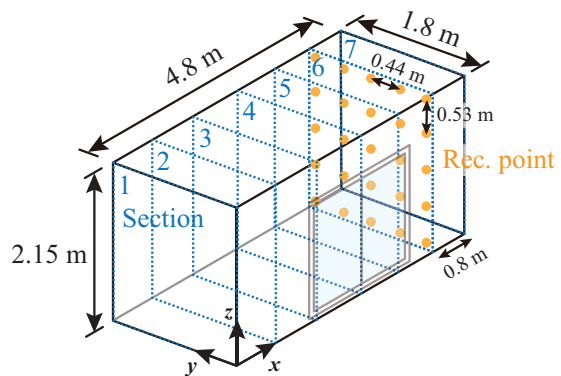


Fig.4 Dimensions of the test house and the arrangement of indoor microphones.

家屋内の音圧レベルが上昇している。40 Hz 以上の帯域では, 家屋内に固有モードが発生しており, 高次のモードが密接する 80 Hz 以上の帯域では, 内外レベル差に落ち込みが見られる。一方で, 家屋内の固有モード周波数は家屋の寸法や比で決定するため, 条件によらず周波数特性は類似している。20 Hz 以下の帯域では, 家屋内空気をばね, 窓を質量とする共振系によりディップが生じており, 著しく家屋内の音圧レベルが上昇している。窓に付加する質量が大きいほど, 共振周波数は低域側にシフトする傾向にある。また, 窓閉じ状態における 10 Hz 以下の帯域での内外音圧レベル差の上昇については, 家屋全体の剛性制御の影響が考えられる。

音源位置の影響 音源の位置が正面から斜めになることで、各条件において内外レベル差が低下する傾向がある。斜めから入射することで屋内音場の加振条件が変化し、 x 方向の固有モードが励起されやすくなったためだと考えられる。

4.3 数値解析との比較

既報のモデル[3,4]を用いて、実測を模擬した数値解析を行った。解析モデルは、外壁を剛壁とし、窓の開放条件は、(1)全面開放(窓なし)、(2)5 cm 開放、(3)窓閉じ(質量のみ:MB)、(4)窓閉じ(質量+剛性)の全4条件で解析を行った(Fig.5(c),(d))。各条件において、40 Hz 以上の帯域での固有モードの発生や、20 Hz 以下の帯域での著しい屋内の音圧レベルの上昇、音源位置の変更による屋内音場の加振条件の変化等、定性的な傾向は一致している。窓閉じでは、窓の質量と剛性を考慮することで、10 Hz 以下の周

波数帯域で内外レベル差の上昇が見られ、実測と対応している。一方で、家屋内に固有モードが発生する帯域付近では、透過音を過大・過小評価している点もあり、定量的に実測との乖離が見られた。

5 おわりに

本研究では、低周波領域の家屋の遮音性能に関わる要素の把握を目的として、数値解析と実測により、低周波音が家屋内に与える影響に関する検討を行った。数値解析と実測で定性的に一致する点もあり、屋内の音圧レベルが上昇する要因に関して知見を得た。低周波音に対する効果的な遮音対策に関する検討が今後の課題である。

参考文献 [1] Bermdez, A., *et al.*, J. Comp.

Physics, pp.469-488, 2007. [2] 土肥他, 音響学会講演論文集(秋), pp.955-956, 2010. [3] 橋本他, AIJ 梗概集, pp.189-190, 2015.[4] 橋本他, 音響学会講演論文集(秋), pp.795-796, 2015.

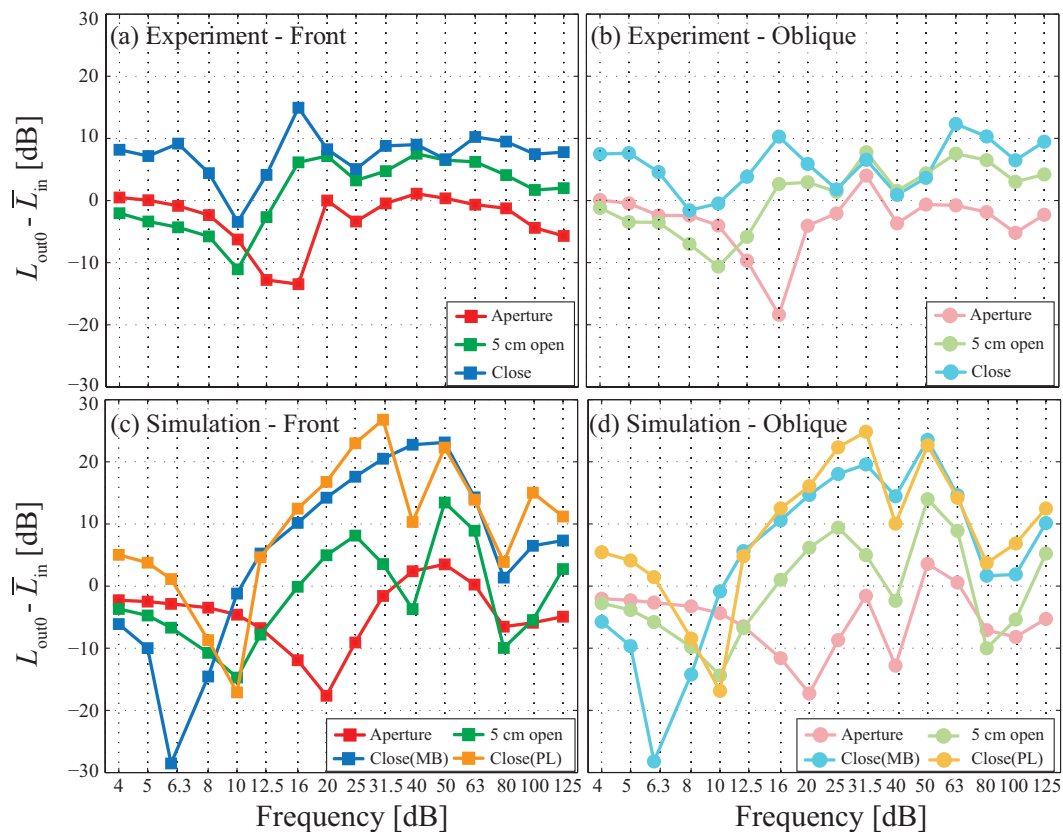


Fig.5 Difference between L_{out0} and \bar{L}_{in} different opening conditions of the window.