

# 防音対策シミュレータの開発

大 脇 雅 直・和 田 浩 之

工場や機械のどの部分からどのような音が発生しているかを特定することは、騒音防止対策を検討する上で非常に重要である。マイクロホン間の位相差を用いて音源位置を探索する装置を開発した。本装置に騒音対策を必要とする音源に対して仮想の防音壁を設定し、防音壁の遮蔽効果の予測を行う機能を追加し、その対策効果を聴くことができる防音対策シミュレータを開発した。

キーワード：音源探索、騒音対策、防音壁、シミュレータ

## 1. はじめに

工場や機械のどの部分からどのような周波数特性の騒音が発生しているかを特定することは、騒音防止対策を検討する上で非常に重要である。騒音防止対策を行う必要がある建物部位や機械を明確にすることによって、効果的な対策を検討することが可能となる。しかし施設の敷地が広大であったり、騒音源となる機器が複数存在したりするような場合、音源や対策部位を特定するために多くの時間と労力を要していた。そこで、筆者らは、マイクロホン間の位相差を用いた相関法による音源方向推定式を導出し<sup>1)</sup>、その推定した音源方向を画像上に表示する音源探索装置（音カメラ）を考案した<sup>2)</sup>。さらに、本装置に騒音対策を必要とする音源に対して仮想の防音壁を設定し、防音壁の効果の予測を行う機能を持たせ、その防音対策効果を実際に耳で聴くことができる防音対策シミュレータを開発した。この音源探索装置の原理、防音壁の効果の予測法及び防音対策シミュレータの原理等について述べる。

## 2. 音源方向の推定方法

5個のマイクロホンを用いて音源方向を推定する方法を示す。マイクロホンを図-1に示すように配置する。M1～M5はマイクロホン、Lは水平面のマイクロホン間隔とする。ここで、音源はマイクロホン位置から充分離れており、平面波として入射すると仮定する。図-2にマイクロホンM<sub>i</sub> - M<sub>j</sub>間における平面波の進行距離の概念図を示す。D<sub>ij</sub>をM<sub>i</sub>に対するM<sub>j</sub>

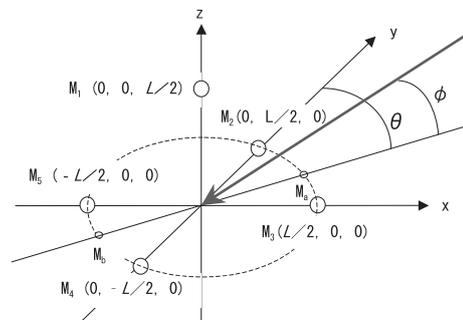


図-1 マイクロホンの配置

の時間遅れ (sec),  $c$  を音速 (m/sec) とする。M<sub>i</sub>, M<sub>j</sub> を通過する平面波の進行距離は  $D_{ij} \cdot c$  (m) となる。図-1における水平角を  $\theta$  (°), 仰角を  $\phi$  (°) とすると、M<sub>2</sub> - M<sub>4</sub> 間および M<sub>3</sub> - M<sub>5</sub> における平面波の進行距離は式 (1), (2) で表される。

$$D_{24} \cdot c = L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \quad (\text{m}) \quad (1)$$

$$D_{35} \cdot c = L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \quad (\text{m}) \quad (2)$$

次に、XZ 平面および YZ 平面における進行距離を求めると式 (3), (4) となる。

$$(D_{13} + D_{15}) \cdot c = \sqrt{3} \cdot L \cdot \sin \phi_x \cdot \cos \theta \quad (\text{m}) \quad (3)$$

$$(D_{12} + D_{14}) \cdot c = \sqrt{3} \cdot L \cdot \sin \phi_y \cdot \cos \theta \quad (\text{m}) \quad (4)$$

但し、 $\phi_x$ ,  $\phi_y$  はそれぞれ XZ 平面, YZ 平面に入射する仰角である。ここで、式 (3), (4) の右辺は等しくなるので式 (5) の関係で表せる。

$$\begin{aligned} D_{1a} + D_{1b} &= D_{12} + D_{14} = D_{13} + D_{15} \\ &= \frac{D_{12} + D_{14} + D_{13} + D_{15}}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

水平角は式 (1), (2) から式 (6) で、仰角は式 (1), (2), (5) から式 (7) で表せる。

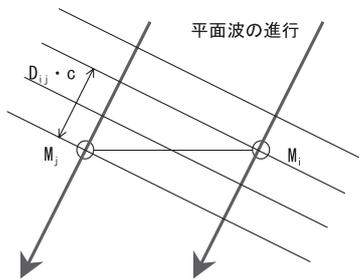
$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{D_{35}}{D_{24}} \right) \tag{6}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{D_{12} + D_{14} + D_{13} + D_{15}}{(2\sqrt{3} \cdot \sqrt{D_{24}^2 + D_{35}^2})} \right) \tag{7}$$

なお、式 (6)、(7) の  $D_{ij}$  は、2 個のマイクロホンに入力される信号のクロススペクトル  $P_{ij}(f)$  を求め、対象とする周波数の位相情報  $\Psi$  から求めることができる。

$$D_{ij} = \frac{1}{2\pi f} \psi [P_{ij}(f)] \tag{8}$$

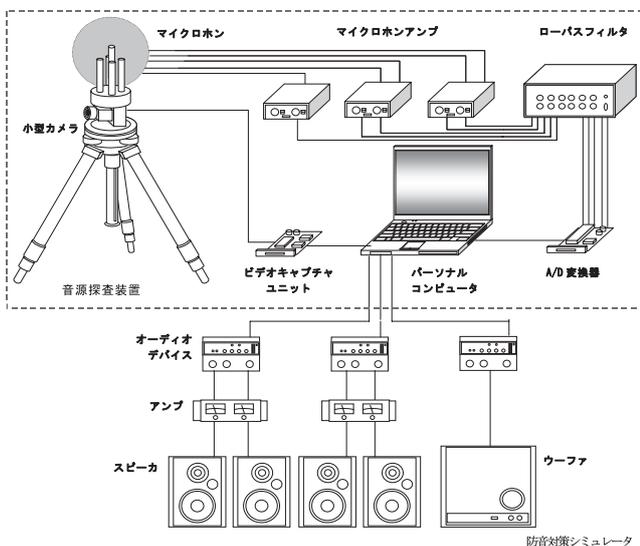
但し、 $f$  は周波数とする。



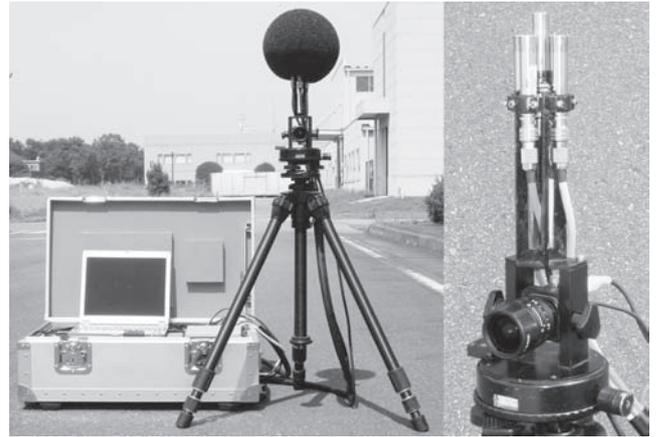
図一 2 平面波の進行距離の概念

### 3. 音源探査装置の概要

図一 3 に音源探査装置及び防音対策シミュレータの構成を、写真一 1 に音源探査装置の概観を示す。センサ部は 5 つのマイクロホンと小型カメラから構成されており、カメラから取り込んだ画像の上に音源方向、周波数、音圧レベルを  $\odot$  印の大きさと色で表示するようにしている。5 つのマイクロホンの間隔は各々 35 mm とし、解析可能周波数の上限は理論上 4,500 Hz



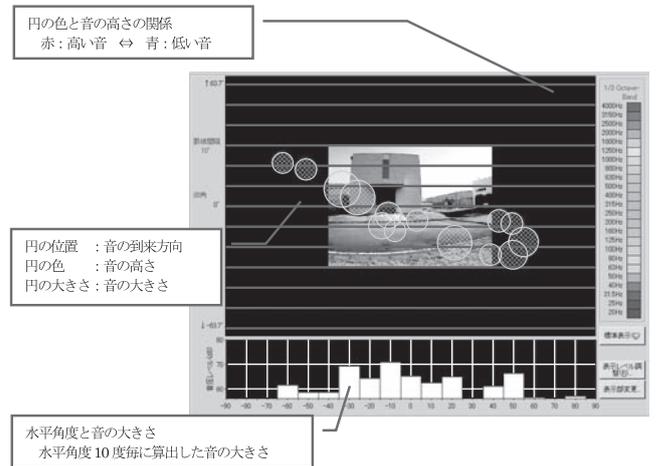
図一 3 音源探査装置及び防音対策シミュレータの構成



写真一 1 音源探査装置の概観 (左) およびマイクロホン、カメラ部 (右)

となっている。なお、周波数の下限は、100 Hz としている。音源探査装置による測定結果の表示例を図一 4 に示す。

音カメラの測定結果画面について示す。



図一 4 測定結果の表示例

### 4. 防音壁の効果の予測

従来、騒音対策を行う前に、現地で詳細な騒音調査を行い、騒音源の位置や音の大きさなどの情報を把握していた。本音源探査装置による測定結果は、任意の測定点における全方位 (360°) の音情報を個別に記録しており、音源の調査漏れはない。本装置の測定結果を用いて仮定の防音壁による遮音効果を予測計算することができるようにしている。本装置に組み込んだ防音壁の予測計算機能は、音源位置の測定結果の画面上に、図一 5 に示す音源の範囲を指定した後に仮定の防音壁を設定し、計算に必要な数値をいくつか入力することで防音壁の遮音効果を計算することができるようにしている。なお、予測計算において、有限長の防音壁による回折効果の計算は山本ら<sup>3)</sup>の提案する方法を用いている。

(1) 防音対策への適用例

本装置を用いて防音壁の効果を実験計算した例を示す。音源の位置と防音壁の配置例を図-6に示す。仮定の防音壁を設置し、遮音効果を計算した結果を図-7に示す。音源からのA特性音圧レベルは62.5dBであったものが、仮定の防音壁を設置すると54.2dBになると予測される。実際に防音壁を設置した後にA特性音圧レベルを測定した結果は、図-8に示すように54.0dBとなり、予測計算した結果とよく一致している。

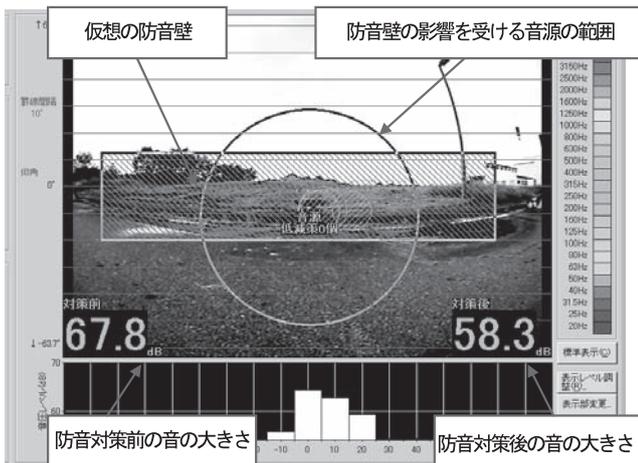


図-5 予測計算結果の表示例

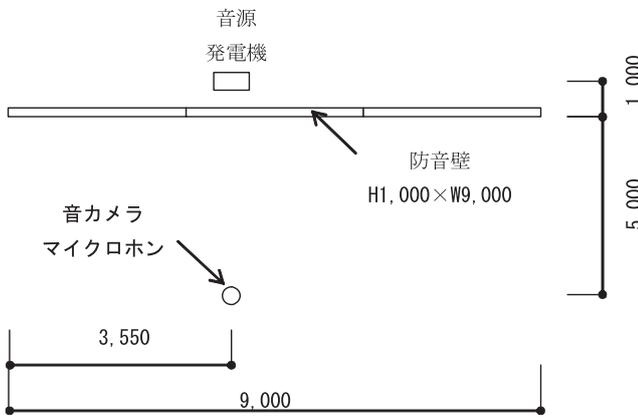


図-6 音源と仮想防音壁の配置

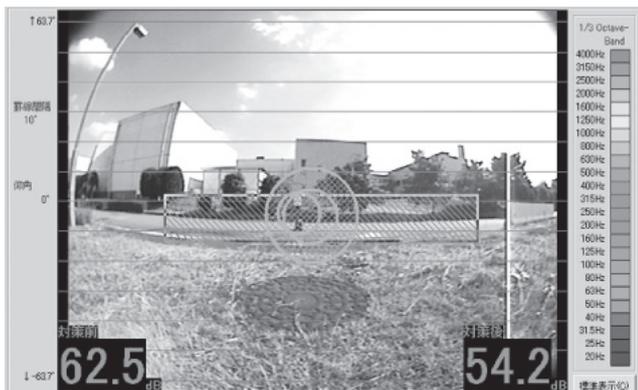


図-7 仮想防音壁の対策効果計算結果



図-8 防音壁設置後の騒音レベル

5. 防音対策シミュレータ

騒音対策前後の音の大きさ及び方向を耳で聴くことができる防音対策シミュレータの原理を述べる。

(1) 音源の再生方法

音源探査装置を用いて音源位置の特定を最初に行う。次に、特定した音を試聴するために、再生用のスピーカがそれぞれ音を受け持つ領域を設定し、音の到来方向を再現する。今、4つのスピーカと1台のウーハで再生する場合について検討する。図-9に示すように、1オクターブバンド毎に4つのスピーカが受け持つ領域の音圧レベルを設定する。図-9の例では125 Hz帯域はスピーカ2（以下SP2と略す）が音圧レベルの70%、SP1が10%、SP3が20%、SP4が0%となる。

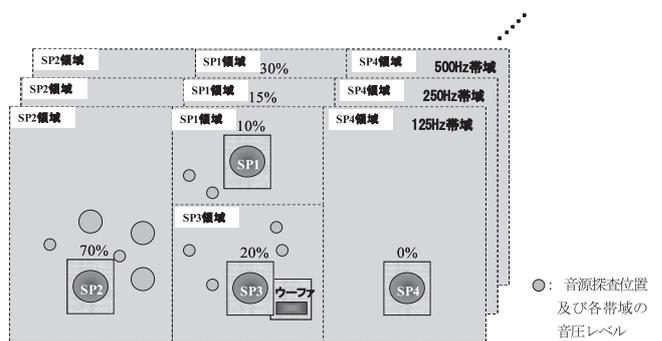


図-9 音源の音圧レベルを各スピーカへ設定する方法

音源の位置や音圧レベル、周波数特性は時間の経過と共に変わる。音の発生レベルも刻々変化するため、各スピーカに割り振っている音圧レベルも変える必要がある。このため、各スピーカに割り振る音圧レベルを一定の時間間隔（例えば0.1秒間隔）で求め、音圧レベルの変化に対応できるようにしている。一定時間ごとのレベルの切り替え（つなぎ目）部分で雑音が発

生しないように、**図-10**に示すようにフェードアウト・フェードイン方式で音を合成して処理している。

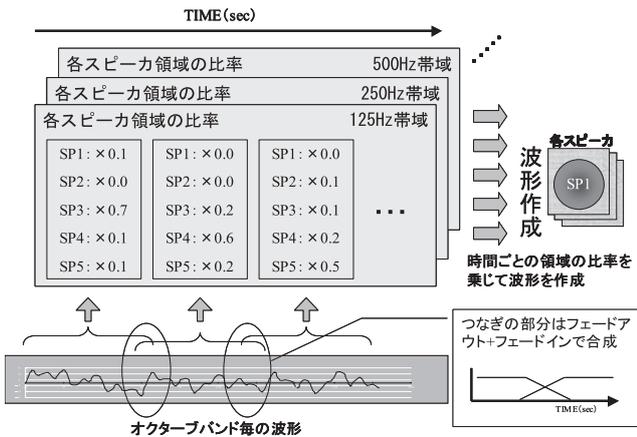


図-10 音源波形の合成方法

(2) 無響室における再生実験

複数の音源がある場合に、**図-11**の左図に示すように音源探査装置を用いて音源位置を特定する。次に、その音源についてオクターブバンドごとに音を再生する基礎的な実験を行った。各スピーカー領域ごとにオクターブバンド毎の音圧レベルを最も近い位置のスピーカーに割り当てた。作成した再生音をスピーカーから発生させ、音源探査装置でその状況を測定し、音源位置の同定を行った。**図-11**右図に示すように音源の位置は、試験音と再生音で良く一致している。

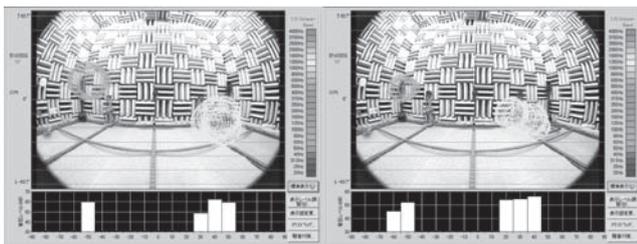


図-11 音源探査装置による測定結果(左:試験音再生時,右:再生音再生時)

次に、**写真-2**に示すように、無響室内に低音域再生用のウーファ1台と中高音域用のスピーカ4台を設置して実験を行った。無響室内で、**図-12**に示すように人が音源スピーカーを持って移動する状況を**図-13**に示すように音源探査装置で位置の特定を連続的に行った。この収録した音を再生する実験を行う。音源は、250 Hz 帯域と 1000 Hz 帯域のバンドノイズ、ピンクノイズと音楽とした。30代から50代の男性4人が試験位置で聴き音像がきちんと移動することを確認した。

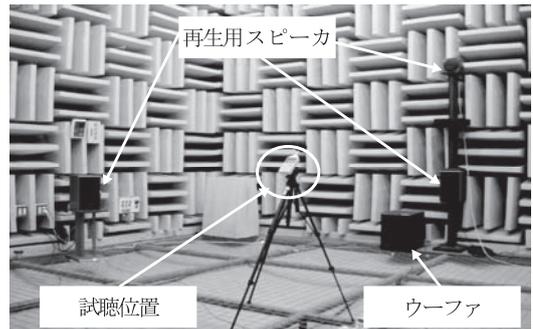
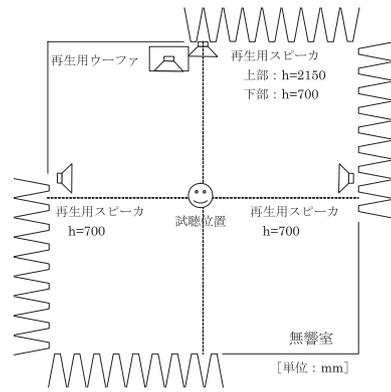


写真-2 無響室にスピーカを設置した状況(上:模式図,下:設置状況)

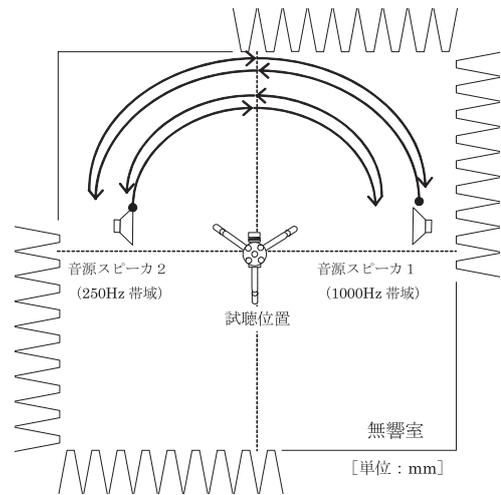


図-12 無響室における音源スピーカの移動経路

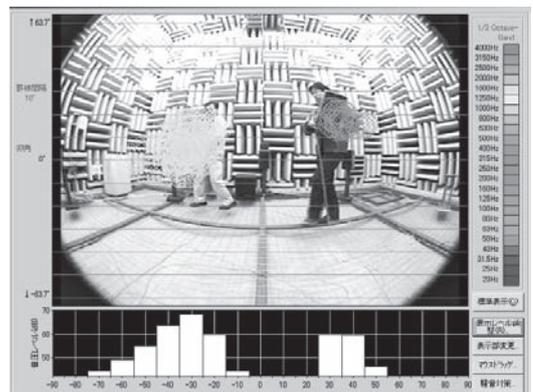


図-13 音源探査装置による音源位置の特定状況

(3) 防音壁設置後の可聴音化実験

音源探査装置で音源位置を特定した後に、障壁による減音量をフィルタリング処理によって計算する手法について検討する。最初に、図-14の上図に示すように、防音壁の計算対象となる音源と対象とならない音源に分離する。計算対象となる音源については、防音壁の減衰効果を文献3の方法で計算する。計算後、図-14中図に示すように音源の位置を障壁の上端部に移動する。最後に図-14下図に示すように、各音源スピーカ領域ごとの音圧レベルを算出する。なお、この計算においては防音壁は十分な音響透過損失をもっているものとした。

図-8に示す実際の防音壁について設置前後に録音したデータと防音対策シミュレータのデータを30

代から50代の男性4人が試聴位置で聴き比べを行い、音像がきちんと定位していることを確認した。

6. おわりに

最初に、音源探査装置の原理について述べ、本装置を用いて屋外の音源について位置を特定した事例を紹介した。次に、この音源に対して防音壁を設置した場合の遮音効果の予測値と実際の防音壁設置後の減音量について比較し、よく一致することを示した。本装置を用いることによって、騒音源の特定から騒音防止対策としての防音壁の検討まで一貫して行うことができる。次に、防音壁を設置した場合の減音効果を実際に試聴できるシステムを構築し、無響室でその効果を確認した。本システムは、移動する音源に対しても音像がきちんと定位することを試聴によって確認した。

なお、本装置の開発は、中部電力(株)、(株)熊谷組、山下恭弘信州大学名誉教授の3者が共同で行っているものである。

J|C|MA

《参考文献》

- 1) 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山武, 澤克紀: 倍音を含む純音性音源の方向推定に関する検討-誤差要因の基礎的検討-, 日本建築学会計画系論文集, No.542, pp.15-21, 2001年4月
- 2) 野上英和, 上明戸昇, 山下恭弘, 大脇雅直, 財満健史, 杉山武, 和田浩之: 音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発-5チャンネル音源探査装置の開発-, 日本音響学会講演論文集, pp.857-858, 2001年10月
- 3) 山本貞平, 堀田竜太, 高木興一: 有限長障壁に対する音の回折効果の計算方法について, 日本音響学会誌 50巻4号, pp.271-278, 1994年4月

[筆者紹介]

大脇 雅直 (おおわき まさなお)  
 (株)熊谷組 技術研究所  
 都市・居住環境研究部  
 副所長 兼 部長



和田 浩之 (わだ ひろゆき)  
 中部電力(株)発電本部  
 土木建築部 建築グループ  
 主任

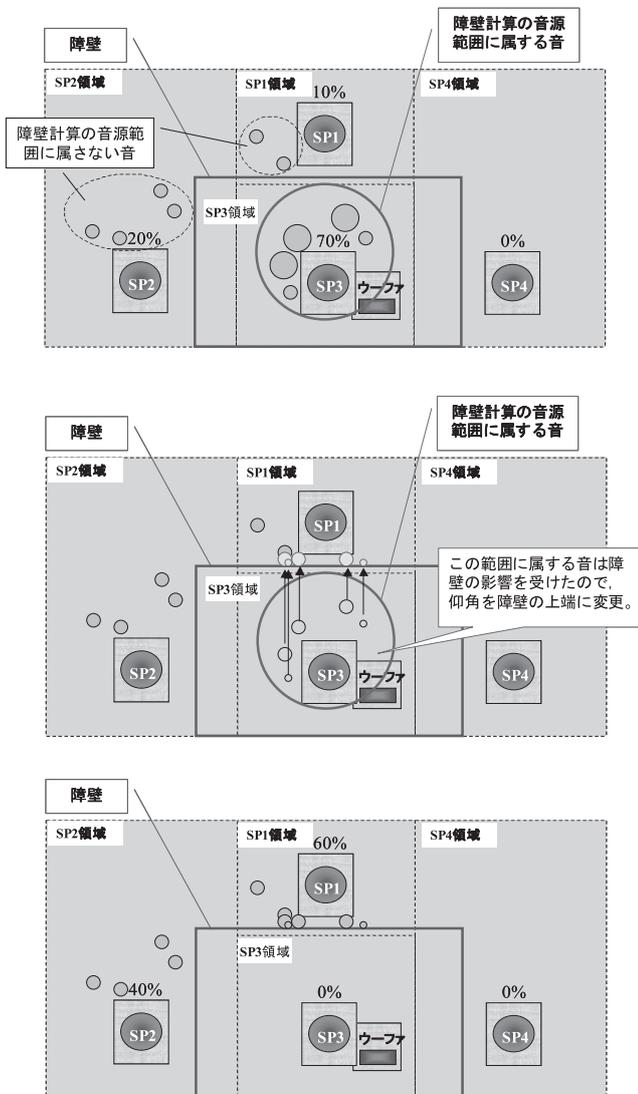


図-14 障壁による減衰量を計算する方法