伝搬モード展開を用いた入射音場の実験的解析手法の検討

界壁遮音性能測定時の入射音場に関する研究 その1

AN EXPERIMENTAL ANALYSIS METHOD

FOR AN INCIDENT SOUND FIELD USING PROPAGATION MODE EXPANSION

Study on the incident sound field in the insulation performance measurement for partition walls Part 1

會田 祐^{*1}, 井上 尚久^{*2}, 佐久間 哲哉^{*3}

Yu AIDA, Naohisa INOUE and Tetsuya SAKUMA

In the sound insulation measurement of partition walls between dwelling rooms, the incident sound field in a source room strongly depends on the geometry of the room, and it is not regarded as random incidence at low frequencies. In this paper, an experimental method for analyzing the characteristics of the incident sound fields in dwelling rooms is proposed, applying the propagation mode expansion with two layers of planar microphone array. The proposed method is tested on FEM models to validate its applicability to dwelling rooms and to demonstrate the analysis of incident sound fields.

Keywords : Sound insulation performance measurement, Incident sound field, Sound field decomposition, Propagation mode, Directivity

遮音性能測定, 入射音場, 音場分解, 伝搬モード, 指向性

1. はじめに

現場における隣室間の室間音圧レベル差を予測する場合, 通常, 音源室におけるランダム入射や音場入射条件を仮定したうえで, 界壁部材の音響透過損失に基づく検討が行われる。しかし, 住宅居室などの比較的小さい空間では, 低音域においては室内モード密度が低いため, 室間音圧レベル差測定時の入射音場はランダム入射条件等に近似するとは見なせず, 室形状に起因する定在波の強い影響を受けると考えられる。一方, 低音域における界壁の遮音性能に関しては, RC 壁のコインシデンス現象や, 乾式二重壁もしくは RC 壁とふかし壁の複合壁での低域共鳴透過現象による, 入射角依存性が考えられる¹⁾。したがって, 各現場における入射音場の特性の違いが, 低音域の遮音性能に影響を及ぼす可能性が推測される。

室間音圧レベル差測定時の入射音場は, 室内の各壁面による多重反射波により構成されることから, 測定対象とする界壁面への入射特性を把握するためには, 入射音場から対象壁面への入射波を分離する音場分解手法が必要となる。既往研究において, 斜入射による吸音率や音響透過損失の算出, 振動場の可視化を目的に, 音場分解を行う実験手法を検討した事例が幾つかあるものの, 住宅居室などの一般室内空間の入射音場を対象とした検討事例はみられない。

無響室における半自由音場の分解に関しては, 浜田らが複素音響インテンシティ計測を用いた手法²⁾, Tamura らが 2 次元空間フーリエ変換を用いた手法^{3), 4)}により, それぞれ入射波を分離する方法を

検討している。しかし, これら手法は, 単一壁面への入射および反射波が存在する場合を対象としており, 通常の室内空間の様に複数の壁面による多重反射がある場合には適用できない。

多重反射を含む音場の分解に関しては, Villot ら⁵⁾, Brutel-Vuilmet ら⁶⁾が近接場音響ホログラフィを応用した実験手法を提案している。同手法は音響透過損失試験室における透過側音場を対象とし, 透過面に対して直交する側壁 4 面を剛境界条件, 対向する後壁を完全吸音条件とした音場に対して 2 次元空間フーリエ変換を適用することで, 側壁間の多重反射を含む音場を分解し, 波数空間での透過波の解析を行っている。しかし同手法は, 後壁が反射性の場合, 透過波と後壁からの反射波を分離できないため適用できない。

一方, 音響材料試験装置における音場分解に関しては, 近年佐久間らが, 寺尾ら⁷⁾の提案に基づき, 矩形の薄型チャンバーにおいて入射波および反射波を分離し, 斜入射吸音率を計測する実験手法を検討している^{8), 9)}。同手法は, チャンバー内における定在波状態の入射音場を進行および後退方向の伝搬モードにより展開するものであり, 多重反射を含む一般室内空間へも応用できる可能性があると考えられる。なお, 入射音場を対象としていないものの, 類似の原理を用いた事例としては, Hallman らが振動板の放射パワー計測や振動場の可視化を目的として, 近接場音響ホログラフィを矩形空間内の観測層 2 層に適用し, 透過波を分離した模型実験事例がある¹⁰⁾。

以上を踏まえ本研究では, 住宅居室などの一般室内空間において,

^{*1} (株)長谷工コーポレーション技術研究所 研究員・修士(工学)／

^{*2} 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
特任助教・博士(環境学)

^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
准教授・博士(工学)

Researcher, Technical Research Institute, HASEKO Corporation, MEng./Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo
Project Assist. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Dr.Env.
Assoc. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Dr.Eng.

界壁遮音性能測定時の入射音場の特性を把握するための実験手法の確立を目的とする。本論ではまず、文献7)～10)において検討された音場分解の原理を一般室内空間に適用することで、入射音場から入射波を分離する手法を提案する。つぎに、数値解析モデルによる室内音場において本手法を検証することで、その精度や適用限界を明らかにし、一般室内空間への適用可能性について考察する。さらに、数値解析モデルを対象に、本手法を用いた入射特性の解析事例を示すことで、今後、実際の建築空間において入射音場解析を検討するうえでの基礎的知見を整備する。なお、本論文は、日本音響学会2017年春季研究発表会にて発表した内容¹¹⁾に加筆・修正を加えたものである。

2. 入射音場解析手法

2.1 伝搬モード展開を用いた矩形室の音場分解

遮音性能測定時の音源室として Fig.1 に示す矩形室を想定する。入射特性の評価対象とする界壁面（以下、入射壁）に対し、直交する側壁4面を剛境界条件と仮定した場合、室内音圧は±z方向の無限長ダクトにおける、伝搬モードおよびエバネッセントモードの重ね合わせとして、Eq.(1)により表される。

$$p(x, y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [a_{m,n} f_{m,n}(x, y, z) + b_{m,n} g_{m,n}(x, y, z)]$$

$$f_{m,n}(x, y, z) = \exp(-jk_z^{m,n} z) \cos(k_x^m x) \cos(k_y^n y)$$

$$g_{m,n}(x, y, z) = \exp(jk_z^{m,n} z) \cos(k_x^m x) \cos(k_y^n y) \quad (1)$$

ここで、 m, n はそれぞれ x, y 方向における室内音圧のモード次数、 $a_{m,n}, b_{m,n}$ はそれぞれ $+z$ および $-z$ 方向の伝搬モードの振幅である。 x, y, z 方向の波数成分 $k_x^m, k_y^n, k_z^{m,n}$ は Eq.(2) のとおりである。 $k_z^{m,n}$ が実数の場合、対象モードは伝搬モードとなる一方、 $k_z^{m,n}$ が虚数の場合、対象モードは音響パワーを伝搬せず振幅が指数関数的に減衰するエバネッセントモードとなる。

$$k_x^m = m\pi/L_x, \quad k_y^n = n\pi/L_y, \quad k_z^{m,n} = \sqrt{k^2 - k_x^{m2} - k_y^{n2}} \quad (2)$$

さらに $+z$ 方向のモードは、Eq.(3) により入射平面波の組み合わせに分解される。

$$a_{m,n} f_{m,n}(x, y, z) = a_{m,n} \exp(-jk_z^{m,n} z) \cos(k_x^m x) \cos(k_y^n y)$$

$$= \frac{a_{m,n}}{4} [\exp(-jk_z^{m,n} z - jk_x^m x - jk_y^n y) + \exp(-jk_z^{m,n} z - jk_x^m x + jk_y^n y)$$

$$+ \exp(-jk_z^{m,n} z + jk_x^m x - jk_y^n y) + \exp(-jk_z^{m,n} z + jk_x^m x + jk_y^n y)] \quad (3)$$

その際、入射平面波の伝搬方向は、入射壁に対する天頂角 $\theta_{m,n}$ ならびに方位角 $\varphi_{m,n}$ について、周波数ごとに Eq.(4) により求められる。

Fig.1 Geometry of the source room model

$$\theta_{m,n} = \sin^{-1} \left(\sqrt{k_x^{m2} + k_y^{n2}} / k \right), \quad \varphi_{m,n} = \tan^{-1} (k_y^n / k_x^m) \quad (4)$$

また、分解された m, n 次モードの入射平面波による音響インテンシティ $I_{\text{inc}}^{\theta_{m,n}}$ は、Eq.(3) に基づき Eq.(5) により求められる。

$$I_{\text{inc}}^{\theta_{m,n}} = \begin{cases} |a_{m,n}|^2 / 2\rho c, & m=0, n=0 \\ |a_{m,n}|^2 / 4\rho c, & m \neq 0, n=0 \text{ or } m=0, n \neq 0 \\ |a_{m,n}|^2 / 8\rho c, & m \neq 0, n \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 ρ は空気密度、 c は音速である。また、Eq.(3)～(5)は-z方向の伝搬モードに関しても同様に適用され、入射平面波と同様に、反射平面波の伝搬方向 $\theta_{m,n} \cdot \varphi_{m,n}$ 、および音響インテンシティ $I_{\text{ref}}^{\theta_{m,n}}$ が求められる。

Fig.2 に、室内の伝搬モードにおける周波数と $\theta_{m,n}$ の対応例を、剛境界条件での室の共鳴モードとともに示す。なお、同図における室形状は、後述する数値解析モデルの形状とした。本論では、界壁遮音性能の入射角依存性に大きく影響すると考えられる、入射壁に対する天頂角 θ に着目して検討を行う。

2.2 入射および反射波振幅の算出方法

Eq.(1)より、室内観測点 R 個における、複素音圧振幅 p_r と入射および反射平面波の関係は R 個の連立方程式により表現され、Eq.(6) のとおりとなる。

$$\mathbf{A}\mathbf{b} = \mathbf{p} \quad (6)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_{0,0}(x_1, y_1, z_1) & g_{0,0}(x_1, y_1, z_1) & \cdots & f_{m,n}(x_1, y_1, z_1) & g_{m,n}(x_1, y_1, z_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ f_{0,0}(x_R, y_R, z_R) & g_{0,0}(x_R, y_R, z_R) & \cdots & f_{m,n}(x_R, y_R, z_R) & g_{m,n}(x_R, y_R, z_R) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \{a_{0,0} \quad b_{0,0} \quad \cdots \quad a_{m,n} \quad b_{m,n}\}^T$$

$$\mathbf{p} = \{p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_{R-1} \quad p_R\}^T$$

対象モード数を N 個とした場合、 $\mathbf{A}$ は $R \times 2N$ の行列となり、特異値分解法などを用いて疑似逆行列 $\mathbf{A}^+$ を求めることで、Eq.(7)により入射および反射平面波の振幅ベクトル $\mathbf{b}$ に関する最小二乗解を算出することができる。

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}^+ \mathbf{p} \quad (7)$$

なお、本手法は、側壁の剛境界条件を仮定し音場を分解する点で、参考文献5), 6), 10)の2次元空間フーリエ変換による手法と同様であるが、空間フーリエ変換の代わりに Eq.(6)を用いることで、原理上、観測点位置が観測層平面内に制約されない点が異なる。

2.3 観測点の配置

複素音圧振幅 p_r の観測点に関しては、観測の効率化も考慮に入れ

Fig.2 Relation between the frequency and the polar angle θ for the propagation modes in a room

た場合、各種配置方法の可能性はあるが、本報では、まず基本的な配置条件を考えることとし、入射壁近傍の x - y 平面に、壁面と平行な観測層 2 層を設け、各層内に観測点を格子点状に配置する方法を検討した。

本配置方法における観測点間隔に関しては、対象周波数との関係により以下を考慮する必要がある。まず、観測層 2 層の間隔 Δz が z 方向半波長と一致する周波数 f_s では、前進・後退波が一意に定まらず分離不能となることから、 Δz を対象周波数範囲の上限 $f_{\max}$ における半波長以下に設定する必要がある。一方、 Δz の間隔が過度に小さい場合、波長の大きい低音域において z 方向の位相差の検出精度が低下する懸念があることから、 Δz の設定では対象周波数範囲の下限 $f_{\min}$ における波長や計測精度なども考慮する必要がある。

つぎに、観測層上の格子点間隔 Δx , Δy に関しても、 $x \cdot y$ 方向の定在波を検知するうえで、各方向の波長を考慮した設定が求められる。空間エイリアシングの影響を考慮すると、 Δx および Δy は各方向の定在波の半波長以下とする必要があることから、モード展開が可能な $x \cdot y$ 方向のモード次数の上限 $m_{\lim}$, $n_{\lim}$ は Eq.(8) に示すとおりとなる。

$$m_{\lim} \leq L_x / \Delta x, \quad n_{\lim} \leq L_y / \Delta y \quad (8)$$

3. 数値解析実験の条件

3.1 検討方法

前章で提案した入射音場解析手法（以下、提案手法）を、FEM の定常音場解析により再現した室内入射音場に適用し、各種検討を行った。

数値解析モデルの概要を Fig.3 に示す。室形状については、一般的な住宅居室を想定した矩形形状とした。室容積は約 42.6 m³ である。数値解析モデルの音響要素には 27 節点 6 面体要素を用い、要素寸法は、 $f_{\max}$ における波長の 1/8 以下を満足する条件となる 0.12 m 程度とした。総節点数は 205,497 点である。入射壁は $z=0$ 位置の壁面とした。

対象周波数範囲は 1/1 オクターブバンド 63~250 Hz 帯域（下限周波数 $f_{\min} = 44.2$ Hz, 上限周波数 $f_{\max} = 353.6$ Hz）とし、室間音圧レベル差測定 JIS 基準¹²⁾における参考的な周波数帯域である 63 Hz 帯域までを含めた。

Fig.3 Numerical analysis model of the source room

音源については、同 JIS に準拠した一般的な配置を模擬し、入射壁に対向する後壁の隅に点音源を設定した。周波数特性については、ピンクノイズを想定した -3 dB/オクターブの勾配を与えた。

観測点配置に関しては、観測点間隔 Δx , Δy , Δz をすべて 0.4 m とし、 $f_{\max}$ における半波長を下回る設定とした。観測層の位置は、特に明記しない限り、入射壁に近い観測層 1 と入射壁の離隔距離を 0.3 m に設定することを基本とし、実建物への適用の際、界壁部に通常存在する梁型等を回避できる配置とした。総観測点数は 144 点である。なお、本設定では $f_{\min}$ の波長に対する Δz の比率は 5.2% となるが、これは、伝達関数法を用いた音響管の垂直入射吸音率計測において、入射および反射波を分離する際における、観測点間隔下限の一般的指針値 5%¹³⁾を満足する程度となる。

3.2 室内吸音条件

数値解析モデルの壁面吸音条件を Table 1 に示す。壁面は剛境界条件もしくは吸音条件とし、吸音条件とした壁面については、住宅居室での 63~250Hz 帯域の室内平均吸音率が 0.1 前後に分布する¹⁴⁾ことを踏まえ、ランダム入射吸音率が 0.1 近傍となる様、垂直入射吸音率 $\alpha_0 = 0.05$ を与える比音響インピーダンスを設定した。また、その際の比音響インピーダンスの位相 ψ については、住宅居室における低音域の比音響アドミッタンス虚数部（比音響サセプタンス）が 0~-0.1 程度に分布するとの調査事例¹⁵⁾を踏まえ、ランダム入射吸音率 0.1 の条件下で同サセプタンスに概ね対応する $\psi = 0 \sim 80^\circ$ に、参考としてマイナス側の範囲も含めた、 $\psi = -80^\circ \sim 80^\circ$ の範囲内で複数条件を設定した。

Table 1 の No.1~4 では吸音面配置による影響の検証を狙い、吸音面の位相を $\psi = 0^\circ$ としたうえで、実際の居室を想定した室内全面吸音を含む各種吸音面配置を設定した。No.5~10 では吸音面の位相 ψ による影響の検証のため、室内全面吸音としたうえで、位相を $\psi = \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 80^\circ$ に変化させた。

4. 入射音場解析の基本条件に関する検討

まず、提案手法を適用する際における基本条件を検討するため、周波数間隔による入射角分解能への影響、ならびにモード展開時のエバネッセントモードの扱いについて考察した。

4.1 周波数間隔による入射角分解能への影響

定周波数幅 Δf による音圧スペクトルを伝搬モードにより展開する際における、天頂角 $\theta_{m,n}$ の分解能の例を Fig.4 に示す。各伝搬モー

Table 1 Absorption conditions of numerical analysis models

No.	incident wall	side walls	back wall
1	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 0 \text{ deg}$	rigid	rigid
2	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 0 \text{ deg}$	rigid	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 0 \text{ deg}$
3	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 0 \text{ deg}$		
4	rigid	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 0 \text{ deg}$	rigid
5	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 45 \text{ deg}$		
6	$\alpha_0 = 0.05, \psi = -45 \text{ deg}$		
7	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 60 \text{ deg}$		
8	$\alpha_0 = 0.05, \psi = -60 \text{ deg}$		
9	$\alpha_0 = 0.05, \psi = 80 \text{ deg}$		
10	$\alpha_0 = 0.05, \psi = -80 \text{ deg}$		

ドの $\theta_{m,n}$ はカットオフ周波数に近づくとともに 90° に向かい急峻に変化するため、天頂角間隔 $\Delta\theta$ は $\theta_{m,n}$ の増大に伴い拡大すること、また、 $\Delta\theta$ は周波数の低下によっても拡大することが確認できる。

そこで、 Δf による入射角分解能への影響を検討するため、No.1 の入射平面波インテンシティ $I_{\text{inc}}^{\theta_{m,n}}$ を、 $\Delta f = 1.25, 0.3125$ Hz の条件で算出し比較した。Fig.5 に、算出結果を周波数および入射角 θ についてバンド合成した結果を示す。ここでは、周波数を 1/24 オクターブバンドにより合成し、入射角については Eq.(9) のとおり、 $0 \sim 90^\circ$ を 45 分割した定幅 $\Delta\theta_b = 2^\circ$ のバンドにより、Eq.(10) に基づき合成した。

$$\Delta\theta_b = \frac{\pi/2}{45}, \quad \theta_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta\theta_b, \quad (i = 1, 2, \dots, 45)$$

$$\theta_{i,1} = \theta_i - \Delta\theta_b/2, \quad \theta_{i,2} = \theta_i + \Delta\theta_b/2 \quad (9)$$

$$I_{\text{inc}}^{\theta_i} = \sum I_{\text{inc}}^{\theta_{m,n}}, \quad \theta_{i,1} \leq \theta_{m,n} < \theta_{i,2} \quad (10)$$

ここで、 θ_i はバンドの中心角、 $\theta_{i,1}$ および $\theta_{i,2}$ はバンドの下限および上限角、 $I_{\text{inc}}^{\theta_i}$ は中心角 θ_i のバンドによる入射平面波のインテンシティの合成値である。なお、Fig.5 のレベルは、対象周波数範囲における室内平均音圧レベルのオーバーオール値により基準化した。

Fig.5 では、fig.2 に図示した伝搬モードの平面波入射方向や、室内共鳴モードでのレベル上昇の様子が観察できるものの、 Δf が大きい Fig.5 (a) では、カットオフ周波数近傍でのインテンシティ分布に欠落

Fig.4 Relation between the intervals of frequency and polar angle θ for propagation modes

Fig.5 Incident intensity of plane waves for No.1

がみられ、とくに入射角分解能が低下する低周波数で顕著だった。一方、 Δf が小さい Fig.5 (b) では、インテンシティ分布に大きな欠落はなく、カットオフ周波数近傍でも入射特性を概ね把握できた。

入射角分解能の要求は $\Delta\theta_b$ の大小により変化することから、 $\Delta\theta_b$ が異なる場合には、 Δf の適切な設定値も変化するが、本論では上述の結果を踏まえ、 $\Delta\theta_b = 2^\circ$ 、 $\Delta f = 0.3125$ Hz により、以降の入射音場解析を行うこととした。

4.2 エバネッセントモードの扱い

Eq.(6) によりモード展開を行う際に、伝搬モードのほか、エバネッセントモードを含めることによる効果について検討した。Fig.6 に示すとおり、波数空間におけるモード格子の対角長 Δk に係数 a を乗じて k に加算した k' を考え、半径長 k' による範囲内の格子点を対象モードとすることで、エバネッセントモードの導入程度を変化させ解析を行った。なお、導入するエバネッセントモードの上限について事前検討を行った結果、Eq.(8) によるモード次数の上限 $m_{\text{lim}} = 12$ 、 $n_{\text{lim}} = 6$ までは含めた場合は入射波が分離不能となり、波長に対する観測点数が不十分であると判断されたため、ここではエバネッセントモードの上限を、分解可能であったモード次数の上限 $m = 11$ および $n = 5$ までに制限した。

音場分解の精度を比較するため、 $a = 0, 0.5, 1$ と変化させて入射音場解析を行い、分解前の FEM 解析による音圧レベル L と、Eq.(7) による振幅ベクトル $\mathbf{b}$ を Eq.(6) に代入し再構成した音圧レベル L' を比較した。各観測点における L と L' の差について、1/3 オクターブバンドでの最大絶対値を Fig.7 に示す。 $a = 0$ では再構成による誤差が目立ち、とくに位相 ψ が負の際に誤差が 10 dB を超える場合があったが、エバネッセントモードを含めた $a = 0.5$ では 1dB 未満に低減された。 $a = 1$ とした場合については、 $a = 0.5$ に比べ誤差が若干縮小する傾向があった。

つぎに、入射および反射波の分離精度を検証するため、Fig.7(a) で誤差が比較的大きかった No.1 を対象に、入射および反射平面波のインテンシティ $I_{\text{inc}}^{\theta_{m,n}}$ 、 $I_{\text{refl}}^{\theta_{m,n}}$ の比からエネルギー反射率 $|r|^2$ を算出し、 $a = 0, 1$ の条件を比較した。 $|r|^2$ について、周波数を 1/3 オクターブバンド、入射角を $\Delta\theta_b = 2^\circ$ のバンドで平均した結果を Fig.8 に示す。同図には、解析モデルで設定した入射壁によるエネルギー反射率の理論値も併せて示す。 $a = 0$ では一部で $|r|^2$ に乱れが生じ、理論値から乖離する傾向があったが、エバネッセントモードを導入した $a = 1$ の $|r|^2$ は理論値と一致し、入射波分離の精度が大きく向上した。

以上より、提案手法においては、入射波分離の精度を確保するうえで、エバネッセントモードの導入が必要であると考えられた。導入の程度としては、本項の結果より $a = 1$ 程度で十分と判断された

Fig.6 Target modes for mode expansion

Fig.7 Maximum absolute difference between analyzed and reconstructed SPL

ことから、以降の検討における解析は、すべて $a = 1$ により実施することとした。

5. 室内吸音による影響の検討

5.1 吸音配置による影響

室内吸音配置による影響を明らかにするため、まず、室内共鳴周波数が剛境界条件時と等しい $\psi = 0^\circ$ の条件について検討した。Fig.9 に、No.1～4 のエネルギー反射率 $|\tau|^2$ を、Fig.8 同様の平均化幅により求めた結果を示す。同図には、Fig.8 と同じく入射壁によるエネルギー反射率の理論値も併せて示す。入射壁のみを吸音面とした No.1 と、入射壁および後壁を吸音面とした No.2 は理論値と極めて対応がよく、入射および反射波が精度よく分離できていることがわかる。一方、室内全面を吸音面とした No.3 の $|\tau|^2$ は、 $\theta = 45^\circ$ 以上で理論値に比べ小さい傾向があり、また各周波数で若干の乱れも確認された。さらに、側壁のみを吸音面とした No.4 の $|\tau|^2$ は、理論上 1 であるものの θ の増大に従い低下し、 $\theta = 90^\circ$ 近傍ではほぼ 0 となった。

本結果より、No.3 および No.4 の $|\tau|^2$ では、入射壁に加え側壁による吸音効果が反映されていると推測された。そこで No.4 を対象に、 Δz を保ったまま、観測層位置を室中心まで後退させた条件を解析し、観測層位置による変化についても検討した。Fig.10 に、観測層位置による $|\tau|^2$ の比較を示すが、観測層が入射壁から後退することで擦過角に近い値がさらに低下する様子がみられた。

この結果について検証するため、Eq.(11) による、矩形ダクトにおける伝搬モードの伝搬特性に関する理論式¹⁶⁾との比較を行った。

$$k_z'^{m,n} \cong \frac{k}{k_z^{m,n}} (\epsilon_m \xi_x / L_x + \epsilon_n \xi_y / L_y) \\ = \frac{1}{\cos \theta^{m,n}} (\epsilon_m \xi_x / L_x + \epsilon_n \xi_y / L_y) \quad (11)$$

ここで、 $k_z'^{m,n}$ は矩形ダクトの m, n 次伝搬モードにおける複素波数の虚数成分、 $k_z^{m,n}$ および $\theta^{m,n}$ はそれぞれダクト周壁を剛境界条件とした場合の z 方向波数成分および平面波入射角、 ξ_x および ξ_y はそれぞれ x, y 方向に直交する周壁の比音響アドミタンス実数部 (比

Fig.8 Ratio of reflected to incident energy for No.1

Fig.9 Ratio of reflected to incident energy for No.1-4

Fig.10 Ratio of reflected to incident energy for No.4 with two different locations of observation layers

音響コンダクタンス)、 L_x, L_y はダクト断面寸法である。 ϵ_m および ϵ_n はモード次数 m, n に対応した係数であり、次数が 0 の場合は 1、1 以上の場合は 2 となる。Eq.(11) の $k_z'^{m,n}$ を Eq.(12) に代入することで、伝搬モードのダクト内伝搬距離 d によるエネルギー伝達率 $|\tau|^2$ が算出される。

$$|\tau|^2 = \exp(-k_z'^{m,n} d)^2 \quad (12)$$

L_x および L_y を数値解析モデルの寸法とし、 ξ_x および ξ_y を壁面吸音

Fig.11 Calculated transmission coefficient of propagation modes for No.4 with two different locations of observation layers

条件 ($a_0 = 0.05$, $\psi = 0^\circ$) に基づき設定することで, Fig.10 の 2 条件における $k_z^{m,n}$ を算出した。さらに d を, 観測層 2 層のそれぞれにおける入射壁までの往復距離を平均した値とし, $k_z^{m,n}$ から $|r|^2$ を求めた結果を Fig.11 に示す。同図の $|r|^2$ では, Fig.10 と同様に, 観測層が入射壁から離れることで擦過角の値が低下する傾向がみられたことから, No.4 での $|r|^2$ の低下は側壁による吸音効果を反映していることが確認された。また本結果から, No.3 で入射壁の理論値に対して $|r|^2$ が低下した点についても, 側壁の吸音効果による影響と考えられた。

以上の検討結果より, 壁面の位相 ψ が 0° で, 室内共鳴周波数が剛境界条件時と等しい場合, 入射波の分離が可能であることがわかった。

5.2 吸音面の位相による影響

Fig.12 に, 吸音面における位相 ψ を各種設定した No.5~10 について, 前項同様に $|r|^2$ を算出した結果を示す。全体の傾向として, ψ が 0° から離れるに従い $|r|^2$ に不規則な乱れが生じる様子があり, 乱れの程度は $\psi = \pm 60^\circ$ までは比較的小さいが, $\psi = \pm 80^\circ$ では顕著となった。 $\psi = \pm 80^\circ$ について周波数別に観察すると, 乱れによる誤差は, 125 Hz 帯域までは一部伝搬方向に限定されるものの, 160 Hz 帯域以上ではほぼ全般的に生じていた。

以上の要因として, 提案手法では側壁の剛境界条件を仮定してモード展開を行っているため, 側壁の位相の絶対値が大きい場合に入射波分離の誤差が生じたと考えられた。また, Fig.12(f), (h) より, 側壁での位相による誤差は, 室内モード密度が高い条件でとくに顕著になると推測された。ただし, 今回検討した住宅居室程度の容積では, ψ が 80° まで拡大した条件でも 125 Hz 帯域まで概ね分離が可能であったことから, 本研究の目的である, 低音域の入射特性把握を行ううえで, 提案手法は適用が可能であると判断された。

6. 入射特性に関する分析

前章の検討結果から, 提案手法により入射波の分離が可能であると考えられたことから, ここでは, 前章までに扱った数値解析モデルのうち No.1, 3 を対象に, 提案手法を用いた入射音場解析を行い, 室内吸音条件による入射特性への影響について考察する。

6.1 入射指向性

入射エネルギーの指向性について検討するため, Eq.(10)により求めた $I_{inc}^{\theta_i}$ に対して Eq.(13)を適用することで, 天頂角 θ をパラメータとし, φ 方向を平均化した, 単位立体角あたりの入射エネルギー密

Fig.12 Ratio of reflected to incident energy for No.5-10

度 $D(\theta_i)$ を求めた。

$$D(\theta_i) = I_{inc}^{\theta_i} / \Omega_{\theta_i} \quad (13)$$

$$\Omega_{\theta_i} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\theta_{i,1}}^{\theta_{i,2}} \sin \theta d\theta$$

Fig.13 に, No.1, 3 の $D(\theta_i)$ を 1/3 オクターブバンドにより示す。レベルについては, 50~315 Hz 帯域での全入射成分の合成値により基準化した。全般的傾向として, 室内モード密度の低い低音域における離散的方向からの入射が, 周波数の上昇に伴うモード密度の上昇により, 一様な入射に徐々に近づく様子が確認された。 θ によるピーク・ディップは, 吸音面が 1 面のみの No.1 に比べ, 室内全面吸音の No.3 ではやや低減されており, 室内吸音の増大により強い入射指向性が緩和される傾向が観察された。

Fig.14 に, No.1, 3 の $D(\theta_i)$ を 1/1 オクターブバンドにより示す。同図には一様な入射条件として, 入射成分を θ の 45 バンドに均等配分した値も示す。ここでは, レベルは各帯域における全入射成分の合

Fig.13 Directional distribution of incident energy density of plane waves for No.1 and 3 in one-third octave band

成値により基準化した。

Fig.14 をみると、垂直入射成分が大きく卓越する点が全体に共通していた。垂直入射以外の入射角に着目すると、周波数帯域が上昇するに従い、分布はピーク・ディップの顕著な状態から平坦な状態へと変化する、250 Hz 帯域では一様入射に近い値となる様子が確認された。なお、各帯域とも垂直入射の近傍には入射成分は存在していない。No.1, 3 の比較では、63~125 Hz 帯域については Fig.13 同様に No.1 のピーク・ディップが顕著だが、250 Hz 帯域では両者の差は小さかった。本解析結果における、垂直入射成分が卓越する傾向については、音線法を用いた矩形室壁面への入射指向性の検討結果¹⁷⁾とも定性的に対応していることから、矩形室における入射指向性の傾向である可能性が考えられた。

6.2 壁面入射インテンシティ

提案手法を用いて算出される壁面入射インテンシティ I_{inc}^n と、入射エネルギーの一般的指標である、拡散音場を仮定した壁面入射インテンシティ推定値 I'_{inc}^n を比較した。 I_{inc}^n は、入射平面波のインテンシティ $I_{inc}^{\theta_{m,n}}$ から、Eq.(14)により算出した。

$$I_{inc}^n = \sum_{\theta_{m,n}} I_{inc}^{\theta_{m,n}} \cos \theta_{m,n} \quad (14)$$

また、 I'_{inc}^n は室内二乗平均音圧 $\langle p^2 \rangle$ から、Eq.(15)により算出した。

$$I'_{inc}^n = \langle p^2 \rangle / 4\rho c \quad (15)$$

なお、ここでの $\langle p^2 \rangle$ は室内全領域の平均とした。

No. 1, 3 について、 I_{inc}^n および I'_{inc}^n を 1/24, 1/3, 1/1 オクターブバンドにより求めた結果を Fig.15 に示す。レベルについては各モデルでの $\langle p^2 \rangle$ のオーバーオール値により基準化した。 I_{inc}^n は、1/3 オクターブバンド 50 Hz 帯域の範囲では I'_{inc}^n に比べ大きく、80 Hz 帯域の範囲では逆に小さい。これは Fig.13 に示したとおり、両帯域ではそれぞれ垂直入射ならびに擦過入射成分の割合が大きく、拡散音場の仮定からそれぞれ大きく外れることが要因である。一方、1/3 オクターブバンド 100 Hz 帯域以上では、入射エネルギー密度の分布が比較的一様なことから I_{inc}^n および I'_{inc}^n の差は小さく、とくに No. 3 では両者はほぼ一致した。

Fig.14 Directional distribution of incident energy density of plane waves for No.1 and 3 in one octave band

Fig.15 Intensity on the incident wall for No.1 and 3

これら結果から、今回の対象モデルにおいて、入射特性は室内吸音条件により主に 1/1 オクターブバンド 125 Hz 帯域以下で変化することを確認した。また、提案手法を用いることで入射指向性などの特性を定量的に把握できることが示された。この様な入射特性の情報は、現場遮音性能の機構解明や予測に関して有用であると考えられる。

7. まとめ

本論では、住宅居室における界壁遮音性能測定時の入射音場の特

性把握を目的とした実験手法を提案し、その適用性について検討を行ったうえで、同手法を用いた入射音場の解析事例を示した。提案手法の概要と、検討による主な知見について以下に示す。

- ・室内の複素音圧観測層 2 層に対し、伝搬モード展開を適用することで、入射音場から伝搬方向別の入射平面波を分離する実験手法を提案した。
- ・伝搬モード展開の際、入射波分離の精度を確保するうえで、エバネッセントモードの導入が必要であることを確認した。
- ・解析対象の入射壁に直交する側壁において、壁面インピーダンスの位相 ψ の絶対値が小さい場合、入射波を精度よく分離できることを確認した。
- ・側壁の位相 ψ の絶対値が大きい場合、室内モード密度が高い周波数範囲において、入射波の分離に大きな誤差が生じることが示された。ただし、室内モード密度の低い低音域においては誤差の影響は比較的小さく、提案手法は適用可能であると考えられた。
- ・提案手法を数値解析モデルの入射音場に適用した結果、入射エネルギーの指向性が、室内吸音条件により主に低音域で変化することを把握した。また、算出した壁面入射インテンシティは、強い入射指向性の影響により、低音域において拡散音場仮定による入射インテンシティ推定値との差が生じることが示された。

今後、本検討により得られた知見を踏まえ、提案手法を実際の建築空間に適用することで、手法の有効性を実証するとともに、住宅居室の入射特性に関して分析を行う予定である。

参考文献

- 1) Fahy, F., Gardonio, P.: Sound and Structural Vibration 2nd ed., Academic Press, 2007
- 2) Hamada, Y., Ankyu, S., Uchida, H., Tachibana, H.: Measurement of Oblique Incident Sound Transmission Losses of Materials by Complex Sound Intensity Technique, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 388, pp. 1–6, 1988. 6 (in Japanese)
浜田幸雄, 安久司郎, 内田季延, 橘秀樹: 複素音響インテンシティー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, 第 388 号, pp. 1–6, 1988. 6
- 3) Tamura, M.: Spatial Fourier Transform Method of Measuring Reflection Coefficients at Oblique Incidence. I: Theory and Numerical Examples, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 88, No. 5, pp. 2259–2264, 1990. 11
- 4) Tamura, M., Allard, J. F., Lafarge, D.: Spatial Fourier-transform Method for Measuring Reflection Coefficients at Oblique Incidence. II. Experimental Results, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 97, No. 4, pp. 2255–2262, 1995. 4
- 5) Villot, M.: Phonoscopy: An Acoustical Holography Technique for Plane Structures Radiating in Enclosed Spaces, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 1, pp. 187–195, 1992. 1
- 6) Brutel-Vuilmet, C., Guigou-Carter, C., Villot, M.: A Study of the Influence of Incidence Angle on Sound Reduction Index Using NAH-Phonoscopy, Acta Acustica united With Acustica, Vol. 93, No. 3, pp. 364–374, 2007. 5
- 7) Terao, M., Sekine, H., Ohkawa, S.: A Basic Study on an Induct Measurement Method of Oblique Incidence Reflection Factors of a Surface, Proceedings of Spring Meeting of Acoustical Society of Japan, pp. 765–766, 2001. 3 (in Japanese)
寺尾道仁, 関根秀久, 大川真平: 斜入射反射係数のダクト内測定法に関する基礎的検討, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 765–766, 2001. 3
- 8) Sakuma, T., Inoue, N.: Development of a Measurement Method for Oblique-incidence Absorption Coefficient Using a Thin Chamber Part I, Measurement Principle and a Proto-type System, Proceedings of Autumn Meeting of Acoustical Society of Japan, pp. 901–902, 2015. 9 (in Japanese)
佐久間哲哉, 井上尚久: 薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 –その 1 測定原理と試作システム–, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 901–902, 2015. 9
- 9) Inoue, N., Sakuma, T.: Development of a Measurement Method for Oblique-incidence Absorption Coefficient Using a Thin Chamber Part II, Investigation by Numerical Analysis and Measurement., Proceedings of Autumn Meeting of Acoustical Society of Japan, pp. 903–904, 2015. 9 (in Japanese)
井上尚久, 佐久間哲哉: 薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 –その 2 数値解析及び実測による検証–, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 903–904, 2015. 9
- 10) Hallman, D., Bolton, J., Long, L., Takata, H.: The Application of Nearfield Acoustical Holography to Locate Sources in Enclosed Spaces Exhibiting Acoustic Modal behavior, Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, pp. 1076–1082, 1994
- 11) Aida, Y., Muro, Y., Abe, S., Inoue, N., Sakuma, T.: Experimental Study on Incident Sound Field in the Insulation Performance Measurement for Partition Walls, Proceedings of Spring Meeting of Acoustical Society of Japan, pp. 851–854, 2017. 3 (in Japanese)
會田祐, 室裕希, 安部真一郎, 井上尚久, 佐久間哲哉: 界壁遮音性能測定時の入射音場に関する実験的検討, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 851–854, 2017. 3
- 12) JIS A 1417: Acoustics-Field Measurement of Airborne Sound Insulation of Buildings, 2000
JIS A 1417: 建築物の空気音遮断性能の測定方法, 2000
- 13) JIS A 1405-2: Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes-Part 2: Transfer-function Method, 2007
JIS A 1405-2: 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定-第 2 部: 伝達関数法, 2007
- 14) Architectural Institute of Japan: Tatemono no Yuka Shougekiou Boushi Sekkei (Floor Impact Sound Prevention Design for Buildings), Gihodo Shuppan, 2009. 9 (in Japanese)
日本建築学会: 建物の床衝撃音防止設計, 技報堂出版, 2009. 9
- 15) Hashimoto, N.: Kenchikubutsu Shouban no Shindou to Onkyouhousha ni Kansuru Kenkyuu (Study on Vibration and Sound Radiation of Building Floors), The University of Tokyo Doctoral Dissertation, 1994 (in Japanese)
橋本典久: 建築物床版の振動と音響放射に関する研究, 東京大学学位論文, 1994
- 16) Morse, P. M., Ingard, K. U.: Sound Waves in Duct and Rooms, Theoretical Acoustics, Princeton University Press, p. 506, 1968
- 17) Kang, H., Ih, J., Kim, J., Kim, H.: Prediction of Sound Transmission Loss Through Multilayered Panels by Using Gaussian Distribution of Directional Incident Energy, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 107, No. 3, pp. 1413–1420, 2000. 3

AN EXPERIMENTAL ANALYSIS METHOD FOR AN INCIDENT SOUND FIELD USING PROPAGATION MODE EXPANSION

Study on the incident sound field in the insulation performance measurement for partition walls Part 1

Yu AIDA^{*1}, *Naohisa INOUE*^{*2} and *Tetsuya SAKUMA*^{*3}

^{*1} Researcher, Technical Research Institute, HASEKO Corporation, M.Eng./

Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo

^{*2} Project Assist. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Dr.Env.

^{*3} Assoc. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Dr.Eng.

In the sound insulation measurement of partition walls between dwelling rooms, the incident sound field in a source room strongly depends on the geometry of the room, and it is not regarded as random incidence at low frequencies. Considering the incidence-angle dependence in sound insulation performance from such phenomenon as coincidence effect in concrete walls and resonance transmission in multiple-layered wall structures, it is possible that the characteristics of incident sound fields in source rooms affect the sound insulation performance in field measurement.

This paper aims to establish an experimental method for analyzing the characteristics of the incident sound fields in dwelling rooms under sound insulation measurement. First, a method to separate incident plane waves from an incident sound field was proposed, where the propagation mode expansion is applied with two layers of planar microphone array. Then, the proposed method was applied to FEM models of source rooms with various absorption conditions to test its applicability to dwelling rooms and to demonstrate its effectiveness in analyzing the incident characteristics.

The reconstructed SPL and the ratio of reflected to incident energy for the FEM models were obtained by the proposed method. The result showed that the inclusion of evanescent modes in the mode expansion improves accuracy in the separation of incident waves. Regarding the influence of the room absorption, the result demonstrated that the incident waves are separated with good accuracy in the case where the absolute value of the phase angle of the impedance is small on the side walls normal to the incident wall. It was revealed that a large absolute value of the phase angle of the impedance on the side walls leads to serious separation error in the frequency range with a high modal density, due to the deviation from the assumption of rigid boundary condition in the mode expansion. However, the error caused by the phase of wall impedance remained relatively small in the low frequency range with a low modal density, and the proposed method is considered to be applicable to low frequencies regardless of the phase of wall impedance.

Additionally, the directional distribution of the incident energy density was calculated for the FEM models using the proposed method, and the result demonstrated the influence of room absorption on the directivity of incident energy at low frequencies. Moreover, the calculated result of total incident energy on the wall showed a difference from the result by the conventional diffuse-field assumption, reflecting the non-uniformity of the incident directivity at low frequencies.

In future study, we plan to apply the proposed method to actual rooms to further validate its applicability and to consider the characteristics of the incident sound fields in dwelling rooms.

(2018年3月8日原稿受理, 2018年7月2日採用決定)