



## 单一板に対する球面波入射の音響透過に関する実験的検討

矢入, 幹記

塚本, 陽平

阪上, 公博

---

(Citation)

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 6:1-5

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81008689>



## 単一板に対する球面波入射の音響透過に関する実験的検討

矢入 幹記<sup>1\*</sup>・塚本 陽平<sup>2</sup>・阪上 公博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>鹿島建設技術研究所

<sup>2</sup>工学研究科建築学専攻

(受付:May 13, 2014 受理:September 26, 2014 公開:October 3, 2014)

キーワード： 音響透過， 透過損失， 球面波入射， 単一板， 実験的検討

従来の音響透過に関する研究は、ほとんどが平面波入射を仮定しておこなわれており、球面波入射の音響透過問題については詳しい検討がなされていない。しかし、音源が近接する場合などは球面波入射として検討することが適切な場合があると考えられる。筆者らはこれまで、球面波入射に対する透過音場について解析解を求め、透過損失の一般的な特徴を考察し、球面波入射の透過損失について基礎的な知見を得ている。その最大の特徴は、球面波入射の質量則が、平面波入射の  $6 \text{ dB/oct}$  に対して  $3 \text{ dB/oct}$  を示すことである。本稿では、理論解析によって得られた知見の妥当性を定性的に確認することを目的として、音源の距離を変化させることで近似的に球面波入射と平面波入射を実現し、それぞれ单一板の音響透過特性について実験的な検討をおこなった。特に球面波入射と平面波入射を比較し、質量則の周波数に対する傾きに注目して考察することで、理論解析の妥当性を検討した。

### 1. はじめに

建築物において、静穏な空間を実現するには、基本性能としてまず壁体の遮音性能が重要である。これは、建築空間の基本性能として最も重要なもののひとつであり、壁面の遮音性能を表す透過損失の予測は、建築物の設計の重要な問題となる。

音響透過損失には、一般に質量則と呼ばれる法則があり、壁面の遮音性能に関する最も基礎的な知見として広く知られている<sup>1)</sup>。壁面の透過損失に関しては、これまでの研究の成果により、多くの知見が蓄積されてきたが、平面波入射を仮定して検討されたものがほとんどである。しかし、建築における実際の音響透過条件を考えると、音源が壁面に近接している場合などは、球面波入射として扱われるべきであろう。

球面波入射に対する单一板の透過損失について、最初に解析したのは高橋ら<sup>2)</sup>であり、数値計算例を示すことで、球面波入射の透過損失は、すべての周波数帯域において平面波入射のそれよりも小さくなることを示した。その後、Villot et.al.<sup>3)</sup>も数値解析を用いて同様の結果を得ている。しかし、これらはいずれも計算例を示すにとどまり、メカニズムの直観的な解釈ができるような解析解は得られていないし、詳しい検討もおこなわれていない。

筆者らは、これらと異なり、遠距離音場の解析解から陽な形で透過損失を求め、球面波入射の音響透過に関する検討をおこない、種々の基礎的な知見を得た<sup>4)</sup>。その結果、球面波入射の場合、透過損失の質量則は、平面波入射の

場合とは異なり  $3 \text{ dB/oct or mass}$ 、すなわち周波数が2倍もしくは板の面密度が2倍になると  $3 \text{ dB}$  増加することが理論的に示された。これは、平面波入射の場合 ( $6 \text{ dB/oct or mass}$ ) よりも、周波数に対する傾きが小さく、透過損失が低くなるということであり、壁体の遮音性能の観点からは、見過ごせない知見である。

そこで本稿では、球面波入射の透過損失について、この理論解析の結果<sup>4)</sup>の妥当性を確認するため、特に質量則の周波数に対する傾きに着目して、基礎的な実験的検討をおこなう。理論<sup>4)</sup>においては、無限大の单一板を扱っているのに対し、実際の実験では有限の板を使用することになる。また、音波の入射条件についても、実験的に理想的な球面波形状を実現するのは困難であると考えられる。

したがって、本研究では、定量的な比較や精度の検討については議論の対象外とし、質量則の周波数に対する傾きが入射条件によって変化する点に着目し、理論<sup>4)</sup>から得られた球面波入射に対する質量則の振る舞いを定性的に考察する。

### 2. 実験

#### 2. 1 実験方法

実験は、簡易無響室と小型残響室が連結した室でおこなう。両室の間に設けた開口（開口部寸法  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ）に試験体を設置し、無響室側を音源室、残響室側を受音室とする。試験体に入射する球面波の音の強さ(音響インテン

シティレベル)と、透過側拡散音場の音圧レベルを測定することにより、音響透過損失を算出する。実験をおこなったのは、日東紡音響エンジニアリング小型残響室無響室(残響室表面積26.5 m<sup>2</sup>, 残響室容積8.9 m<sup>3</sup>)である。

音源には、事前に指向特性を測定したうえで、可能な限り無指向性に近いものを選択した結果、小型のツイータスピーカを使用することとした。その周波数特性は500 Hz~10000 Hzにおいて、±5dB以内でフラットである。

音源は、試験体中央の垂直線上に設置する。実験室の音源側の様子をFigure 1に示す。音源と試験体との距離を変化させて、5種類の入射条件を設定する。音源と試験体との距離が小さい場合には、球面波入射に近い条件が実現されていると考えられる。また距離が大きくなるにつながって、平面波入射に近づくと考えられる。

検討した距離条件は、1.5 m, 0.4 m, 0.2 m, 0.1 m, 0.05 mの5通りである。これらの中では、1.5 mが最も平面波入射に近い条件と考えられる。以後、距離が小さくなるほど、球面波入射に近づくと考えられる。これらを比較検討することによって、音響透過特性の変化を考察する。音源信号には、ピンクノイズを用いた。測定は500~10000 Hzの各1/3オクターブバンドごとにおこなった。

### 2.1.1 入射音の測定

試験体の入射側表面に5点の受音点を取り、それぞれにおいて試験体の表面の音圧を測定した。測定値には、試験体による反射波が含まれることになるため、ここでは近似的ではあるが試験体表面が完全反射すると仮定して、測定値の1/2を入射音圧の値として採用した。これらの値から、平均入射音響インテンシティを求めた。

### 2.1.2 透過音の測定

透過音については、通常の遮音測定で行われる方法と同様に、受音室である残響室内に5点で音圧レベルを測定し、それらの平均音圧レベルを求めた。

受音室(残響室)内の状況をFigure 2に示す。

## 2.2 試験体

開口部の大きさと同じ1 m<sup>2</sup>(1 m×1 m)の単一板を試験体とした。2種類の板を用意した。試験体aは厚さ9 mmの合板であり、そのコインシデンス限界周波数は2239 Hzである。試験体bは、厚さ0.8 mmの鉄板であり、そのコインシデンス限界周波数は18794 Hzである。

したがって、試験体aの場合は測定周波数領域においてコインシデンス効果の影響が予想されるが、試験体bについては測定周波数帯域全体が質量制御領域となり、コインシデンス効果の影響を受けないと考えられるため、本研究で主目的としている球面波入射に対する質量則の傾きの変化については、より考察に適切であると考えられる。しかし、試験体aについてはコインシデンス効果の影響により考察は難しい面はあるが、一般的な材料として興味ある対象であることや、コインシデンス限界周波数付近の挙動の観察が可能なことから測定対象とした。

主眼とする質量則の挙動については、試験体bを中心に考察することになる。



**Figure. 1** Arrangement of the microphone and loudspeaker in the anechoic chamber (source room).



**Figure. 2** Arrangement of the microphone in the reverberation chamber (receiver room).

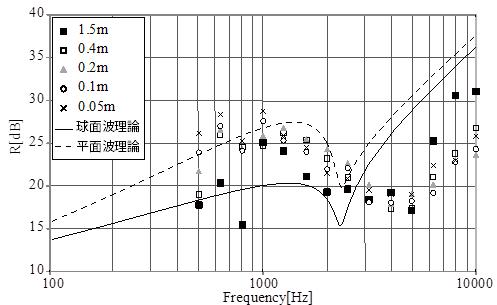
## 3. 実験結果と考察

### 3.1 実験結果

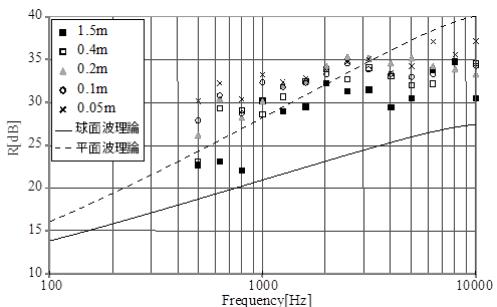
1.5 m, 0.4 m, 0.2 m, 0.1 m, 0.05 mの5通りの音源距離について、音圧の測定値から透過損失を算出した。Figure 3, Figure 4にそれぞれ試験体aとbの測定結果を示す。2種類の試験体と、5通りの音源距離を比較し、透過損失の変化を見る。Figure 3と4より、以下の結果が得られる。

#### 3.1.1 試験体aの結果

Figure 3に、試験体a(合板9 mm)の透過損失の周波数特性の測定結果を示す。本実験では、使用した実験室の容積的な制約により、拡散音場が保障される500 Hz以上についてのみ測定結果を示す。平面波および球面波入射に対する理論解析結果を参考までに併記してある。前者は文献5), 後者は文献4)による計算結果である。Figure 3より、試験体aを用いた結果からは、コインシデンス効果の影響が著しいため、質量則の傾向を見ることは難しいようである。また、音源の距離が近いほど透過損失が上昇する傾向がうかがえる。どの音源距離でも1000 Hz程度から透過損失が低下し、コインシデンス効果によるディップは、限界周波数の計算値より高い4000 Hz付近であらわれている。



**Figure. 3** Experimental results for the plywood (specimen a). Theoretical results for spherical wave incidence (solid line) and those for plane wave incidence (dashed line) are shown for reference.



**Figure. 4** Experimental results for the steel panel (specimen b). Theoretical results for spherical wave incidence (solid line) and those for plane wave incidence (dashed line) are shown for reference.

### 3.1.2 試験体bの結果

Figure 4に、試験体b（鉄板0.8 mm）の透過損失の周波数特性の測定結果を示す。試験体aの結果と比較すると、4 kHz付近では大きく透過損失が低下する試験体aと比較すると、ややばらつきはあるものの、全体的な傾向としては、周波数が高くなるにつれて単調に増加しており、コインシデンス効果の影響は見られない。また、音源の距離が近づくにつれて透過損失は上昇し、傾きも小さくなっている様子が見られる。

これらの結果を見ると、試験体a, bともに、大部分の周波数帯域で音源の距離が近くなるにつれて透過損失の値が大きくなることがわかる。また、どの音源距離についても、程度の差はあるが800 Hz付近にディップが生じる。これは、開口部の試料設置面と壁面との段差、いわゆるニッセによる効果ではないかと考えられるが、詳細な確認はできなかった。いずれにしても、試験体a, bともに、図中に示した理論計算結果と同様の定性的振る舞いを示していることが見て取れる。

質量則の周波数に対する傾きについては、Figure 5に結果を整理したものを示す。試験体aについては傾きの考察が困難なため、質量則が明瞭に表れている試験体bのみについて音源距離ごとの透過損失実測値をまとめたもので

ある。4 kHzの帯域には、有限板の固有モードの影響と考えられるディップが僅かに生じているため、質量側による傾きが評価しやすいように、考察の周波数帯域を500 Hz～3.2 kHzに限定する。音源距離の場合ごとに、直線回帰による近似直線を併記してある。音源距離が近いほど透過損失が大きくなるとともに、傾きが少なく平坦になっていく様子がわかる。

### 3.2 考察

球面波入射の理論<sup>4)</sup>で設定されている解析条件を、実験において忠実に再現することは難しい。解析では、板に入射する球面波音源のパワーを完全に捉えているが、実験では、入射表面のインテンシティから推定しているため、入射エネルギーを完全に捉えることはできない。したがって、実験値の絶対値をもって理論の妥当性を議論することは困難である。また、実験において、音源が試験体に近くなると、音源自体が、開口部の試料設置面と壁面との段差、いわゆるニッセによる効果の領域内に入り込むため、この点も解析では考慮されていない。

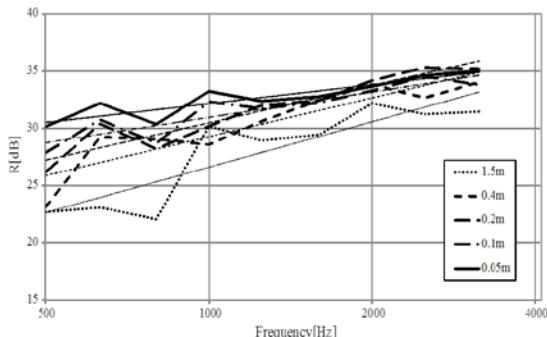
このように、完全には実現が難しい解析条件の中であっても、音源を試験体に近づけることによって、平面波入射に近い状態から球面波入射に近い状態に徐々に変化するという定性的な点は、おおよそ実現されていると考えられる。そこで、本節では、平面波入射と球面波入射による定性的な傾向の差異、すなわち、質量則の傾きの差異に焦点を絞って考察する。

前節の結果のうち、試験体aについては質量則の傾きについての考察が困難なため、Figure 5に基づいて試験体bについて考察をおこなう。図にみられる質量則の傾きは音源距離1.5 mで4.0 dB/oct, 0.4 mで3.4 dB/oct, 0.2 mで3.2 dB/oct, 0.1 mで2.2 dB/oct, 0.05 mで1.7 dB/octを示し、音源距離が小さくなり入射波形が球面波に近づくにつれて傾きが小さくなる。この知見は理論解析<sup>4)</sup>から得られたものと一致する。

最も球面波入射条件に近いと想定した音源距離0.05 mの質量則の傾きは1.7 dB/octであり、理論解析の結果の3 dB/octとは異なる。これは、音源が試験体に近すぎるために音波が試験体全体に入射せず、中心のみを加振する点加振のような状態になっていたためであることが推測される。点加振を受ける無限大單一板からの音響放射パワーは、コインシデンス限界周波数より低域においては、フラットな周波数特性を示すことが理論的に示されており、この傾向に符合するものと考えられる<sup>6)</sup>。

また、平面波入射を想定した音源距離1.5 mの質量則の傾きは4.0 dB/octであり、一般に6 dB/octといわれる傾きよりも小さい結果を得た。この理由としては、試験体の大きさに対して音源距離1.5 mでは十分に大きな距離をであるとはいはず、理想的な平面波入射に近い条件を実現できなかつたことが考えられる。

以上のように、実験条件の制約などから、定量的に理論と一致する結果は得られなかつたが、音源距離が近い、すなわち球面波入射の性質が強くなるほど、透過損失の質量則の傾きが小さくなることなど、定性的な傾向としては理論解析の知見<sup>4)</sup>と同様の振る舞いが見られた。



**Figure. 5** Variation of the experimental results of transmission loss in mass-control region for different source distance for Specimen b. The linear regression lines estimating the experimental results are also shown.

sound Insulation: Case of a small airborne sound Source close to a Wall”, Proceedings of the International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 3083-3084 (2004).

- 4) M. Yairi, T. Koga, K. Takebayashi and K. Sakagami, “Transmission of a spherical sound wave through a single-leaf wall: Mass law for spherical wave incidence”, Applied Acoustics, 75, 67-71 (2014).
- 5) Kimihiro Sakagami, Daiji Takahashi, and Masayuki Morimoto, ”Reflection of a spherical sound wave by an infinite elastic plate”, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 14, 85-90 (1993).
- 6) M. Junger and D. Feit, Sound, structures and their interaction,” Cambridge MA: MIT Press (1972), Chap. 8.

#### 4. おわりに

本研究では、これまで詳しく検討されることがなかつた球面波入射の透過損失について、筆者らの理論解析<sup>4)</sup>の結果を定性的に確認することを目的に、実験的な検討をおこなった。

その結果、球面波入射に近いと判断される入射条件においては、理論解析と同様の傾向を示すこと、および音源の距離が試験体に接近し球面波入射に近づくほど、質量則の傾きが小さくなる傾向が見られ、理論解析の結果とおおむね一致する傾向が認められた。

ただし、今回の実験は理論解析の条件を理想的に実現できていない点があり、定量的な面ではもとより、現象面でも今後の課題として検討すべき面が示唆された。たとえば、特に音源が近い場合の透過損失周波数特性がほとんど平坦になる傾向についても、点加振の場合に近づいていると推論されるが、さらに検討の余地があるであろう。今後の課題としては、平面波入射から、音源距離の接近による変化を経て、点加振による放射に至るまで、單一板の音響放射に関する統一的な把握に向けた検討が必要となると考えられる。

[謝辞]実験に際しご協力いただき、有益なご助言をいただいた日東紡音響エンジニアリングの中川博氏に厚くお礼申し上げる。

#### References

- 1) 前川純一, 森本政之, 阪上公博, “建築・環境音響学 (第3版)”, pp.104-106 (共立出版, 東京, 2011)
- 2) 高橋大式, 古江嘉弘, 松浦邦男, “球面波入射による板振動・音の透過”, 日本音響学会誌, 35 (6) 314-321 (1978).
- 3) Michel Villot and Cathy Guigou-Carter, “Airborne

## An experimental study on the sound transmission characteristics of a panel for spherical sound wave incidence

Motoki Yairi<sup>1</sup>, Yohei Tsukamoto<sup>2</sup>, and Kimihiro Sakagami<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kajima Technical Research Institute, Kajima Ltd.*

<sup>2</sup>*Department of Architecture, Graduate School of Engineering*

**Key words:** Sound transmission, Transmission loss, Spherical wave incidence, Plate, Experimental study

So far studies of sound transmission have been limited, except for a few pioneering studies, to plane wave incidence cases. Sound transmission for spherical wave incidence has not been studied in detail, although it is needed to consider spherical wave incidence when the sound source is close to the panel. The authors have theoretically analyzed the transmitted sound problems of a panel under a spherical wave incidence. In the study, insulation mechanisms for spherical wave incidence and some different features than those for plane wave incidence cases are revealed. In this study, a preliminary experiment is conducted to confirm the basic features of the sound transmission for spherical sound wave incidence cases which have been presented in the author's previous paper. As the results, though there are many points to require more consideration, the experiments show some similar tendencies to the theoretical ones.