

面音源に対する障壁の防音効果

吉田 甚一郎

§ 1. はじめに

工場などにおいて、その外壁から放射される騒音を防止する1つの方法として、その前面に障壁（防音塀）を設けることがしばしばある。この場合の防音効果の予測は、外壁面に点状の無指向性音源が集合していると考え前川の提案する計算図表を用いて行なっている^{1),2)}。この計算法は、建家外壁面と障壁の間に多重反射が起こっていないならば防音効果の実態をよく表わしているが、実際には多重反射が起きているのが普通であり、このため計算値と実測値の間にずれが生じている³⁾。本報では、このような多重反射の影響を考慮した面状音源（建家壁面等）に対する障壁の防音効果の計算法を提案し、これを模型実験によって確める。

§ 2. 計算の方法

2.1 計算法の概要

音源面から出た音が障壁、床面、音源面で反射して受音点に到達する音を反射音とし、一度も反射されずに直接受音点に到達する音（障壁による回折効果は考慮する）を直接音ということにすると、前述の文献2)による方法は直接音の計算ということになる。一方、反射音の影響を含めた計算法として、従来図-1に示すような仮想面音源（ハッチ部分）からの音の伝搬を計算する案が提案されている。しかし、この方法には種々の問題が含まれ

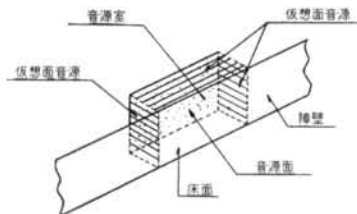


図-1 仮想面音源

ていると思われるので、ここでは新たに幾何音響学的に鏡像法を利用した方法を提案した。

2.2 直接音の計算

音源面を、1区画が点音源とみなせる程度に分割し、各区画を点音源とみなすと、以下の式により受音点の音の強さを計算することができる。

$$I = \sum_{i=1}^D \frac{P}{4\pi r_i^2} \cdot 10^{-\frac{\Delta L_i}{10}} \quad \dots\dots(1)$$

I: 受音点における音の強さ (w/m²)

D: 分割数

P: 1区画当りのパワー (w)

r_i: i番目の区画の中心点と受音点の間の距離(m)

ΔL_i : i番目の区画に対する障壁の減音効果で、下式で計算する⁶⁾

$$\Delta L_i = 5 \pm 20 \log_{10} \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tan h\sqrt{2\pi|N|}} \quad \dots\dots(2)$$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad \delta: \text{行路差(m)} \quad (\text{図-2参照})$$

λ : 波長(m)

符号は音源が受音点から見通せるときを負、見通せないときは正とする。

式(1)の両辺の対数をとることにより、受音点の音圧レベル (dB) が得られる。

$$SPL = PWL - 10 \log_{10} D$$

$$+ 10 \log_{10} \sum_{i=1}^D \frac{1}{4\pi r_i^2} \cdot 10^{-\frac{\Delta L_i}{10}} \quad \dots\dots(3)$$

PWL: 音源面全体のパワーレベル (dB)

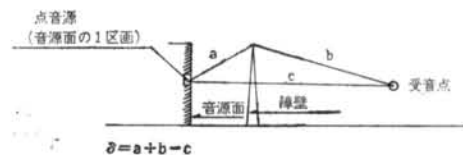


図-2 行路差の計算

回数で、式(8)~(9)により計算する

$N_{(+y)}$, $N_{(-y)}$, $N_{(+z)}$, $N_{(-z)}$ についても同様である

$$d_{lmn} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad \dots\dots(7)$$

$$\left. \begin{aligned} d_x &= l \cdot X \pm x_s - x_r \\ d_y &= m \cdot Y \pm y_s - y_r \\ d_z &= n \cdot Z \pm z_s - z_r \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{符号は } l, m, n, \text{ それぞ} \\ \text{れが偶数のときを正, 奇数} \\ \text{のときを負とする} \end{array}$$

d_x : d_{lmn} の x 成分

d_y : d_{lmn} の y 成分

d_z : d_{lmn} の z 成分

x_s, Y_s, Z_s : 実音源の座標

x_r, y_r, z_r : 受音点の座標

$$N_{(+x)} = \left\{ \begin{array}{l} l \text{ が偶数なら } \left\lfloor \frac{l}{2} \right\rfloor \text{ 回} \\ l \text{ が奇数で正なら } \frac{l-1}{2} \text{ 回} \\ l \text{ が奇数で負なら } \left\lfloor \frac{|l|+1}{2} \right\rfloor \text{ 回} \end{array} \right\} \quad \dots\dots(8)$$

$$N_{(-x)} = |l| - N_{(+x)} \quad \dots\dots(9)$$

N の y, z 方向についても x 方向と同様に計算する
次に、各音源室について下式のように合成すれば、音源面の i 番目の区画による受音点の音の強さ I_i がまる。

$$I_i = \sum_{l,m,n} \cdot I_{lmn} - I_{000} \quad \dots\dots(10)$$

面全体からの音による受音点の音圧レベルは、次のように求められる。

$$\begin{aligned} SPL &= 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^D I_i}{10^{-12}} \\ &= PWL - 10 \log_{10} D + 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^D I_i}{P} \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

SPL : 全音源面による受音点音圧レベル (dB)

PWL : 音源面全体のパワーレベル (dB)

D : 音源面の分割数

以上により受音点レベルが求まるのであるが、鏡像の次数 (l, m, n の値) をどの程度まで計算すれば良いかが問題となる。計算に必要な時間は次数の3乗に比例するので、むやみに次数をあげるわけにいかないからである。

文献4)に計算次数と誤差の関係が検討されており、それによれば、音源室内の内面が均等な吸音面であるとすると、受音点から半径 a の球内に含まれる虚音源を計算した場合と、全ての虚音源を計算した場合の差は下式で表わされる。

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - C^a} \right) \quad \dots\dots(12)$$

$$C = (1 - a')^{\frac{1}{l}} \cdot \exp(m \cdot a) \quad \dots\dots(13)$$

ΔL : 誤差 (dB)

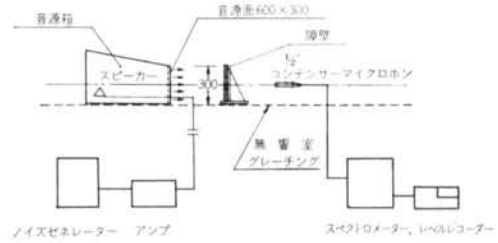


図-4 実験装置と測定系統

α' : 室内面吸音率

\bar{l} : 平均自由行程 = $\frac{4V}{S}$ (m)

V : 室容積 (m^3)

m : 空気吸収係数

§ 3. 実験

3.1 目的

前述した直接音の計算法を確め、次に反射音の計算方法を確認するために、1/10 程度の模型面音源による実験を試みた。

3.2 実験方法

実験は、図-4 に示すような装置を無響室において、音源面中心軸上の音圧レベルを測定することにより行なった。

実験周波数は、2 KHz~8 KHz のオクターブバンドノイズとした。これは、模型の縮尺を 1/10 と考えると実周波数 200~800 Hz に相当する。

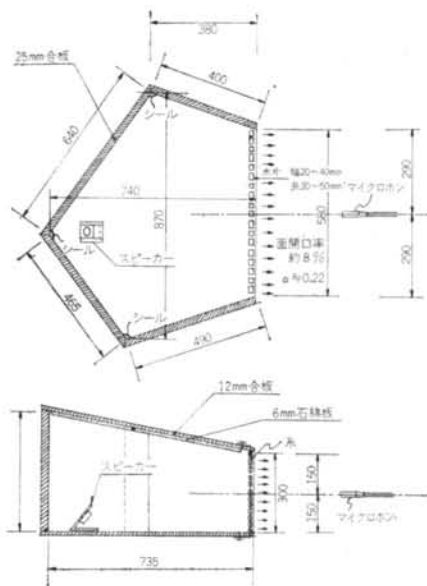
3.2.1 実験装置

実験装置における音源面は、計算上の仮定条件をなるべく満たすようにするため、

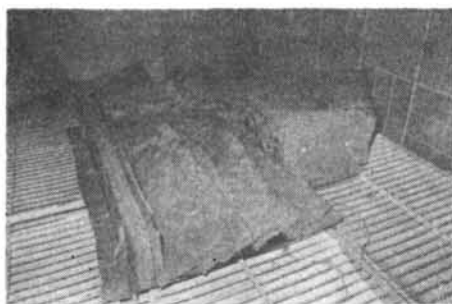
- 1) 無指向性であること、
- 2) 音の放射特性が非干渉性であること、
- 3) 等放射パワーをもつ点音源の集合とみなせること、

などの条件を備えている必要がある。これらの条件を満たすものとして図-5 に示すような音源面を考案した。

これは、音源箱の開口面に幅 20~40 mm、長さ 30~50 mm の木片をランダムに綿糸を使って並べたもので、開口率は約 8% となっている。このようにすれば、ランダム位相の放射特性をもった面音源を得ることができ、また音源面に反射性をもたせることができる。音源箱内にはスピーカーを図のように設置し、ビニール板の拡散板を設置した。障壁は合板と石綿板で作成した。実験装置を写真-1 に示す。



図—5 模型面音源



写真—1 音源箱、障壁

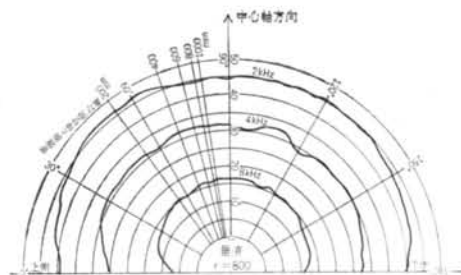
模型面音源の満たすべき条件について、その特性を以下に検討する。

(1) 指向特性

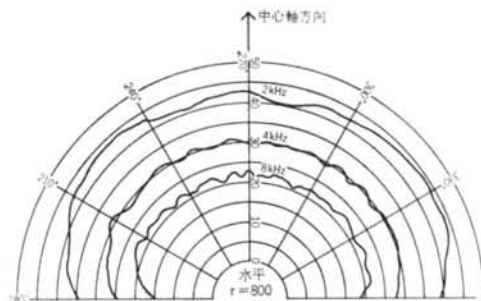
音源面の中心から800 mmの点の音圧レベル分布を直交する2方向で測定した結果を図—6に示す。これによれば、中心軸からの角度が60°以内では±2 dB程度の差となっている。受音点音圧レベルに対する直接音のレベルは、音源面から障壁を見込む方向のレベルで決まり、反射音はそれ以下の方向のレベルで決まる(図—7参照)。したがって、60°以上の方向のレベルは今回の実験の場合受音点レベルに大きな影響を与えないこと、障壁を移動させた場合当然音源から障壁の頂部を見込む方向が変わるので、±2 dB程度の影響を与えることが予想される。なお、音源面の中心から障壁の頂部を見込む方向を障壁の位置(音源面からの離れ)ごとに図—6(1)に示す。

(2) 面上の音圧レベル分布

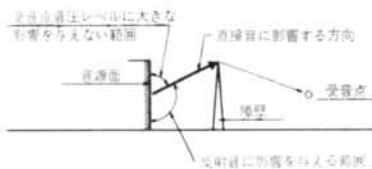
図—8に示すように、マイクロホンを移動させて面上



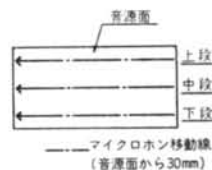
図—6(1) 面音源の指向特性(垂直方向)



図—6(2) 面音源の指向特性(水平方向)



図—7 面音源の指向性の影響



図—8 音源面レベル分布測定位置

のレベル分布を測定した結果を図—9に示す。この結果によれば最大±3 dB程度のばらつきがみられる。レベルのばらつきがどの程度受音点音圧レベルに影響を与えるかを調べるために、同一パワーが面上に均一に分布している場合と上下に5 dBの差をもって分布している場合の比較を、図—10に示すような例について行なった結果を表—1に示す。なお、表の値は同一分布に対する不等分布の場合のレベル上昇の値である。この結果から、面上のレベル分布は受音点レベルにはあまり大きな影響を与えないことがわかる。

(3) 音源面中心軸上の減衰傾向

音源面が無指向性、非干渉性、等放射パワー点音源の

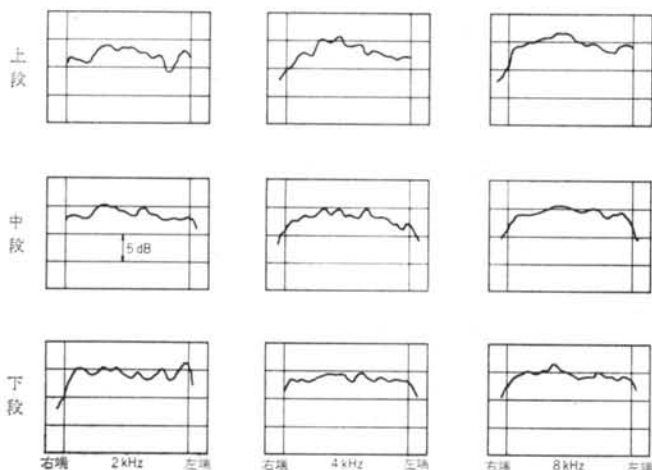


図-9 音源面上のレベル分布

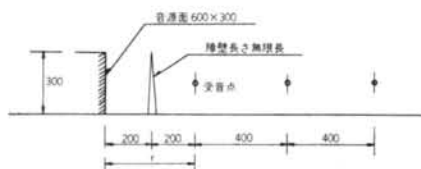


図-10 レベル分布の影響計算例

受信点位置 r	0.4			0.8			1.2		
周波数 (Hz)	2K	4K	8K	2K	4K	8K	2K	4K	8K
レベル上昇量 (dB)	0.4	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	0.9	1.1	1.2

表-1 不等分布によるレベル上昇量

集合という条件を満たしているかを総合的に検討するために、音源面中心軸上の減衰性状を測定した。測定結果と前記条件を満たすとして計算した結果を図-11に示す。この結果によれば測定値と計算値は良く合っておりこの模型面音源が計算の条件を満足していると考えられる。

以上の模型面音源の特性の検討結果から、この面音源が実験に使用できることがわかる。

3.2.2 パワーレベルの測定方法

面音源中心軸上の音圧レベルで音源面から $D/4$ 離れた点のレベルを、単位面積当たりパワーレベルとした⁵⁾。なお、 D は下式で計算する。

$$D = \frac{ab}{a+b}$$

a, b : 長方形音源の2辺

3.2.3 直接音による受信点音圧レベルの測定方法

障壁の内面、床面にグラスウール(かさ密度 12 kg/m^3 , 厚さ 50 mm)を写真-1に示すようににおいて、反射音を防ぎ、直接音のみによる音源面中心軸上音圧レベルを測

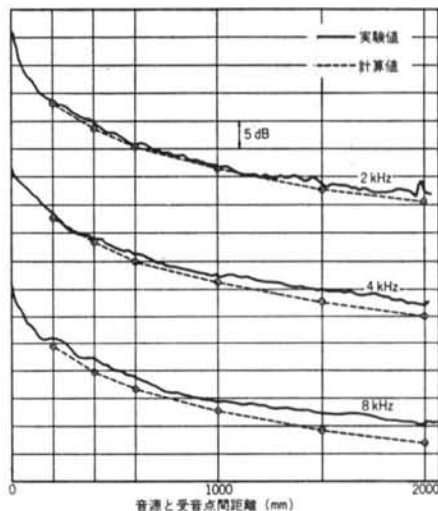


図-11 面音源中心軸上の減衰性状

定した。障壁の位置は音源面から $200, 400, 600, 800, 1000, 1200 \text{ mm}$ の位置に設置した。

3.2.4 反射音の影響を含めた場合の測定方法

直接音の測定の場合と同じ方法で、障壁内面、床面のグラスウールを除いて測定した。

§ 4. 測定結果

4.1 直接音による受信点音圧レベル

直接音のみによる面音源中心軸上の音圧レベルの測定結果を、障壁の位置が面から $200, 600, 1000 \text{ mm}$ の3種類についてのみ図-12に示す。

4.2 反射音の影響

4.2.1 受信点位置による反射音の影響

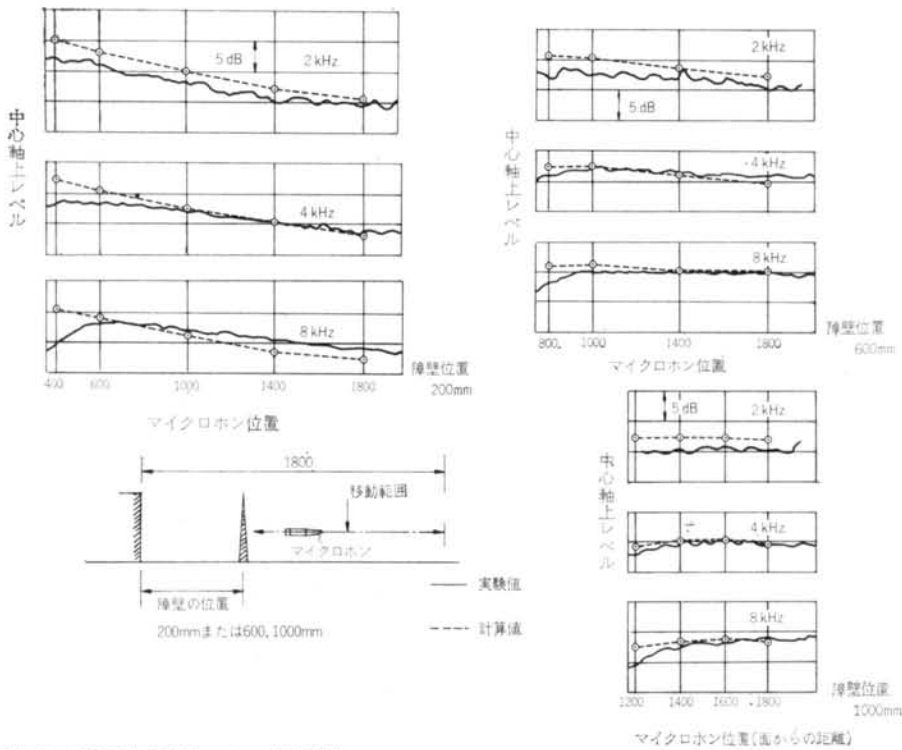
障壁の位置が面から $200, 600, 1000 \text{ mm}$ 離れた場合のみ、音源面中心軸上の反射音の影響を図-13に示す。反射音の影響は、直接音のみによる音圧レベルと反射音の影響を含めた場合のレベルとの差によって表わした。

4.2.2 障壁の位置による反射音の影響

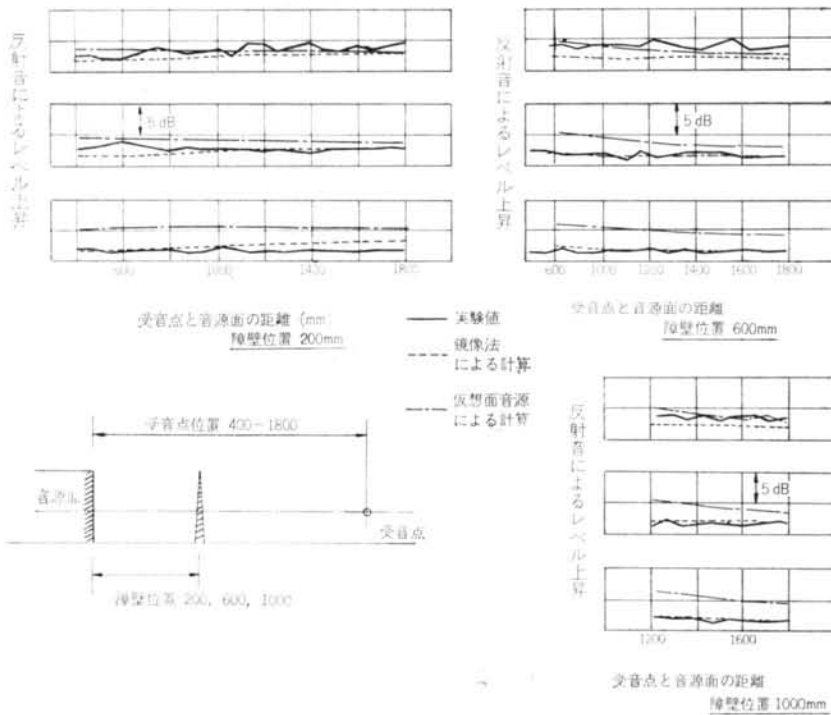
障壁の位置による反射音の影響の変化の様子をみるために、受信点位置が音源面から $1000, 1400, 1800 \text{ mm}$ 離れた各場合について、障壁を移動させたときの受信点レベルの反射音による影響を図-14に示す。

§ 5. 計算による予測

図-4に示す模型実験の場合について、音源面中心軸



図一12 直接音の音源面中心軸上レベルの減衰性状



図一13 音源中心軸上のレベルの反射音による上昇量

上の音圧レベルの予測計算を以下のように行なった。

5.1 直接音の予測

直接音のみによる中心軸音圧レベルの計算を2.2に示した方法で行なった結果を、図-12の破線で示す。音源面の分割は50mm単位、パワーレベルは3.2に示す方法によって測定した結果を使用した。

5.2 仮想面音源法による反射音の予測

音源面中心軸上の反射音による音圧レベルを2.3.1により計算し、この結果と直接音によるレベルを合成して反射音の影響を考慮した受音点レベルとした。この値と直接音による受音点レベルとの差を、図-13の鎖線で示す。なお、計算の条件として下記の値を使用した。

(1)吸音率 (2~8 KHz に対し)

音源面 : 0.23, 合板 : 0.1, 開放面 : 1.0

(2)仮想面音源の分割数

100mm×100mm単位に分割。

(3)パワーレベル

3.2に示す方法による測定結果。

5.3 鏡像法による反射音の予測

音源面中心軸上の反射音による音圧レベルを2.3.2に

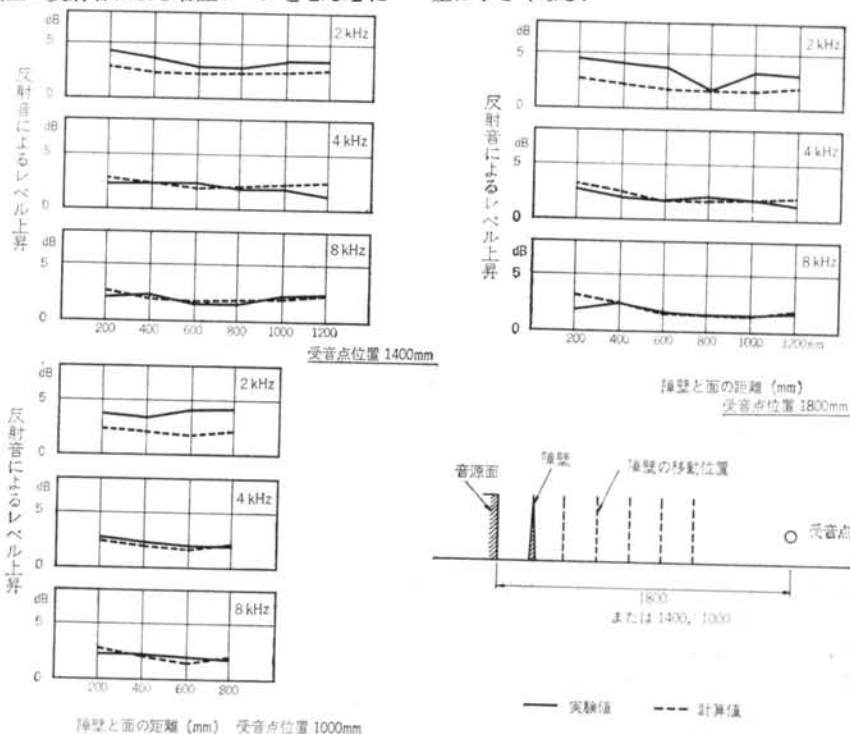


図-14 障壁の位置による反射音の影響の変化

面と障壁の距離(mm)	誤差 (dB)	誤差の平均 (dB)
200	0.4~2.3	1.4
600	0.6~1.1	0.8
1000	0.4~0.6	0.5

表-2 鏡像の計算回数による誤差 (4次の場合)

より計算し、この結果と直接音によるレベルを合成して反射音の影響を考慮した受音点レベルとした。この値と直接音による受音点レベルとの差を、図-13の破線で示す。計算の条件は、吸音率とパワーレベルは5.2と同じで、音源面の分割数と鏡像の計算回数は以下のとおりとした。

(1)音源面の分割

150mm単位

(2)鏡像の回数

4次まで計算したが、このときの誤差を2.3.2に示す方法により計算した結果を表-2に示す。なお今回の実験の場合、音源室内表面は均一な吸音率となっていないが、平均吸音率を音源面と障壁の吸音率の平均値とした。このような条件のもとでは誤差が大きめに出る傾向にあり、安全側となる。また、受音点は障壁から100mmの位置の場合であり、この距離が大きくなるに伴って誤差は小さくなる。

§ 6. 考察

6.1 直接音の計算方法について

図-12に、直接音の測定結果と計算結果が示されているが、2 KHz で 2 dB 程度計算値が大きめにしているのは良く合っており、先に 2.2 で示した計算法が実用的に使用できることがわかる。8 KHz で計算値が大きになっているのは、障壁の位置、受音点位置に関係なくほぼ一定の差となっているので、パワーレベルの算出の誤差によるものではないかと思われる。また、障壁の近くで実測レベルが下がっているのは、吸音材の影響と思われる。

6.2 反射音の影響度合

6.2.1 受音点位置による反射音の影響の度合

図-13に、音源面中心軸上の音圧レベルに対する反射音の影響が示されているが、音源面中心軸上の実測値は面からの距離に関係なくほぼ一定の値を示している。また、その値は 4 KHz, 8 KHz ではほぼ 2 dB, 2 KHz では 3~4 dB である。

一方、鏡像法による計算値は実測値とほぼ同じ傾向を示しているが、2 KHz で実測値より 2 dB 程度小さくなっている。これは、図-6 の指向性のグラフからわかるように、直接音のレベルに強い影響を与える中心軸方向のレベルが平均より小さくなっており、その分だけ反射音の影響が大きくなっているためと思われる。また仮想面音源による方法では、障壁位置が音源面から離れるにしたがって中心軸上の減衰傾向が実測値と違ってくこと、周波数が高くなるにしたがって実測値より大きな値を示す傾向がみられる。これは、仮想面音源のもつ指向性が影響しているものと思われる。

6.2.2 障壁の位置による反射音の影響の度合い

図-14に、障壁を移動させた場合の反射音の影響の実測値と鏡像法による計算値が示されているが、障壁の位

置にかかわらず、ほぼ一定の値を示していることがわかる。実測値と計算値は、2 KHz を除き良く合っている。2 KHz では、6.2.1 で述べたように指向性の影響を受けていると思われる。

6.2.3 鏡像法と仮想面音源法の得失

仮想面音源による方法では、音源室内を拡散音場としてパワーレベルを求めたものであるが、実際にはこのような開放面をもつ空間では拡散条件は期待できず、特に音波の方向性の不均一さを、仮想面音源を考えた場合の面の指向性として考慮しなければならないと思われる。しかし、このような指向性を定量的に把握することは容易ではない。一方、鏡像法による計算ではこのような仮定条件の必要性はなく、明解な計算法といえる。しかし、鏡像法による計算法では計算に必要な手数が計算次数の 3 乗に比例して増加するので、次数のとり方によっては計算時間が大きくなるという問題がある。

§ 7. 今後の問題点

従来、面音源に対する障壁の計算に際し、面音源と障壁による多重反射の影響は予想されていたのであるが、具体的検討が行なわれていなかった。今回の検討によって、辺々比 2:1 程度の矩形面音源で、音源と同じ高さの障壁に対しては、中心軸上でほぼ 2 dB 程度の反射音の影響がみられることがわかり、またこの計算法としては、鏡像法を利用した計算法が利用できることがわかった。しかし、以上の結果は音源面が、無指向性、非干渉性、等放射パワー点音源の集合とみなせる場合にいえることであり、実際の面音源、例えば建物の壁面での程度このような条件を満足しているかは不明であり、この解明が今後の課題である。

おわりに、本研究に当り御指導いただいた久保田主任研究員に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 前川：“障壁の遮音設計に関する実験的研究”日本音響学会誌 18巻4号(昭和37年)
- 2) 前川、藤原：“ひろがりをもつ音源による騒音回折の近似計算”日本建築学会大会学術講演会梗概集(昭和45年9月)
- 3) 山本、加来、子安：“面音源に近接した障壁の遮音効果”日本音響学会講演論文集(昭和50年10月)
- 4) B. M. Gibbs & D. K. Jones: "A Simple Image Method for Calculating the Distribution of Sound Pressure Levels Within an Enclosure" *Acustica*, Vol. 26 (1972)
- 5) 松浦：“遮音測定における計算公式について”日本建築学会論文報告集 第76号(昭和27年9月)
- 6) 藤原：“障壁による音波の減衰に関する実験的考察”日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和47年10月)