

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18196

研究課題名(和文)音響振動連成数値解析に基づく窓システムの遮音性能予測手法及び高性能サッシの開発

研究課題名(英文)Development of the vibroacoustic numerical analysis for predicting and designing the insulation performances of window systems

研究代表者

井上 尚久(Inoue, Naohisa)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号：00755803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：従来、窓システムの遮音性能予測はエネルギーベースの評価や、種々の部材を簡単な理論モデルに置き換え、音響透過損失の性能予測が行われてきた。しかし、現象の簡略化により性能の予測精度が低くなることに加え、問題に応じてモデルを構築する必要があるため必ずしも効率的でなく、相互比較が難しいことが課題であった。本研究では窓システムの音響透過損失の予測、設計のための音響振動連成解析技術の開発、及びその妥当性・有効性の検証を行った。特に、材料設置、端部支持、周辺隙間、サッシ枠振動のモデル化に注目し、各種の要素について解析手法の構築を行うとともに音響透過現象のメカニズムを整理した。

研究成果の概要(英文)：Sound insulation performance of window systems is conventionally predicted based on the energy-based evaluation by replacing various components with simple theoretical models. The simplifications sometimes spoil the prediction accuracy, and are not necessarily efficient approaches because the modeling is strongly depends on the problems. In this research, we developed a numerical method for predicting and designing the insulation performance of the window system. In particular, we focused on verifying the validity and effectiveness of models of material placement, end support, peripheral gaps and sash frame vibration. Furthermore, mechanisms of sound transmission phenomenon are interpreted during the verifications.

研究分野：建築音響学

キーワード：音響振動連成 窓システム サッシ 音響透過損失 遮音

1. 研究開始当初の背景

近年の都市部での高密度居住の増加，騒音源の多様化などの社会的要因に加え，個人レベルにおいてもプライバシー保護や QOL を重視する傾向が高まっており，建築物内部においては一層に静謐性の確保が重要になってきている。住宅性能表示制度においては空気音遮断性能として界壁，外周部開口の遮音性能が評価項目として挙げられ，その部材性能により等級が定められ，消費者に提示される。しかし，現状では音環境に関する項目は遮音性能のバラツキの多さ，専門性の高さから選択項目となっており，消費者保護が十分であるとは言えない。このような背景から，遮音構造の部材性能を明らかにすること，その性能を向上することは社会的にニーズの高いものと言える。さらに性能劣化のメカニズムの把握により，現場性能の安定化が促進され，ひいては住宅性能表示制度における音環境評価項目の必須化に貢献するものと考えられる。

一般に外周壁の遮音性能は窓が主要な決定要因となっているため，高性能なサッシやガラスの開発が行われている。窓システムの遮音性能はガラス自体の性能，ガラスの支持方法，サッシの性能，気密性，開閉方式等の様々な要因により決定される。従来，エネルギーベースの評価や，種々の部材を簡単な理論モデルに置き換え，透過損失の性能予測が行われてきたが，現象の簡略化により性能の予測精度が低くなることに加え，窓システムに応じてモデルを構築する必要があるため必ずしも効率的でなく，相互比較が難しいことが課題であった。このような問題に対して，数値解析を適用することで有限性や複雑形状を考慮した透過損失を算出する研究が国内外で見られるが，その多くが単層材料を対象としていたり，音波入射条件や材料の振動特性に制限を設けたりするものがほとんどであり，複雑な振動系を構成する遮音構造に対する部材性能予測手法については未整備であった。

このような背景から研究代表者は任意の構成・形状の材料を対象とし，任意の音波入射条件における部材性能予測手法について，解析理論及びプログラムを構築進めている。以下に音響透過損失解析モデル (図 1) の概要を示す。

- 1) 厚みのある剛バフル中の開口に材料を設置(開口内部で任意の形状)
- 2) バフル外部の音場に境界要素法,内部の音場・振動場に有限要素法を適用
- 3) バフル内外は音響要素同士で連成
- 4) 任意の音波入射角(θ, φ)での平面波入射を想定
- 5) エネルギー透過率は開口面への幾何学的入射パワー,及びバフル内外の境界面におけるネットの透過パワーから算出

上記の解析モデルにより入射角ごとの音響透過損失値を解析し，最後に重み付け平均を行い，ランダム入射音響透過損失を算出する。

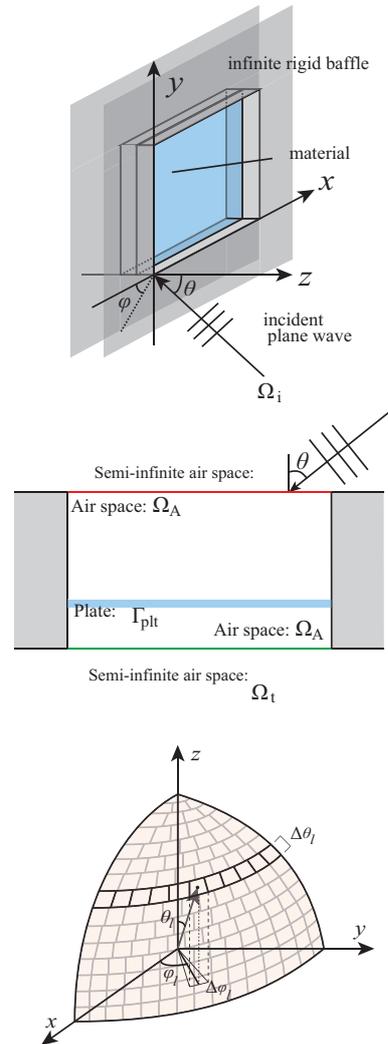


図 1 透過損失の解析モデル

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ，本研究では第一の目的として窓システムの各部材の振動系をモデル化するためのフレームワーク技術の整備を行うと共に，窓システムからの音響透過現象をより詳細に，かつ効率的にモデル化するための数値解析プログラムの開発・検証を行う。また，数値解析の妥当性検証のプロセスを通して窓システムの音響透過現象のメカニズムを整理し，サッシや，支持部材の高性能化に関する知見を得ることを第二の目的とする。

3. 研究の方法

上記目的に対応し，数値解析モデルの確立を目指し以下の課題群を設定し，研究を進めた。

- 1) JIS・ISO 規格に則った開口部形状のモデル化
- 2) 板ガラスの端部支持モデルの開発及び理論的妥当性の検証

- 3) 隙間における空気粘性の導入方法の検討
- 4) サッシ枠・障子の振動場のモデル化

4. 研究成果

上記方法に対応した形で研究成果を整理する。

1) 解析モデルの JIS・ISO 規格に則った開口部形状のモデル化

試料設置位置については JIS/ISO で試料両側のニッシュ深さの比が 1:2 になる位置に設置することが規定されている。数値解析においても同様の問題設定とすることで、実測条件との同等性が高まり、より比較が行い易くなることを期待される。ここでは指定性能評価機関の試験室において一般的な入射側、透過側で開口寸法の異なるスタガードタイプのニッシュを設定し、ニッシュ無し（両面フラッシュ状態）の場合に対するランダム入射透過損失の変化（ニッシュ効果）を検証した。その結果を図 2 に示す。ニッシュ効果はコインシデンス周波数（ f_c ）以下で透過損失低下として現れ、ボックス型が顕著なのに対して、スタガード型ではかなり抑制され、フラッシュ型に近づく傾向が確認される。ただし、ニッシュ効果の程度は板厚にも若干依存する傾向が見られた。

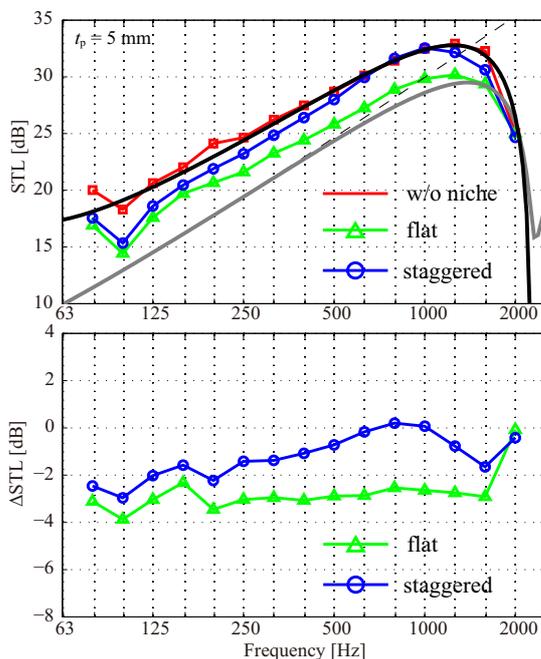


図 2 形状によるニッシュ効果の違い（5mm 単板ガラス）

また、本解析手法では任意の入射角度での透過損失が得られることが特徴的である。そこで、ニッシュ効果の入射角依存性についても詳細に検討を行った。結果を図 3 に示す。中・低音域以下ではニッシュ効果の入射角依存性は比較的小さい。高音域では、入射角依存性が強くなり、コインシデンス周波数・角

度では透過損失の上昇としてニッシュ効果が現れることが確認できる。さらにスタガード型では入射角依存性が比較的大きく出ることにより留意が必要であることが示された。

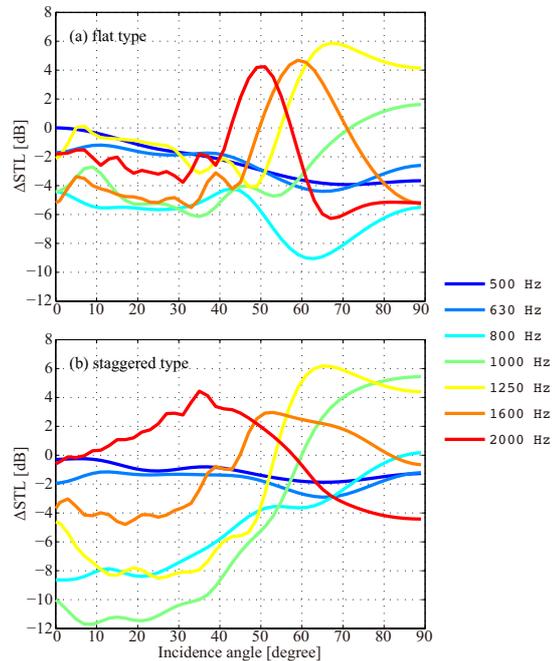


図 3 ニッシュ効果の入射角依存性

2) 板ガラスの端部支持モデルの開発及び理論的妥当性の検証

板振動場の端部支持をモデル化する方法は大きく次の 2 つ大別される。

- A) 三次元要素による支持部材の有限要素解析に基づく振動連成解析を行う手法
- B) 簡易バネマスモデルにより理論的に算出した機械・モーメントインピーダンスを与える手法

計算負荷軽減の観点から、前者は非常に有効であるが、具体的なインピーダンスの与え方、モデル化精度の妥当性が十分に検証されていなかった。本検討でははじめに、図 4 に示すような矩形の支持材の等価バネマスインピーダンスを理論的に導出した。続いて、図 5 に示すような曲げ波の一次元伝搬問題を設定し、上記手法 A, B による振動エネルギー吸収率、機械・モーメントインピーダンスを比較した結果を図 6 に示す。

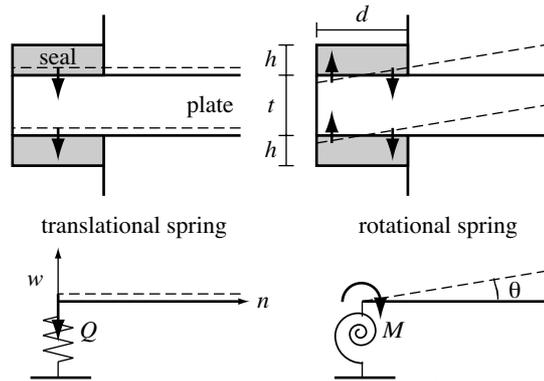


図 4 端部支持の等価バネマスモデル

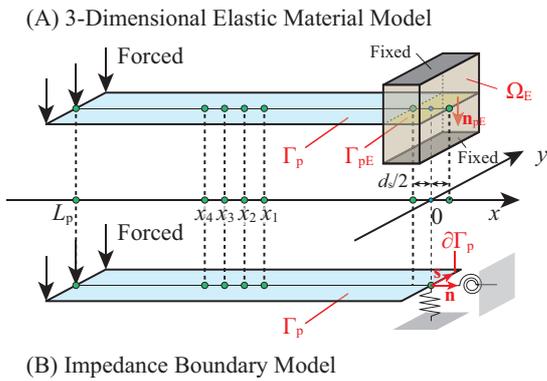


図5 曲げ波の一次元伝搬問題

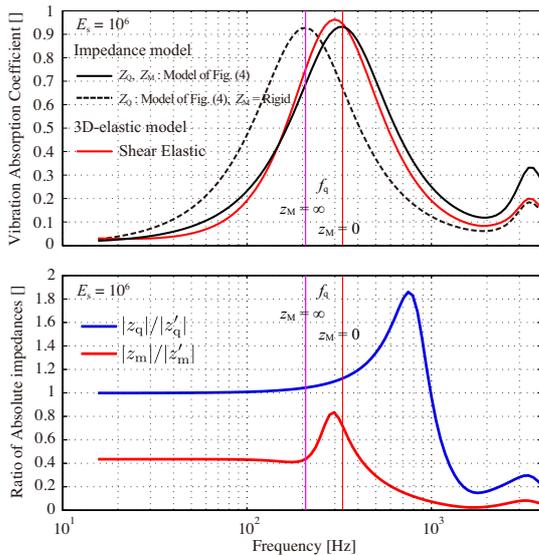


図6 支持条件のインピーダンスモデルと三次元弾性体モデルの比較

振動エネルギー吸収率においては、手法 A, B の差は比較的小さい。しかし、インピーダンス比を見ると、手法 B のモーメントインピーダンスは全周波数帯域で過小評価されている。一方、機械インピーダンスは支持材をバネ、板を質量とした共振 f_q 以下では精度良くモデル化されているものの、 f_q 以上では過小評価する傾向がある。端部拘束の強弱は音響放射のメカニズムにも影響を及ぼすことから、高周波数帯域では支持材内部の振動場を考慮した解析を行う必要があるものと考えられる。尚、支持材や板材の物性値を変化させた場合もほぼ同様の傾向が見られたことから、上記の傾向は一般性が高いものと考えられる。さらに原理的に支持材が粘弾性を持つ場合にも同様の傾向が現れるものと見込まれる。

3) 隙間における空気粘性の導入方法の検討

狭小な領域では空気粘性による減衰を考慮しなければ、音響透過を過大評価してしまう。この減衰を考慮する方法は以下に二つに大分できる。

A) 粘性境界層による影響をインピーダンス

として与える手法

B) 粘性境界層による狭小領域内での粒子速度分布を平均化し、等価な減衰を与える流体として取り扱う手法

本研究では手法 A についてプログラムを実装し、その妥当性の検証を理論値の参照が容易な共鳴器の垂直入射吸音率の計算を通して行った。図 7 に示す音響管問題を設定し、粘性境界層条件を与えるべき境界についての考察を行った。計算結果を図 8 に示す。ネック側壁、バフル両面に粘性境界層境界条件を与えた場合、実測との対応が最もよく、現実に即したモデル化になっているものと考えられる。スリットのネック側壁のみに減衰を与えた場合、吸音率が大きく算出される。これはバフル表面での粘性抵抗がないために、バフル表面上を滑り共鳴器に流れ込むエネルギーが大きくなるためである。また、エッジ部分での減衰を無視した場合、吸音率は小さくなっておりエッジにおける減衰が比較的多きことが示された。この結果は手法 B のようにネック内部の空気に内部減衰を与えるだけでは現象を十分に表せないことを意味している。

サッシ隙間を考慮する際にも、隙間部側壁だけでなくその周辺の境界に粘性境界層条件を付与する必要があるものと考えられる。

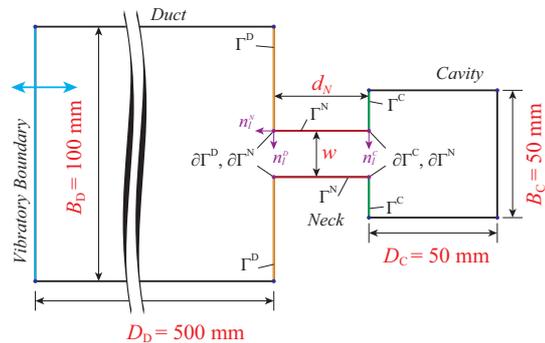


図7 スリット型共鳴器の音場解析

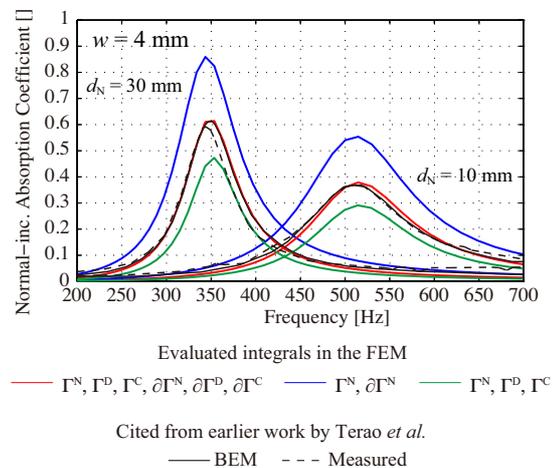


図8 粘性境界層を付与すべき境界について

4) サッシ枠・障子の振動場のモデル化

サッシ各構成部材のモデル化を想定し、面外方向の曲げ振動、及び変位方向が平面内の縦波、横波を考慮し解析を行うシェル要素を実装した。実装した要素を家屋の低周波音遮断性能の解析に適用し、板ガラス部以外の振動の影響について一考察を行った(図9)。家屋内外の音圧レベル差の計算結果を図10に示す。超低音域においては構造全体の剛性による遮音効果が見られる。シェル要素では外壁角部(折れ曲がり部分)での回転拘束が強くなり、板の単純支持に比べ外壁全体の剛性が高まるものと考えられる。窓システムにおいてもサッシ枠が全体剛性に寄与するため、本検討において得られた低周波領域の挙動に関する知見は有効なものと考えられる。支持部や隙間などとの総合的な効果に関しては今後の課題として残った。

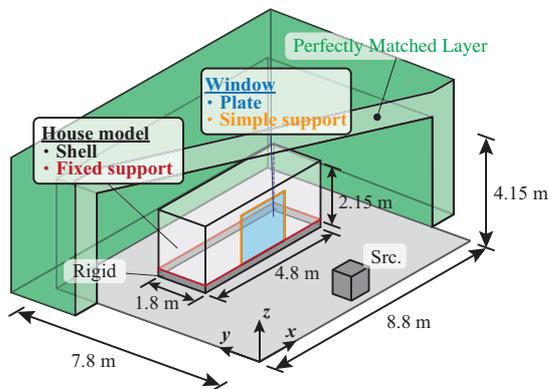


図9 家屋遮音性能の計算モデル(外壁部にシェル要素を適用)

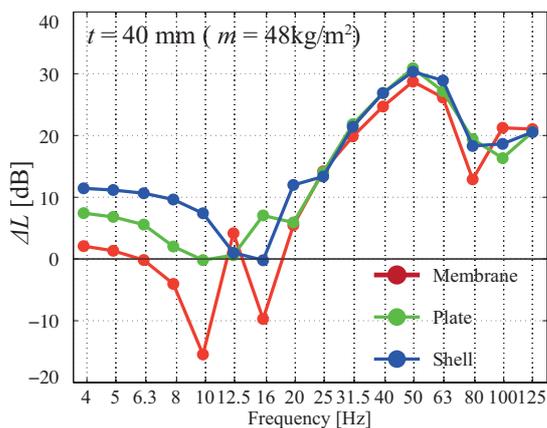


図10 家屋内外音圧レベル差

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① N. Inoue, T. Sakuma: Finite element modeling of acoustic resonators with thermal and viscous boundary layers, Acoust. Sci. Tech.

Vol.39, pp.-, 2018. (in print) 査読有

- ② T. Sakuma, N. Inoue, T. Seike: Numerical examination on the niche effect on sound transmission loss of glass panes, Acoust. Sci. Tech. Vol.38, pp.279-286, 2017. 査読有
- ③ N. Inoue, T. Sakuma: Numerical investigation of effect of support conditions of poroelastic materials in the impedance tube measurement, Acoust. Sci. Tech. Vol.38, pp.213-221, 2017. 査読有

[学会発表] (計8件)

- ① 井上尚久, 佐久間哲哉: 有限要素法によるハニカム型共鳴器の垂直入射吸音率解析, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.901-902, 2018.
- ② N. Inoue, T. Sakuma: Numerical investigation on the effects of the edge damping in the thin plate-like vibration system, Proc. Inter-Noise 2017 (Hong Kong), pp.5443-5450, 2017. 概要査読有
- ③ T. Sakuma, N. Inoue, K. Kami: Numerical simulation and scale model experiment of low-frequency noise transmission into house, Proc. Inter-Noise 2017 (Hong Kong), pp.413-420, 2017. [invited] 概要査読有
- ④ 井上尚久, 佐久間哲哉: 板ガラスの遮音性能の数値予測に関する研究 -実験室実験の模擬-, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.13-14, 2017. [招待講演]
- ⑤ 井上尚久, 佐久間哲哉: 板状部材の支持条件のモデル化に関する数値解析的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp.311-314, 2017.
- ⑥ 加美梢, 井上尚久, 佐久間哲哉: 低周波音の家屋遮音性能に関する研究 -縮尺模型実験による外壁質量の影響の検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.857-858, 2017.
- ⑦ 井上尚久, 佐久間哲哉: 音響透過損失測定におけるニッシュ効果に関する数値解析 -入射角依存性に関する検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.855-856, 2017.
- ⑧ 佐久間哲哉, 井上尚久: 板ガラスの遮音性能に関する数値解析 -ガラス測定用試験開口のモデル化-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.827-828, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 尚久 (INOUE, Naohisa)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号: 00755803