

## 虚像法計算値と実測値の対応

高木 直樹\*\*\* 山下 恭弘\*\* 松井 昌幸\*

(昭和62年10月31日受理)

### Comparison between Values Calculated by the Image Method and Measured Values

Naoki TAKAGI, Yasuhiro YAMASHITA  
and Masayuki MATSUI

Sound pressure levels calculated by the image method were compared with measurements, in comparison with the diffusion method. Three types of rooms were used for the measurement: a reflective conference room, an absorptive budo-gymnasium, and a mid-character corridor. For the conference room, no large differences were found between the values calculated by both the image and diffusion methods, and both the methods could simulate the measurements well. For the budo-gymnasium, the diffusion method gave constant values at sound source distances over a certain critical value, which depends on the room constant and room dimensions. Measured values for each point decreased with increasing distance from the sound source. Thus, the diffusion method will yield noticeable errors for points far away from the sound source. On the other hand, the image method could simulate the measurements well. For the corridor, the effect of oblique incidence angle was also taken into account in the calculation by the image method. A comparison was made between the measurements and the results of calculations by the diffusion method, the image method, and the image method with the effect of incidence angle taken into account. The oblique incidence image method gave various types of measurement simulations, but it is a highly promising method if we are furnished with data on the oblique incidence absorption coefficient.

### 1. ま え が き

近年、工場内の作業環境の改善のため、またオフィスにおけるOA化のために新しい騒

---

\* 建築工学教室 教授  
\*\* 建築工学教室 助教授  
\*\*\* 建築工学教室 助手

音源が事務室内に入ってきたり、トンネル、地下道等における非常放送の改善のために、従来室内音響の解析対象とされてきたコンサートホールや劇場等とは違った空間において室内音場を解析する必要性が増して来ている。このような部屋は拡散音場とは考えられず、従って拡散法による解析を適用したときに計算誤差が大きくなる。こうした部屋において虚像法による解析は、計算の複雑さによる計算時間が大量に必要であるという欠点はあるが精度の高い解析ができると考えられる。本論文は各種の部屋において音圧分布を実測して虚像法による計算値と拡散法による計算値との間で実測値との対応を検討するものである。実測した部屋は反射性の会議室、吸音性の武道練習場と吸音特性は中間的な廊下である。会議室と武道練習場においては虚像法と拡散法の実測値との対応を、廊下においてはさらに斜め入射吸音率を虚像法計算に代入し実測値との対応を検討する。

## 2. 実測地点の選定

実測を行なうに際して次に上げるような条件を考慮して場所を選定した。

- (1) 部屋の形状が矩形であること。
- (2) 拡散法を適用しても誤差が少ないと考えられる部屋から明らかに拡散法の適用が無理であると考えられる部屋まで、部屋の形状が変化に富んでいること。
- (3) 吸音特性も反射性から吸音性まで幅広いこと。
- (4) 部屋の大きさが大きく測定誤差や定在波の影響をできるだけ受けないこと。
- (5) 壁面の吸音率を推定しやすいこと。

以上の観点から3つの室において実測を行なった。表1に実測に用いた部屋の概要を示す。寸法比を見ると会議室、武道練習場は天井高さが床面積に対して小さい部屋であり、廊下は極端な形状である。吸音特性は会議室は反射性であり、武道練習場は吸音性、廊下は中間的な特性である。これらの部屋で虚像法の平均自由行程を拡散法の平均自由行程で割った値を見ると、会議室、武道練習場では約2、廊下においては4近くになっている。

Table 1 Room dimensions and character, the number of observations, etc.

NAME	DIMENSIONS (m)	VOL (m <sup>3</sup> )	SURFACE (m <sup>2</sup> )	Pi/Pd	No. OBS.	CHARACT.
CONFERENCE	18.9, 11.6, 2.8	613.9	609.3	1.92	12	REFLECT.
BUDO-GYM.	25.8, 16.0, 4.0	1651.2	1160	1.86	35	ABSORB.
CORRRIDOR	24.2, 1.93, 2.5	116.14	223.4	3.76	14	MID

## 3. 実測方法

実測方法は各部屋においてノイズをスピーカから発生させ、テープレコーダに録音して研究室に帰ってから解析を行なった。測定系統図を図1に示す。音源系統はホワイトノイズをノイズジェネレータで発生させ、アンプリファイアで増幅したあとカットオフタイムで時間的な制御を加え指向性が少ないグローブスピーカにつないでいる。測定系統は騒音計のフィルタ特性を All Pass にして収録した信号をテープレコーダに録音し、オクター

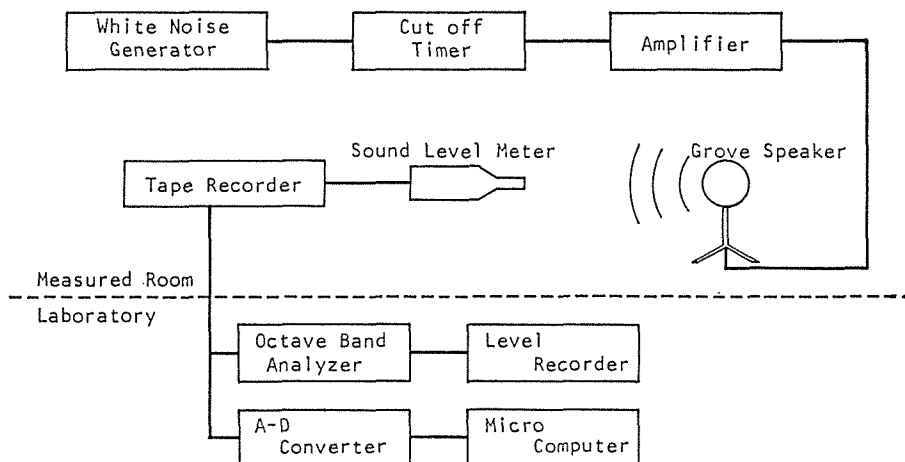


Fig. 1 Block diagram.

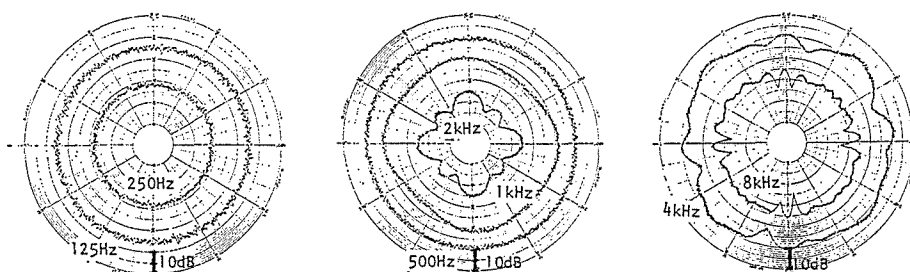


Fig. 2 Directivity of the grove speaker.

バンドフィルタで 125Hz から 8000Hz までの 7 バンドで分析した。また A/D 変換器を使ってパーソナルコンピュータでの解析も一部使用している。なお収録したデータは全て暗騒音補正、使用した機器間の相互補正を行なった。音源のパワーは無響室内でスピーカへの出力電圧とそのときの実測値から求めたが、一部の実測では実測時の音源近くの受音点の実測値から求めている。

図 2 にグローブスピーカの指向特性を示す。図 2 は 125Hz ~ 8,000Hz のデータであるが 500Hz 以下ではほぼ 4dB 以内の指向特性であり指向性は無視できる。2,000Hz 以上では若干の指向性が見られ、最大 10dB のあばれがある。そこで、実測に際してはこの指向性が最大ないしは最小の方向に、最も近い受音点方向を向けないように注意してスピーカを設置した。

#### 4. 会議室における実測

(4-1) 吸音特性等 会議室の大きさは表 1 にあるように  $18.9 \times 11.6 \times 2.8 \text{ m}^3$  であり、床は P タイル張り厚さ 4 mm ニードルパンチ仕上げ、壁はモルタル金ゴテ下地ビニールクロス張りで 5 ヲ所に鉄ないしは木製ペイント仕上げの扉があり、一方の壁は 2/3 がガ

Table 2 Acoustical character of the conference room.

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
$\alpha$	0.08	0.06	0.11	0.11	0.11	0.08	0.08

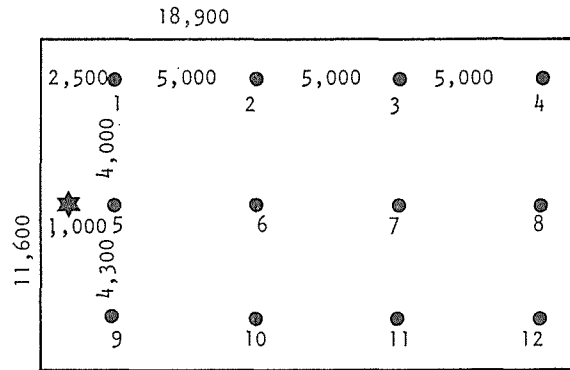


Fig. 3 Plan of the conference room.

ラス面である。天井は厚さ 9 mm プラスターボード下地リシン吹きつけ仕上げとなっている。こうした建築部材から推定された吸音率を表 2 に示すが、ほぼ 0.1 であり反射性であることが分かる。なお虚像法と拡散法の平均自由行程の比は 1.92 である。

音源位置、受音点を図 3 に示す。音源は高さ 0.6 m であり、受音点は 4 列 3 段計 12 点を受音点高さ 1.2 m で置いた。

(4-2) 実測結果 表 3 は 4 点で残響時間を測定した結果を示す。250 Hz 以下では 3 秒以上、4,000 Hz 以上でも約 1.3 秒と長めの残響時間である。この残響時間を拡散法の残

Table 3 Reverberation time RT for the conference room. [sec]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
RT	3.38	3.08	2.50	1.86	1.58	1.28	1.29

Table 4 Acoustical character of the conference room.  
calculated with the reverberation time.

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
$\alpha_r$	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08

Table 5 Difference between maximam and minimam sound pressure levels. [dB]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Dif.	6.5	4.0	3.0	8.0	8.0	6.5	10.0

響時間の計算式に代入して平均吸音率を求め表4に示す。表2の値と比べてやや小さめとなっているが両者にあまり大きな差はなく、反射性の部屋であることが確認される。また拡散法の適応をしても誤差が少ないことが予想される。

実測結果から各周波数で、最大の値（音源近くの点の値）から最小の値を引き表5に示す。これを見ると音が部屋の中であまり減衰していないことが分かる。

図4は音圧レベルの実測結果の一部を示す。これを見ると拡散法による計算値も虚像法

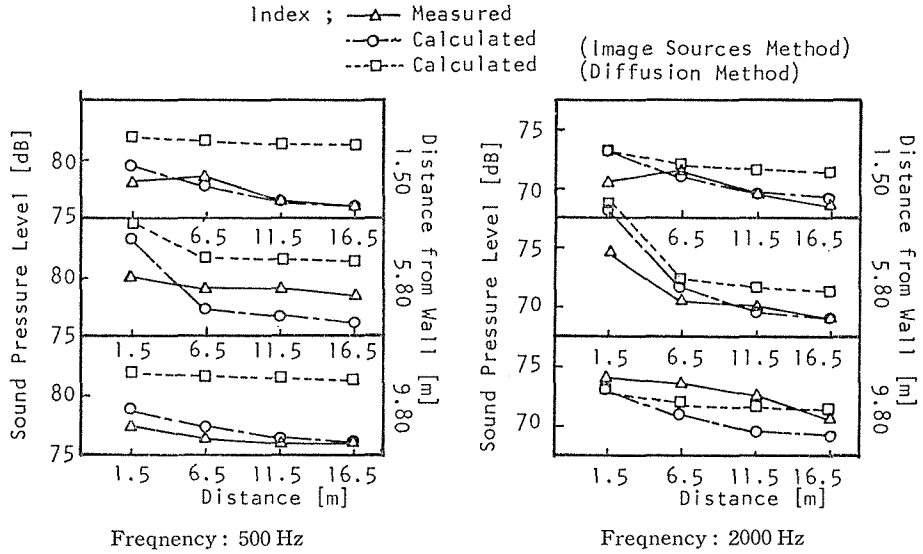
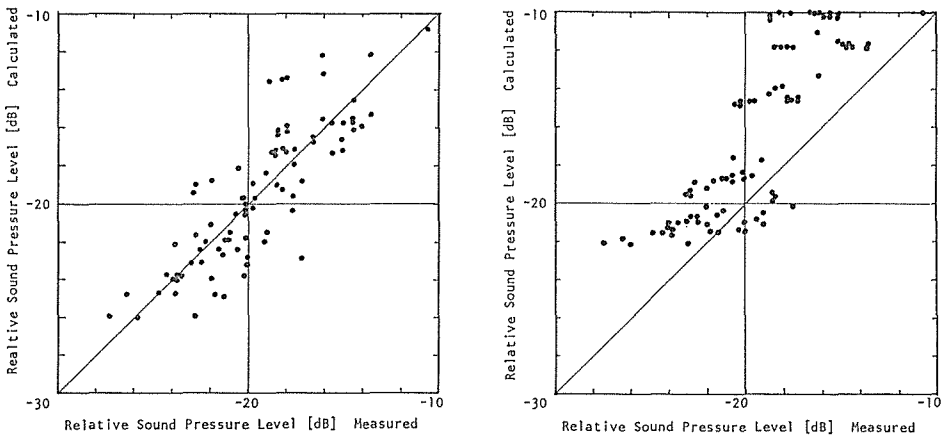


Fig. 4 Sound pressure level vs. distance from sound source.



Measured relative sound pressure level against that calculated with image sources method.

Measured relative sound pressure level against that calculated with diffusion method

Fig. 5 Scatter diagram of all data for the conference room, with the image and diffusion methods.

による計算値も比較の実測値をよくシミュレートしている。測定点数が少ないため、全体的な傾向をつかみにくいので、125 Hz から 8,000 Hz までの全ての値を散布図の形で示したものが図 5 である。これは相対レベルの形で縦軸に実測値、横軸に計算値を示した。これを見ると、虚像法による計算値のほうが拡散法による計算値より、実測値を良くシミュレートしており、誤差もほぼ 4 dB 以内に入っていることが分かる。

## 5. 武道練習場における実測

会議室よりも部屋容積の大きい吸音性である武道練習場における実測について示す。

(5-1) 吸音特性等 大きさは表 1 にあるように  $25.8 \times 16.0 \times 4.0 \text{ m}^3$  であり、平均自由行程の比は 1.86 であり、これは会議室とほぼ同様な値である。床は畳敷き、壁は短辺方向 2 面はモルタルペイント仕上げ、4 ヶ所に木製の出入り口、長辺方向 2 面はガラス張りである。天井はコンクリート下地石綿吹きつけである。吸音特性を表 6 に示すが 125 Hz, 250 Hz は 0.2 以下であるが 1,000 Hz 以上の周波数では 0.4 以上と全体的に吸音性であることが分かる。実測点を図 6 の武道練習場の平面図に示すが 5 列 7 段計 35 点の実測である。音源の高さは 1.5 m, 受音点の高さは 1.2 m である。

(5-2) 実測結果 実測結果から最大値と最小値の差を求め表 7 に示す。これを見ると一番値が小さい 125 Hz で 12 dB であり、4,000 Hz 以上では 20 dB 以上の値になってい

Table 6 Acoustical character of the budo-gymnasium.

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
$\bar{\alpha}$	0.16	0.17	0.35	0.45	0.47	0.49	0.49

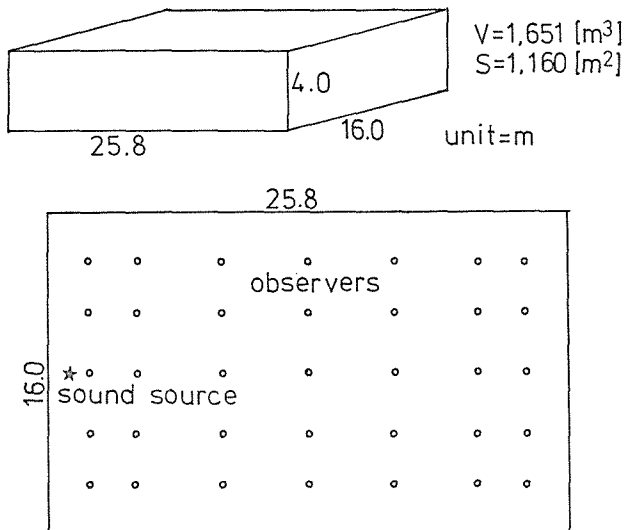


Fig. 6 Plan of budo-gymnasium.

る。実測結果のうち 1,000 Hz の結果を図 7 に示す。これを見ると音源からの距離が大きくなると拡散法による計算値は拡散状態になり一定の値となるが、実測値は音源からの距離が大きくなっても減衰が続いている。この拡散法で完全拡散状態になる臨界距離を表 8 に示す室定数により求める式が式(1)である。

Table 7 Difference between maximum and minimum sound pressure levels. [dB]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Dif.	12	14	14	15	16	22	23

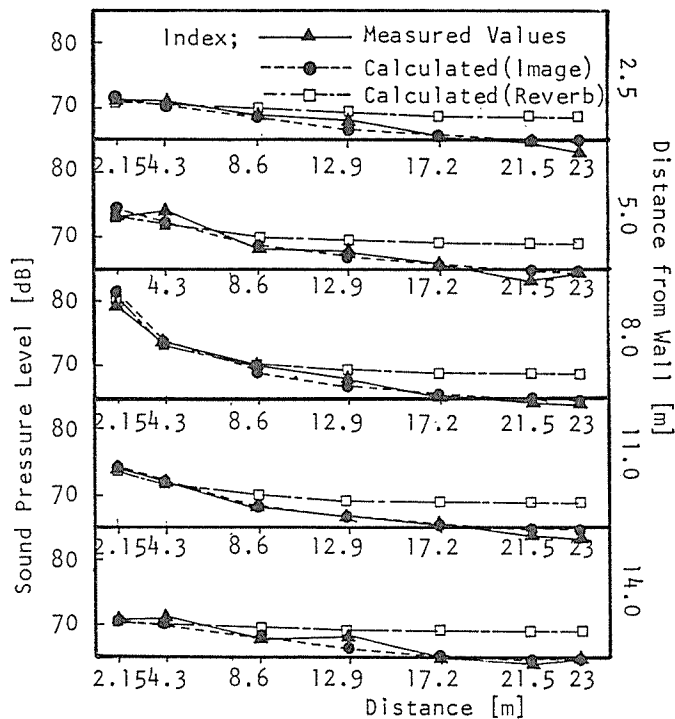


Fig. 7 Sound pressure level vs. distance from sound source, 1,000Hz.

Table 8 Room constances. [m<sup>2</sup>]

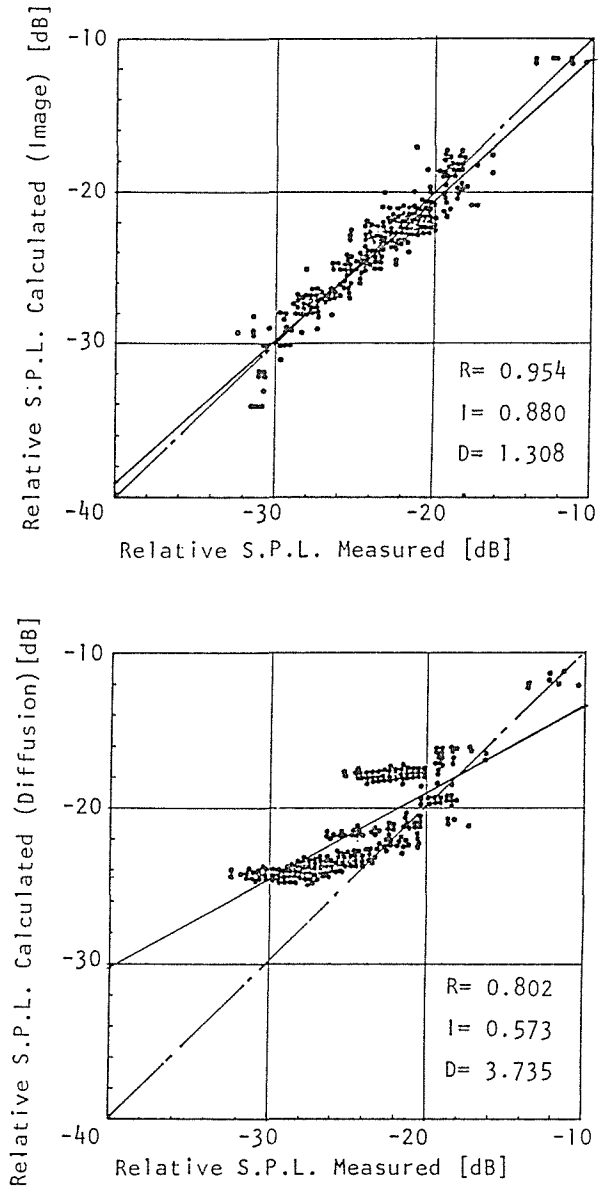
Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Ro	221.0	237.6	624.6	949.1	1,028.7	1,114.5	1,114.5

Table 9 Critical distance dl. [m]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
dl	4.16	4.32	7.00	8.63	8.98	9.35	9.35

$$dl = 0.28(Ro)^{1/2} \text{ (m)} \quad (1)$$

この臨界距離を周波数毎に表9で示すが、部屋の大きさが  $25.8 \times 16 \times 4 \text{ m}^3$  であるのに対し、例えば 1,000 Hz では音源からの距離が 8.6 m 以上になると完全拡散状態になり、



$R$ ; Coefficient of Correlation     $I$ ; Incline of Regression Line  
 $D$ ; Mean Square Difference [dB]

Fig. 8 Scatter diagram of all data at budo-gymnasium, with the image and diffusion methods.



Table 10 Statistical values.

	Freq (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Image	R	0.88	0.88	0.93	0.97	0.96	0.95	0.96
	D	1.4	1.3	1.1	0.9	1.0	1.5	1.7
Diffusion	R	0.75	0.78	0.87	0.87	0.85	0.88	0.83
	D	1.8	1.9	1.6	2.0	3.0	2.9	3.8

Index: R; Coefficient of Correlation

D; Mean Square Difference [dB]

音の大きさが距離に無関係になる。しかし実測値は臨界距離以上離れても減衰するため、拡散法の計算値では実測値を良くシミュレートできなくなってしまう。

全周波数について図5と同様に散布図の形で示したものが図8である。ここでは測定点数が増えたのでよりはっきりとした傾向が表われる。また両計算値と実測値との間で相関係数等各種統計量を取り表10に示す。これを見ると虚像法計算値は全周波数ではほぼ0.9以上の高い相関が得られており、平均二乗誤差も全ての周波数で2 dB以下である。これに対し、拡散法では相関係数はほぼ0.8であり、0.9を超える周波数はない。平均二乗誤差は1.6 dBから3.8 dBである。

## 6. 測定誤差の検討

本論文で行なっているような実測はある程度の測定誤差は避けられない。そこで、測定

Table 11 Difference between two measurements. [dB]

Dif (dB)	All Pass	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
-3	1						1	
-2	4	1	1	2				
-1	11	2	2		1	2	2	2
0	39	8	9	7	4	5	2	4
1	72	11	9	11	12	11	6	12
2	28	2	1	4	4	3	8	4
3	10		1		3	2	4	2
4	2		1			1		
5	1						1	
Expected Value (dB)	0.89	0.46	0.58	0.63	1.17	1.04	1.42	1.00
Standard Deviation (dB)	1.18	0.91	1.22	1.03	0.99	1.17	1.61	1.00
Error Range (dB)	1.95	1.50	2.01	1.70	1.63	1.93	2.66	1.65

誤差がどの程度存在するか実験的に求めた。求め方としては35点の実測値を24点に減らし、同じ条件下で実測を行ない、同じ受音点での2回の実測値の差を求めた。その差を表にしたものが表11である。これを見ると最大の差は5 dB であるが、ほとんどの受音点で±1 dB 以下であることが分かる。また誤差の期待値、標準偏差と誤差の存在範囲の確率90%値を表に示すが、期待値はほぼ1 dB 程度であり、誤差の存在範囲の90%値は2 dB 程度であることが分かる。これらの事から本論文で行なった測定系では±2から3 dB 程度の誤差で測定誤差、音源パワーレベルの変動があることが分かった。従ってそれ以下の値について考察する場合はその物理的意味に注意しなければならない。

## 7. 廊下における実測

最後に明らかに拡散法の適用が不適当な形状である廊下において実測を行なった。

(7-1) 吸音率等 大きさは $24.2 \times 1.925 \times 2.493 \text{ m}^3$ であり、他の2ヶ所と比べて極端な形状である。平均自由行程の比も3.76と大きな値となっている。床はPタイル張り、壁はモルタル下地塗り塗装仕上げ、両側に4ヶ所と6ヶ所の鉄製の扉がある。天井は石膏ボードである。なお廊下の両端は防火扉（鉄製）を閉じて区切り、6面の反射面にした。このままの状態では反射性であり、部屋としての容積も小さいため、測定誤差の影響を受けやすいので、床一面に吸音材（ウレタン）を敷いて吸音力を上げて実測した。音源は高さ0.6 mで、受音点は廊下の中央にそって高さ1.2 mで14点を図9に示すように置いた。部材から推定された吸音率を表12に示す。125 Hz～500 Hzでは0.1程度の吸音率であり、それ以上では約0.2程度である。

(7-2) 実測結果 残響時間を測定した。14点の実測結果の一部を表13に示す。これは125 Hzの結果であるが、音源の近くでは0.7秒であるのに対し、一番大きな値である No.

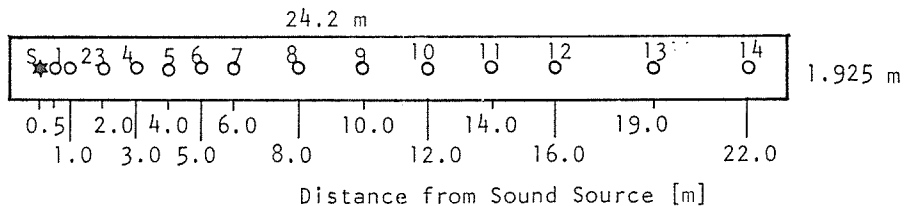


Fig. 9 Plan of the corridor.

Table 12 Acoustical character of the corridor.

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
$\bar{\alpha}$	0.11	0.13	0.11	0.16	0.19	0.23	0.26

Table 13 Reverberation time at the corridor, (125Hz). [sec]

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RT	0.70	1.35	1.18	1.53	2.77	3.03	2.26	2.07	2.81	2.42	2.16	2.12	2.82	2.40

Table 14 Reverberation time at the corridor. [sec]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
RT	2.64	1.86	1.12	0.92	1.12	0.98	0.74

Table 15 Acoustical character of the corridor.

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
$\alpha$	0.04	0.05	0.08	0.10	0.08	0.08	0.08

Table 16 Difference between maximam and minimam sound pressure levels. [dB]

Freq. (Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Dif.	12.4	7.5	8.5	9.5	10.0	11.3	14.2

6の点では約3秒と4倍の値の違いがある。また受音点により値が大きく上下しており、コンサートホール等における残響時間との違いが明らかである。各周波数における残響時間の平均値を表14に示す。またこの残響時間の実測値を拡散音場の残響時間式に代入して求めた平均吸音率を表15に示す。これを表11と比較すると、いずれも小さな値になっており、特に高い周波数では1/3ほどにもなっている。これは廊下のような形状では入射角が0度近くや90度近くになる入射が多く表われるための影響であると考えられる。特に入射角が90度近い場合、斜め入射吸音率は大きく変化して小さな値になることが予想され、このことの影響により、特に角度による吸音率の変化の大きな高い周波数での平均吸音率に差が出たと考えられる。音圧レベルの実測値の最大値と最小値の差を周波数毎に表16に示す。ほぼ10 dB以上の値になっていることが分かる。

ここで入射角の影響を虚像法計算に代入するために、斜め入射吸音率を求める必要がある。しかし廊下の建築部材に対する斜め入射吸音率が分かっているものは吸音材しかないため、以下のような方法で推定した。斜め入射吸音率は以下の式で求まる。

$$\alpha_{\theta} = \frac{4r_1 \cos \theta}{(r_1 \cos \theta + 1)^2 + (x_1 \cos \theta)^2} \quad (1)$$

ここで M. E. Delany と E. N. Bazley が多孔質材料に対して求めた音響インピーダンスを求める実験式は以下である。

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{\rho c} = r_1 &= 1 + 9.08 \left( \frac{f}{R_s} \right)^{-0.75} \\ \frac{X_1}{\rho c} = x_1 &= -11.9 \left( \frac{f}{R_s} \right)^{-0.73} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $\alpha_{\theta}$  は斜め入射吸音率、 $\theta$  は入射角、 $r_1$  は音響インピーダンスの実数部、 $x_1$  は虚数部、 $f$  は周波数、 $R_s$  は流れ抵抗とする。

従って流れ抵抗  $R_s$  の値が求めればよいことになるが、実際にはこの値を得ることは難しい。そこで、拡散音場と考えられる部屋を想定して、拡散法によるエネルギー密度を求め、この値を入射角の影響を考慮した虚像法計算に入れてそのときの  $f/R_s$  を逆算して残響室法吸音率と  $f/R_s$  の換算表を作った。こうして得られた  $f/R_s$  の値を式(1)、式(2)に代入して斜め入射吸音率が求まることになる。

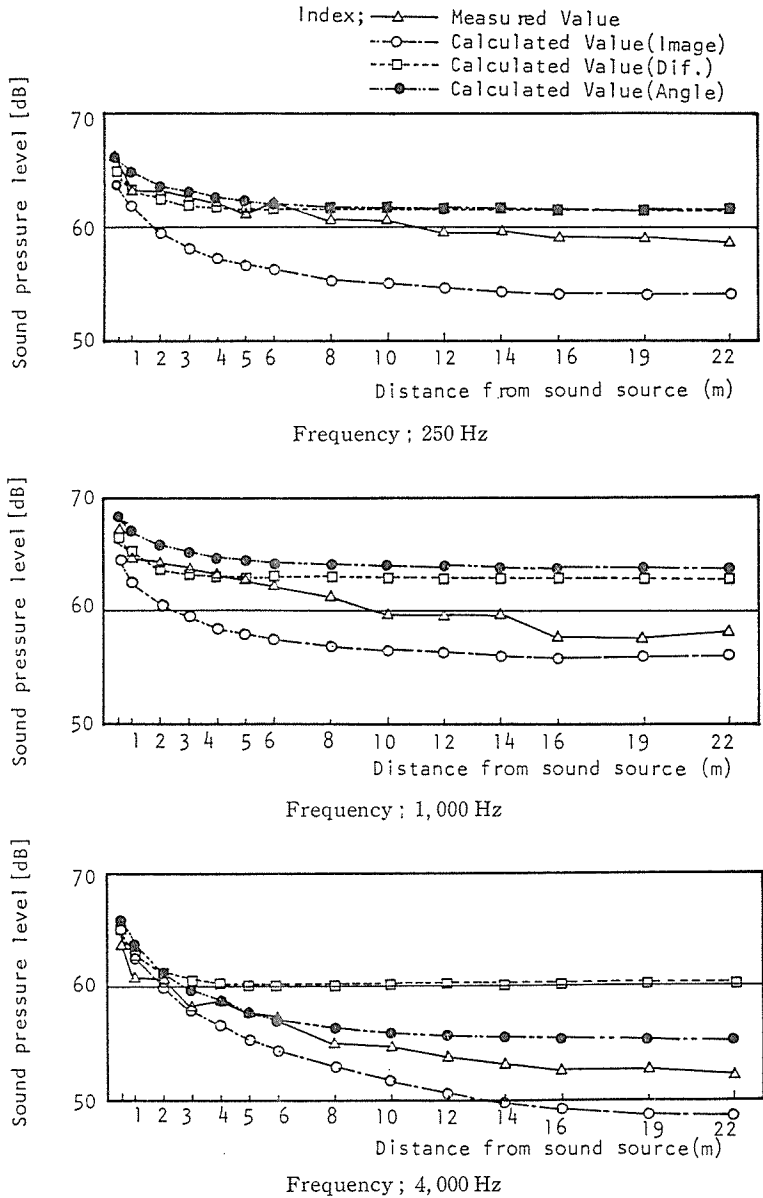


Fig. 10 Sound pressure level vs. distance from the sound source.

以上のように斜め入射吸音率は実測データで適当なものがないためさまざまな過程を経て求め、計算に代入することになる。このため現状では実用的ではないが、廊下のような極端な形状の部屋の解析を行なう場合は斜め入射吸音率を計算に代入する必要があると考えたため、このような手法により計算を行なった。

図10に実測値、拡散法、虚像法、入射角の影響を考慮に入れた虚像法（以下斜め入射虚像法）の計算値の一部を示す。図は 250 Hz, 1,000 Hz, 4,000 Hz の結果を示すが、250 Hz においては斜め入射虚像法の計算値は拡散法の計算値に近く、虚像法による計算値は実測値と大きな差がでている。1,000 Hz においては斜め入射虚像法は拡散法よりも大きな値になり3計算値とも実測値と合っていない。4,000 Hz では拡散法、虚像法の計算値は実測値と合っていないが、斜め入射虚像法の計算値は実測値をうまくシミュレートしていることが分かる。

以上のことから廊下のような極端な形状の場合は、拡散法はもちろん、入射角の影響を考慮に入れない虚像法でも計算誤差が大きくなることがある。これに対し現状では問題が多いが、今後斜め入射吸音率が実測されれば、斜め入射虚像法による解析に大きな可能性があることが分かった。

## 8. ま と め

本論文は虚像法による室内の音圧分布の計算精度を確認するために3つの部屋で実測を行ない、実測値、拡散法による計算値と虚像法による計算値の間で比較検討を加えた。その結果、部屋の形状、吸音率により、拡散法による計算でも計算誤差が少ない場合、虚像法による計算が必要な場合、さらに入射角の影響を考慮に入れるべき場合があることが確認された。

## 参 考 文 献

- 1) M. E. Delany and E. N. Bazley "Acoustical Properties of Fabrous Absorbent Materials" Applied Acoustics 3 '70 p105-
- 2) 高木, 松井 "虚像法による工場等の建築物内部の音圧計算 (その2)", 建築学会大会講演論文集 概集 '79, 9 P97- 等