

## 第7章 圧電振動板加振による損失係数の測定と内部損失係数の分離

## 7.1 まえがき

前章において、非共振透過を修正したSEA法の実験的な検証を行い、単層壁の透過損失を高い精度で推定できることを確認した。その場合、内部損失係数( $\eta_{int}$ )を適当な値に仮定して計算を行っている。実際の壁体の場合、周辺支持部でのエネルギーが大きく、 $\eta_{int}$ にはその影響が含まれているものとしてマクロに取り扱っている。

損失係数の測定においては、加振方法が問題となる場合が多い。近年のセラミック加工技術の進歩により、高性能の圧電振動板が開発されている。その小型・軽量性に着目し、本研究での応用を試みた。

本章では、圧電振動板を使用した加振法による損失係数測定システムを構築し、SEAパラメータの計測手法を検討する。この方法によって計測された、総合損失係数と音響放射による結合損失係数から内部損失係数を分離することができる。これらの測定結果の検討を行い、さらに、周辺支持部におけるエネルギー吸収率の算出を試みる。また、圧電振動板加振時の、音響インテンシティ計測法による音響放射の可視化や放射率の測定を行い、理論的な音響放射特性の検証を行う。

## 7.2 総合損失係数の測定方法と支持条件の影響に関する検討

本節では、 $\eta_{int}$ の定量化を目的とした、単層壁の総合的な損失係数( $\eta_{tot}$ )の測定を行い、測定方法および支持条件の影響について検討を行う。

### 7.2.1 損失係数の測定に関する既往の研究

損失係数の測定は1950年代頃から試みられており、様々な工夫が行われている<sup>64)</sup>。本研究で対象とする、実用寸法のパネルの損失係数測定に限定すると、その数は少なくなってくる。Crockerら<sup>11)</sup>は、単層壁の透過損失へのSEA法の適用を最初に行った論文では、振動レベルの減衰による総合損失係数の測定を行い、間接的に内部損失係数を推定している。パネルへの加振方法は、シェイカーによる機械的な加振である。

損失係数の測定に際しては、対象物以外によるエネルギー減衰をできるだけ避ける必要がある。したがって、非接触加振が理想的である<sup>54)</sup>。Crockerらは、加振方法について、ハンマリングによる衝撃加振を検討している<sup>55)</sup>。衝撃加振では、共振モードが一気に励起され、減衰の遅い低次のモードから減衰の早い高次のモードへ、エネルギーが転移していくことを考察している。その結果、高周波数の損失係数が小さく測定されるとしている。

近年のデジタル信号処理の進歩により、損失係数の計測技術も急激に発達してきた。山口・鈴木らは制振材の性能を確認する目的で、損失係数の計測に関する一連の研究を行っており<sup>56), 57)</sup>、計測法の違いによる影響やパネルの測定を試みている。

## 7.2.2 圧電振動板加振による損失係数の測定システム

損失係数の測定方法には、機械インピーダンス法による半値幅法や振動レベルの減衰時間から求める残響法がある<sup>54), 58)</sup>。本研究の目的は、広い周波数範囲にわたる、周辺支持部の影響を含む壁体の損失係数の定量化にある。従って透過損失測定との整合を考慮すると残響時間法が適当であると考えられる。残響時間法は試料の振動減衰過程から60dB減衰の残響時間( $T_{60}$ )を計測し、次式によって総合的な損失係数( $\eta_{tot}$ )を算出できる<sup>19), 58)</sup>。

$$\eta_{tot} = \frac{2.2}{f \cdot T_{60}} \quad (7.1)$$

ここで $f$ は周波数(Hz)である。

測定対象試料は1.2mm厚と3.2mm厚のアルミ板( $0.86\text{m} \times 0.86\text{m}$ ,  $0.74\text{m}^2$ )とし、支持条件は残響室開口部(透過損失測定と同じ条件)に15cm間隔釘打と、無響室内に吊り下げた(自由端)2種類とした。

加振方法は鉄製ハンマー(350g)による衝撃加振と、圧電セラミック振動板による定常加振を行った。圧電振動板の構造を図-7.1、動作原理を図-7.2に示す。定常加振については非接触が理想的である。圧電セラミック振動板は図-7.1に示すように、圧電セラミックスの両面に電極を形成した圧電素子と、黄銅あるいはステンレスなどの金属板を接着した単純な構造を基本としている。圧電素子の対向電極間に電圧を印加すると、圧電効果により径方向に伸び縮みする機械的な歪みが生じる。従って、圧

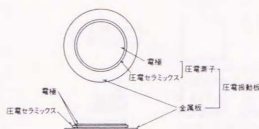


図-7.1 圧電振動板の構造

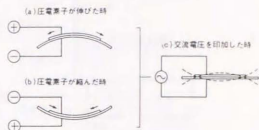


図-7.2 圧電振動板の動作原理

電振動板を試料に貼りつけ、交流電圧を印加すると屈曲を繰り返して試料に振動が生じることとなる<sup>6,9)</sup>。圧電振動板は種々の仕様のものが安価に入手できる。低周波数領域まで加振するには直径の大きいものが必要である。今回使用した圧電振動板は直径41mm・厚さ0.4mm・重量5.4gであり、付加質量や抵抗は無視でき非接触加振と同等とみなすことができる。

測定システムのブロックダイアグラムを図-7.3に示す。振動の減衰時間は特に試料を開口部に取り付けた場合非常に短くなる。従って短い現象を高速に観測処理する必要がある。今回はA/D変換とトランジェントメモリをFFTアナライザの機能を利用して行いパソコンへの負担を軽減した。定常加振においては減衰波形を取り込むため、入力信号の停止時と同期するトリガ装置を制作した。トランジェントメモリに取り込まれた電圧波形データはGPIBによりパソコンに転送される。パソコンによる信号処理は、まず任意の積分時間でdB変換を行い、減衰部分において最小自乗法により残響時間( $T_{60}$ )を計算する<sup>6,9)</sup>。測定系のチェックは残響時間既知のテスト用信号(0.1~3.0sec:日本オーディオ協会のテストCDに集録されている)によって行った。

図-7.4は本測定システムでのFilteringによる測定可能な損失係数の上限<sup>5,4),5,7)</sup>を、また表-7.1はサンプリング周波数とdB変換の積分時間を示す。1/3 Octave Filterin gでは約0.1以下の損失係数が測定できる。



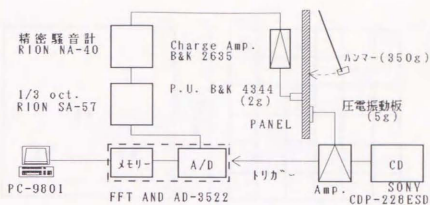


図-7.3 測定ブロックダイアグラム

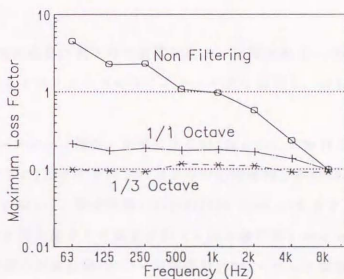


図-7.4 測定可能な損失係数の最大値

表-7.1 損失係数測定システムのサンプリング周波数と積分時間

Frequency	Sampling clock frequency	Integration time
63Hz	12.8kHz	5.0msec
125-250Hz	25.6kHz	2.5msec
500-8kHz	51.2kHz	1.25msec

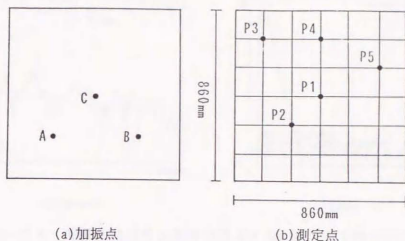
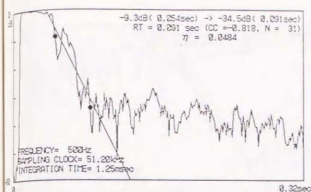


図-7.5 加振および測定点位置

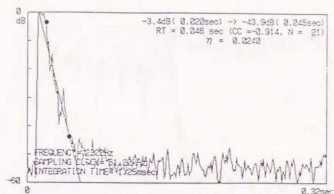
図-7.5に加振点及び測定点の位置を示す。圧電振動板への入力信号はテストCDに集録されている1オクターブのホワイトノイズを使用し、分析は1/3オクターブバンドで行った。

図-7.6にハンマー（裸面）加振による500Hzと2kHzにおける減衰波形の測定結果を示す。図中左下に1/3オクターブバンドの中心周波数(FREQUENCY=)・サンプリング周波数(SAMPLING CLOCK=)・積分時間(INTEGRATION TIME =)を示す。図中右上の第1行には最小自乗法で計算対象とした減衰波形（2点の●印間）のdB値及び時間範囲を、第2行は減衰時間の計算結果(RT=)・相関係数(CC=)・データ個数(N=)、第3行に式(7.1)による損失係数( $\eta$  =)を示している。ハンマーによる衝撃加振は3.2mm厚アルミ板について残響室内15cm間隔釘打支持条件のみ行った。

図-7.8～図-7.10に圧電振動板による定常加振の減衰波形を示す。圧電振動板の加振力は中高周波において、残響時間を計算するための十分なS/N比(25dB以上)をとることができる。低周波においてはその動作原理上（直径に依存）加振力が小さくなる。3.2mm厚アルミ板では125Hz帯域で計測できなかった。

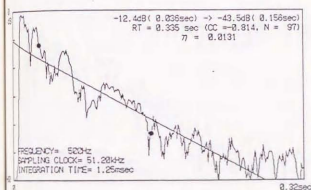


(a) 500Hz

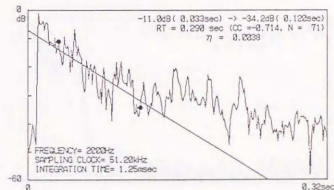


(b) 2kHz

図-7.6 残響室開口部に取り付けた3.2mm厚アルミ板のハンマー加振(裸面)による減衰波形例(15cm釘打・衝撃加振)

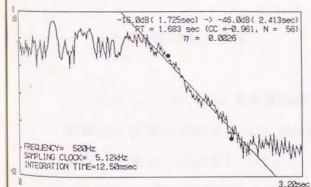


(a) 500Hz

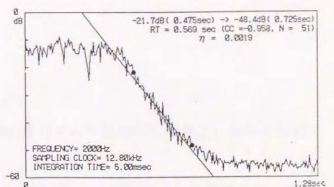


(b) 2kHz

図-7.7 残響室開口部に取り付けた3.2mm厚アルミ板のハンマー加振(10mm厚ゴム貼付)による減衰波形例(15cm釘打・衝撃加振)

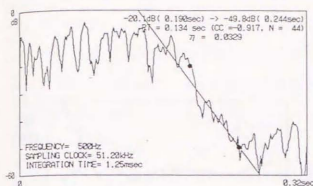


(a) 500Hz

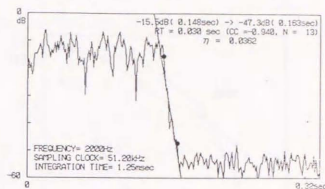


(b) 2kHz

図-7.8 無響室内に吊り下げた3.2mm厚アルミ板の圧電振動板による減衰波形例(自由端・定常加振)

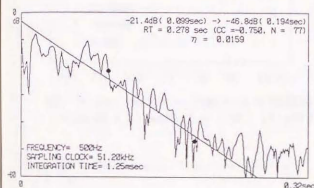


(a) 500Hz

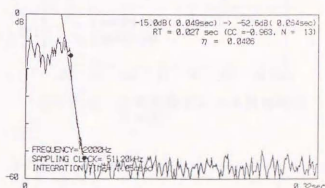


(b) 2kHz

図-7.9 残響室開口部に取り付けた3.2mm厚アルミ板の圧電振動板による減衰波形例 (15cm釘打・定常加振)



(a) 500Hz



(b) 2kHz

図-7.10 残響室開口部に取り付けた1.2mm厚アルミ板の圧電振動板による減衰波形例 (15cm釘打・定常加振)

### 7.2.3 測定結果と考察

#### (1) ハンマーによる衝撃加振について

衝撃面の影響を検討するため 5mm厚と10mm厚のゴムを貼付した場合と、貼付しない(裸面)の場合の測定を行った。

図-7.7は10mm厚の減衰波形の測定例である。図-7.11に衝撃面による残響時間の比較を示す。ゴムを貼付した場合、残響時間はかなり長くなる。これはハンマーの衝撃接触時間が長くなり、試料への運動エネルギーの伝達が大きくなったことによる影響と考

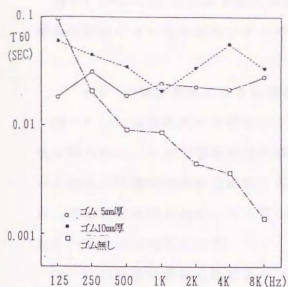


図-7.11 ハンマー加振による残響時間の比較 (3.2mm厚アルミ板, 15cm釘打)

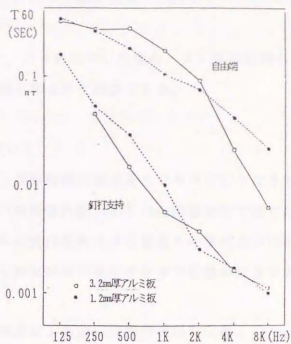


図-7.12 圧電振動板による残響時間の比較

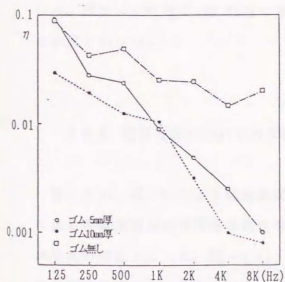


図-7.13 ハンマー加振による損失係数の比較 (3.2mm厚アルミ板, 15cm釘打)

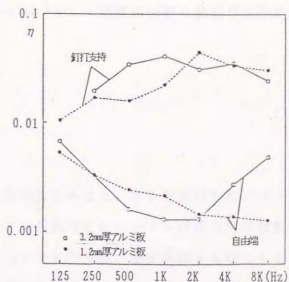


図-7.14 圧電振動板による損失係数の比較



えられる。Crockerら<sup>8,9)</sup>は衝撃加振の場合、高次のモードに対して低次のモードが励振され易く、かつ低次のモードは減衰が遅い、従って減衰の速い高次のモードへエネルギーの転移が生じることを推測している。

図-7.13に式(7.1)による損失係数を示す。ゴムを貼付した場合、ゴム厚に比例して損失係数は小さくなる傾向がみられ、高周波になるほど顕著である。

## (2) 圧電振動板による定常加振について

図-7.12に減衰時間の比較を示す。図より残響時間は高周波になるほど短くなる特性が得られた。また無響室内自由端にくらべ残響室内開口部に15cm間隔釘打で取り付けた場合、残響時間が非常に短くなる。これは支持条件による振動モードに違いがあり、音響放射性状も異なってくるが、周辺支持部でのエネルギーロスの影響が大きく現れているものと考えられる。

図-7.14の損失係数の比較より、試料の厚さによる違いは明確ではないが、3.2mm厚アルミ板の自由端で4kHz以上の帯域において損失係数が大きくなっている。これはコインシデンス効果( $f_c = 3900\text{Hz}$ )によって音響放射ロスが増えたためと考えられる。1.2mm厚アルミ板は $f_c = 10.3\text{kHz}$ であり、コインシデンス効果の影響は測定周波数範囲に生じていない。

## 7.2.4 加振方法についての考察

図-7.11、図-7.12より減衰時間の周波数特性をみると、ゴムを貼付したハンマーによる衝撃加振以外は同様な特性を示す。ゴムを貼付したハンマー加振は周波数変化が小さい特性となった。図-7.13、図-7.14より釘打支持の損失係数を比較すると、高周波数領域でゴム無しハンマー加振と定常加振は同程度の値を示す。低周波数領域では加振特性の違いによりハンマー加振では大きく、定常加振では小さくなる傾向がある。ゴムを貼付したハンマー加振は、上述したように低次モードから高次モードへのエネルギー転移により、見かけ上損失係数が小さくなったものと考えられる。

単層壁の損失係数の測定を残響時間法によって行い、加振方法と支持条件の影響に

ついて検討した。今回導入した圧電振動板による定常加振は非接触加振と同等な結果を得ることが可能である。ここで測定した $\eta_{tot}$ には音響放射によるロスも含まれており、このことを考慮した内部損失係数の分離・定量化が必要である。

### 7.3 SEA法の適用による結合損失係数の測定と内部損失係数の分離

前節において、内部損失係数の定量化を目的とした、損失係数の測定方法に関する基礎的な検討を行った。周辺支持部でのエネルギー損失を含む内部損失係数は直接測定することができないので、総合的な損失係数から音響放射による結合損失係数を差し引くことによって算出分離できる。

本節では、圧電振動板加振による総合損失係数と結合損失係数の測定を行い、内部損失係数の分離を試みる。

#### 7.3.1 各損失係数の測定について

試料パネルとしては以下の3種類のアルミ板を対象とし、残響室開口部に15cm間隔釘打ちで取り付け周囲は油粘土で隙間をふさいだ。

- ① 1.2mm厚、有効寸法 860 x 860mm (0.74m<sup>2</sup>)
- ② 3.2mm厚、有効寸法 860 x 860mm (0.74m<sup>2</sup>)
- ③ 3.0mm厚、有効寸法 860 x 1770mm (1.52m<sup>2</sup>)

#### (1) 総合損失係数の測定

圧電振動板をパネルの隅角部付近に取り付け、1/3オクターブバンドのWHITE NOISEによって加振する。振動加速度ピックアップ(2g)で5点の60dB減衰時間( $T_{60}$ )を測定し、次式より総合損失係数 $\eta_{tot}$ を算出する。

$$\eta_{tot} = \frac{2.2}{f \cdot T_{60}} \quad (7.2)$$

## (2) SEA法を適用した結合損失係数の測定

周知のようにSEA法では音源室(システム1)・試料パネル(システム2)・受音室(システム3)間のパワー流を考慮して、各システム間のパワーバランス式により解析を行っていく。ここでは一般的に用いられるパワー流にもとづいてパラメータの算出を行った。<sup>1)</sup>

圧電振動板加振時の結合損失係数( $\eta_{rad}$ )はパネル両面の結合損失係数が等しい( $\eta_{21}=\eta_{23}=\eta_{rad}$ )とすると次式となる。

$$\eta_{rad} = \frac{\eta_1 E_1 + \eta_3 E_3}{n_2 \left( \frac{E_2}{n_2} - \frac{E_1}{n_1} \right) + n_2 \left( \frac{E_2}{n_2} - \frac{E_3}{n_3} \right)} \quad (7.3)$$

$E_1, E_3$ : 室の全エネルギー、 $\eta_1, \eta_3$ : 室の損失係数、 $n_1, n_3$ : 室のモード密度、 $E_2$ : パネル

の全エネルギー、 $n_2$ : パネルのモード密度

ここで、SEAパラメータは以下の各式とし、モード密度以外はすべて実測によった。

$E_1, E_3$ : 各室の全エネルギー

$$E_1 = \frac{\langle p_1^2 \rangle}{\rho c^2} V_1, \quad E_3 = \frac{\langle p_3^2 \rangle}{\rho c^2} V_3 \quad (7.4)$$

$\langle p_i^2 \rangle$ : 各室の平均自乗音圧

$\rho$ : 空気密度、 $c$ : 音速、 $V_i$ : 各室容積

$\eta_1, \eta_3$ : 各室の損失係数

$$\eta_1 = \frac{2.2}{f \cdot RT_1}, \quad \eta_3 = \frac{2.2}{f \cdot RT_3} \quad (7.5)$$

$f$ : 周波数、 $RT_i$ : 各室の残響時間

$n_1, n_3$ : 各室のモード密度

$$n_1 = \frac{V_1 \omega^2}{2\pi^2 c^3}, \quad n_3 = \frac{V_3 \omega^2}{2\pi^2 c^3} \quad (7.6)$$

$E_2$ : パネルの全エネルギー

$$E_2 = m A_p \frac{\langle a^2 \rangle}{\omega^2} \quad (7.7)$$

$m$ : 面密度、 $A_p$ : パネルの面積

$\langle a^2 \rangle$ : パネルの平均自乗振動加速度

$n_d$  : パネルのモード密度

$$n_d = \frac{\sqrt{3} \cdot A_p}{2\pi h c_L} \quad (7.8)$$

$h$  : 厚さ、  $c_L$  : 縦波速度

総合損失係数の測定と同様に圧電振動板でパネルを定常加振し、定常状態におけるパネルの振動加速度レベルを5点、各室の音圧レベルを各5点測定する。また各室の残響時間を測定し、式(7.3)より片面の $\eta_{rad}$ を算出した。

### (3) 内部損失係数の分離

圧電振動板加振によるパネルの減衰過程において、蓄積されたエネルギーは周辺支持部での損失を含む内部損失( $\eta_{int}$ )と音響放射による損失( $\eta_{rad}$ )を受けるので、

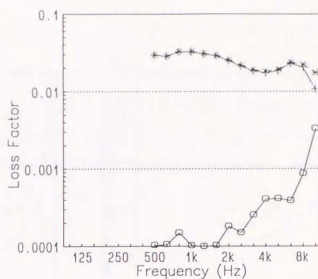
$$\eta_{tot} = \eta_{int} + 2\eta_{rad} \quad (7.9)$$

の関係が成り立つものと考えられる。従って $\eta_{tot}$ と片面の $\eta_{rad}$ の測定結果より、式(7.9)によって $\eta_{int}$ が分離算出できる。

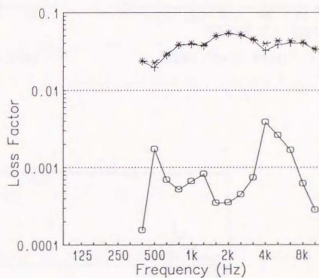
## 7.3.2 測定結果および考察

図-7.15に $\eta_{tot}$ と $\eta_{rad}$ の測定結果と分離算出した $\eta_{int}$ の結果を示す。 $\eta_{rad}$ はコインシデンス効果領域(1.2mm厚,  $f_c=10.3\text{kHz}$ 、3.2mm厚,  $f_c=3.8\text{kHz}$ 、3.0mm厚,  $f_c=4.0\text{kHz}$ )において放射効率が高くなり、それ以外ではかなり小さい値を示している。従って分離された $\eta_{int}$ は $\eta_{tot}$ とはほぼ等しい値となっている。

(a) #1.2mm (0.86x0.86m)



(b) #3.2mm (0.86x0.86m)



(c) #3.0mm (0.86x1.77m)

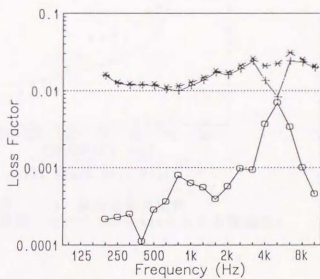
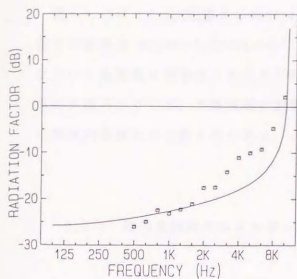
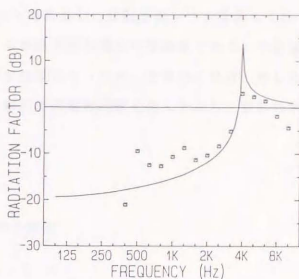


図-7.15 アルミ板の損失係数の比較  
 $\times$  :  $\eta_{tot}$  ,  $+$  :  $\eta_{int}$  ,  $\circ$  :  $\eta_{rad}$

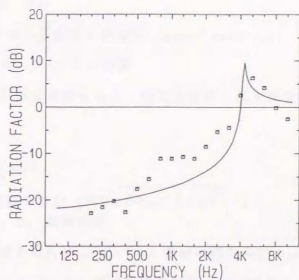




(a)  $\phi 1.2\text{mm}$  (0.86x0.86m)



(b)  $\phi 3.2\text{mm}$  (0.86x0.86m)



(c)  $\phi 3.0\text{mm}$  (0.86x1.77m)

図-7.16 放射効率の比較  
□: 測定値, —: Crockerらによる理論値

つぎに  $\eta_{rad}$  と放射効率  $\sigma_{rad}$  の関係は次式であらわされる。(第3章, 3.4.3参照)

$$\eta_{rad} = \frac{\rho c}{\omega m} \sigma_{rad} \quad (7.10)$$

図-7.16は  $\eta_{rad}$  測定値から式(7.10)によって算出した放射効率レベルを示しており、図中の実線は Maidanik, Crockerら<sup>11)</sup>による単純支持の場合の理論値である。中音域において測定値は理論値より大きな値を示す結果となったが、全体的にはほぼ一致した傾向が得られている。支持状態の定量的な解析は困難な問題を含んでおり、放射効率の理論的な検討も必要と思われる。

### 7.3.3 周辺支持部のエネルギー吸収率の算出<sup>8,11)</sup>

パネル内を2次元の拡散曲げ波振動場と仮定し、周辺支持部でのエネルギー吸収率を  $\alpha_p$  (平均吸音率に相当) とすると、室内残響理論と同様に残響式を導出すると次式となる<sup>43)</sup>。

$$T = \frac{13.8}{C} \frac{\pi S}{L} \frac{1}{\alpha_p} \quad (7.11)$$

$C$ : パネルの屈曲波の群速度 (group velocity)

$L$ : 周辺長、 $S$ : パネル面積

ここで、式(7.2)の関係を考慮すると、周辺支持部の損失係数  $\eta_{per}$  は次式で表すことができる<sup>44)</sup>。

$$\eta_{per} = \frac{\lambda_b}{\pi^2 S} \alpha_p L \quad (7.12)$$

$\lambda_b$ : 屈曲波の波長 ( $\approx \sqrt{\pi h C_L / (f \sqrt{3})}$ )

$h$ : 板厚、 $C_L$ : 縦波速度

7.3.1において分離された  $\eta_{int}$  はパネル素材の損失係数  $\eta_{mat}$  と周辺支持部の損失係数  $\eta_{per}$  から成る。ここでアルミ素材の損失係数は  $10^{-6}$  程度と非常に小さいため<sup>44)</sup> これを無視し、 $\eta_{per} \approx \eta_{int}$  とみなし式(7.12)より周辺吸収率の算出を行った。

図-7.17に示す算出結果より、釘打支持という再現性の困難な支持条件ではあるが、周辺吸収率は周波数に比例して上昇していく傾向がうかがえる。 $f_c$  付近における周辺吸収率の低下は、音響放射による損失が大きくなるため、見かけ上低下しているもの

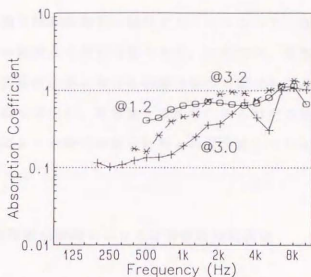


図-7.17 15cm間隔釘打ちによるアルミ板の周辺吸収率

と考えられる。 $f_c$ 以上の領域では $\alpha_p \approx 1$ となり、ほぼ完全吸収する結果となっている。

本章において導入した圧電振動板加振により、各損失係数が高精度に測定可能となった。さらに、試料の損失係数が小さければ、周辺吸収率の算出もできる。今後、再現性の高い支持条件での基礎的な検討や、実際の取付条件に関するデータを蓄積してゆく必要がある。

#### 7.4 音響インテンシティによる放射特性の検証

パネルに小型軽量な圧電振動板を貼付することによって、曲げ波振動を容易に発生でき、各損失係数が精度良く測定可能である。本節では、音響インテンシティ測定装置を用いて、圧電振動板加振における音響放射の可視化を試み、放射特性の検証を行う。また、放射効率を算出し、従来法との比較による精度の検討および前節において得られた S E A 法による放射効率測定結果との整合性について検討する。

##### 7.4.1 圧電振動板加振時における音響放射の可視化

###### (1) 実験の概要

測定対象試料は3.2mm厚アルミ板(0.66m × 1.77m)とし、残響室開口部に15cm間隔釘打ちによって取り付けた。測定システムを図-7.18に示す。圧電振動板は小残響室側のパネルの左上隅にエポキシ樹脂で貼付した。大残響室側からみると右上隅となり、図-7.20の法線インテンシティ分布よりその位置は確認できる。インテンシティベクトルの測定方法は第6章第6節と同様である。

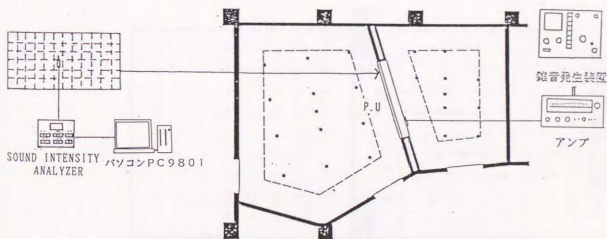
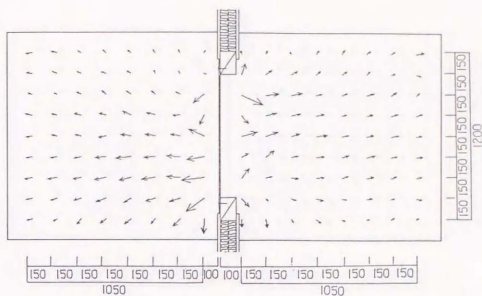
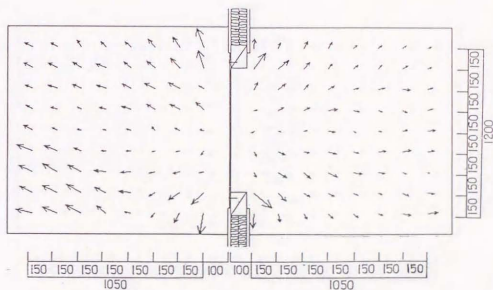


図-7.18 測定システム

(a) 250Hz



(b) 500Hz



(c) 1kHz

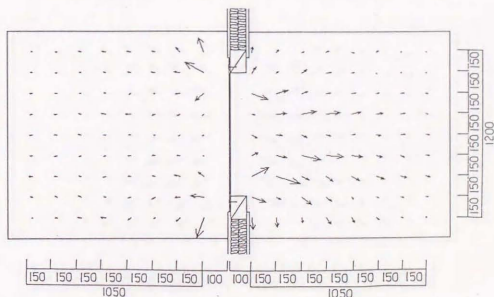
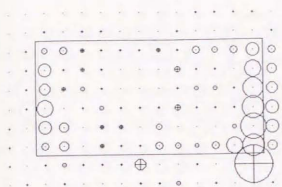


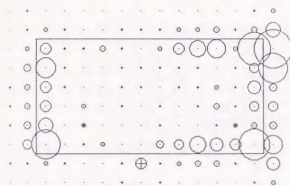
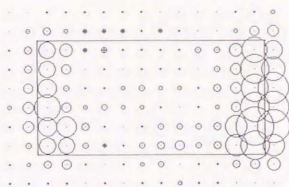
図-7.19(A) 圧電振動板加振によるインテンシティベクトル (断面方向)



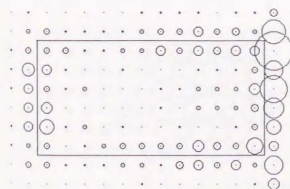
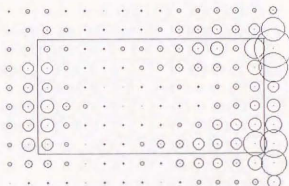




(a) 250Hz



(b) 500Hz



(c) 1kHz

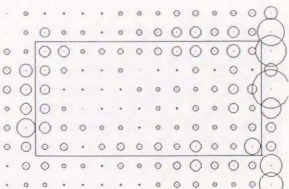
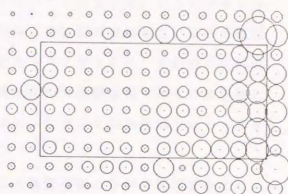
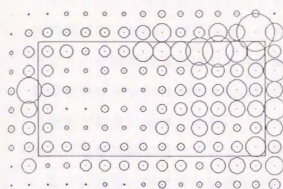
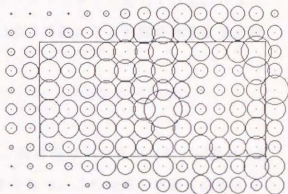
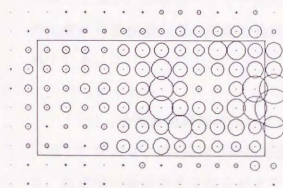


図-7.20(A) 圧電振動板加振による法線インテンシティ分布 (サークルマップ)

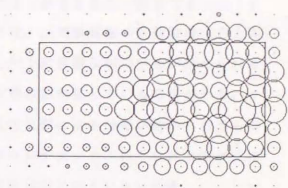
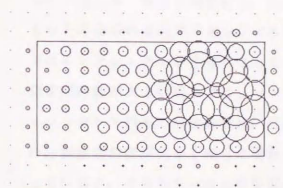
(測定面距離, 左側: 10cm, 右側: 20cm)



(d) 2 kHz



(e) 4 kHz



(f) 8 kHz

図-7.20(B) 圧電振動板加振による法線インテンシティ分布 (つづき)

(測定面距離, 左側: 10cm, 右側: 20cm)

## (2) 測定結果

図-7.19に圧電振動板加振によるインテンシティベクトルを示す。コインシデンス限界周波数(4kHz)以下では、パネルの周辺部分からの放射が卓越しているのが確認できる。小残響室側ではパネル中央部からの放射のように見えるが、周辺枠の反射の影響を受けているためである。周辺枠の影響を受けない大残響室側ではその放射特性の特徴が顕著に現れている。一方、4kHz以上のコインシデンス効果領域ではパネル全面から音響放射が生じているのが確かめられる。

図-7.20は、周辺枠の影響を受けないパネルの大残響室側に平行な測定面をとり、パネルからの距離を10cmと20cmとした、圧電振動板加振による法線インテンシティ分布の測定結果をサークルマップで示している。円の大きさはインテンシティレベルに比例しており、⊕印はパネルへ向かう負方向のインテンシティを表している。パネルの右側に残響室開口部の突起が約15cm程度あり、その反射による影響が測定結果に現れている。

## (3) 音響放射特性についての考察

図-7.20より、500Hz以下の低周波数領域では、負方向のインテンシティが現れており、測定面距離が大きくなるほどその影響は小さくなる。これは第6章第6節のスピーカー音源とした測定結果と同様である。コインシデンス限界周波数(4kHz)以下の周波数では、周辺部からの音響放射がパネル中央部より卓越しているのが確かめられる。スピーカー音源の場合には、空気音の強制透過が卓越するため確認できなかったものと考えられる。コインシデンス周波数以上では、圧電振動板の貼付位置(右上隅)ではインテンシティが小さくなっているが、同心円上に音響放射の分布が認められる。測定面距離が大きい場合では、パネル全面から音響放射が生じているのがわかる。コインシデンス以下の周波数では、圧電振動板の貼付位置による分布が認められるものの、測定面距離が大きくなった場合でも、インテンシティレベルはそれほど大きくない。すなわちパネル中央部からの音響放射は生じにくいといえる。

図-7.19および図-7.20の結果より、コインシデンス限界周波数以下においては、屈曲振動するパネルからの音響放射は周辺部分で主に生じるのがわかった。これは第1章で触れた、エッジモードやコーナーモードによる音響放射と考えられ、パネル中央部では屈曲波速度が空気中の音速より遅くなり、volume sourceの強さが低くなった

ためである。パネルのモードにおける音響放射特性の理論的な傾向に一致するものと考えられる。

#### 7.4.2 音響インテンシティによる放射効率測定

##### (1) 実験の概要

圧電振動板加振時のパネルの振動加速度レベルと室内の音圧レベルを各5点測定し、同時にインテンシティ分布の測定を行った。音響インテンシティによるパネルの音響放射パワーレベル  $L_{WI}$  は次式により算出される。

$$L_{WI} = 10 \log_{10} (\sum 10^{L_i/10} \cdot S_i) \quad (7.13)$$

$L_i$  : 各メッシュにおけるインテンシティレベル

$S_i$  : 分割された各メッシュの面積

受音室の音圧レベル測定による音響放射パワーレベル  $L_{WP}$  算出は次式を使用した。

$$L_{WP} = L_p - 10 \log_{10} (T_{60}/T_0) + 10 \log_{10} (V/V_0) - 14 \quad (7.14)$$

$L_p$  : 受音残響室内の平均音圧レベル

$T_{60}$  : 受音残響室内の残響時間、 $T_0$  : 1(sec)

$V$  : 受音残響室の容積、 $V_0$  : 1(m<sup>3</sup>)

放射効率レベルは、振動加速度レベルの測定より放射効率 = 1 と仮定した場合の(19)式より得られる、仮想的な音響パワーレベルとの差より求めた。<sup>\*2)</sup>

$$L_{W0} = L_{va} - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} A_p + 30 \quad (7.15)$$

$L_{va}$  : 平均振動加速度レベル (0dB:10<sup>-6</sup>m/s<sup>2</sup>)

##### (2) 測定結果について

図-7.21に2種類の方法による放射効率レベルの比較を示す。全体的にはほぼ一致した傾向が得られている。また、図-7.22には前節において得られたSEA法による測定結果との比較を示している。帯域幅の違いはあるが両者の測定結果は良く一致しているといえる。



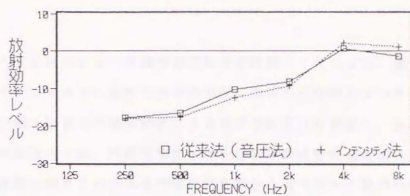


図-7.21 音響インテンシティ法と従来法による放射効率レベルの比較

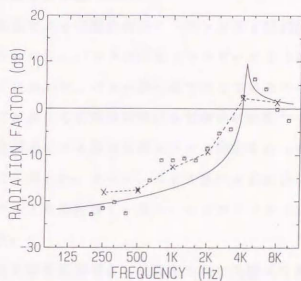


図-7.22 音響インテンシティ法とSEA法による放射効率レベルの比較  
 -x- : インテンシティ法, □ : SEA法, — : Crockerらによる理論値

## 7.5 総 括

修正されたSEA法による音響透過損失推定計算にあたっては、壁体の周辺支持条件や周辺部でのエネルギー損失を含む内部損失係数の定量的なデータを必要とする。本章では、小型・軽量の圧電振動板による定常加振方法に着目し、損失係数の測定方法について検討を行った。残響時間法による総合損失係数の測定値と、SEA法を適用した音響放射に関する結合損失係数の測定値から内部損失係数の分離を行った。圧電振動板による加振方法は低周波数でパワーが不足するものの、容易にパネルに屈曲振動を生じさせることができる。各損失係数の測定結果も良好であり、定常加振デバイスとしての妥当性が確認できた。

圧電振動板加振による音響放射をインテンシティ計測法を用いて可視化し、音響放射特性の検討を行った。パネルの振動エネルギーによる音響放射は、コインシデンス限界周波数以下において、パネル周辺部で生じているのを確認した。これは理論的なパネルのモードにおける音響放射特性を実験的に検証できたものといえる。また、インテンシティ計測法による放射効率レベルの測定を行った。測定結果は従来法による測定値と良好に一致した。さらに、SEA法による結合損失係数の測定値より算出した放射効率レベルとも精度良く一致し、インテンシティ計測法の損失係数測定への適用性を確認した。

パネルを2次元拡散振動場として導出された残響式を適用し、周辺取り付け部のエネルギー吸収率の算出を行った。これは周辺取り付け部の影響を定量的に同定する手段を与えるものであり、今後、これらの手法を用いたデータが蓄積されていく必要があると考える。

## 第8章 SEA法による単層壁の遮音解析および予測手法

## 8.1 まえがき

本研究では、建築居住空間で使用される実用的寸法パネルを対象として、その音響透過特性を実証的に検討してきた。本章では、これまでに得られた研究結果に基づき、S E A法による単層壁の遮音解析または予測を行う場合のフローを作成した。S E Aパラメータの設定は、遮音特性解析のための実測による方法と、遮音設計のための予測による方法に分けて整理している。また、これらのフローに基づく計算結果と実測値の比較を行いその妥当性の検証を行う。

## 8.2 遮音解析・予測のフロー

図-8.1に、遮音解析・予測のためのメインフローを示している。損失係数に関するS E Aパラメータの設定法はサブフローとして別にまとめている。以下フローにそって説明していく。

## 8.3 基本データの設定

パネルの形状に関するデータとしては、ここでは矩形壁を前提とした長辺・短辺の寸法が基本となる。パネルの厚さによる面密度および縦波速度は、実測あるいはデータ集<sup>\*)</sup>などを参考として設定する。また、音源・受音室の容積も必要となる。

室温の設定は、小面積で内部損失の小さい試料では、コインシデンス周波数付近で影響がでてくるので注意しなければならない。ここでコインシデンス限界周波数を計算しておく(式(2.27))。

つぎに、対象とする周波数範囲と帯域幅を設定し、以下計算周波数による繰り返しとなる。

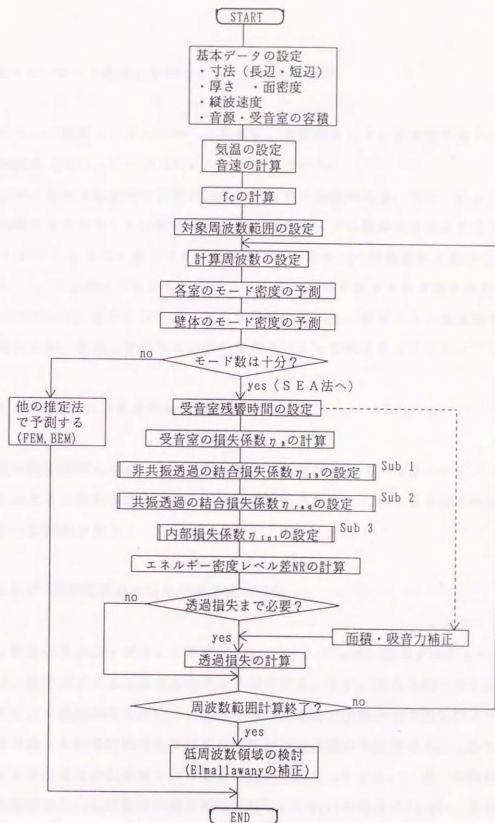


図-8.1 遮音解析・予測のためのメインフロー



## 8.4 SEAパラメータの設定法

### 8.4.1 モード密度の予測とSEA法適用の検討

室のモード密度とパネルのモード密度は、実験的にもその妥当性が確かめられている、理論式(式(3.24)～(3.26))による予測で行う。

ここで、SEA法適用の下限周波数を検討する必要がある。まず、各システム要素内を伝搬する音波もしくは振動の波長は、そのシステム要素の寸法より小さくなければならない<sup>13)</sup>。また、各システム要素のモード数は15～20個程度必要であるのが定説である<sup>13)</sup>。以上のような条件によりSEA法が適用可能である下限周波数が予測できる。したがって、それよりも低い周波数領域の予測は、後述する低周波数領域の補正法を用いるか、有限要素法などの他の解析法によって検討することが考えられる。

### 8.4.2 各室の損失係数の設定

各室の残響時間は実測によるが、一般的な予測の場合は、部屋のタイプ(和・洋室)や広さによる平均的な値を設定する。残響時間が設定されれば室の損失係数は式(3.23)によって算出できる。

### 8.4.3 非共振透過の結合損失係数の設定

$\eta_{13}$  設定のためのサブフローを図-8.2に示す。 $\eta_{13}$  は、実測することは不可能であるので、理論式による非共振透過率の予測を行う。まず、垂直入射( $TL_{N1}$ )・乱入射( $TL_{R1}$ )透過損失を求めておく。つぎに、無限大板理論で予測を行ったCrockerらの方法では、入射角度範囲の検討を行い拡散音場透過率を計算する。しかし、この方法による予測値は中低音域での実測値の傾向と異なってくる。一方、有限板理論に基づく予測法は3つの理論式が適用可能である。Sewellの簡易式(2.86)(または式(3.28)の厳密な式)では面積や形態係数(簡易式では省略)によって限界周波数以下の予測を行うことができる。Elmallawanyの式(3.32)では適用範囲が狭く、小面積の壁体ま

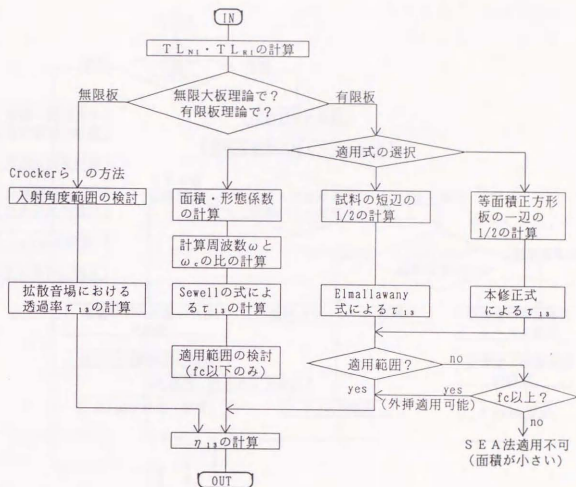


図-8.2 非共振透過における結合損失係数  $\eta_{13}$  設定のサブフロー 1 (Sub 1)

たは低周波数領域に限られる。本研究で修正を行った拡散音場透過損失式(4.6)による予測は適用範囲も広く予測精度も高い。以上のような方法で得られた透過率により式(3.22)で非共振透過の結合損失係数が算出される。有限板理論に基づく予測式を適用する場合、 $f_c$ 以下の領域で非共振透過が卓越するので、各式の適用範囲を確認しておく必要がある。しかし、 $f_c$ 以上の高周波数領域においては、共振透過が支配的になるので、適用範囲から外れる場合があっても外挿して適用は可能である。

#### 8.4.4 共振透過における結合損失係数の設定

$\eta_{rad}$  設定のサブフローを図-8.3に示している。予測の場合には、Maidanik, Crock

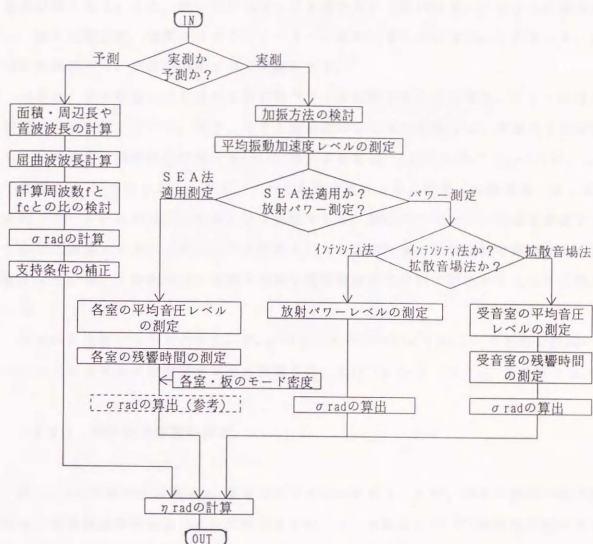


図-8.3 共振透過における結合損失係数  $\eta_{rad}$  設定のサブフロー-2 (Sub 2)

erらによる式(3.19)(3.20)を使用して計算できる。式(3.20)の放射率  $\sigma_{rad}$  は単純支持の場合の理論式であり、固定の場合は、 $f_c$ 以下で2倍(3dB増加)する<sup>\*)</sup>。実際の取り付け方法はこの範囲内の値をとると考えられるが、面積が小さくなるにつれて支持条件の影響が鋭敏にあらわれてくる。通常用いられるビス止めや釘打ちは、間隔にもよるが、単純支持とみなしてもよいと考える。

実測の場合は、放射効率  $\sigma_{rad}$  を測定することになる。そこでまず、加振方法を検討する必要がある。本研究では、圧電振動板の小型・軽量性に着目して、応用を試み良好なる結果を得ることができた。また、反力を必要としないので簡便に用いることが

できる。圧電振動板は高周波数の加振には適しているが、低周波数ではその原理上加振力は弱くなる。また、脆い材料に対しても適さないと思われる。このような場合には、他の加振方法（電磁コイルやシェーカー）を用いることになる。したがって、適切な加振を行い、壁体の振動レベルを測定する。

つぎに、定常加振したときの音響放射パワーを測定することになる。フローには3種類の方法を示している。まず、SEA法を適用して求める場合は、各室の平均音圧レベルの測定と残響時間の測定を行い、第7章3節(2)で述べた式(7.3)～(7.8)によって直接 $\eta_{rad}$ が算出できる。また、これらの測定値により、従来（拡散音場）法による放射パワーレベルが式(7.14)によって算出できる。放射パワーレベルを直接測定することは、音響インテンシティレベル計測で行うことができ、式(7.13)で算出する。音響インテンシティ計測法は、建築の複雑な周壁構造を部位別に測定することが可能である。

得られた放射パワーレベルと、 $\sigma_{rad}=1$ として式(7.15)より得られる仮定の放射パワーレベルとの差から放射効率レベルが得られ、式(3.19)によって $\eta_{rad}$ を計算する。

#### 8.4.5 内部損失係数の設定

図-8.4に内部損失係数 $\eta_{int}$ 設定のサブフローを示す。まず、パネル素材の損失係数は、半値幅法や残響法により実測できるが、データ集など<sup>(33)(34)</sup>を参考に設定する。ここでは、実際に取り付けられた状態の内部損失係数が必要となるので、素材の損失係数に加わってくる境界条件による構造損失を評価しなければならない。

内部損失係数を実測によって得るためには、まず、前項と同様に加振方法の検討をしておく。つぎに、測定法であるが、SEA法との整合を考慮すると残響法が適していると考えられる。したがって、残響法による総合損失係数 $\eta_{tot}$ を計測し、前項によって得られる音響放射による結合損失係数 $\eta_{rad}$ 測定値から、式(7.9)を用いて $\eta_{int}$ が分離できる。さらに、素材の損失係数を差し引くことにより構造損失が分離される。周辺支持部のエネルギー吸収率まで算出する場合は、式(7.12)を用いる。

予測の場合には、構造損失をどの程度評価するかに関わってくる。現段階では、データ不足の観が否めない。上記の実験的な手法による周辺損失等のデータの蓄積が望まれるところであり、取り付け条件による構造損失のモデル化も必要であると思われる。

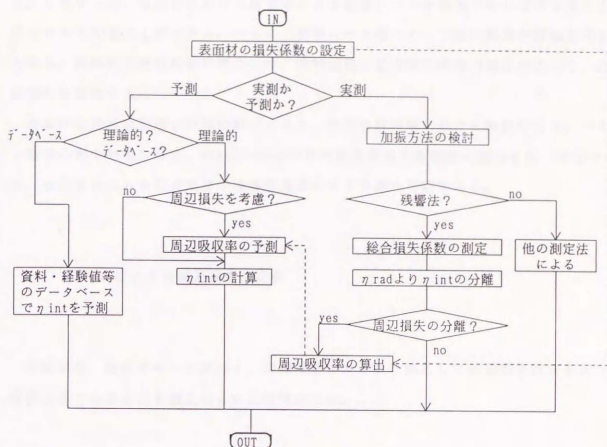


図-8.4 内部損失係数  $\eta_{int}$  設定のサブフロー 3 (Sub 3)

る。このような点が明らかになると理論的な予測を行うことができる。したがって、現段階においてはこれまでの資料や経験等によるデータベースによって予測せざるを得ない。また、内部損失の影響は、パネル面積が小さい場合に顕著に現れてくるので、種々の試算により安全側の値を選んだ方がよいと言える。

## 8.5 遮音量の算出と低周波数領域の検討

前述の基本データやSEAパラメータの設定が行われると、遮音量の算出はまず両室間のエネルギー密度レベル差 (NR, 遮音度に相当) が式(3.17)によって計算され



る。したがって、音源室における騒音等による音圧レベルが既知であれば受音室の音圧レベルを知ることができる。さらに、騒音レベル等によって室内騒音の評価も可能となる。実験的な遮音解析の場合には、試料面積・受音室の吸音力補正によって、透過損失を算出する。

計算対象周波数範囲の計算が終了すると、低周波数領域における検討を行う。パネル面積の大きい場合には、Elmallawanyの非共振透過式が実測値の傾向を良く評価できる。そのほかにも有限要素法や境界要素法による予測も可能である。

## 8.6 S E A 法による透過損失推定例

本節では、前記フローに基づく、実用寸法アルミ板を例として透過損失推定を行い、残響室法での透過損失測定値との比較検討する。

### 8.6.1 計算における S E A パラメータの設定条件

S E A 法を適用することにより、スピーカー励振時の音源室・受音室の全エネルギー比は次式であらわされる。

$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{\eta_3 + (n_1/n_3)\eta_{13} + (n_2/n_3)\eta_{rad}}{\eta_{13} + \eta_{ad}^2(n_2/n_1)/(\eta_{int} + 2\eta_{rad})} \quad (8.1)$$

S E A パラメータの設定は以下のとおりとした。

基本データの設定は残響室法透過損失測定時の条件とし、受音室残響時間も実測値によっている。室およびパネルのモード密度は式(3.24)～(3.26)の理論式による計算値である。実測による推定の場合のパネルに関する各損失係数は、圧電振動板加振による測定値を使用する。共振透過の結合損失係数  $\eta_{rad}$  は S E A 法適用による測定値である。(第7章7.3参照)

ここで非共振透過の結合損失係数  $\eta_{13}$  は

$$\eta_{13} = \frac{A_p C}{4V_{10}} \tau_{13} \quad (8.2)$$

であり、非共振透過率  $\tau_{13}$  として以下の3種類の有限板の拡散音場透過損失理論式よ

り計算して比較する。

①Sewellの簡易式

$$TL_{sew} = TL_o - 10 \log_{10} [ln(kA^{1/2})] + 20 \log_{10} [1 - (\omega/\omega_c)^2] \quad (8.3)$$

②Elmallawanyの式

$$TL_{elm} = TL_m + 5 \left( \frac{k\alpha}{2.3} \right)^{-0.72} \quad (8.4)$$

③我々の修正式

$$TL_{sk} = TL_o + 9.2 (k\alpha)^{-0.51} - 8 \quad (8.5)$$

$TL_o$ : 垂直入射質量則、 $TL_m$ : 乱入射質量則、

$k$ : 波長定数、 $A$ : 面積

$\alpha$ : ②短辺の1/2、③辺長(正方形)の1/2

従って

$$\tau_{13} = 10^{-(TL_m/10)} \quad (8.6)$$

音圧レベル差( $NR$ )はエネルギー密度の比になるので

$$NR = 10 \log_{10} ((E_1/V_1)/(E_3/V_3)) \quad (8.7)$$

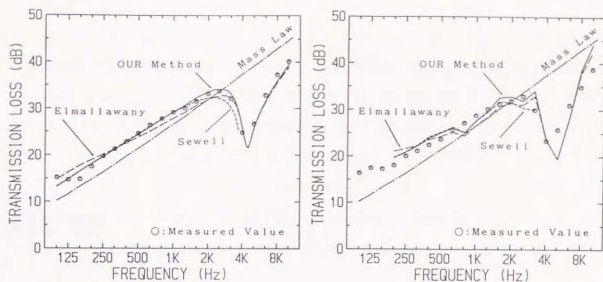
結局、透過損失 $TL$ は次式で算出できる。

$$TL = NR + 10 \log(A/F) \quad (8.8)$$

$F$ : 受音室の吸音力

## 8.6.2 推定値と測定値の比較

3.0mm厚アルミ板(0.86m x 1.77m, 1.52m<sup>2</sup>)の透過損失推定結果と残響室法透過損失測定値の比較を図-8.5に示す。(a)図は予測による方法であり、(b)図は $\eta_{13}$ を理論式によった以外は実測値(図-7.15)によって透過損失推定を行っている。 $\eta_{rad}$ はSEA法適用による実測である。Elmallawanyによる式(8.4)の適用範囲は800Hzまでであり、本研究において得られた式(8.5)の適用範囲は5600Hzまでである。適用範囲以上の周波数は外挿した計算結果である。式(8.3)と式(8.5)は中低周波数領域においてはほぼ同じ結果を与えるが、 $f_c$ 直下で評価に差が生じる。本研究で得られた式(8.5)の推定結果は測定値と広い周波数範囲で精度良く近似している。



(a) 予測による方法 (単純支持)

$f < f_c: \eta_{int} = 0.002, f > f_c: \eta_{int} = 0.03$

(b) 実測による方法

図-8.5 3.0mm厚アルミ板 (0.86m X 1.77m) の透過損失推定例

## 8.7 総括

本章では、本研究で得られた結果に基づき、SEA法による単層壁の遮音解析・予測手法のフローを作成した。SEAパラメータの設定は、遮音特性解析のための実測による方法と、遮音設計のための予測による方法に分けて整理した。

このフローに従って、予測による方法と実測による方法で透過損失推定を行い、実用的寸法パネルの測定値と良好な一致を示すことが確認され、本手法の妥当性が検証された。

## 第9章 結語

## 9.1 研究結果のまとめ

本論文は、建築居住空間で使用される実用的寸法壁体の音響透過損失予測手法を確立するための基礎データを提供することを目的として、単層壁の音響透過機構の定量的な解析方法とSEA法の実践的な適用方法について、実証的に研究したものである。以下に、各章で得られた知見をまとめて結語とする。

第1章では、研究の背景、研究の目的、および論文の構成について述べた。

第2章から第4章では、単層壁の音響透過機構の解析法について、理論的な検討を行っている。

第2章では、単層壁の音響透過機構の基本的な特性を確認しておく必要があると考え、単層壁の音響透過損失の波動解析理論に関する既往の研究について整理した。波動解析は、境界条件が複雑になると、解析的に解くことが困難になってくるが、基本的な遮音機構を理解するための重要な手段となるものである。

無限大板の古典的音響透過理論は、いわゆる質量のみによって音響透過が制御される質量則が原点となっている。質量則では説明できないコインシデンス現象は、屈曲振動する場合の運動方程式によりCremerが説明している。

実際のパネルの音響透過は質量以外にも弾性や粘性の影響を受ける。この点を考慮した無限大板の集中定数モデルについて、垂直入射および斜入射の透過損失が解析的に得られている。この場合、斜入射透過損失にはコインシデンスが含まれており、定量的な評価を可能としている。しかし、ランダム入射透過損失を解析的に解くことはできない。

無限大板の音響透過機構は以下のようにまとめられる。

- ①基本固有周波数以下の低周波数領域では弾性スティフネスによって決まる。
- ②固有周波数以上では質量則に従う。
- ③コインシデンス限界周波数 ( $f_c$ ) においては、質量・スティフネス・ダンピング全てが影響を及ぼす共振透過を示すが、通常機械的なダンピングによって制御される。
- ④  $f_c$  より高い周波数では、スティフネス項が支配的となり、ダンピングは影響を及ぼさない。



つぎに、有限寸法単板の音響透過機構について整理した。無限大板と異なる点は、パネルの境界において屈曲波の反射が生じるということである。すなわち、有限板では、定在波モードが発生し、それと関わる共振周波数が存在する。また、パネルの寸法による回折効果が音響放射特性に影響する。結局、有限板の音響透過機構が以下のようにまとめられた。

- ①有限板の応答は、無限大板の応答（非共振透過）と、有限寸法による共振運動の応答（共振透過）の重ね合わせとして理解できる。
- ②共振モードにおいて、 $f_c$ 以下の周波数領域では放射効率は低いが、パネルは音を放射し得る。 $f_c$ 以上では、放射効率は高くなり、音響透過を支配する。さらに周波数が上昇すると、内部損失が急激に増加し、共振透過は減少する。したがって、非共振透過の比率が増え、質量則に近づいていく傾向となる。
- ③ $f_c$ 以下の低周波数領域では、ダンピングが小さく軽量の高い小面積のパネルを除いて、共振透過は非共振透過に比べてかなり小さい。したがって、質量則に相当する非共振透過が支配的であり、内部損失の影響はほとんど受けない。しかし、パネルの寸法が小さくなると、共振透過が増加し、非共振透過は減少する。すなわち、小さいパネルの低周波数における透過損失は同材質の大きいパネルの透過損失より大きくなり、ダンピングの影響を受けることになる。
- ④コインシデンス限界周波数は、共振モードによって音が透過し易くなる周波数として決まり、内部損失の影響を受ける。

最後に、拡散音場モデルとは異なる、室のモードと隔壁のモードの連成を考慮した既往の解析結果を整理した。概ね上記の透過損失と同様な結果が得られている。

波動解析理論によって、理想モデルの基本的な音響透過特性を理解することができる。しかし、境界条件が複雑になってくると、解析的に解くことが不可能になり、定性的な説明にとどまってしまう。実際の実用的寸法板の、取り付けられた状態での遮音量を定量的に解析することは、遮音設計において重要であると言える。建築の周壁構造は複雑であり、間柱等の下地材や取り付け方法による影響を受ける。これらの影響は、波動解析におけるスティフネスや内部損失に関係しており、その定量的な説明が必要であると総括した。

第3章では、まずSEA法の原理や音響透過損失への適用方法に関する既往の研究成果をまとめた。一般の建築構造物は複雑な構造要素から構成され、各構造要素は固

有振動モードをもっている。このような居住空間における音響透過や固体音の伝搬問題は、境界条件が複雑であり、解析的に解くことは困難である。近年、このエネルギー伝達を統計的に近似計算する方法が発達してきた。この方法が統計的エネルギー解析 (Statistical Energy Analysis, SEA) 法とよばれている。

SEA法は音源室・受音室を含めた解析手法であり、空間-時間平均としての測定結果値と整合をとることができる。まず、SEA法の原理を述べ、その仮定条件に基づく適用限界を確認している。つぎに、SEA法による単層壁の透過損失算出の定式化について述べ、SEAパラメータの設定方法を整理した。SEA法は、有限壁を介して音源室から受音室へ透過するパワー流を、共振透過によるパワー流とそれ以外の非共振透過によるパワー流に分けて、音源室・受音室を含む全音響透過システムの解析を行うところに特徴がある。

つぎに、非共振透過の結合損失係数について、従来の適用方法の検討を行い、適用範囲等について検討した。単層壁の透過損失へSEA法を最初に適用したCrockerらは、非共振モードの結合損失係数として無限大板の質量則を用いていた。しかし、低周波数領域において、実測値が質量則よりも大きな値になるという一般的な傾向を説明できない点で改良の余地を残していた。すなわち、有限壁体の解析法に無限大板の質量則を適用した点で合理性を欠いていたとすることができる。この点の改良を試みた既往の研究がいくつかある。これらの有限壁体の非共振音響透過に関する既往の理論式を検討した結果、適用範囲に限界があることがわかった。

第4章は本研究前半の理論的な研究成果を示している。まず佐藤によって導出された有限矩形パネルの放散係数に着目し、非共振透過における結合損失係数へ導入し、その改良を行った。周波数が低くなるにつれて、あるいは面積が小さくなるにつれて、音響透過の効率が小さくなり、透過損失が上昇するという実動的な有限パネルの音響透過特性を表すことができる。この修正されたSEA法による計算結果は、前章で検討した既往の計算方法に比べ、透過損失測定値の傾向をよくとらえていることがわかった。また、適用範囲も広く高い精度で測定値と一致することが確認できた。

次の段階として、計算値に影響を及ぼすSEAパラメータの感度解析を行った。その結果、コインシデンス限界周波数以下のいわゆる質量制御領域において、面積が小さく内部損失の小さい壁体では、共振透過の影響を従来言われてきたようには無視できないことが明らかになった。また、建築で使用される実用寸法パネル(3×6板程

度)を考慮すると、周辺支持条件と内部損失係数の定量的な解明が必要であることを指摘した。

第1章で整理した波動解析でも明らかのように、有限単層壁の遮音特性は、周波数領域においてスティフネス制御・板共振・質量制御・コインシデンス効果の各領域に分けてとらえることができる。さらに、透過損失に影響を及ぼす要因として、

- ① 壁体構成材料の物性値、
- ② 音源室・受音室の音場条件、
- ③ 壁体への音波入射条件、
- ④ 壁体の寸法・形状、
- ⑤ リブや間柱等を含めた壁体の支持条件、
- ⑥ 周辺支持部でのエネルギーロス、

等を挙げることができ、有限単層壁はきわめて複雑な音響透過機構を呈している。SEA法は、これらの要因を合理的に組み込む柔軟性を有している。したがって、これらの要因と関連するSEAパラメータの定量化手法の確立が必要であると結論づけた。

第5章から第7章では、SEA法の実際的な適用方法とSEAパラメータの同定手法に関する、実験的なアプローチをまとめた。

第5章では、実験的に検討するための準備段階として、まず透過損失測定に使用する測定装置の基本的な性能の確認を行った。また、測定データの信頼性向上や処理時間の短縮を目的として、パーソナルコンピュータの透過損失測定への利用を試み、従来法と良好な一致を示すことが確認できた。

つぎに、これらの測定システムを使用する場合の精度について検討を行い、測定の再現性は良好であり、低周波数領域を除き1 dB以内の誤差で再現できることを確認した。さらに、取り付け方法の再現性の検討を行い、以下のような透過損失測定に関する基礎的な知見を得た。

- ① 室温の影響に関しては、損失係数の小さい試料のコインシデンス限界周波数付近で影響があらわれやすい。
- ② 取付方法の影響に関しては、比較的大きい面積の試料ではその影響は小さいが、小面積試料では測定結果のばらつきが大きくなり、取付方法の再現性については注意する必要がある。このことは、小面積試料の音響透過特性の理論的傾向とも一致している。

第6章では、SEA法の適用方法について実証的な検討を行った。まず、測定結果に影響を及ぼすと考えられる、基本的な実験条件を把握しておくことを目的として、下地材としての間柱の影響と試料への音波入射角度範囲について検討した。また、吸音性フィンを音源側に取り付けた透過損失測定を行い、強制的な入射角度制限効果による透過損失変化量が得られた。吸音性フィンによる改善量はかなり大きく、実用的にも期待できる手法であり、そのための遮音度改善量の計算図表も作成した。これらの検討により、基本的な実験条件が以下のように確認された。

- ①釘打ちによる取り付け方法では、低周波数領域を除き間柱を付加質量として取り扱う必要がない。音響透過は間柱によって分割された表面材部分が占めている。
- ②試料周辺枠等が特に吸音性でない限り、試料への音波入射はほぼ完全拡散入射として取り扱ってよい。

つぎに、第4章で指摘された要因、すなわち周辺支持条件と内部損失係数の定量的な検討を実験的にを行い、有限性を考慮した修正SEA法の適用性を検証した。その結果、質量制御及びコインシデンス効果の周波数領域において、修正SEA法による計算値は実測値をかなり高い精度で推定できることがわかった。他機関の測定データへの適用結果も良好であり、本手法の妥当性が確認された。本手法を適用した場合、計算値に及ぼす試料面積、内部損失係数及び周辺支持条件の定量的な影響は次のようにまとめられた。

- ①  $f_c$ 以下の領域では試料面積にかかわらず、内部損失係数 ( $\eta_{int}$ ) は一定の値をとる。ただし周辺支持条件によって透過損失は変化し、共振モードの結合損失係数で評価できる。試料の厚さが厚くなると  $\eta_{int}$  も比例して大きい値をとる。
- ②  $f_c$ 以上の領域では、取付方法が同一であれば、パネルの厚さにかかわらず  $\eta_{int}$  は一定の値となる。ただし周辺部でのエネルギーロスの影響は大きく、固定度が増すとエネルギーロスが減少し  $\eta_{int}$  は小さくなる。面積が小さくなると周辺部でのエネルギーロスの割合が増加し  $\eta_{int}$  は大きな値をとる。

このように小面積パネルに対しては、周辺支持条件と内部損失係数の値が与える影響は大きく、その現実的な条件を測定方法も含めていかに定量化していくかがより精度の高い予測手法を確立する上で必要となってくる。

一般に低周波数領域では板のモード密度は減少し、スティフネス制御や板共振が支配するようになる。したがって、透過損失は共振・反共振モードによって急激に変動



する特性を示す。この点に対応するためには、個々のモード毎に板のインピーダンスと室モードとの連成を考慮した応答解析が必要になってくる。すなわち、SEA法のようなエネルギー解析法を適用することはできなくなる。そこで、SEA法の低周波数領域への適用性に関して、Donatoによる低周波数領域での補正法に着目した検討を行った。この補正法は、試料面積が比較的大きい場合は、実測値の平均的な傾向をかなり精度よくとらえることがわかった。しかし、これらの問題に対する解析法としては、有限要素法や境界要素法が適していると考えられ、SEA法とのハイブリッドな解析手法を構築していく必要があるが、これについては今後の検討課題とした。

さらに、音響インテンシティ計測法による音響透過の可視化を行い、無限大板とは異なる、有限板の理論的な音響透過性状を説明できる結果が得られた。

第7章では、SEAパラメータの同定手法を検討した。修正SEA法を適用する場合、内部損失係数を適当な値に仮定して計算を行っている。実際の壁体の場合、周辺支持部でのエネルギーロスが大きく、内部損失係数にはその影響が含まれているものとしてマクロに取り扱っている。そこで、取り付けられた状態での内部損失係数の定量化が必要となった。

損失係数の測定においては、加振方法が問題となる場合が多い。近年のセラミック加工技術の進歩により、高性能の圧電振動板が開発されている。その小型・軽量性に着目し、本研究での応用を試みた。

まず、圧電振動板を使用した加振法による損失係数測定システムを構築し、SEAパラメータの計測手法の検討を行った。圧電振動板加振によって計測された、残響時間法による総合損失係数の測定値と、SEA法を適用した音響放射に関する結合損失係数の測定値から内部損失係数の分離を行った。圧電振動板による加振方法は低周波数でパワーが不足するものの、容易にパネルに屈曲振動を生じさせることができる。各損失係数の測定結果も良好であり、定常加振デバイスとしての妥当性が確認できた。

つぎに、圧電振動板加振による音響放射をインテンシティ計測法を用いて可視化し、音響放射特性の検討を行った。パネルの振動エネルギーによる音響放射は、コインシデンス限界周波数以下において、パネル周辺部で生じているのを確認した。これは理論的なパネルのモードにおける音響放射特性を実験的に検証できたものといえる。また、インテンシティ計測法による放射効率レベルの測定を行った。測定結果は従来（音圧）法による測定値と良好に一致した。さらに、SEA法による結合損失係数の



測定値より算出した放射効率レベルとも精度良く一致し、インテンシティ計測法の損失係数測定への適用性を確認した。

また、パネルを2次元拡散振動場として導出された残響式を適用し、周辺取り付け部のエネルギー吸収率の算出を行った。これは周辺取り付け部の影響を定量的に同定する手段を与えるものであり、今後、これらの手法を用いたデータが蓄積されていく必要があると考える。

本研究では、建築居住空間で使用される実用的寸法パネルを対象として、その音響透過特性を実証的に検討してきた。第8章では、これまでに得られた研究結果に基づき、SEA法による単層壁の遮音解析・予測手法のフローをまとめた。SEAパラメータの設定は、遮音特性解析のための実測による方法と、遮音設計のための予測による方法に分けて整理した。

このフローに従って、圧電振動板加振によるSEAパラメータを用いたSEA法による透過損失推定を行い、実用的寸法パネルの測定値と良好な一致を示すことが確認され、本手法の有効性を示した。

## 9.2 今後の研究課題

最後に、本研究で得られた成果に基づき、今後進めていくべき研究課題を整理して本論文の締めくくりとしたい。

### (1) SEA法の適用範囲の拡張と予測手法の確立に向かって

SEA法は解析の初期段階で平均化が行われ、そのエネルギー解析ゆえの適用限界がおのずと生じてくる。すなわち、モード密度が小さくなる低周波数領域での適用に限界がある。したがって、有限要素法などの応答解析を結合したハイブリッドな解析手法へ発展させていく必要があると考える。

また、本研究で提案した修正SEA法をより多くの実測結果に適用し、その有効性や適用限界を明らかにしなければならない。さらに透過損失に影響を与える要因を分離解明し、本手法に組み込んでいき、より精度の高い解析手法を確立する必要がある。

#### (2) 支持条件を考慮したパネルの放射効率の理論的検討

パネルの放射効率の理論値と実測値には低周波数において差異が大きく、理論的にも今後詳しく検討する必要がある。

#### (3) 周辺吸収率の予測手法の確立

本研究において、圧電振動板を用いた損失係数の測定方法を開発し、周辺吸収率の算出手法を示した。今後この手法によるデータを蓄積してゆき、取り付け条件による周辺吸収率のモデル化等を行い、予測のための手法を確立する必要があると考える。

#### (4) 多層壁への展開

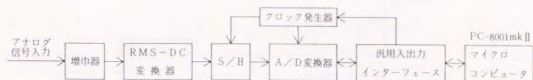
軽量かつ遮音性能の高い周壁構造をつくり出すためには、本手法の多層壁への展開が必要である。SEA法を多層壁へ適用した研究はすでに行われているが、非共振透過の結合損失係数として無限大板質量則が適用されており、改良の余地を残していると考える。また、多層壁の音響透過機構は、単層壁よりさらに複雑な要因が関係してくる。本研究で得られた知見を基礎データとし、これらの要因を一つ一つ解明してゆく研究も必要であろう。

最近のパーソナルコンピューターの発達・普及により、アナログ信号処理も個人レベルで容易に行うことができるようになってきている。そこで、透過損失測定の際に従来から行われてきている、アナログ方式測定の読み取り作業をパーソナルコンピューターを利用し自動化することを試みた。これによって全体の測定処理時間を短縮し、データの信頼性を向上させるのが目的である。パーソナルコンピューターによるアナログ信号の処理は参考となる書籍<sup>34-37)</sup>等の情報も多く、部品も安価で手に入れることが可能となり個人レベルでの製作が容易になってきている。そこで、音響信号処理のハードウェアおよびインターフェースの製作し、音響透過損失測定へのパーソナルコンピューターの応用について検討を行った。製作にあたっては安価で高機能なICを利用し、回路の簡略に努め、できるだけソフトウェアへの負担を軽減した。その結果プログラムはBASIC言語のみで記述でき、音響透過損失測定も良好な結果が得られた。

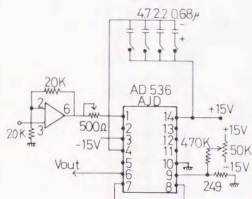
## 1.1 音響信号処理ボードの作製

### 1.1.1 ハードウェア

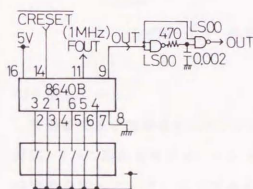
今回使用したA/Dコンバータは8ビットの分解能で、8チャンネルの入力信号に対し最高100μsecで変換することが可能なADC0809である<sup>38)</sup>。ハードウェアの構成を付図-1.1に示す。騒音計からは1/3オクターブ分析器によりろ波された交流信号が最大2.5V(フルスケール時)で出力されており、これをハードウェア部の入力としている。A/Dコンバータの許容入力電圧は直流5Vであるので、8ビットの分解能を有効に利用するため、増幅器によってアナログ信号を増幅する必要がある。また、式(1.3)のように音圧は実効値として取り扱わねばならない。音圧の瞬時値をソフトウェアによって処理することも可能ではあるが、パーソナルコンピューターの負担がその分増え、処理時間がかかってしまう。



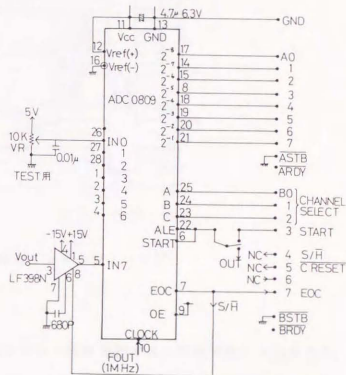
付図-1.1 ハードウェアの構成



付図-1.2 RMS-D/C変換器

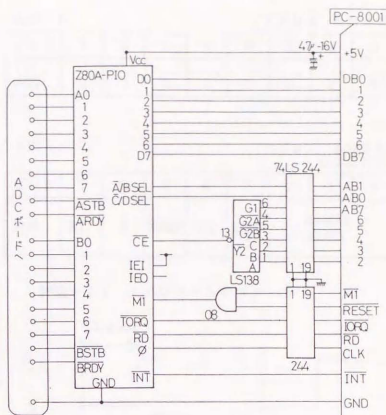


付図-1.4 プログラム標準パルス発生器



付図-1.3 8ビットA/D変換 (S/H付き)

これに対する便利なICとしてアナログデバイス社のAD536がある。このICの機能は交流信号を実効値処理し直流電圧として出力するもので、A/Dコンバータによく整合する。付図-1.2に増幅器とRMS-D/C変換器の回路図を示す。増幅器にはOPアンプLF356を正相増幅器として使用し、倍率は2倍としている。AD536は±15Vの電源を必要とし、9番ピンのオフセット調整に注意すれば比較的簡単に回路を組むことができる。実効値を得るときの時定数は外付けのコンデンサによって決まる。騒音計の時定数はFAST特性が0.2sec、SLOW特性が0.5secであるので、AD536の規格資料よりそれぞれ2.2μFと4.4μFの容量のコンデンサをDIPスイッチにより



付図-1.5 汎用入出力インターフェース<sup>37)</sup>

切り換えている。

実効値を表す直流電圧はサンプル&ホールド回路を経てA/D変換器に入力される。付図-1.3に回路図を示す。サンプル&ホールドICとしてLF398Nを使用し、回路の簡略を計っている。サンプル&ホールドのタイミングはA/D変換器の変換終了(EOC)信号からとっている。

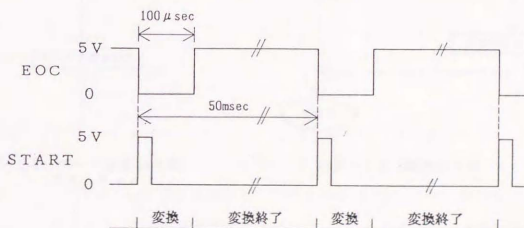
A/D変換器の変換速度を決めるCLOCK信号には付図-1.4に示すプログラム標準パルス発生器8640Bを使用している。このICの特徴はプログラマブルに7種類の出力周波数が選択できる。A/D変換器を最高の変換速度(100μsec)で動作させるためには10番ピンに1MHzのクロックを必要とし、8640Bの11番ピンからそのクロックが得られる。次にA/D変換開始の信号を6番ピン(START)に入力しなければならない。スタート信号は付図-1.3に示すように汎用入出力インターフェースのBポートの3ビットよりソフトウェアによって与えることもできるが、パーソナルコンピュータの負担を軽減するため今回は8640Bの9番ピンから得られるプログラマブルなクロック信号を用いている。ソフトウェアとの切り換えはトグルスイッチで行っている。



Aポート		アドレス &H88						
ビット	7	6	5	4	3	2	1	0
内容	$2^{-1}$	$2^{-2}$	$2^{-3}$	$2^{-4}$	$2^{-5}$	$2^{-6}$	$2^{-7}$	$2^{-8}$

Bポート		アドレス &H8A 0はGND						
ビット	7	6	5	4	3	2	1	0
内容	EOC	0	CRESET	S/H	START	CHANNEL SELECT		

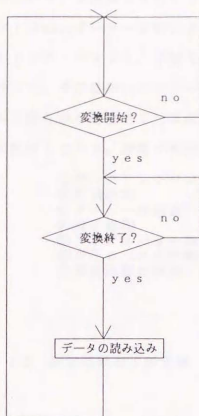
付図-1.6 I/Oポートのステータス



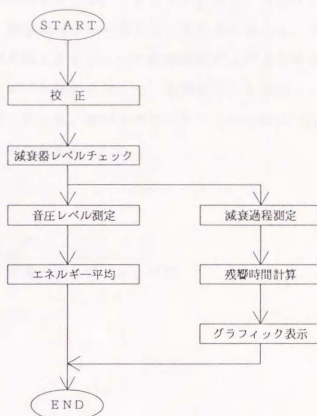
付図-1.7 タイミングチャート

8640 Bからのクロック周波数は2~7番ピンにDIPスイッチを取り付け適当な周波数を選択できるようにした。今回は、20Hzをサンプリング周波数としている。

A/D変換器とのデータ入出力は付図-1.5に示す汎用入出力インターフェースを用いている。Z80A-PIOの強力な割り込み機能は今回使用していないが、2ポート16ビットのデータの入出力が可能である。各ポートの割り付けを付図-1.6に示す。AポートはA/D変換結果の8ビットバイナリーのデータ取り込み用である。Bポートの0~2ビットはアナログ信号の入力チャンネルを選択できるが、今回は7チャンネルのみを使っている。0チャンネルは動作チェック用のテスト電圧が接続されているので、機器のチェックに使用できる。3ビットはソフトウェアによるA/D変換開始信号を送信できるが今回は未使用である。4~6ビットも使用していない。7ビッ



付図-1.8 データ取り込みの  
フローチャート



付図-1.9 測定のフロー

トにはA/D変換器からの変換終了信号（EOC）が入力されている。EOCが1のときAポートにA/D変換結果が入力されているのでパーソナルコンピュータにそのデータを取り込む。付図-1.7にタイミングチャート（略図）を示す。

### 1.1.2 ソフトウェア

パーソナルコンピュータの負担を軽減すべくハードウェアの製作を行ったので、結局ソフトウェアはBASIC言語のみの記述が可能になった。使用言語はPC-8001mkII（NEC）のN80-BASICである。A/D変換結果のデータ取り込みのフローチャートを付図-1.8に示す。A/D変換のスタートはパルス発生器により正確に行われるため、ソフトウェアは変換終了（EOC）信号を監視するのみで済む。変換開始（EOCの立ち下がり）はWAITコマンドでセンスし、変換終了（EOCの立

ち上がり)も同様にWAITコマンドを使用している。BASIC言語の一つのコマンドはmsecオーダーで実行されるので、画面表示のためのDMAを停止させたり、マルチステートメント、不要な空白桁を取り除くことによって処理速度を上げる工夫を行った。その結果20Hzのデータサンプリングが可能となった。実効値による音圧レベルの読み取り速度としては満足できる値と言える。全プログラムリストは文献40)付録に掲載している。概略の処理フローを下記に示す。

- ① データサンプリング
- ② 初期設定
- ③ メニュー画面表示
- ④ 校正処理
- ⑤ アッテネーターのレベルチェック
- ⑥ 音圧レベルの計測とデータ処理
- ⑦ 減衰過程の計測、残響時間の計算、グラフィック処理

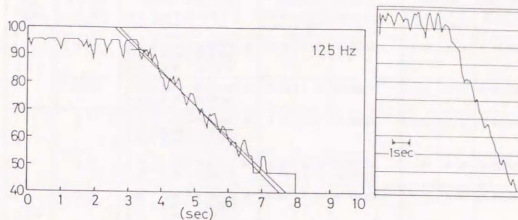
## 1.2 測定結果および考察

測定の手順(フロー)を付図-1.9に示す。まず騒音計の校正信号によりA/D変換器からの出力データを校正する。同時に電圧値をdB値に変換するためのテーブルをソフトウェアで作成する。次に音源より任意の帯域雑音を発生させ、騒音計のアッテネーターを調整する。アッテネーターのレベルをパーソナルコンピュータに入力し、オーバーフローのチェックを行う。

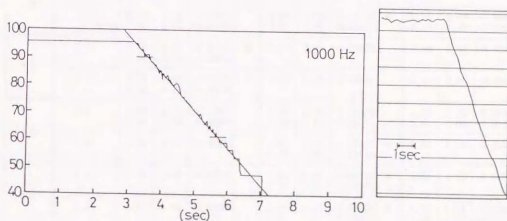
### 1.2.1 音圧レベルの測定

音圧レベルの測定はオーバーフローのチェックのための画面表示を行わせているため、サンプリング周波数は10Hz(ソフトウェア上)としている。平均のための測定時間は長くするほどより真値に近づくが、予備実験より15~20secで $\pm 0.5$ dB以内に納まることが確認できたので、全ての測定周波数について20sec間(200個のデータ取り込み)を測定時間とし、エネルギー平均を計算している。

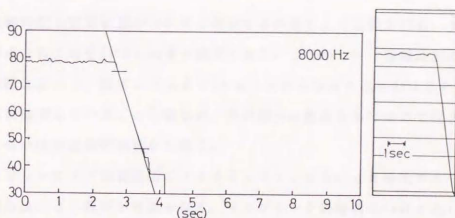
### 1.2.2 残響時間の測定



(a) 125 Hz : 91.50~62.51dBまで, TX=5.14sec, TY=4.81sec,  
平均RT=4.98sec, 相関係数=-0.967



(b) 1000 Hz : 89.74~60.92dBまで, TX=4.46sec, TY=4.41sec,  
平均RT=4.44sec, 相関係数=-0.994



(c) 8000 Hz : 74.78~46.48dBまで, TX=1.49sec, TY=1.49sec,  
平均RT=1.49sec, 相関係数=-0.999

付図-1.10 測定例 (左側: デジタル処理、右側: アナログ記録)

きり出し間隔		30dB				27.5dB				25dB			
中心 周波数 f <sub>z</sub>	アナログ 実測 sec	残響時間		相関係数		残響時間		相関係数		残響時間		相関係数	
		T x sec	T y sec	R x y		T x sec	T y sec	R x y		T x sec	T y sec	R x y	
125	5.4	5.33 5.39 5.60	5.22 5.27 5.47	-0.98899 -0.98870 -0.98849	*	5.60	5.47	-0.98849		5.49	5.36	-0.98764	
	5.35	5.56 5.50	5.45 5.40	-0.99057 -0.99041	*	5.60	5.48	-0.98922		5.52	5.37	-0.98679	
250	2.7	2.73 2.91 2.80	2.67 2.84 2.73	-0.98946 -0.98779 -0.98778	*	2.82	2.75	-0.98642		3.05	2.95	-0.98381	
	2.75	2.71 2.82	2.68 2.78	-0.99486 -0.99308	*	2.73 2.73	2.70 2.70	-0.99438 -0.99369		2.72	2.68	-0.99304	
500	2.67	2.60 2.91 3.01	2.56 2.87 2.96	-0.99224 -0.99200 -0.99199	*	3.05	3.00	-0.99183		2.72	2.67	-0.99108	
	2.8	3.11 2.95	3.05 2.89	-0.99145 -0.99049	*	2.79	2.73	-0.98895		2.82	2.76	-0.98782	
1K	2.75	2.79 2.79	2.76 2.76	-0.99534 -0.99480	*	2.77 2.85	2.74 2.81	-0.99500 -0.99426		2.80	2.76	-0.99321	
	2.75	2.76 2.90	2.74 2.88	-0.99683 -0.99683	*	2.83 2.92	2.82 2.90	-0.99709 -0.99666	*	2.85 2.81	2.83 2.79	-0.99685 -0.99664	
2K	2.47	2.56 2.57	2.55 2.56	-0.99830 -0.99823	*	2.61	2.60	-0.99820		2.65	2.64	-0.99810	
	2.47	2.52 2.58	2.50 2.56	-0.99750 -0.99725	*	2.51	2.50	-0.99724		2.48	2.46	-0.99689	
4K	2.0	2.04 2.14	2.03 2.14	-0.99894 -0.99849	*	2.06 2.04	2.05 2.03	-0.99874 -0.99863		2.08 2.08	2.08 2.08	-0.99905 -0.99888	*
	1.97	1.98	1.98	-0.99915		1.95 1.97	1.95 1.97	-0.99927 -0.99920	*	1.94	1.94	-0.99919	
8K	1.52	1.50	1.49	-0.99592		1.43 1.43	1.42 1.43	-0.99786 -0.99782	*	1.42	1.41	-0.99758	
	1.55	1.41	1.40	-0.99920		1.38 1.41	1.38 1.40	-0.99921 -0.99901	*	1.38 1.38	1.38 1.38	-0.99900 -0.99899	

\*印は相関係数絶対値の最大を示す。

付表-1.1 残響時間算出のための切り出し間隔による計測値の比較

残響時間は定常状態から60dB減衰する時間として定義される。アナログ方式の測定器のS/N比はせいぜい50dB程度である。したがって、残響時間の読み取りは、減衰過程において、定常レベルより5dBしたから少なくとも25dBの範囲が全体として一様に減衰していることを確かめ、その部分に直線をあてはめて行う。一様に減衰していない場合は測定回数から除く。

8ビットのA/D変換器のダイナミックレンジも50dB程度であるが、dB変換した場合40dB程度が有効となる。サンプリング周波数は20Hzとし、0.05secの分解能で減衰過程のデータを取り込んでいる。残響時間の算出にあたっては、30dB減衰する時間を計測し、その値を2倍すれば残響時間となる。しかしこの方法ではサンプリング間隔が粗いことや、その時間内の減衰過程の直線性のチェックが困難なため、



アナログ方式による結果との対応はよくなかった。

そこで、減衰過程から最小自乗法による回帰直線を求め、その傾きから残響時間を算出する方法を試みた。回帰直線は次式で表せる。

$$L(t) = L_0 - (60/T)t \quad (\text{付1.1})$$

ここで、 $L(t)$  : 時刻  $t$  における音圧レベル (dB)

$T$  : 残響時間 (sec)

$L_0$  : 定数

最小自乗法の定義により、残響時間は時間 ( $T_x$ ) および音圧レベル ( $T_y$ ) の偏差を最小にする2つの値として得ることができる。今回はその平均値を残響時間とした。

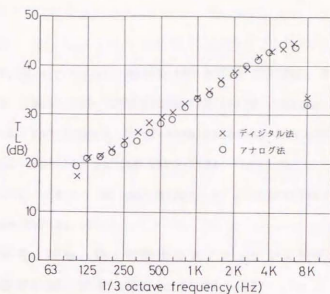
付図-1.10にデジタルおよびアナログ方式の測定例を代表的な周波数について示している。時間軸のスケールが異なっているが、デジタル測定はアナログ測定によく一致していると言える。

付表-1.1は残響時間算出のための減衰過程からのデータの切り出し間隔(最小自乗法を適用する区間)について比較している。切り出し間隔は30 dB、27.5 dB、25 dBの3種類としている。減衰過程からデータを切り出す区間は同一切り出し間隔について複数区間会話的に処理可能である。それぞれについて残響時間と相関係数を算出している。27.5 dBと25 dBについては相関係数の絶対値が最大となったもののみ表に載せている。\*印は各中心周波数において、相関係数の絶対値が最大になったものを示している。表より、一般的に切り出し間隔を大きくとった方が相関係数は上昇すると言えるが、高周波数になるとSNが小さくなることもあって断定することはできない。しかし、相関係数の絶対値は全周波数にわたって0.99程度が得られている。したがって、切り出し間隔は30 dBとし、相関係数の絶対値が最大値になるような値(減衰過程の直線性が良好)を残響時間と決定している。付図-1.10にはその回帰直線もプロットしており、満足すべき結果が得られている。

### 1.2.3 透過損失測定結果

1.5mm厚鉄板についてアナログ方式とデジタル方式の音響透過損失の測定を行った。

付図-1.11に測定結果を示す。最大2 dB程度の差は認められるが、全般的に両者は比較的良好に一致している。



付図-1.11 透過損失測定結果の比較

### 1.3 まとめ

音響透過損失測定にパーソナルコンピュータを利用し、測定時間の短縮と自動化によるデータの信頼性、精度の向上を計った。これによって測定時間はデータの整理の時間も含めて、アナログ方式の半分以上に短縮できた。音響透過損失の測定はアナログ方式でのみ規格化されており、デジタル測定もアナログ方式をできるだけシミュレートする方向で行った。両者の方法による測定結果はよく一致していることを確認した。

ハードウェアの製作にあたっては、機能豊富なLSIを使用し、回路の簡略につとめた。これによってソフトウェアの負担を軽減することができ、プログラムは全てBASICS言語で記述できた。

## 参考文献

- 1) Crocker, M. J., et al.: NOISE AND NOISE CONTROL, Vol. II, CRC Press, 1982
- 2) Fahy, F.: SOUND AND STRUCTURAL VIBRATION, ACADEMIC Press, 1985
- 3) Josse, R. and Lamure, C.: Transmission du Son par Une Paroi Simple, ACUSTICA, vol. 14, pp. 266-280, 1964
- 4) Cremer, L., Heckl, M. and Unger, E. E.: STRUCTURE-BORNE SOUND, Springer-Verlag, 1973
- 5) 東山三樹夫, 伊藤 毅: 有限板のコインシデンス周波数について, 日本音響学会誌, 33巻 1号, pp. 36-37, 1977
- 6) Ver, I. L. and Holmer, C. I.: NOISE AND VIBRATION CONTROL (L. L. Beranek, ed), pp. 287-296, McGRAW-HILL, 1971
- 7) 例えば, 安岡正人: 窓の遮音性能を高める方法, 建築技術, pp. 160-167, 1990年4月
- 8) Sewell, E. C.: Transmission of Reverberant Sound Through a Single-Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle, J. of Sound & Vib., Vol. 12, No. 1, pp. 21-32, 1970
- 9) Lyon, R. H.: Noise Reduction of Rectangular Enclosures with One Flexible Wall, J. A. S. A., Vol. 35, pp. 1791-, 1963
- 10) White, P. H. and Powell, A.: Transmission of Random Sound and Vibration Through a Rectangular Double Wall, J. A. S. A., Vol. 40, pp. 821-832, 1965
- 11) Crocker, M. J. and Price, A. J.: Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis, J. of Sound & Vib., Vol. 9, No. 3, pp. 469-486, 1969
- 12) Price, A. J. and Crocker, M. J.: Sound Transmission Through Double Panels Using Statistical Energy Analysis, J. A. S. A., Vol. 47, PP. 683-, 1970
- 13) 田代新吉ほか: 船舶騒音予測プログラムについて - S E A理論の適用 -, 日本造船学会論文集, 第150号, pp. 564-575, 昭和56年11月
- 14) 安田博之, 松井昌幸: 矩形閉空間を構成する壁面の騒音減衰量とその音響放射率について, 日本音響学会誌, 36巻 7号, pp. 357-365, 1980
- 15) 藤原恭司, 鈴木陽次: S E A法による建築物内における固体音伝搬特性の解析,

- 日本音響学会講演論文集, pp.635-, 昭和63年10月
- 16) 岩重博文, 太田光雄: 各種幾何断面構造をもつ中空二重壁の改良型SEA法に基づく透過損失の理論と実験, 日本音響学会誌, 36巻 9号, pp.447-458, 1980
  - 17) 岩重博文, 太田光雄: 一般N重壁の透過損失に関する改良型SEA法からの予測手法, 日本音響学会誌, 37巻10号, pp.484-493, 1981
  - 18) Ver, I. L. and Holmer, C. I.: NOISE AND VIBRATION CONTROL (L. L. Beranek, ed), pp.296-301, McGRAW-HILL, 1971
  - 19) Cremer, L., Heckl, M. and Unger, E. E.: STRUCTURE-BORNE SOUND, pp.201 Springer-Verlag, 1973
  - 20) Donato, R. J.: Sound Transmission Through a Double-Leaf Wall, J. A. S. A., Vol. 51, No. 3, pp. 807-815, 1972
  - 21) 川井孝雄: 一重板の遮音機構の解析-円形板への平面波垂直入射-, 日本音響学会誌, 29巻 4号, pp.186-198, 1973
  - 22) 佐藤英男: 壁体および窓の戸外騒音透過機構について-透過波の放散性状を考慮した無限壁理論の修正-, 日本音響学会誌, 29巻 9号, pp.509-516, 1973
  - 23) Gurovich, Yu. A.: Nonresonant Sound Transmission Through a Rectangular Panel, Sov. Phys. Acoust., Vol. 26, No. 3, pp. 221-223, May-June 1980
  - 24) Elmallawany, A.: Improvement of the Method of Statistical Energy Analysis for the Calculation of Sound Insulation at Low Frequencies, Applied Acoustics, Vol. 15, pp. 341-345, 1982
  - 25) London, A.: Transmission of Reverberant Sound Through Single Walls, RP1998, J. R. of N. B. S., Vol. 42, pp. 605-615, 1949
  - 26) Kuroki, S.: Prediction of Sound Transmission Loss of Single Leaf Walls Due to an Improvement of the SEA Method, the Research Reports of the Faculty of Engineering, Kagoshima University, No. 28, November, 1986
  - 27) Kuroki, S.: Sound Transmission Loss of Single Leaf Walls Due to an Improvement of the Coupling Loss Factor for Nonresonant Transmission, Inter-noise87, pp.1633-1636, 1987
  - 28) 黒木荘一郎: 非共振透過を修正したSEA法による単層壁の音響透過損失について, 日本建築学会計画系論文報告集, 第409号, 1990年3月

- 29) 日本工業規格 JIS A1416 「実験室における音響透過損失測定法」
- 30) 建築音響関係 JIS 解説, 日本音響材料協会, 1979年
- 31) Beranek, L.L.: NOISE AND VIBRATION CONTROL, McGRAW-HILL, 1971
- 32) 前川純一: 建築・環境音響学, 共立出版, 1990年
- 33) 黒木荘一郎: 多孔質吸音材を充填した二重壁の音響透過損失について,  
鹿兒島大学工学部研究報告, 第25号, pp.85-94, 昭和58年11月
- 34) 志水英二ほか: マイコンインターフェイスの作り方・使い方,  
日刊工業新聞社, 1982年
- 35) 鈴木ほか: 周辺装置の製作, アスキー出版, 1981年
- 36) アナログ・デバイセス・データブック
- 37) 特集 A-D/D-A のインターフェース技術,  
トランジスタ技術, 1984年2月号, pp267-
- 38) 大迫勝彦: 遮音機構の等価理論解析に関する研究-電気回路への  
シミュレーター-, 昭和52年度鹿兒島大学大学院修士論文
- 39) 塘一郎, 古川恵子: 建築学科新音響室の音響特性について,  
鹿兒島大学工学部研究報告, 第15号, pp.45-52, 昭和48年9月
- 40) 黒木荘一郎: 音響透過損失測定へのマイクロコンピュータの利用,  
鹿兒島大学工学部研究報告, 第27号, pp.131-143, 昭和60年11月
- 41) 黒木荘一郎: 壁体の遮音性能に及ぼす間柱の影響に関する実験的研究,  
日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.87-88, 昭和55年9月
- 42) 黒木荘一郎: 間柱をもつ壁体の透過損失 - 単層壁について -,  
日本音響学会講演論文集, pp.481-482, 昭和56年10月
- 43) 黒木荘一郎: 単層壁への音波入射角度を制限することによる透過損失の変化  
(壁体の形態による透過損失の変化に関する研究),  
日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.15-16, 昭和59年10月
- 44) de Bruijn, A.: Influence of Diffusivity on the Transmission Loss of  
a Single-Leaf Wall, J.A.S.A., vol.47, pp.667-, 1970
- 45) 黒木荘一郎: 単層壁への入射音波制限による遮音度改善量 (壁体の形態に  
よる透過損失の変化に関する研究),  
日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.195-196, 昭和60年10月



- 46) 十倉毅, 森本三男: 試験体寸法が残響室の既設開口より小さい場合の音響透過損失, G B R C, 第20号, pp. 20-24, 日本建築総合試験所, 1980
- 47) 久我新一: ガラスおよびガラス窓の遮音性,  
日本建築学会論文報告集, 第96号, pp. 36-45, 昭和39年3月
- 48) 黒木荘一郎: 低周波数領域における単層壁の透過損失への S E A 法の適用に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 389-390, 1989年10月
- 49) 黒木荘一郎, 赤坂 裕: 圧電振動板による単層壁の損失係数の測定,  
日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 427-428, 1990年10月
- 50) 黒木荘一郎, 安岡正人, 赤坂 裕: 圧電振動板加振による単層壁の損失係数の測定と S E A 法による遮音解析,  
日本音響学会講演論文集, pp. 623-624, 平成3年3月
- 51) Fahy, F.: SOUND INTENSITY, Elsevier Applied Science, 1989
- 52) 橘 秀樹: 音響インテンシティ法による遮音測定, 音響技術, No.62, 1988年
- 53) 橘 秀樹, 矢野博夫, 浜田幸雄, 日高新人: 建物の遮音性能に関する研究  
東京大学生産技術研究所報告, 第34巻, 第5号, 昭和63年10月
- 54) Unger, E. E.: NOISE AND VIBRATION CONTROL (L. L. Beranek, ed), Chap. 14  
McGRAW-HILL, 1971
- 55) M. J. Crocker & A. J. Price: DAMPING IN PLATES, (LETTERS TO THE EDITOR)  
J. Sound Vib., Vol. 9, No. 3, pp. 501-505, 1969
- 56) 山口道征, 鈴木昭介: 多孔質層と軟質樹脂層から成る積層体の遮音特性,  
日本音響学会講演論文集, pp. 645-646, 昭和63年10月
- 57) 鈴木昭介, 山口道征: 損失係数の測定に関する検討,  
日本音響学会講演論文集, pp. 497-498, 平成元年3月
- 58) 安岡 正人: 騒音・振動対策ハンドブック (日本音響材料協会編)、第7章、  
技報堂出版、1982年1月
- 59) PIEZOELECTRIC SOUND COMPONENTS MANUAL, 圧電発音部品 APPLICATION,  
御村田製作所、1988年
- 60) 霜田英應、田原靖彦: 可搬型自動残響計測装置、  
日本音響学会建築音響研究委員会資料AA85-10、昭和60年4月
- 61) 黒木荘一郎, 安岡正人, 赤坂 裕: 圧電振動板加振による単層壁の損失係数

の測定と周辺吸収率の算出,

日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1427-1428, 1991年9月

- 62) 橋 秀樹、日高新人、今西由利、石井聖光：建築音響における模型実験法に関する研究, 日本音響学会建築音響研究委員会資料AA90-6, 平成2年3月
- 63) 日本建築学会編：実務的騒音対策指針, 技報堂出版, 1975年
- 64) 日本建築学会編：実務的騒音対策指針応用編, 技報堂出版, 1987年
- 65) 日本建築学会編：建物の遮音設計資料, 技報堂出版, 1988年

## 《謝 辞》

終始多大のご指導を賜り、本論文をとりまとめる機会を与えて下さった東京大学・安岡正人教授に心から感謝申し上げます。

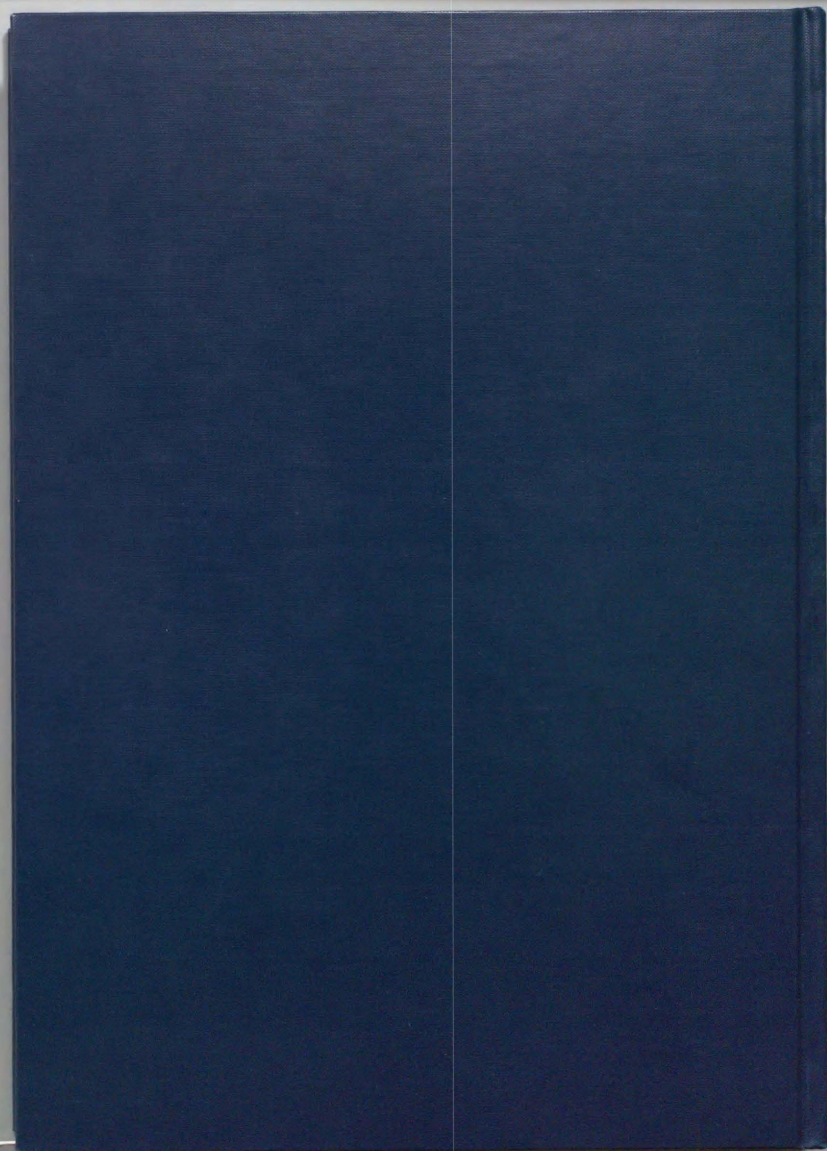
東京大学生産技術研究所・橋秀樹教授からは、多くの貴重なご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

鹿児島大学・赤坂裕教授には、研究をまとめる基本的な考え方をお教え戴き、さらに本研究を進める上での多大なるご援助と叱咤激励を戴きました。心から感謝申し上げます。

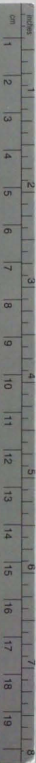
また、本研究のきっかけを与えて下さり、多大なるご高配を賜った鹿児島大学名誉教授・故塘一郎博士に深く謝意を表するとともに、心より冥福をお祈り申し上げます。

鹿児島大学工学部共通講座・小原幸三先生には、信号処理や圧電振動板等のハードウェアに関する数多くのご教示を戴きました。東洋大学工学部・藤井弘義先生には、計測機器をこころよくご貸与下さり、またご高配を賜りました。また、本研究に関する内地研修に際しては、東京大学・平手小太郎助教授、福島寛和氏（現在、建設省建築研究所）をはじめ安岡研究室、環境系研究室の関係各位よりご高配を賜りました。さらに本研究の推進に際しては、当研究室歴代の蘭田誠二技官・寿福初美技官・湯田茂技官をはじめ、学生諸君の協力を戴きました。ここに記して深く感謝いたします。

最後に、本研究に対する、ご支援・ご援助を戴いた関係各位に対し心より謝意を表します。







# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue

Cyan

Green

Yellow

Red

Magenta

White

3/Color

Black



## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

