

## 室内壁面への音響エネルギーの入射角度分布の測定

正会員 ○水野聖也\*1 同 穆瑞林\*2 同 豊田政弘\*3 同 高橋大式\*4

## 4.環境—2.室内音響・音環境

## 近接4点法, 指向性分布, 残響室, インパルス応答, 音響インテンシティ

## 1. 研究背景

窓・壁などの各種建物部材の遮音性能あるいは室内構成材料の吸音率を測定・評価する際、通常は残響室が使われている。一方、材料の遮音性能・吸音性能を理論的に予測する場合の一般的な方法としては、まず単一角度での平面波入射による応答をそれぞれ求め、それらを残響室の入射条件に対応するべく入射角度における平均化がなされる。平均化は残響室を完全拡散とみなして、完全拡散に対応する $0\sim90^\circ$ で平均をとる乱入射、あるいは現実の場に近い条件を想定して $0\sim78^\circ$ とする音場入射などがある。これらは、単層壁においてはよく機能する、しかし二重壁の透過損失計算などでは、乱入射・音場入射のどちらを使用しても実測値と大きくかけ離れた特性となることが従来から問題となっており、これに関して音線法によるシミュレーションから、入射角度に何らかの重みづけをした分布が提案されている[1]。

このようにいくつかの提案はあるものの、壁面の入射エネルギーの指向性分布に関してあまり注意が向けられておらず、その実態は今もって明らかにされていない。本研究の目的は室内壁面への音響入射エネルギーの指向性分布を実際に測定するために、文献[2]による、1次元インテンシティプローブシステムを用いた測定方法の不備な点をあげ、「近接4点法」を用いた今までに無い新たな測定方法を提案し、その実態を明らかにすることである。

## 2. インテンシティプローブによる測定法

壁面の入射エネルギーの指向性分布の測定法として文献[2]による提案は、それぞれの入射角における音響インテンシティを1次元プローブシステムで測定し、それらを統合する方法である[2]。1

次元プローブシステムというのは、図-1のように2つの音圧型マイクロホンを近接配置したプローブを用いて音響インテンシティを測定するシステムのことである[3]。

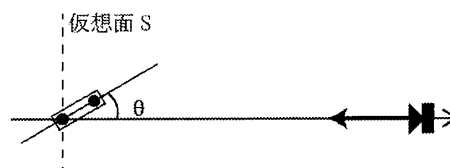


図-1

例えば、図-1のように自由空間中のスピーカーから、遠距離場で想定された面Sに垂直入射で音が入射しているとする。この時、1次元プローブシステムを用いて、この面上でのインテンシティを測定すると、入射角 $\theta$ で入射してくる音のインテンシティ $I$ の成分 $I_\theta$ は図より、 $I_\theta = I \cos \theta$ と表され、この測定法では $I_\theta$ を測定することになる。

このことから入射エネルギーの指向性分布は図-2の破線のようなカーブとなる。しかし、今回は反射波のない自由空間を想定しているので、 $\theta = 0$ 以外の入射角の音は存在していないはずなので、本来分布は図-2の実線のように $\theta = 0$ のときのみエネルギーが分布されるようにならなければならない。従って、この測定方法では正しい分布は得られないと考えられる。また、3次元プローブを用いた測定であっても、室内に複数の音像がある場合には測定が困難になる[3]。

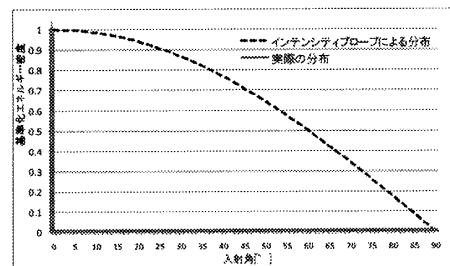


図-2

Measurement of the Directional Distribution of Incident Energy on the Wall Surface

MIZUNO Seiya, MU Ruilin, TAKAHASHI Daiji and TOYODA Masahiro

以上の理由から、インテンシティプローブを用いた測定方法では、正確な分布の測定ができないと考えられる。しかし、室内の全ての音像の位置と大きさを測定することが出来れば、理論的には正確な壁面への音響入射エネルギーの指向性分布を求めることが出来るので、今回この手法は用いず、「近接4点法」を用いた今までにない新たな、壁面の入射エネルギーの指向性分布を測定する方法を提案する。

### 3. 近接4点法

近接4点法とは、図3.1のような原点および直交座標軸上の原点から等距離の3点におかれたマイクでインパルス応答を測定し各マイクロホン間のパルス到達時間差とパルスの大きさから、音源と音像の位置と大きさを測定する方法である[4]

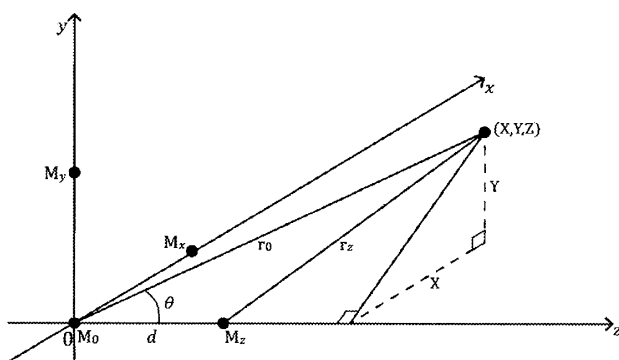


図-3

#### 3.1 適応範囲

今回の測定システムにおいて、測定される信号はアナログ信号であるが、計算する際には得られた信号を離散化した数値としてデジタル化するので、マイクと音像の距離はデータ数×サンプリング周期×音速で計算する。なお今回の実験では、サンプリング周波数 48000Hz で測定を行い、また音速は340 m/sである。従って、データ数が1つズレると、サンプリング周期×音速=7mmの違いとなり、この7mmが違いを感知できる最少経路差となる。したがって、図-3より $r_0$ と $r_z$ について注目すると(1)式が成立しなければならない。

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - d \geq \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - d)^2} \quad (1)$$
ここに $d$ はマイク間距離であり、今回の実験では $d = 30\text{mm}$ のものを使用したので(1)式に代入し、式変形を行う。さらに $r_0$ と $r_x$ 、 $r_0$ と $r_y$ についても

同様に展開していくと、最終的に図-4のような範囲が得られる。よって、今回の測定システムで最終的に得られる壁面の入射エネルギーの指向性分布において、およそ $13.49^\circ \sim 76.51^\circ$ の範囲を外れてしまうと、あまり正確なデータを得られないことをあらかじめ考慮しておく必要がある。

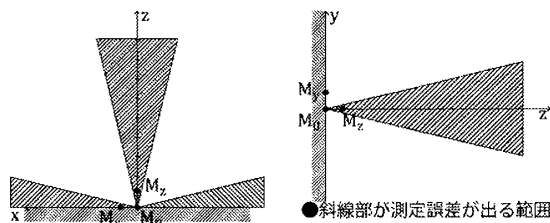


図-4

### 4. 実験

今回は実際の残響室ではなく、図-5のような残響室の模型(以後、残響箱)の壁面の入射エネルギーの指向性分布を測定する。なお、残響箱の寸法は図-6に示した通りで、今回は斜線部の壁面中心位置Rでの入射エネルギーの指向性分布を測定した。

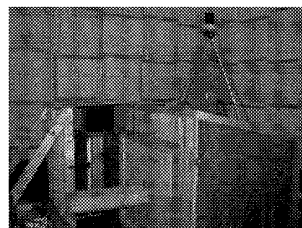


図-5

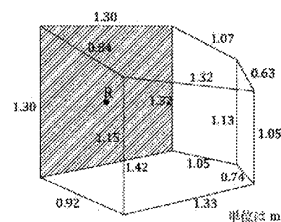


図-6

#### 4.1 対称面内の音像

今回の実験では、壁面上の入射角エネルギーの指向性分布を測定するため、マイクを壁面上に設置するので、そのことによる影響について考える必要がある。これに関して、図-7のように対象面上P点にマイクを設置した場合について考えると、図よりマイクは音源Qとその音像Q'の和として応答してしまい、不要な対象面内の音像Q'まで測定してしまう。それにより、 $M_z$ マイクのインパルス応答の時間軸におけるパルス密度が2倍となり音像の分離可能となる最小時間が短くなってしまふ。また $M_x$ マイクと $M_y$ マイクのインパルス応答 $PQ = PQ'$ より音響インテンシティの大きさが二倍となる、さらに $M_x$ マイクと $M_y$ マイクは厳密に面上に置くことができないため2つの和としてのパルス波形は若干ずれてしまうことが問題となる。そ

ここで今回、問題解決として、図-8のように開口部を設けてその背後に完全吸音に近い処理をすることによって、対象面内の音像 $Q'$ の影響を低減させた。

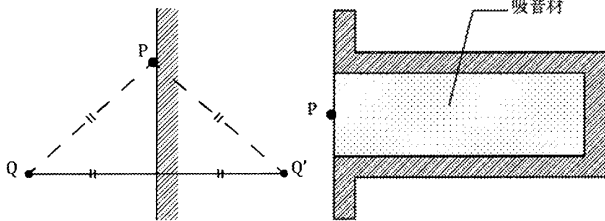


図-7

図-8

なお、マイク背面の吸音材には、各周波数での計算シミュレーションを行い、実験環境や装置の制限を考慮して最適であった図-9のような3種類のグラスウールと空気層から構成される延長箱を使用した。

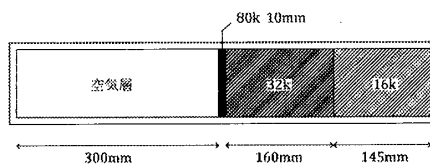


図-9

## 4.2 測定

音源は、スピーカーにプラスチック製のパイプ(半径 5.5mm 厚さ 2mm)を取り付け、パイプの先端から無指向性の音が出るような音源を作り出した。またパイプ内の開口端での反射音による影響を分離及び距離減衰により低減させるために、パイプの長さを 2m と長めにとることにした。なお、用いた音源信号は TSP 信号 48000kHz である。

実験は、音源の位置を変えて図-10のような音源位置 $S_1 \sim S_4$ の4点で実験を行い、受音点 R でのインパルス応答を測定した。

インパルス応答の処理方法は、まずスピーカー、マイクの特性を補正するために、あらかじめ計測した逆フィルターをかけて、さらに今回の実験では測定精度をあげるため、波形の高音域(16000Hz～)と低音域(150Hz～)を切り取った。それらの処理を行った波形の一部を図-11に示した、図より処理後の波形は理想的なパルスになっていることが分かる。そして、処理後の波形から、振幅比の閾値が 0.1 以上で相関が 0.5 以上のものを音像として探知するように処理を行った。

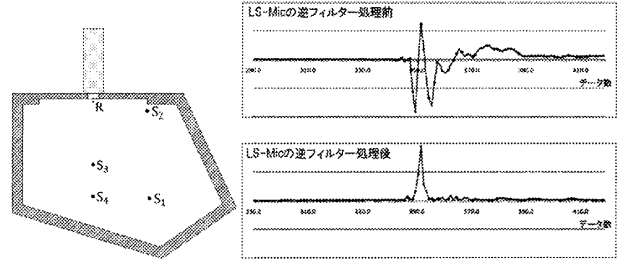


図-10

図-11

## 4.2 分布の作成方法

最終的に求めたい入射エネルギー密度の指向性分布は[1]の論文を参考にして計算を行った。具体的には、まず入射角 $\theta$ で入射してくるものは、 $\theta \pm \alpha^\circ$ の範囲から入射してくるものであると定義する。従って図-12より、斜線部 $\Delta S$ を通して入射する音が入射角 $\theta$ のものであるので、斜線部 $\Delta S$ を通して入射してくる音の全エネルギーを $E$ とすると、エネルギー密度 $D$ を式(2)で計算できる。なお、今回は $\alpha = 5$ とした。そして、得られたエネルギー密度の最大値を基準化して、その値を基にして分布を作成する。また、この分布を平滑化するために重み付けをした移動平均を取った。

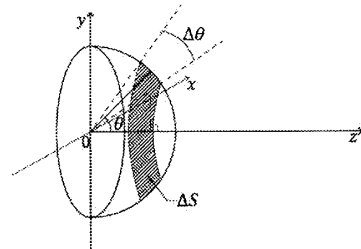


図-12

## 4.3 実験結果

まず、直接音の入射角について見ると、表-1より $S_1, S_2$ に関してはよく測定されているが、 $S_3$ や $S_4$ など、極端に適応範囲を外れてしまうと予測値より大きくずれてしまうので、測定の適応範囲についてはまた今後何らかの対処を行う必要がある。

得られた分布は、図-13のようになった。なお今回、従来法との比較のため Gauss 分布を想定した分布も示した[1]。

|       | 入射角(予測値) | 入射角(実測値) |
|-------|----------|----------|
| $S_1$ | 35.043   | 36.646   |
| $S_2$ | 78.455   | 82.271   |
| $S_3$ | 3.814    | 11.768   |
| $S_4$ | 0        | 11.290   |

表-1

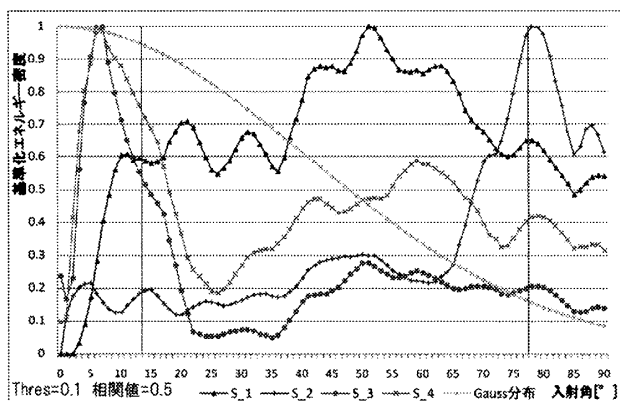


図-13

図-13 より、今回得られた残響箱の壁面の入射エネルギーの指向性分布は、どの音源位置においても Gauss 関数による分布とは大きく傾向が異なっていることが分かる、また同様に分布には示さなかったが、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$  まで一様にエネルギーが分布する乱入射、 $0^{\circ} \sim 78^{\circ}$  まで一様に分布する音場入射なども大きく傾向が異なる。また、それぞれの音源位置での分布をみると、直接音や初期反射音の入射角付近でのエネルギー密度が非常に高くなっており、やはり直射音や初期の反射音が分布の傾向をほとんど決定づけていることが良く分かる。

以上より、近接 4 点法を用いた今回の測定システムにより得られた壁面の入射エネルギーの指向性分布は、従来用いられてきたものとは大きく異なり、音源位置に大きく左右されることが分かり、またそれぞれの音源位置においても直射音や初期反射音が傾向を決定づけていることが測定された分布より分かった。

## 5. まとめ

「近接 4 点法」を用いた新しい壁面の入射エネルギーの指向性分布を測定する方法を提案した。これまで述べてきたように 1 次元インテンシティプローブを用いた方法の場合、正しい分布は得ることが出来ないが、この近接 4 点法を用いた方法だと理論的には正しい分布を得ることが可能である。しかし今後の、この測定システムに関する課

題としては、システムの適応範囲を検討する必要があり、この測定範囲を広げることが出来れば、より正確な音像探査を行うことが可能となる。また、音像探査の計算条件をどのように設定すれば、余分なものは省くことができ、さらに必要な音像を探査できるのかについて今後考察が必要である。

また今回は実験の一例として、模型ではあるが残響室の壁面の入射エネルギーの指向性分布は乱入射や音場入射、Gauss 関数によるものといった従来用いられてきた分布とは傾向が大きく異なり、特に直射音に大きく左右されることが分かった。

最後に今後の研究の流れとして、今回の研究では残響室の模型について測定したので、実際の残響室での壁面の入射エネルギーの指向性分布の測定を行い、さらに測定された分布から計算を行った透過損失の値と従来用いられてきた分布から計算を行った透過損失との比較などを行っていく予定である。

## 【参考文献】

- [1] H.-J. Kang, J.-G. Ih, H.-S. Kim, J.-S. Kim, Prediction of sound transmission loss through multi-layered panels by using Gaussian distribution of directional incident energy, Journal of the Acustica 1987; 63:163-73
- [2] H.-J. Kang, J.-G. Ih, H.-S. Kim, J.-S. Kim, An experimental investigation on the directional distribution of incident energy for the prediction of sound transmission loss, Applied Acoustics 63 (2002) 283-294
- [3] 時田保夫, 音の環境と制御技術(フジテクノシステム, 2000), p.751-757
- [4] Yoshio Yamasaki and Takeshi Itow, Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method, J. Acoust. Soc. Jpn(E) 10 101-110, 1989

\*1 京都大学大学院工学研究科 修士課程  
 \*2 京都大学大学院工学研究科 博士課程  
 \*3 京都大学次世代開拓研究ユニット 助教  
 \*4 京都大学大学院工学研究科 教授 工博

Graduate school of Eng., Kyoto Univ.  
 Graduate school of Eng., Kyoto Univ.  
 Assist. Prof. Pioneering Research Unit, Kyoto Univ. Dr. Eng.  
 Prof. Graduate school of Eng., Kyoto Univ. Dr. Eng.