

斜め入射音に対する部材の遮音性能予測システムの開発

山崎 泰知^{*1}・田中 ひかり^{*1}・増田 潔^{*1}

Keywords : sound transmission loss, oblique-incident condition, numerical analysis, optimization AI

音響透過損失, 斜め入射, 数値解析, 最適化 AI

1. はじめに

建物の設計・施工の際には、室内の騒音に対する目標値が設けられることが多く、設計時にその目標を満たすかどうかを予測する必要があり、その際、窓ガラスなどの音響透過損失の値が必要となる。

音響透過損失の実験室測定法はJIS A 1416:2000¹⁾及びISO 10140:2021²⁾で規格化されており、また音響透過損失の数値解析法に関してもこれまで多くの研究がなされている^{3,4)}。これらは、音源室及び受音室として残響室を用いるため、試験体に音が様々な方向から入射する条件での性能が得られる。しかしながら、図-1に示すように高層建物近傍に鉄道路線や幹線道路がある場合、部材に対する音の入射角度は限られ、特定の方向から入射するため、残響室の条件とは異なる。特にガラスに対して斜めに入射する場合は高音域において遮音性能が低下するコインシデンス効果といわれる現象

が生じることが知られている。

このような条件において、前述の規格に則って測定された遮音性能データを用いて室内の騒音を予測すると、入射角度によっては室内の騒音が過少に予測される場合がある。安全を見て遮音性能を低く見積もって予測を行う場合もあるが、過剰な設計になる可能性がある。斜め入射条件での建築部材の遮音性能が得られればこれらの問題を解決できる。

斜め入射条件での建築部材の遮音性能を実験で求める方法は先行研究がいくつかあるものの、規格化されるには至っていない。これらは大きく分けて無響室と無響室もしくは無響室と残響室を組み合わせた実験室を用いて、一方の無響室から斜めに音を入射させる方法^{5,7)}と、二つの矩形室を用いて信号処理により斜め入射音に対する遮音性能を求める方法⁸⁾に分けられる。しかしながらどちらの手法を用いても、時間や手間がかかり実際の建物の設計に用いるのは難しい上、前者では実験室の大きさによる制約により、理想的な平面波入射条件での性能を得ることが難しい。また、後者では遮音性能が求められる入射角度が矩形室のモードに依存するという課題がある。

そこで、実験ではなく数値解析で斜め入射音に対する部材の遮音性能を予測するシステムを開発した。本論文では、単板ガラス及び2種の複層ガラスの斜め入射音に対する遮音性能を対象とし、第2章で予測システムの概要を示し、第3章で予測システムの妥当性検証として行った実験室実験の方法について示す。第4章で実験室実験及び予測システムの結果を比較し、予測システムの妥当性を検証する。

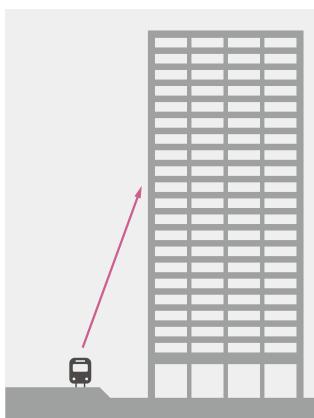


図-1 斜め入射音の例

Fig.1 Example of oblique-incident condition

*1 技術センター 先進技術開発部 AI連携技術開発室

2. 予測システムの概要

2.1 数値解析手法

数値解析モデルの概要を図-2に示す。予測システムは実務で使用することを前提としているため、予測精度が高いことに加え、解析時間が短いことが求められる。そのため、実際の実験室では音源室と受音室が存在し、その間の開口部にガラス部材などの試験体が設置される。一方で、解析モデルでは実験室全体をモデル化することはせず、音源・受音側は半自由空間とし、開口部との仮想境界面に境界要素法（Boundary Element Method: BEM）を適用した。また開口内部の音場及び試験体には有限要素法（Finite Element Method: FEM）を適用した。これにより試験体周囲のみのモデル化で解析することができ、居室や実験室などの空間全体をモデル化する方法に比べて計算時間の短縮が見込める。なお、解析は周波数領域とし、解析対象周波数バンド内を1/48オクターブバンド毎に解析した。

部材の遮音性能指標は、ある入射角度 θ で音波が入射するとき、音響透過損失 $R(\theta)$ として式(1)で表される^{注1)}。音響透過損失は1/3オクターブバンドもしくはオクターブバンド毎に算出されることが多い。

$$R(\theta) = PWL_{inc}(\theta) - PWL_{trans}(\theta) \quad (1)$$

ここで PWL_{inc} は部材に入射する音響パワーレベル、 PWL_{trans} は部材を透過する音響パワーレベルである。予測システムにおいては、それぞれのパワーレベルを以下のように算出する。 PWL_{inc} は試験体表面を剛と仮定し、入射側の試験体の多点の表面音圧レベル $L_{s,1,i}$ から式(2)より算出する。

$$PWL_{inc} = 10\log_{10}\left(\sum_i 10^{\frac{L_{s,1,i}}{10}} \Delta S_i \cos\theta_i\right) - 6 \quad (2)$$

ここで ΔS_i は音圧レベル算出点が代表する面積を示す。本研究では、各試験体において ΔS_i が概ね 0.01m^2 となるようにグリッド上に表面音圧レベルの算出点を設定し、 PWL_{inc} の計算に用いた。なお平面波入射の場合は、試験体のどの場所においても入射角度 θ_i は一定である。一方で球面波入射の場合は、試験体の位置毎に幾何的な入射角度が異なるため、 $\cos\theta_i$ は場所毎に異なる値となる。次に PWL_{trans} は試験体の透過側のインテンシティ積分で計算でき、式(3)のように算出する。

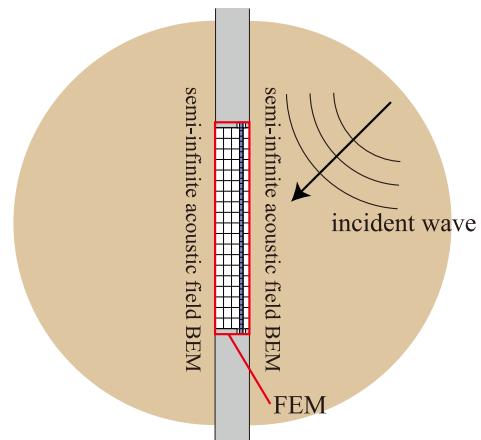


図-2 予測システムの模式図
Fig.2 Schematic of analysis system

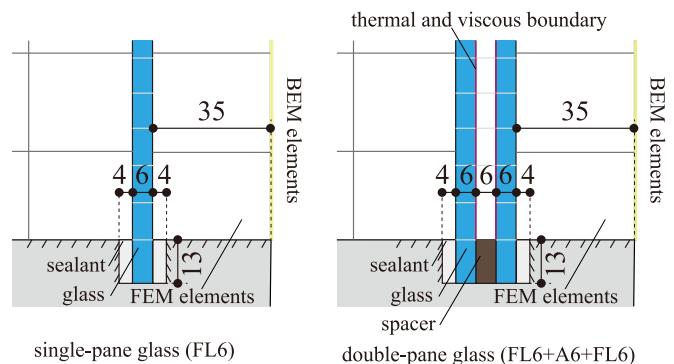


図-3 解析モデルの模式図
Fig.3 Schematic of analysis model

$$SWL_{trans} = 10\log_{10}\left\{\frac{1}{2}\Re\left(\int p_2^*(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS\right)\right\} \quad (3)$$

ここで p_2^* は試験体の透過側の表面音圧の共役複素数を、 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ は表面粒子速度の試験体法線方向成分を表す。また、 $\Re(\cdot)$ は実部を取り出す操作を表す。

最終的に、各周波数での入射パワーレベルと透過パワーレベルを1/3オクターブバンドもしくはオクターブバンド毎にエネルギー合成し、式(1)より音響透過損失を算出する。

2.2 部材のモデル化方法

ここでは後述する実験室実験で測定したガラス部材のモデル化方法について述べる。図-3に単板ガラス及び複層ガラスの解析モデルの模式図を示す。実験では、ガラスは押し縁などによって固定することが一般的で、後述する実験室実験でもそのようにしているが、解析ではモデルの簡略化のため、押し縁をモデル化せずに、ガラスが開口部に直接埋め込まれた条件とした。

FEM及びBEMのメッシュは2次四角形もしくは六面体要素とし、各部材にはソリッド要素を適用した。

なお複層ガラスのスペーサは本来吸湿材や封着材など複数の部材から構成されているが、本解析では均一なソリッド要素としてモデル化している。

また音場要素については節点間隔が波長の1/6以下、ソリッド要素については各要素のアスペクト比が1:3以下となるようそれぞれの要素サイズを独立に設定した。そのため、ガラスと音場は不整合メッシュでの連成となっている。これにより、音場のメッシュをガラスのメッシュに合わせて必要以上に細かくする必要がなくなり、モデルの自由度を小さくすることで解析の効率化、解析時間の短縮を図っている。

またガラスとシーリング材及びガラスとスペーサの境界面では両者の変位が連続しているものとし、シーリング材はその反対の面で固定境界とした。なお、シーリング材と音場の連成及びスペーサと音場の連成は考慮していない。

複層ガラスは、ガラス間の中空層の厚さが小さい場合、空気の粘性と音波の振動が熱として散逸する現象（熱拡散）による減衰の影響が無視できない。これを考慮する方法の1つに、Navier-Stokes方程式に基づいた定式化が考えられるが、この方法はメッシュを細かく分割する必要があるため、計算負荷が高くなる。そこで、粘性・熱拡散の影響が音場の境界付近以外ではほぼ無視できることを利用し、通常の波動方程式に基づく音場に対する周波数依存性のあるインピーダンス境界条件として与えることでモデル化した^{9,10)}。

2.3 物性値の推定システム

予測システムの精度を向上させる上で、数値解析モデルに物性値などのパラメータを適切に与えることが重要である。しかしながら、パラメータの値は実験な

どから直接得ることが難しいことが多い。このような場合には、数値解析をパラメータを変えながら繰り返し行う試行錯誤をしながら尤もらしいパラメータを推定する場合もある。ただしこのような方法はパラメータが多変数になると人間が行うことは困難となる。そこでそのような作業を最適化AIを用いて自動化することで、多数のパラメータを同時に推定するシステムを構築した。これにより精度の高いパラメータ推定が自動で可能となる。

本検討では、ガラスの支持材として用いたシーリング材のヤング率・損失係数が不明であった。また、複数の部材から成る複層ガラスのスペーサを前述のとおり、均一なソリッド要素でモデル化したため、その等価なヤング率を求める必要があった。そこで開口部にシーリング材によって設置された条件の単板ガラス、複層ガラスそれぞれについて、これらの物性値を最適化手法のひとつであるベイズ最適化を用い求める方法を検討した。ベイズ最適化を用いた物性値推定のフローチャートを図-4に示す。まず、ガラスが設置された条件で、面に垂直に力センサー付きハンマーで加振し、ガラス面に設置された振動加速度センサの出力から、単位力あたりの振動変位であるコンプライアンス(m/N)を算出する。この時の加振点と受振点の組み合わせは複数設定する。次に実際の部材をモデル化し、推定したいパラメータを適当な初期条件で数値解析を行い、コンプライアンスを算出する。実測結果と解析結果の差異を誤差関数の形で数値化し、ガウス仮定回帰によって学習させる。ここでガウス仮定回帰では、解析していないパラメータ値での誤差関数の回帰ができる他、そのパラメータでの推定誤差関数の分散も求めることができる。そのためベイズ最適化では、次の候補パラメータ値を選定する際に、現状の回帰モデルで誤差関数が小さくなるようなパラメータ値を選ぶ操作（活用）と、分散が大きく誤差関数の未知な領域を選ぶ操作（探索）が可能である。なお、このバランスはベイズ最適化のハイパーパラメータとなる。選ばれた候補点について再度数値解析を実行し、誤差関数を算出する。所望の誤差関数以下になればその値を推定結果とし、そうでなければ解析結果をガウス仮定回帰に学習させる操作を繰り返す。

ベイズ最適化の特徴として、目的関数をガウス過程回帰で推定するため、誤差関数や誤差関数の勾配を陽に表さずに最適化ができ、また前述の探索の操作が入ることで、比較的局所解に陥りにくい。さらに順問題を繰り返し解析しながら逆問題を解くため、順問題部

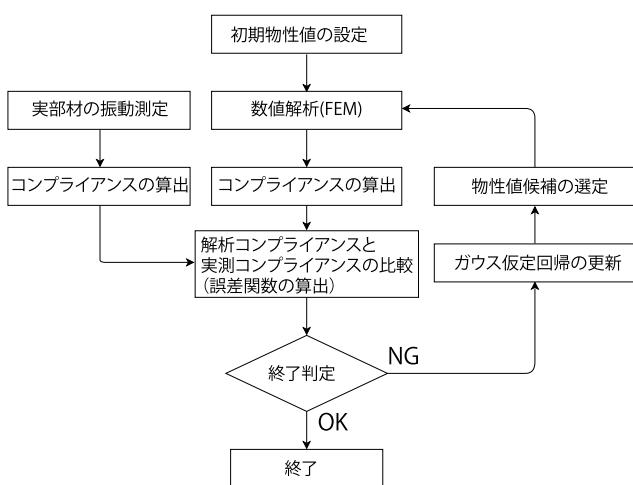


図-4 物性値推定システムのフローチャート

Fig.4 Flowchart of the physical property estimation system

分の一般的な数値解析手法をそのまま流用でき、プログラム上実装が簡便になるという利点がある。

3. 妥当性検証のための実験室実験

本章では、前章で構築した予測システムの妥当性を確認するために行った実験室実験について述べる。

3.1 実験室概要

斜め入射音に対する部材の遮音性能の実験法としては、第一章で述べたとおり数種類の方法が報告されているが、ここでは大成建設技術センター音響のラボ内にある無響室と残響室を組み合わせた実験室（以下、斜め入射遮音実験室）を用いた方法について述べる。

斜め入射遮音実験室の断面図を図-5に示す。無響室を音源室、残響室を受音室とし、その間に設けられている試験開口（W3,400 mm × H3,000 mm）の中に試験体を施工する。この開口に対して斜め入射条件となる

ように単一のスピーカを設置する。このような方法で多数の角度について斜め入射音の音響透過損失を測定するには、角度に応じてスピーカを設置する必要があり、手間がかかる。これを解決するため、今回無響室内に円弧状トラバーサでスピーカを移動できるシステムを構築した。スピーカは円弧のトラバーサ上を移動することができ、仰角方向のスピーカ移動が可能である。また円弧状トラバーサ自体も水平角方向に移動できるため、スピーカを半球面上の任意の点に設置することができる。なおスピーカから開口の無響室側表面中央までの距離はスピーカの位置に関わらず 2.25 m である。距離が短いため、試験体には概ね球面波入射で入射する。またこのスピーカ用のトラバーサとは別に、マイクロホン用のトラバーサを無響室側開口に設置し、試験体の表面音圧の測定に用いた。これにより表面音圧についても多点計測が容易に行える。

3.2 音響透過損失測定方法

実験においても予測システムと同様、式(1)から各入射角度 θ に対する音響透過損失 R を算出する。入射パワ

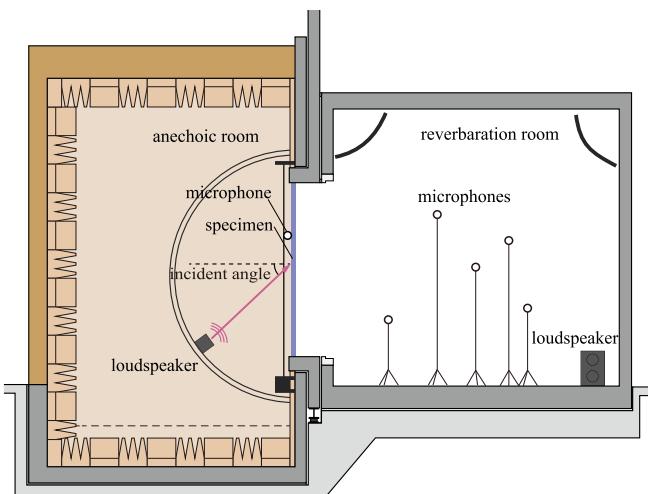


図-5 斜め入射遮音実験室の断面図

Fig.5 Cross section view of the oblique-incident sound transmission loss test room

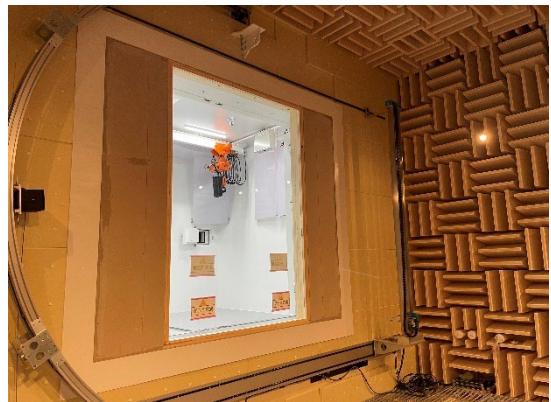


写真-1 单板ガラス試験体

Photo 1 Single-layer glass specimen

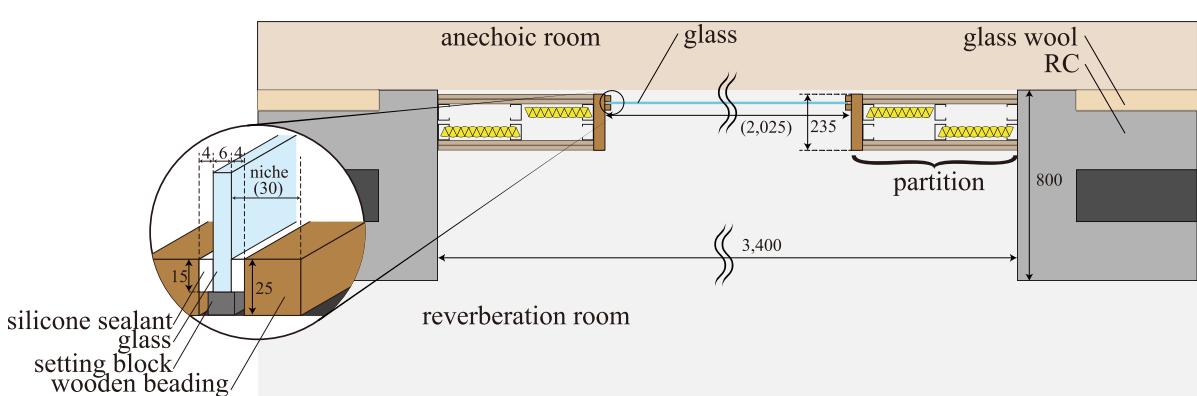


図-6 開口に設置された单板ガラス試験体の断面図

Fig.6 Cross section view of single-layer glass on test opening

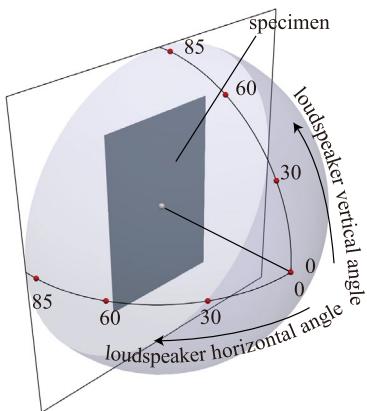


図-7 斜め入射音源条件
Fig.7 Schematic of loudspeaker positions

一レベル PWL_{inc} は予測システムと同様式(2)より求めた。このとき試験体の表面音圧レベル $L_{s,1}$ は試験体から 2 mm (許容誤差 1 mm) の点で測定することとし、試験体とマイクロホン振動膜が平行になるように設置して測定した。次に透過パワーレベル PWL_{trans} を、拡散音場仮定とエネルギー授受式に基づき、透過側の残響室の平均音圧レベル L_2 と等価吸音面積 A を用いて式(4)から算出した。

$$PWL_{trans} = L_2 + 10\log_{10}A - 6 \quad (4)$$

ここで L_2, A の算出には、式(4)と測定原理が同じであることから、残響室と残響室の結合室による音響透過損失の測定方法である JIS A1416:2000¹⁾を援用した。つまり、 L_2 は残響室内 5 点の音圧レベルを用い、 A は残響室内に設置した 1 点の音源での残響室内 5 点の残響時間 T 及び残響室の体積 V より式(5)から算出した。

$$A = \frac{0.16V}{T} \quad (5)$$

3.3 実験条件

斜め入射音の入射角度は、図-7 に示すように水平角方向および仰角方向 0°, 30°, 60°, 85° の計 7 条件とした。なお、この入射角度は、試験体中心までの幾何的な入射角度を示す。前述のように試験体には音波が概ね球面波入射しているため、試験体中心以外では設定した角度とは異なる入射角度となる。

音源にはピンクノイズを用い、1/3 オクターブバンドで 100 Hz から 5 kHz までを対象に音響透過損失 R を算出した。

3.4 試験体条件

妥当性検証のための実験に用いる試験体として、1種類の単板ガラスと 2 種類の複層ガラスを用いた。それぞれの試験体について述べる。

3.4.1 単板ガラス試験体

単板ガラス試験体として厚さ 6 mm のフロートガラス (W2,000 mm × H2,900 mm) を用いた。実験室の開口はガラスの平面寸法よりも広いため、乾式二重壁調整（以降、調整壁）を行った。ただしガラスは押縁によって四周 13 mm が隠れるため、見かけの寸法はそれぞれ 26 mm 程度小さい。試験体を設置した開口部の水平断面図を図-6 に示す。また試験体の様子を写真-1 に示す。ガラスは無響室側のバブル面に対してなるべく凹み（ニッシェ）が生じないように設置しているが、シーリング材を通して 25 mm の押縁で両側から固定している関係で、実際には 30 mm 程度のニッシェが生じている。

3.4.2 複層ガラス試験体

複層ガラス試験体としては、空気層 6 mm を厚さ 6 mm のフロートガラスで挟んだ同厚複層ガラス (FL6+A6+FL6) 及び、異厚複層ガラス (FL6+A6+FL8) の 2 種類の試験体を用いた。平面寸法は、どちらも W1,500 mm × H2,300 mm であり、単板ガラス試験体よりも小さい。また単板ガラス試験体同様、見かけの寸法はさらに 26 mm 程度小さい。試験体の固定の方法は単板ガラス試験体と同様である。通常異厚複層ガラスでは耐風圧の関係で、厚いガラスを屋外側つまり無響室側にするが、本実験では異厚の条件も薄い 6 mm ガラスを屋外側にし、屋外側のガラス条件を揃えることとした。

4. 予測システムの妥当性検証

本章では、2 章で述べた予測システムの解析結果と、3 章で述べた実験室実験の結果の比較を行うことで、予測システムの妥当性を検証した。

4.1 解析モデル条件

解析モデルに設定した試験体を構成する各部材の物性値を表-1 に示す。フロートガラスの物性値については文献¹¹⁾を参照した。シーリング材及び複層ガラスのスペーサのヤング率及び損失係数については、今回使用した単板ガラス試験体と同厚複層ガラス試験体に対して、2.3 節で述べた物性値の推定システムを用いて得られた数値を利用した。

音源条件は実験室実験と同様に、試験体中心から

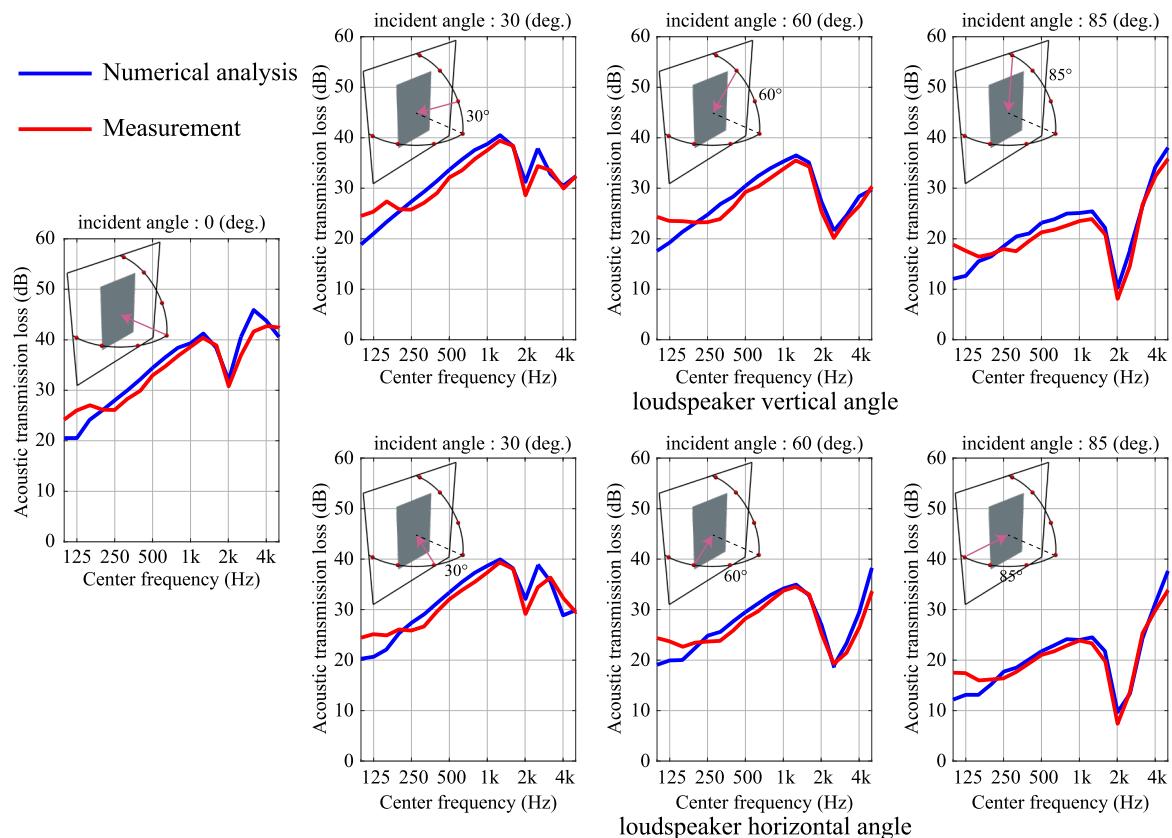


図-8 単板ガラス試験体の斜め入射音に対する音響透過損失
Fig.8 Acoustic transmission loss of single-layer glass under oblique-incident conditions

2.25 m 点からの球面波入射とし、実験と同様に 7 条件の 1/3 オクターブバンドで 100 Hz から 5 kHz の斜め入射に対する音響透過損失を算出した。

4.2 解析結果

4.2.1 単板ガラス試験体

単板ガラス試験体について、7 条件の斜め入射音に対する音響透過損失を実験と数値解析で比較した結果を図-8 に示す。2 kHz 付近で大きな遮音性能の落ち込みがみられるが、これはコインシデンス効果によるものである。理論的に、無限大面积の 6mm ガラスに平面波入射する仮定の下では、85° 入射では 2 kHz、60° 入射では 2.7 kHz、30° 入射では 8 kHz で遮音性能の落ち込みが生じるが、有限面積の試験体を押し縁等によって無響室から凹んだ位置に設置していることなどから、0° や 30°

入射では理論通りの周波数では落ち込んでいない。予測システムの結果においても上記のような理論通りとはならない実験室実験での落ち込みが確認でき、さらにその落ち込みの周波数や落ち込み量についても、水平方向・仰角方向に関わらず、実測値と良い対応がみられている。このことから、予測システムの妥当性が示される。

なお 160 Hz 帯域以下では実験値の方が音響透過損失が高くなる傾向が見られる。これは斜め入射実験室では無響室の吸音楔の垂直入射カットオフ周波数が 125 Hz となっており、低音域では無響室の壁面で吸音が不足し、反射が生じた影響と考えられる。

4.2.2 複層ガラス試験体

FL6+A6+FL6 の同厚複層ガラス及び FL6+A6+FL8 の異厚複層ガラスに対して予測を行った結果をそれぞれ図-9、図-10 に示す。複層ガラスの場合はコインシデンス効果に加え、ガラスと中空層による共振現象である共鳴透過現象による遮音性能の落ち込みが発生する。この落ち込み周波数の理論値は今回の試験体の条件ではそれぞれ 280 Hz, 260 Hz である。実験では概ねこの理論値に対応する中心周波数で落ち込みがみられた。またその落ち込み幅は 85° 入射では小さく、他条件と比

表-1 解析モデルの物性値条件
Table 1 Physical property of analysis model

	Young's modulus (N/m ²)	Poisson's ratio	density (kg/m ³)	loss factor
Float glass	7.16×10^{10}	0.23	2500	0.001
Sealant	7.94×10^4	0.25	1000	0.014
Spacer (only double-layered glass)	1.0×10^7	0.23	1000	0.01

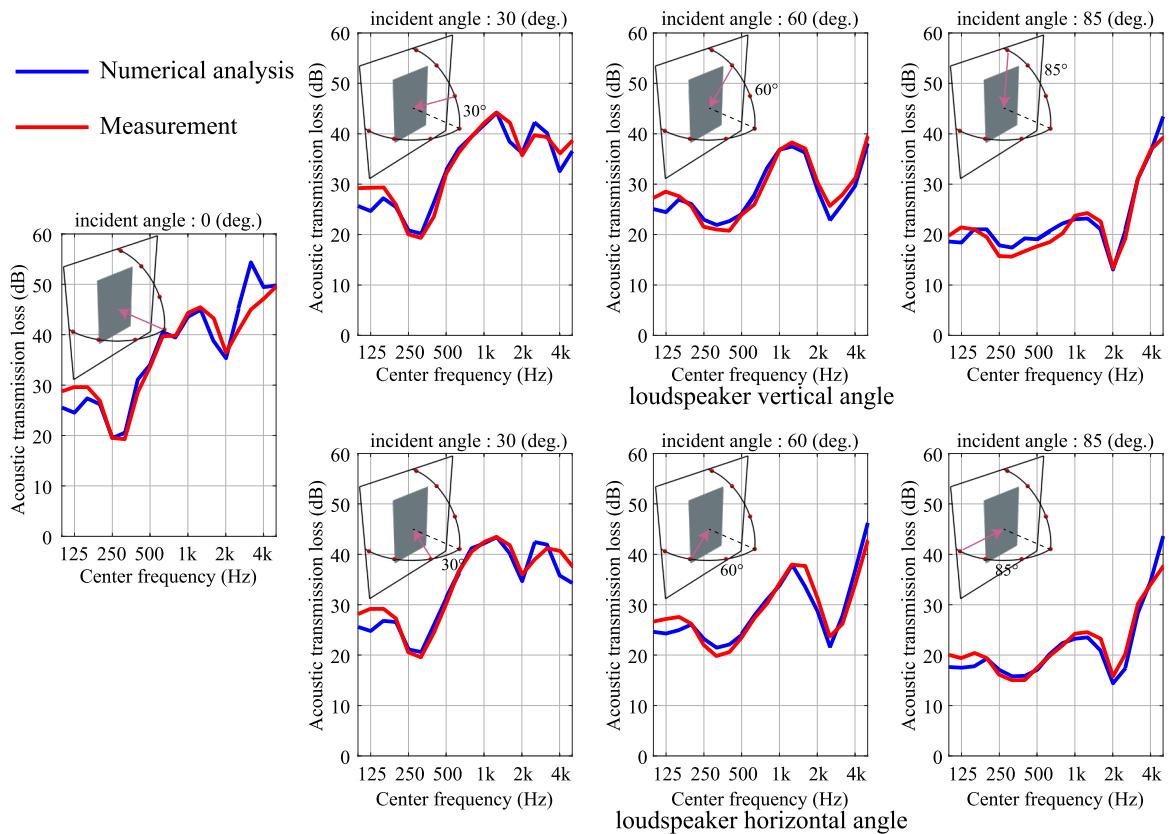


図-9 同厚複層ガラス試験体(FL6+A6+FL6)の音響透過損失
Fig.9 Acoustic transmission loss of same-thickness double-layered glass (FL6+A6+FL6) under oblique-incident conditions

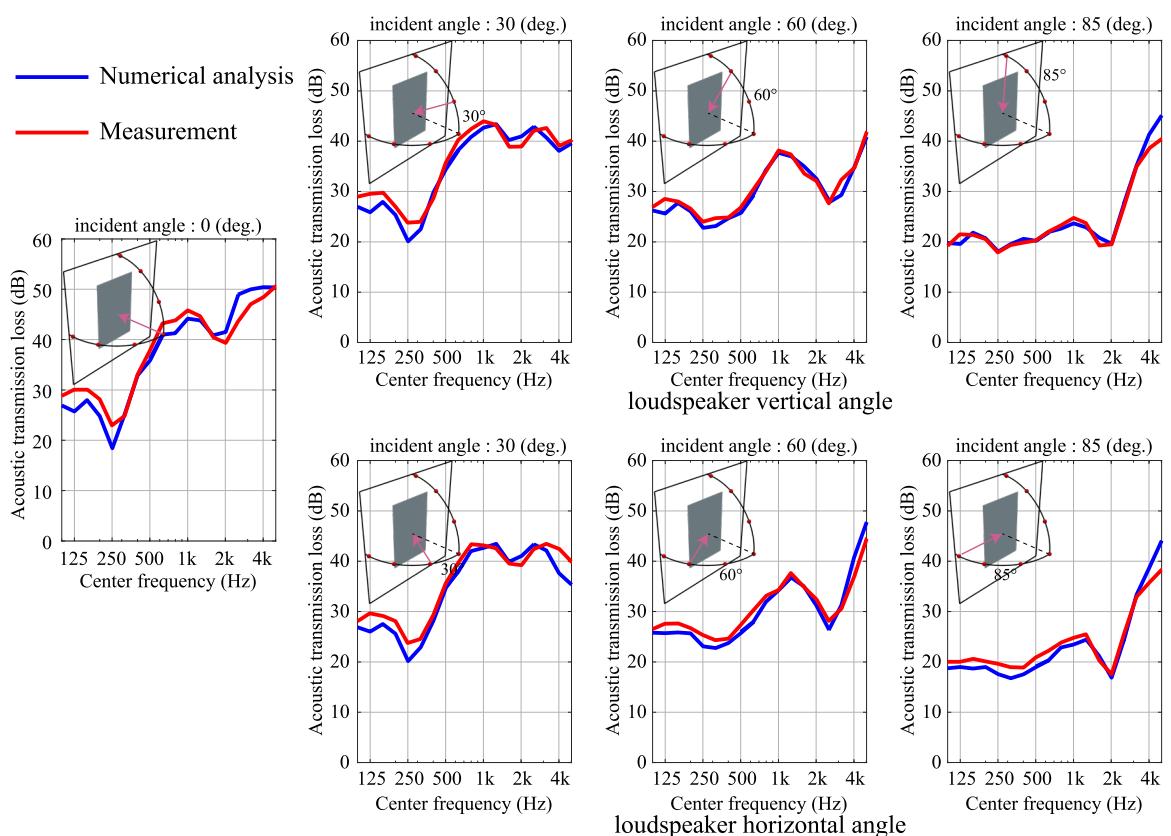


図-10 異厚複層ガラス試験体(FL6+A6+FL8)の音響透過損失
Fig.10 Acoustic transmission loss of different-thickness double-layered glass (FL6+A6+FL8) under oblique-incident conditions

べてなだらかな曲線となっている。次にコインシデンス現象が起こる 2 kHz 付近を見ると、同厚複層ガラスよりも異厚複層ガラスのほうが遮音性能の落ち込みがやや小さい。これは同厚複層ガラスでは、コインシデンス現象が起きる周波数が両側のガラスで同じなのに對し、異厚複層ガラスではその周波数がずれるためである。予測システムはこれらの現象を 160 Hz 以上の帯域で概ね解析できており、単板ガラスに比べ複雑な構成である複層ガラスに対しても本予測システムは遮音性能を予測できることを示した。

5. まとめ

数値解析で斜め入射音に対する部材の遮音性能を予測するシステムを開発した。不整合メッシュの連成及び半自由空間 BEM の採用により、解析時間の削減を行い、物性値推定及び空気粘性の適切なモデル化により、解析精度の向上を図った。実験室実験と比較したところ、遮音性能を精度よく予測することができるることを確認した。なお、本論文での予測システムの入射条件は実験との比較のために球面波入射としたが、実現場では試験体と音源が離れており、平面波入射に近い入射条件であることが多い。予測システムでは平面波入射での解析ができ、これに対応可能である。今後、高層のホテルや住宅など、室内における静謐性が求められる様々な建物の音響設計に適用し、適切な部材の選定によるリスク低減・コスト削減に利用していきたい。

謝辞

本システムを開発するにあたり、東京大学大学院工学系研究科 佐久間哲哉教授及び九州大学大学院芸術工学研究科 井上尚久助教授のご指導を賜りました。ここに深く謝意を表します。

注

注1) ここでは試験体法線方向ベクトルと、音波の進行方向ベクトルとのなす角を入射角度と定義する。また、遮音性能は試験体平面内で定義される方位角には依存しないものとして定式化しているが、実際には 4 章で述べているように、遮音性能は方位角にも依存する。

参考文献

- 1) JIS A 1416:2000 実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法
- 2) ISO 10140-2:2021 Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation
- 3) 朝倉 巧, 坂本 慎一 : FDTD 法による音響振動連成解析を用いた遮音性能のシミュレーション, 生産研究, Vol.61, No. 4, pp.793-796, 2009.
- 4) 會田 祐, 井上 尚久, 佐久間 哲哉 : 残響室における壁体の音響透過損失測定の数値シミュレーション -複合部材の低音域共鳴透過に関する検討-, 日本建築学会環境系論文集, Vol.85, No.768, pp.115-124, 2020.
- 5) J.C. Davies, B.M. Gibbs: The oblique incidence measurement of transmission loss by an impulse method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 74, No. 3, pp. 381-393, 1981.
- 6) 浜田 幸雄, 安久 司郎, 内田 季延, 橋 秀樹 : 複素音響インテンシティ計測による材料の斜め入射音響透過損失の測定, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 388, pp.1-6, 1988.
- 7) J. Yoshimura, S. Sugie: Measurement methods for sound insulation of windows, Inter-Noise 2004, Prague, Czech Republic, 2004.
- 8) M. Villot, G. Chavériat; J. Roland: Phonoscopy: An acoustical holography technique for plane structures radiating in enclosed spaces, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 1, pp.187-195, 1992.
- 9) P.M. Morse, K. N. Ingard: Theoretical Acoustics, Chapter 6, McGraw Hill, 1968.
- 10) 井上 尚久, 佐久間 哲哉 : 粘性境界層を考慮した音響振動連成境界条件の導出, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.651-652, 2018.
- 11) セントラル硝子 : 板ガラス総合カタログ 技術資料編, p.8, 2019.