

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

フェアリング部材のランダム音響透過試験による 数値解析手法の妥当性確認 —アルミ板の場合—

高橋 孝, 金田 英和, 青山 剛史,
大久保 朝直, 杉江 聡, 吉村 純一

2014年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

フェアリング部材のランダム音響透過試験による数値解析手法の妥当性確認 —アルミ板の場合—*

高橋 孝^{*1}、金田英和^{*2}、青山剛史^{*1}、大久保朝直^{*3}、杉江 聡^{*3}、吉村純一^{*3}

Validation of the Numerical Prediction Method by Fundamental Random Incidence Sound Transmission Experiments for Fairing Materials: Aluminum Plates

Takashi TAKAHASHI^{*1}, Hidekazu KANEDA^{*2}, Takashi AOYAMA^{*1}, Tomonao OKUBO^{*3}, Satoshi SUGIE^{*3} and Junichi YOSHIMURA^{*3}

ABSTRACT

The mechanical vibration is applied to a spacecraft via the interface to a launch vehicle at lift-off. The spacecraft is also exposed to acoustic pressure with wide frequency range. Lightweight and large area structures, such as solar paddles, antennas, and components with relatively high natural frequencies, are sensitive to acoustic load. Although the acoustic tests are usually conducted for components and system of the spacecraft, acoustic tests and analysis of the spacecraft mounted in a fairing have not been sufficiently done. It is expected that numerical analysis can be applied to the prediction of acoustic environment inside of fairings. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been developing a vibroacoustic prediction tool by the wave based method (WBM), which is one of the deterministic approaches and is proposed for numerical prediction up to the mid-frequency range. The existing deterministic approaches cannot accurately solve vibroacoustic problems in this range. In this report, numerical prediction results of random incidence sound transmission through an Aluminum plate by the 3D WBM and FEM are compared with those by an experiment, and the 3D WBM is validated.

Keywords : Sound Transmission, WBM, FEM

概 要

ロケットで打ち上げられる宇宙機には、ロケットとの間のインターフェイスを通じて機械振動が加わる。さらに、広い周波数成分をもつ音圧がフェアリングを透過して宇宙機表面に加わることにより振動する。太陽電池パドルやアンテナなど軽量で大きな面積をもつ構造や、比較的高い固有振動数をもつコンポーネントは、音響荷重に影響されやすい。しかし、衛星のコンポーネントやシステムの音響試験は行なわれていないのが現状である。そこで、解析によって、事前に全系の検討が十分に行われることが期待されている。JAXA では、フェアリングまでを含めた衛星の音響解析手法の確立を目指し、今までに 2 次元 WBM をフェアリング内部の衛星の音響連成問題に適用し、その応用性について検討してきた。また、解析コードの妥当性確認を目的として簡易フェアリング部材を用いた音響透過実験を行ってきた。本報告では、3 次元に拡張した WBM の解析結果の妥当性を確認するため、アルミ板のランダム入射音響等価実験結果及び既存の解析手法である FEM の解析結果との比較を行った。

* 平成 25 年 12 月 19 日受付 (Received 19 December, 2013)

*1 航空本部 数値解析技術研究グループ
(Numerical Simulation Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

*2 (株) 計算力学研究センター
(Research Center of Computational Mechanics, Inc)

*3 一般財団法人 小林理学研究所
(Kobayashi Institute of Physical Research)

1. はじめに

ロケットで打ち上げられる宇宙機には、ロケットとの間のインターフェイスを通じて機械振動が加わる。さらに、広い周波数成分をもつ音圧がフェアリングを透過して宇宙機表面に加わるにより振動する。太陽電池パドルやアンテナなど軽量で大きな面積をもつ構造や、比較的高い固有振動数をもつコンポーネントは、音響荷重に影響されやすい。しかし、衛星のコンポーネントやシステムの音響試験は行なわれているが、フェアリングまでを含めた衛星の十分な音響試験及び解析は行なわれていないのが現状である。実際、フェアリング内では、局所的に音圧レベルが不均一となる現象（フィル・エフェクト（fill effect））が起こると報告されている。このように地上試験で十分に再現できない現象を含め、解析によって事前に十分な検討が行われることが期待されている。

一般に音響振動の解析手法に着目すると、既存の手法としては、低周波側では有限要素法（FEM）等の決定論的手法、高周波側では統計的エネルギー法（SEA）等の確率統計的手法が適用される。しかし、両手法では信頼性の高い解析のできない中間周波数帯が存在する。そこで、中間周波帯を含む領域での解析が可能な波動ベース法（WBM）が提案されている¹⁾。これは、支配方程式を厳密に満たす特異でない解（波動関数）の重ね合わせで解を表現するアプローチであり、FEM等の要素ベース手法で問題となる数値分散誤差²⁾を含まないため、小さな自由度のモデルで高精度な予測結果が得られると期待できる。ここで、数値分散誤差とは、厳密で連続な支配方程式から得られる解と、離散化された数値的な支配方程式の解の波数が異なることで認識される誤差である。つまり、空間等を離散化するあらゆる数値解法には必ず存在する誤差のひとつである。

著者ら³⁾は、フェアリングまでを含めた衛星の音響解析手法の確立を目指し、まずは2次元（以下、2D）WBMをフェアリング内部の衛星の音響連成問題に適用し、その応用性について検討してきた。そして、3次元WBMの妥当性を確認する目的として、まずはアルミ平板を介した垂直入射による音響透過解析及び実験との比較検討を行なった⁴⁾。

本報告では、ランダム入射モデルでの定常音響構造連成問題に対する3D WBMと既存のFEM及び実験との比較を行なうことにより、さらに3D WBMの妥当性と応用性について検討を進める。

2. 音響透過実験

2.1 実験装置

音響透過に関する数値解析の妥当性確認を目的として、アルミ平板を対象とするランダム音響透過試験を実施する。

図2.1における、(a)（残響－残響モデル）および(b)（残響－無響モデル）の2種類の状況を想定し、音源が置かれた室の周壁に設置された平板を透過する音について考える。図2.1(a)では音源側と透過側の両方が閉空間となっているのに対し、図2.1(b)では音源側は閉空間、透過側は開空間となっている。ある程度高い周波数範囲においては、閉空間内の音響エネルギーは均一に分布しており、なおかつどの点においても音の進行方向はあらゆる方向に一樣である。平板の音源側表面にはすべての方向から均一にエネルギーが入射し、これをランダム入射と呼ぶ。

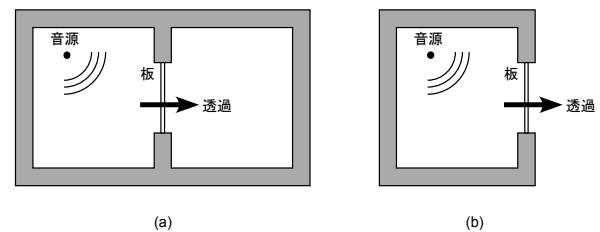


図2.1 想定する音場の概略図

上図の透過音に関する数値解析の妥当性を確認するため、同じ状況を想定した音響試験を行う。数値解析では平坦な周波数特性を有する理想的な点音源を仮定することが多いが、実験で用いるスピーカの出力は周波数により大きく異なるため、両者を比較するには実験結果を音源出力で基準化した値で表現する必要がある。スピーカの出力を表す音響パワーレベルを事前に測定し、透過試験の結果を音響パワーレベル測定値で基準化した相対的な音圧レベルとして整理する。

2.2 音響透過試験を行う試験室

後述の音響透過試験では、試験室の開口部に設置した平板に音波を放射し、平板に入射する音と平板を透過する音をそれぞれ測定する。この節では、試験室の設備や形状について記述する。

2.2.1 試験室の概要

小林理学研究所内の建築音響試験室棟にある試験室Tおよび試験室Fを用いる。図2.2に概略図を示す。壁面は250mm厚、床面は400mm厚のコンクリートで構成されており、室内側の表面は滑らかで音響的に反射性である。試験室Fは可動、試験室Tは固定となっている。試験体の音響透過以外の

経路の寄与を小さくするため、室間の音響絶縁および振動絶縁について配慮されている。

表 2.1 に試験室の内寸を示す。床の短辺と天井高さは両室で共通だが、長辺は試験室 T の方が長い。

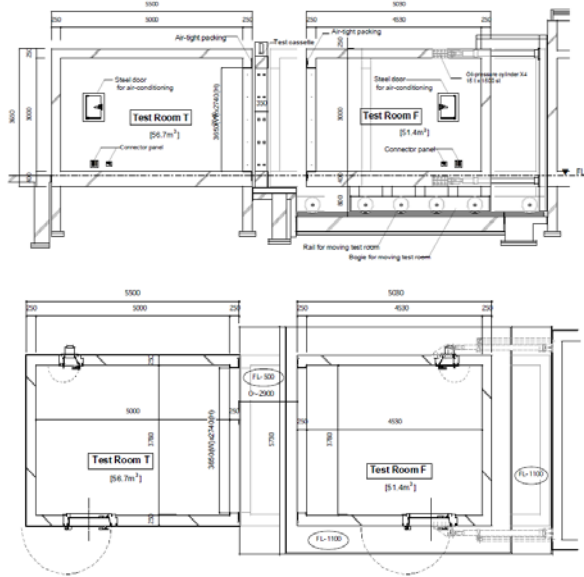


図 2.2 試験室の概略図 (上段：断面図、下段：平面図)

表 2.1 試験室の内寸

	試験室T	試験室F
床長辺 [m]	5.00	4.53
床短辺 [m]	3.78	3.78
天井高 [m]	3.00	3.00
容積 [m ³]	56.7	51.4
表面積 [m ²]	90.5	84.1

2.2.2 残響室—残響室試験

残響室と残響室の間に開口部を設け、その開口部に設置した平板の透過音を測定する。

図 2.3 に試験室の全景を示す。試験室 F を移動して試験体カセット (コンクリート壁に試験体が埋め込まれたもの) を試験室 T に押し付ける。試験室 T に置いたスピーカから試験音を放射し、試験室 F に置いたマイクロホンで透過音を測定する。試験室は、基本的に ISO 140-1 の要件を満たす。



図 2.3 残響室—残響室の全景
(左奥：試験室 T、右手前：試験室 F)

2.2.3 残響室—無響室試験

残響室に設けた開口部に平板を設置し、音源側を残響室、透過側を無響室 (自由音場) の状態にして、平板の透過音を測定する。

図 2.4 に試験室の全景を示す。試験室 F を試験室 T から離れる方向に移動し、透過側に空間を作る。この空間を吸音材で囲い、簡易的な無響室とする。試験室 T に置いたスピーカから試験音を放射し、透過側のマイクロホンで透過音を測定する。試験室は、基本的に ISO 15186-1 の要件 (残響室に関する要件は ISO 140-1 と共通) を満たす。



(a) 試験室Fの移動



(b) 試験室Fの移動完了位置



(c) 吸音材の仮設による
残響室—無響室条件

図 2.4 残響室—無響室の全景

2.3 平板の設置

音響透過試験の対象となる 2 種類の平板を、試験室に設置する。弾性板の境界条件を完全拘束 (Clamped) とする数値解析を想定し、平板の周囲 4 辺をコンクリートで固めて設置する。

2.3.1 アルミ平板の仕様

表 2.2 に音響透過試験の対象となる試験体の概要を示す。材質および透過部面積は共通とし、厚さを変えた 2 種類の平板を用意する。

表 2.2 試験体の概要

	アルミ平板 1	アルミ平板 2
厚さ	10 mm	15 mm
材質	アルミ合金 A5052	
透過部の面積	1.0m×0.7m	

2.3.2 平板周囲の固定

弾性板の境界条件を完全拘束 (Clamped) とする数値解析を想定し、平板の周囲4辺をコンクリートで固めて設置する。

図 2.5 に平板を固定するコンクリート枠の構成を、図 2.6 にコンクリート枠の製作手順を示す。溝型鋼で作った型枠の中にコンクリートを流し込み、その中に平板を固定する。1200mm×1500mm の平板の周囲を 275mm または 250mm の幅だけコンクリート内に埋めこみ、音が透過する面 (開口部) を 1000mm×700mm 残す。

厚さの異なる 2 種類の平板について製作し、計 2 体のコンクリート枠となる。

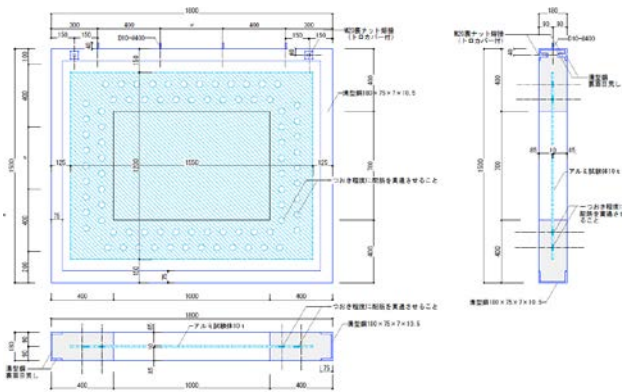


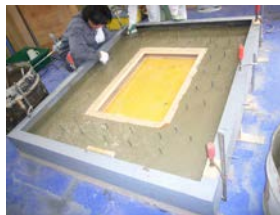
図 2.5 平板を固定するコンクリート枠の構成



(a) 平板の周辺に穴を開ける



(b) 鉄筋の配置



(c) 開口を木枠で残しながらコンクリートを流し込む



(d) 平板を置く



(e) 穴を通過する鉄筋とコンクリート



(f) 開口を木枠で残しながらコンクリートを流し込む

図 2.6 平板を固定するコンクリート枠の製作手順

2.3.3 試験室への設置

前節に示したコンクリート枠を試験室に設置する。図 2.7 に試験体カセットの構成を、図 2.8 にコンクリート枠の試験体への設置の様子を示す。

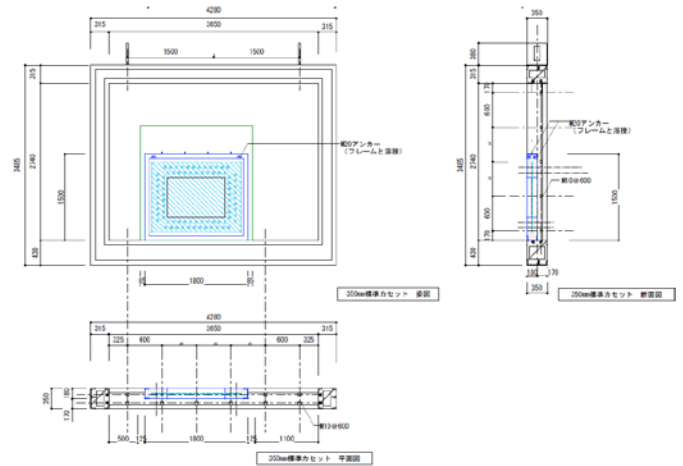


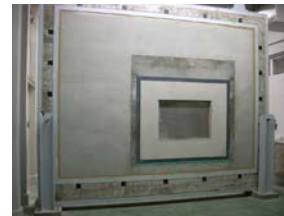
図 2.7 試験体カセットの構成



(a) コンクリート枠を置く



(b) モルタル充填



(c) コンクリート壁に埋め込まれた試験体

図 2.8 コンクリート枠の試験室へ設置の様子

2.4 試験体の共振周波数の測定

音響透過試験の前に、平板の振動特性を把握するため、共振周波数の測定を行う。

2.4.1 測定方法

衝撃加振に対する平板の振動応答を測定する。図 2.9 に測定機器のブロックダイアグラムを示す。1 点の加振に対する測定点 (多数点) の振動を測定する代わりに、相反則を利用して加振点と測定点を入れ替え、加振点 (多数点) を移動しながら加振して固定点 1 点での振動応答を測定する。表 2.3

に測定機器一覧を、図 2.10 に加振点と応答測定点の配置を示す。

加振力と振動応答の間の伝達関数を FFT で算出し、パーソナルコンピュータに転送する。専用の解析ソフトを用いて、平板の固有振動を分析する。

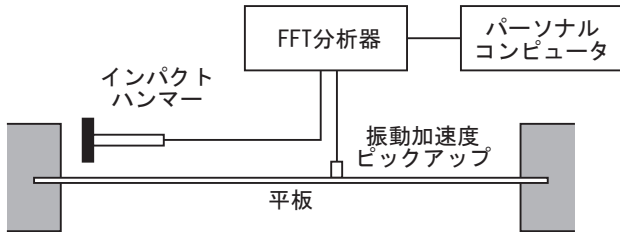


図 2.9 測定機器のブロックダイアグラム

表 2.3 測定機器一覧

インパクトハンマー	RION PH-51
振動加速度ピックアップ	RION PV-95
チャージアンプ	RION UV-06
FFT分析器	Agilent Technology 35670A

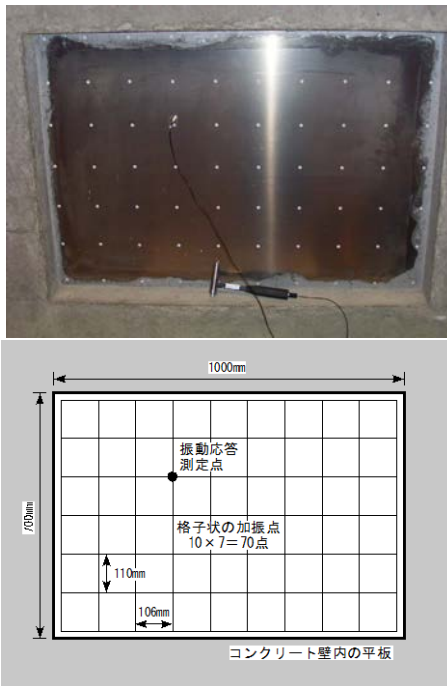


図 2.10 加振点(格子状)と振動応答測定点(固定点)の配置

2.4.2 平板の共振周波数と固有モード形状

表 2.4 に共振周波数の一覧を、表 2.5 に板の固有モードを示す。各モードの特定があまり明瞭でなかったため、共振周波数は 5Hz 単位で丸めて表示する。

表 2.4 共振周波数一覧

アルミ 10mm			アルミ 15mm		
モード形状		周波数[Hz]	モード形状		周波数[Hz]
長辺	短辺		長辺	短辺	
1	1	120	1	1	160
2	1	185~195	2	1	250
1	2	270	1	2	345
2	2	350	2	2	445
3	2	460	4	2	840

表 2.5 板の固有モード

10mm 厚		15mm 厚	
120Hz (1,1)		160Hz (1,1)	
185Hz (2,1)		250Hz (1,1)	
270Hz (1,2)		345Hz (1,1)	
350Hz (2,2)		445Hz (1,1)	
460Hz (3,2)		840Hz (1,1)	

2.5 試験スピーカの基本特性の測定

後述の音響透過試験は、3D WBM の妥当性確認を目的として、その比較対象として行う。数値解析における音源は、全指向性かつ平坦な周波数特性を持つ理想的な点音源を想定することが多い。一方、実験に用いるスピーカは、ある程度の指向性を有し、周波数特性も平坦ではない。

そこで、音響透過試験の前に試験音源の特性を把握するため、スピーカの指向性、および放射される試験音の出力を表す音響パワーレベルの周波数特性を測定する。

2.5.1 インパルスレスポンス測定の方法

本報告書における音響試験では、特に記述のない場合には、すべてインパルスレスポンス測定により音場の伝達特性を分析する。インパルスレスポンスとは、理想的なインパルス信号（継続時間無限小、振幅無限大）に対するシステムの時間応答として定義される。音響測定においては、スピーカ

から放射された有限振幅のインパルス信号に対してマイクロホンで観測される音圧の時間波形を意味する。インパルスレスポンスの時間波形は時間発展型の非定常数値解析の比較対象となり、インパルスレスポンスを周波数分析した結果は定常純音を想定した数値解析の比較対象となる。

音響的なインパルスレスポンス測定には、いくつかの手法がある。表 2.7 にインパルスレスポンス測定手法の比較を示す。透過音の測定では信号対雑音比 (SN 比) が小さくなることが予想され、SN 比改善の手段がある測定法を採用するのが望ましい。本報告書における音響透過試験では、Swept-sine 法を用いてインパルスレスポンスを測定する。

表 2.7 インパルスレスポンス測定手法の比較

	擬似インパルス法	Maximum length sequence法 (MLS法、M系列信号)	Swept-sine法 (TSP信号、OATSP信号)
音源	ピストルや高電圧放電	有限長の擬似ランダム信号	スイープ純音
長所	信号処理が不要。	信号処理の負担が小さい。	外乱に対して強い。同期加算によりSN比を改善できる。
短所	音源の再現性がない。SN比を改善する方法がない。	外乱に対して弱い。同期加算によるSN比の改善量が理論どおりに得られない場合がある。	信号処理の負担が大きい。
普及度	用途が限定的。	欧州を中心に普及。	日本を中心に普及。

本試験では、TSP 信号 (Time-Stretched Pulse) と呼ばれる試験信号を用いる。TSP 信号には、一般に Linear TSP と呼ばれる信号 (以下 Lin TSP と略記。White TSP と呼ばれる) と、Logarithmic TSP と呼ばれる信号 (以下 Log TSP と略記。Pink TSP と呼ばれる) の 2 種類がある。図 2.11 に Lin TSP 信号の例を、図 2.12 に Log TSP 信号の例を示す。Lin TSP は、時間に対する周波数掃引速度が一定な掃引純音である。Log TSP は対数周波数軸上で等速に掃引される純音として定義され、低周波数域における掃引速度が遅く、Lin TSP に比べて低周波数域で SN 比が必要な場合に有効である。Lin TSP 信号は、離散時間 k における音源信号 $H_{Lin}(k)$ および逆フィルタ $H_{Lin}^{-1}(k)$ の組み合わせにより定義される。

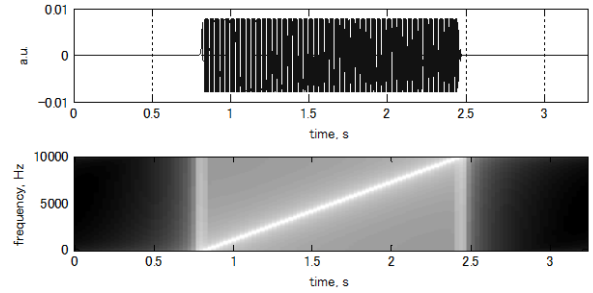


図 2.11 Lin TSP 信号の例

(上段：音圧の時間波形、下段：周波数特性の時間変化)

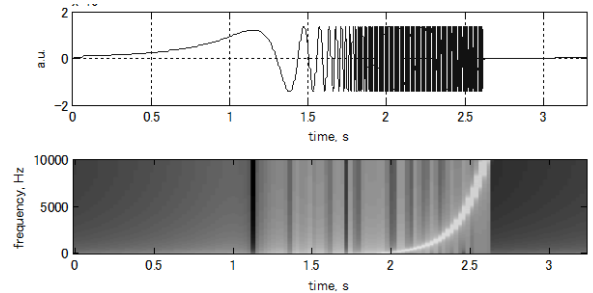


図 2.12 Log TSP 信号の例

(上段：音圧の時間波形、下段：周波数特性の時間変化)

$$H_{Lin}(k) = \begin{cases} \exp(-j4m\pi k^2/N^2), & 0 \leq k \leq N/2 \\ H_{Lin}^*(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (2.1)$$

$$H_{Lin}^{-1}(k) = \begin{cases} \exp(j4m\pi k^2/N^2), & 0 \leq k \leq N/2 \\ H_{Lin}^{-1*}(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (2.2)$$

同様に、Log TSP 信号の音源信号 $H_{Log}(k)$ と逆フィルタ $H_{Log}^{-1}(k)$ は、次式で定義される。

$$H_{Log}(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ \frac{\exp(-jak \log k)}{\sqrt{k}}, & 0 < k \leq N/2 \\ H_{Log}^*(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (2.3)$$

$$H_{Log}^{-1}(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ \sqrt{k} \exp(jak \log k), & 0 < k \leq N/2 \\ H_{Log}^{-1*}(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (2.4)$$

図 2.13 に測定系のブロックダイアグラムを、表 2.8 に測定機器一覧を示す。 $H_{Lin}(k)$ あるいは $H_{Log}(k)$ を D/A 変換してスピーカから放射し、マイクロホンで観測した信号を A/D 変換して $H_{Lin}^{-1}(k)$ あるいは $H_{Log}^{-1}(k)$ を畳み込めば、インパルスレスポンスが得られる。なお、測定されたインパルスレスポンスには、スピーカからマイクロホンまでの音場の伝達特性に加えて、アンプ、スピーカ、マイクロホン、プリアンプ、低域通過フィルタのすべての機器の伝達特性が含まれる。

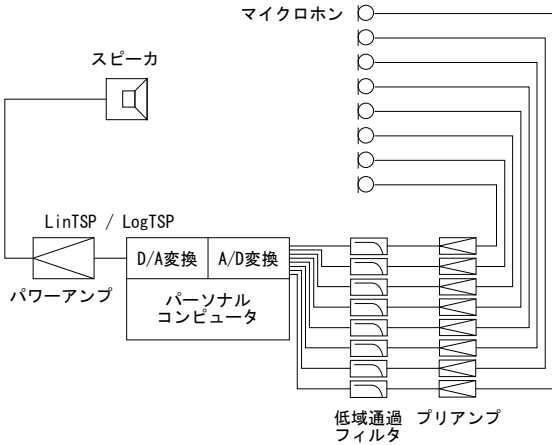


図 2.13 インパルスレスポンス測定
のブロックダイアグラム

表 2.8 測定機器一覧

測定機器	製造者	型番
パーソナルコンピュータ	NEC	Mate MY18A/B-4
D/A・A/D変換器	CONTEC	ADA16-32/2(CB)F
パワーアンプ	Accuphase	Pro-30
スピーカ	Dynavector	DVS-201S
マイクロホン	リオン	NL-15
プリアンプ		
アンチエイリアシング フィルタ	エヌエフ 回路	P-85
音響校正器	リオン	NC-74

表 2.9 にインパルスレスポンス測定条件一覧を示す。当初は Lin TSP で実験を行っていたが、実験条件によっては SN 比が不足することがわかったため、途中から Log TSP に移行した。TSP 信号の使い分けについては、2.6 節および 2.7 節に記述する。実験の大部分は Log TSP で行った。

音響透過試験で上限 2kHz までの測定を行うため、この周波数範囲で平坦な特性となるよう、アンチエイリアシングフィルタの遮断周波数（平坦から -3dB）を 5kHz とした。サンプリング周波数は遮断周波数より十分高い 24000Hz に設定した。TSP 信号長が長いほど測定の SN 比は向上するが、同時に計算負荷の増加により実験の進行が遅くなるため、両者のバランスを考えて設定した。A/D 変換のサンプリング長は、TSP 信号が鳴り終わってから試験室の残響音が十分小さくなる（残響時間は約 10 秒）までの過程を収録できるよう、TSP 信号長と残響時間の和として設定した。同期加算を 4 回行い、SN 比を 6dB 向上させる。収録された信号に逆フィルタをかけて得られるインパルスレスポンスのうち、残響過程を十分に含む前半の約 11 秒間の部分を測定結果として採用した。

測定されたインパルスレスポンスを FFT 分析すると、周波数分解能は $24000/262144 \approx 0.092\text{Hz}$ となる。この分解能でグラフを描画すると詳細すぎてやや見づらいため試験結果

は、周波数軸上で 10 個分のデータの 2 乗振幅を合成して 1 個のデータにまとめ、周波数分解能 0.92Hz の分析結果として表示する。

表 2.9 インパルスレスポンス測定条件一覧

	Lin TSP	Log TSP
アンチエイリアシング フィルタの遮断周波数	5000 Hz	
サンプリング周波数	24000 Hz	
TSP 信号長	$2^{16} = 65536$ 点 (約 2.7 秒)	$2^{18} = 262144$ 点 (約 11 秒)
A/D 変換サンプリング長	$2^{19} = 524288$ サンプル (約 22 秒)	
同期加算	1 回または 4 回 (暗騒音の状況により適宜)	
採用するインパルス レスポンスの長さ	$2^{18} = 262144$ 点 (約 11 秒)	

2.5.2 試験スピーカの指向性

音響試験に用いるスピーカの指向性を測定する。

測定の概要

図 2.14 のように、スピーカを囲む半径 1m の円周上にマイクロホンを配置し、各点においてインパルスレスポンスを測定する。周波数分析して音圧レベル相当値を算出し、角度による音圧レベルの変動を周波数ごとに描画する。

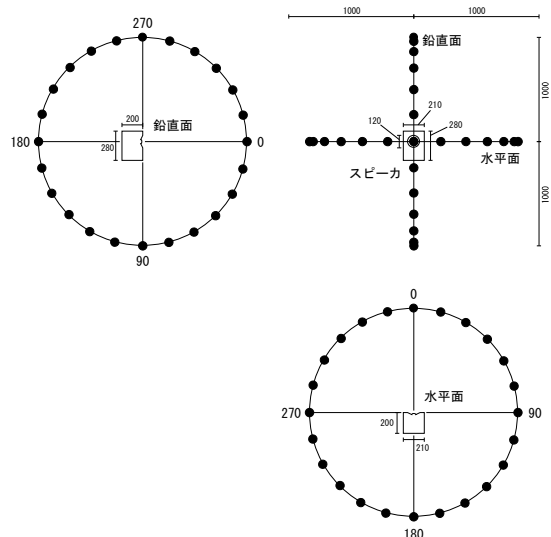


図 2.14 スピーカの指向性測定における
マイクロホンの配置

スピーカとマイクロホンを、図 2.15 のように無響室内に設置する。マイクロホンは 15 度間隔で 2 本設置したまま固定し、スピーカを 30 度ずつ回転させてインパルスレスポンスを測定する。

図 2.16 に示すように、スピーカおよびマイクロホンを取

り付けた三脚を置くため、合板を架台として置いた。反射を抑制するため繊維系吸音材(厚さ約100mm)で架台を覆ったが、低周波数域においてはあまり吸音効果を期待できない。

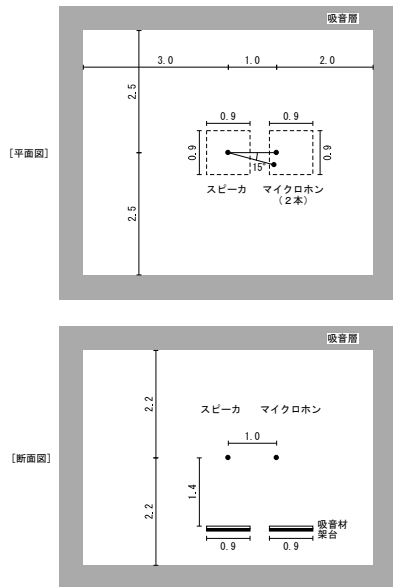


図 2.15 無響室内におけるスピーカの指向性測定

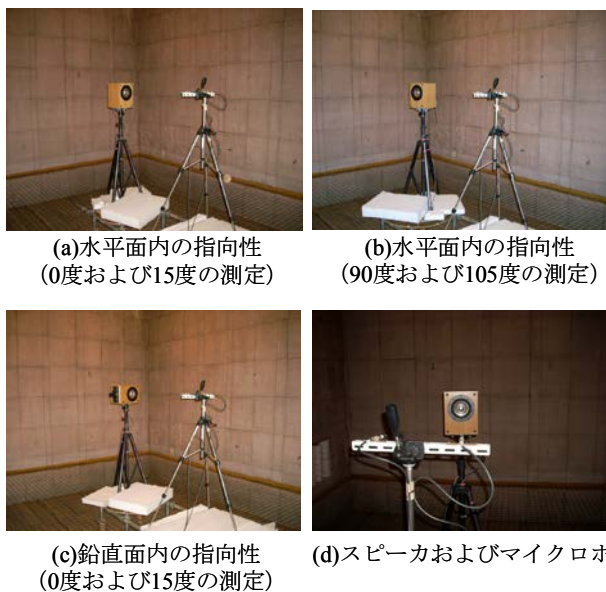


図 2.16 スピーカおよびマイクロホンの配置

室内の反射音を除外した分析

架台および無響室内壁からの反射音を除外するため、インパルスレスポンスの時間波形から直接音のみを抽出して分析を行う。図 2.17 に示すように、反射音は直接音に比べて伝搬経路が長いので、インパルスレスポンスの時間波形上では直接音より遅れて現れる。そこで、直接音を含み反射音を含まないように時間窓を設定すれば、インパルスレスポンスのうち直接音だけを抽出して分析対象とすることができる。

時間窓の中央部は矩形窓、開始部と終了部は Blackman-Harris 窓に準じて設定する。窓の長さ T_W は、直接

音と反射音の時間間隔に応じて適宜設定する。Blackman-Harris 窓 $w_{BH}(t)$ は、窓の長さを T_{BH} とし、次式で定義される。

$$W_{BH}(t) = 0.35875 - 0.48829 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{BH}}\right) + 0.14128 \cos\left(\frac{4\pi t}{T_{BH}}\right) - 0.01168 \cos\left(\frac{6\pi t}{T_{BH}}\right) \quad (2.5)$$

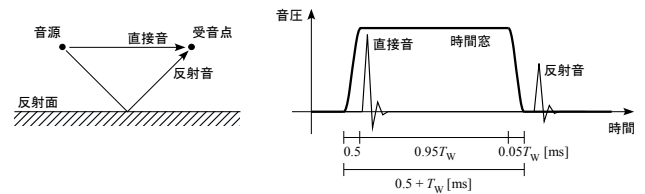


図 2.17 時間窓による時間波形の抽出

図 2.18 に無響室内で測定したインパルスレスポンスの測定例を示す。スピーカからインパルスが出た時刻をゼロ秒とした音圧の時間波形として、表現される。細い黒線のグラフは、観測された波形をそのまま示したものである。インパルス放射の約 3msec 後に直接音と思われる大きな音圧が観測され、その後反射音と思われる音が次々に到達する。図 2.19 に無響室内で想定される反射経路を、表 2.10 に各反射音の到達時刻を示す。経路長から推定される到達時刻は、おおむね実測結果と合致する。したがって、測定されたインパルスレスポンスのうち、9msec 以降に現れる時間波形は図 2.19 で想定した反射音であり、指向性測定には不要な成分であるといえる。

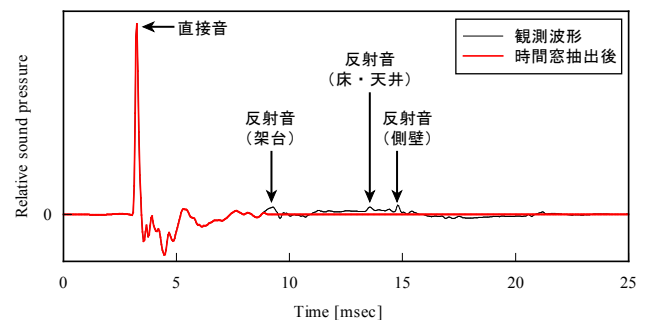


図 2.18 無響室内におけるインパルスレスポンスの測定例

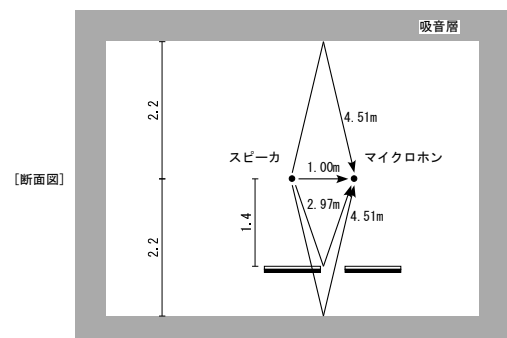


図 2.19 無響室内の反射経路

表 2.10 各経路の到達時刻

経路	推定		実測
	経路長 [m]	到達時刻 [msec]	到達時刻 [msec]
直接音	1.00	2.9	3.2
反射音：架台	2.97	8.7	9.3
反射音：床面と天井面	4.51	13.1	13.6
反射音：側壁	5.10	14.8	14.8

図 2.20 に、反射音の除外による音圧レベル分析結果を示す。比較のため、反射音を含むインパルスレスポンスの分析結果もあわせて示す。200Hz以上の周波数範囲では両者の差は小さく、無響室内の吸音処理は十分であるといえる。これより低い周波数範囲では、直接音のみの結果は滑らかな特性を示すのに対し、反射音を含む結果は大きく揺らぐ。直接音と反射音の干渉により、音圧レベルの増減が生じているものと推測される。

以下、指向性測定においては、図 2.17 の方法で反射音を除外した分析を行う。

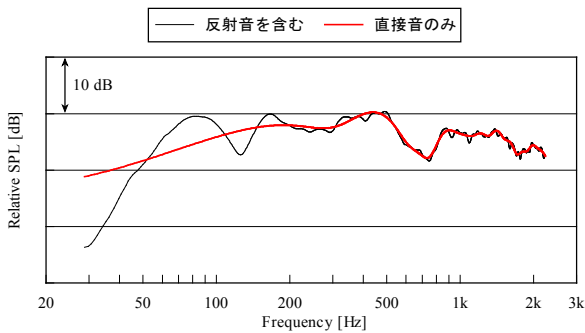


図 2.20 反射音の除外による音圧レベル分析結果

試験スピーカの指向性の測定結果

図 2.21 に水平面内の指向性を、図 2.22 に鉛直面内の指向性を示す。正面方向の音圧レベルを 0dB とした相対音圧レベルで表している。1/3 オクターブバンド中心周波数に近い純音スペクトル (FFT の結果) の音圧レベルを示したものであり、1/3 オクターブバンド音圧レベルではない。

どの程度の指向性までを全指向性とみなすのか、一般的な基準はない。ここでは仮に「正面方向と比べた音圧レベル低下幅が 3dB 以内」を基準とすると、スピーカが全指向性といえるのはおよそ 250Hz 以下の周波数範囲であるといえる。これ以上の周波数範囲ではスピーカ背面方向で音圧レベルが大きく減少し、1kHz 以上では正面と背後の差が 10dB を越える。

全指向性の点音源を想定した数値解析 (3D WBM および、その比較対象として実施した FEM) の結果を、2.6 節および 2.7 節に記述される音響透過試験の結果と比較する場合には、ここに示した指向性の影響について留意する必要がある。

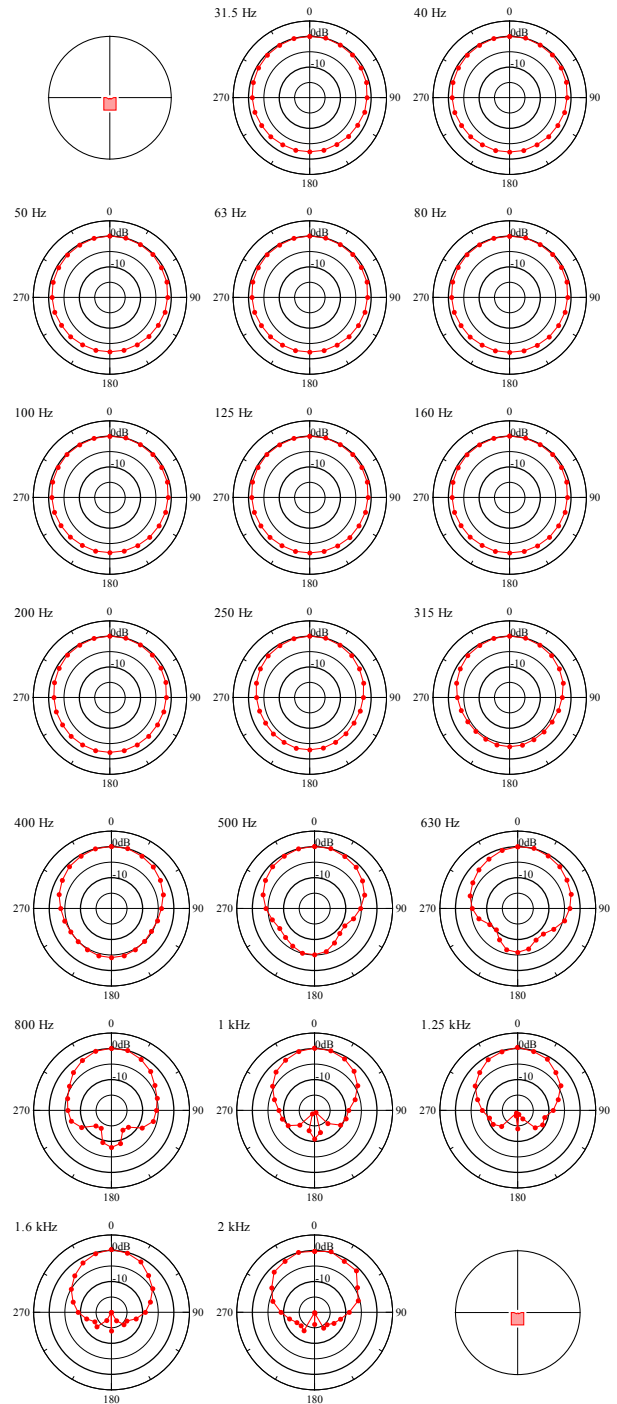


図 2.21 スピーカの指向性：水平面内

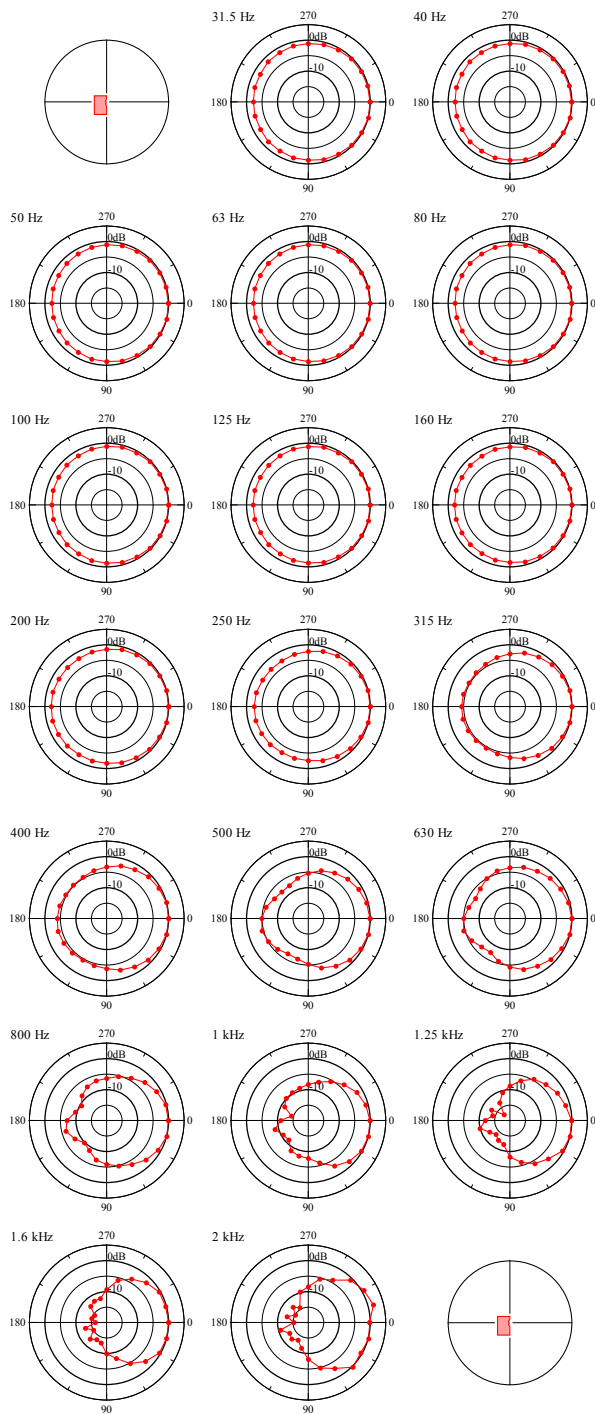


図 2.22 スピーカの指向性：鉛直面内

2.5.3 音響パワーレベル相当値の測定

後述の音響透過試験で得られる結果を音源出力で基準化するため、試験音の音響エネルギーレベル（定常音の音響パワーレベルに相当する値）を測定する。

「音響パワーレベル」と「音響エネルギーレベル」
音源の出力の大きさを表す量には、「音響パワーレベル」

と「音響エネルギーレベル」の2種類がある。表 2.11 にそれぞれの概念を示す。

換気ファンの騒音など、ある程度定常な状態が続く音源については、音響パワー（音源が空气中に放射する単位時間当たりの音響エネルギー）の平均値 \bar{P} [W] に相当する音響パワーレベル L_W [dB] を用いる。定常音場を想定した数値解析では、音源出力は音響パワーレベルで表される。音源から離れた受音位置における暴露量は、自乗音圧振幅の平均値 $\overline{|p|^2}$ [Pa²] に相当する音圧レベル L_p [dB] となる。なお、慣例的に、パワーには大文字の P (ISO など国際的には W を用いる場合もある)、音圧には小文字の p が用いられる。

一方、トンネル発破音のように単発的あるいは過渡的な音源については、瞬時パワー $P(t)$ [W] を試験音の放射開始から終了まで積分した音響エネルギー E [J] に相当する音響エネルギーレベル L_J [dB] を用いる。音響透過試験に用いるインパルスレスポンスは単発音に、スピーカから放射される TSP 信号そのものは過渡音に分類されるため、これらの出力を表すには音響エネルギーレベルを用いるのが適切である。音源から離れた受音位置における暴露量は、自乗瞬時音圧 $|p(t)|^2$ [Pa²] を全時間区間で積分した値に相当する単発音圧暴露レベル L_{pE} [dB] となる。

表 2.11 音響パワーと音源エネルギーの概念

	音源出力	受音位置の暴露量
定常音	音響パワーレベル $L_W = 10 \log_{10} \left[\frac{\bar{P}}{P_0} \right]$	音圧レベル $L_p = 10 \log_{10} \left[\frac{\overline{ p ^2}}{P_0^2} \right]$
単発音過渡音	音響エネルギーレベル $L_J = 10 \log_{10} \left[\frac{E}{E_0} \right]$ $= 10 \log_{10} \left[\frac{\int P(t) dt}{E_0} \right]$	単発音圧暴露レベル $L_{pE} = 10 \log_{10} \left[\frac{\int p(t) ^2 dt}{P_0^2} \right]$

音場の伝達特性を表す量の定義

自由音場において、音響パワーレベル L_W [dB] の定常音を放射する点音源から r [m] 離れた位置の音圧レベル L_p [dB] は、次式で表される。

$$L_p = L_w - 11 - 20 \log_{10} r \quad (2.6)$$

同様に、自由音場において、音響エネルギーレベル L_J [dB]の単発音を放射する点音源から r [m]離れた位置の単発音圧暴露レベル L_{pE} [dB]は、次式で表される。

$$L_{pE} = L_J - 11 - 20 \log_{10} r \quad (2.7)$$

すなわち、点音源から受音点までの伝達特性は、音源の種類に関わらず同一の形式で表される。そこで、音場の伝達特性を表現する量として、音源出力で基準化した音圧レベル $L_{p,norm}$ [dB]を次式で定義して用いる。

$$L_{p,norm} \equiv L_p - L_w = L_{pE} - L_J \quad (2.8)$$

例えば、自由音場では $L_{p,norm} = -11 - 20 \log_{10} r$ となる。

透過音に関する数値解析と音響試験を比較する場合、弾性板の音源室側と受音室側の観測点において、数値解析の L_w と L_p から求めた平板表裏の音圧レベル差 $SPL_difference$ と、音響試験の L_J と L_{pE} から求めた平板表裏の音圧レベル差 $SPL_difference$ を比較する。ここで、 $SPL_difference$ を次式で定義する。

$$SPL_diffirence = \text{音源室側観測点の } L_{p,norm} - \text{受音室側観測点の } L_{p,norm} \quad (2.9)$$

2.5.3.1 JIS規格に準拠した予備測定

試験音の音響エネルギーレベル L_J について、インパルスレスポンス法による測定の前に、JIS規格に準拠した表 2.12 に示す4種類の測定を予備的に行う。残響室法(隅)で室の隅にスピーカを置いた測定を行うのは、2.6節と2.7節の音響透過試験における音源配置を再現するためである。

表 2.12 予備測定の方法

本報告書での呼称	音源位置	JIS規格	概要
無響室法(空中)	空中	JIS Z 8732	無響室内に設置した音源を取り囲む仮想球面上で L_{pE} を測定し、球面上で積分して L_J を算出する。
残響室法(空中)	空中	JIS Z 8734	音源を設置した残響室内の数点で L_{pE} を測定し、拡散音場を仮定した換算式で L_J を算出する。
残響室法(床)	床面上		
残響室法(隅)	室の隅		

図 2.23 に示す機器を無響室または残響室に設置し、測定を行った。スピーカから Lin TSP または Log TSP を放射するが、A/D 変換後にインパルスレスポンス分析するのではなく、実時間分析器で 1/3 オクターブバンド L_{pE} を算出する。1/3 オクターブバンド実時間分析器(RION SA-29)以外は、図 2.13 および表 2.8 と同一の機材を使用する。

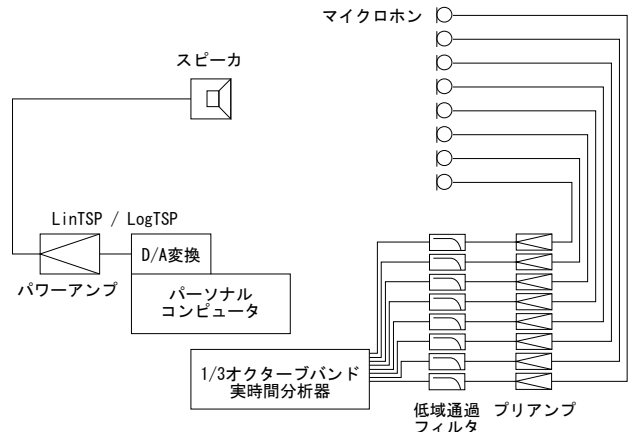


図 2.23 音響エネルギーレベル予備測定のプロックダイアグラム

無響室法

無響室法(空中)の測定は、2.5.2節の指向性測定と同じ配置で行う。スピーカから Lin TSP または Log TSP を放射し、図 2.14 の全受音点で 1/3 オクターブバンド L_{pE} を測定する。スピーカを囲む仮想球面を通過するエネルギーの和から L_J を算出するため、仮想球面上で各受音点が受け持つ面積により重み付けしながら L_{pE} の測定値を加算する。なお、図 2.14 の「鉛直面」と「水平面」の両方に垂直な面内の指向性を無視する。

この予備測定ではインパルスレスポンス分析による直接音の抽出を行わないため、低周波数域では無響室表面の反射の影響(図 2.20 参照)を含む結果となる。

残響室法

残響室法(空中、床、隅)の測定は、不整形残響室(容積 513m^3 、表面積 382m^2)で行った。図 2.24 に残響室法におけるスピーカとマイクロホンの配置を、表 2.13 に残響室法におけるスピーカとマイクロホンの座標を、図 2.25 に音源スピーカの設置の様子を示す。マイクロホンの点数は6点とした。

スピーカから Lin TSP または Log TSP を放射し、それぞれに対して 1/3 オクターブバンド L_{pE} を測定した。別途測定した室の残響時間を加味し、 L_J を算出した。

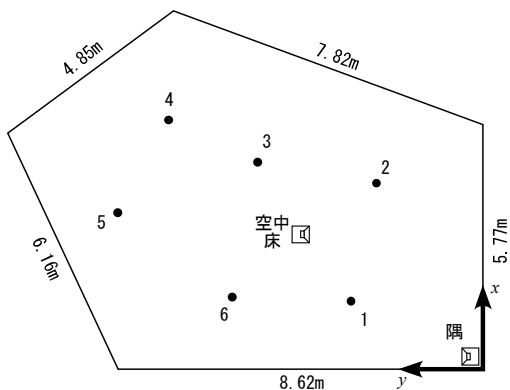


図 2.24 残響室法（空中、床、隅）におけるスピーカとマイクロホン 6 点の配置

表 2.13 残響室法（空中、床、隅）におけるスピーカとマイクロホンの座標

	スピーカ			マイクロホン		
	空中	床	隅	1	2	3
X[m]	3.19	3.19	0.11	1.59	4.44	4.90
Y[m]	4.31	4.31	0.21	3.09	2.53	5.32
H[m]	1.52	0.12	0.12	1.67	1.35	1.67

	スピーカ			マイクロホン		
	空中	床	隅	4	5	6
X[m]	3.19	3.19	0.11	5.96	3.68	1.70
Y[m]	4.31	4.31	0.21	7.39	8.64	5.94
H[m]	1.52	0.12	0.12	1.51	1.35	1.51



(a)残響室法（空中）

(b)残響室法（床）



(c)残響室法（隅）

図 2.25 音源スピーカ設置の様子

測定結果：TSP 種類による差異、無響室法と残響室法の差異

図 2.26 に、Lin TSP と Log TSP、無響室法（空中）と残響室法（空中）の音響エネルギーレベル予備測定の結果比較を示す。なお、この測定の根拠にしている JIS Z 8732（無響室法）と JIS Z 8734（残響室法）の適用範囲は、100Hz 以上である。100Hz 未満の値は参考として示す。

まず Lin TSP と Log TSP を比較する。全周波数範囲にわたり Log TSP は Lin TSP より大きな音響エネルギーレベルを示し、その差は特に低周波数域で顕著である。今回の設定では、Log TSP の放射時間は Lin TSP の 4 倍長い（表 2.9 参照）ために $10\log_{10}4=6[\text{dB}]$ 有利であり、さらに元々低周波数域の掃引時間が長く定義されている（図 2.12 参照）ことが反映されたものと考えられる。

次に、無響室法と残響室法を比較する。Lin TSP と Log TSP のどちらにおいても、無響室法と残響室法の全体的な傾向はよく合致する。両者の差は、TSP の種類によらずほぼ同一である。125Hz で無響室法の方が小さく、100Hz、160Hz、200Hz では逆に無響室法の法が大きいという傾向は、図 2.20 に示した無響室内壁の反射の影響に酷似している。これは無響室内の反射により生じる干渉の影響であると考えられ、残響室法の結果の方が信頼性が高いものと推測される。言い換えれば、これらの周波数において無響室法の測定を行う場合には、インパルスレスポンス法による反射音除去が必要である。

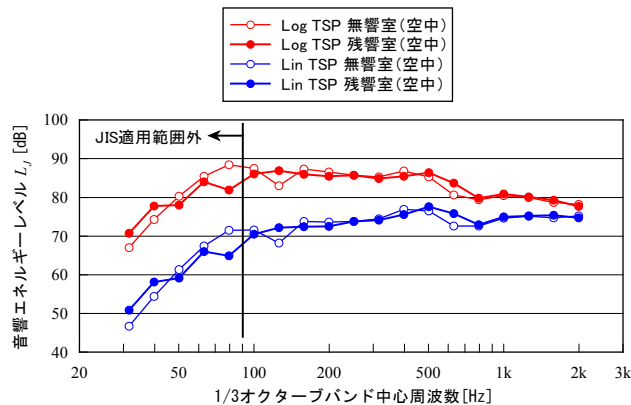


図 2.26 音響エネルギーレベル予備測定：

TSP 種類による差異、無響室法と残響室法の差異

測定結果：スピーカ設置位置による差異

図 2.27 に Lin TSP でのスピーカ設置位置（空中、床、隅）による音響エネルギーレベルの結果比較を、図 2.28 に Log TSP でのスピーカ設置位置（空中、床、隅）による音響エネルギーレベルの結果比較を示す。

630Hz 以下の範囲では、TSP の種類に関係なく、隅、床、空中の順に大きな値を示す。床では空中に比べて放射面積が 1/2（インテンシティが 2 倍）になるため 3dB 増加、隅では放射面積が 1/8 になるため 9dB 増加するものと推測される。周波数が低いほど、この推論と合致する。

800Hz 以上の範囲では、逆に隅が最も小さくなるなど、

630Hz以下とは異なる傾向を示す。スピーカと壁の距離が1/4波長以上となり、スピーカ近傍に干渉など波動的な性質が現れるためである。

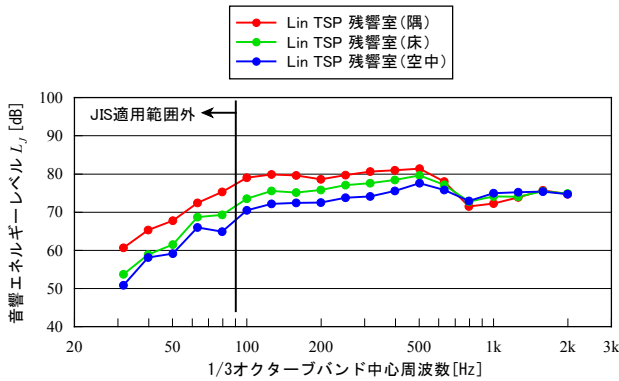


図 2.27 音響エネルギーレベル予備測定：
スピーカ設置位置による変化(Lin TSP)

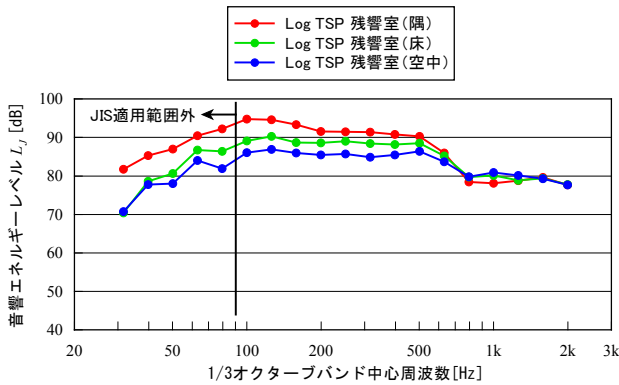


図 2.28 音響エネルギーレベル予備測定：
スピーカ設置位置による変化(Log TSP)

2.5.3.2 インパルスレスポンス法による測定

予備測定の結果をふまえて、インパルスレスポンス法により試験音の音響エネルギーレベル L_j を測定する。測定の方針は以下のとおりである。

- (1) 定常純音を想定した数値解析との詳細な比較に供するため、1/3 オクターブバンドレベルではなく、FFT に基づく純音スペクトルの音圧レベルとして測定する。
- (2) JIS Z 8734 (予備測定の残響室法) は、拡散音場を仮定するのに十分な数のモード周波数を含む 1/3 オクターブバンドにおける L_j 測定を前提としているため、純音スペクトルの測定という目的には適用できない。JIS Z 8732 (予備測定の無響室法) では、純音スペクトルとしての L_j 測定に関する記述はないものの、原理的には適用可能であるので、これを流用する。したがって、ここで行う測定は、厳密には JIS には準拠しない。
- (3) 無響室法で低周波数域まで測定する場合、インパルスレス

ポンス法による内壁反射の除去が必要である。

- (4) 後述の音響透過試験では、室の隅にスピーカを配置する。予備測定の結果によれば、スピーカを室の隅に置くと L_j は増加する (図 2.27、図 2.28 参照)。無響室法ではこの増分を測定できないため、予備測定の結果に基づき増分を推定する。

空中に置かれたスピーカの音響エネルギーレベル

インパルスレスポンス法を用いて、空中 (床面などの反射面から離れた位置) に置かれたスピーカから放射される試験音の音響エネルギーレベルを測定する。

無響室において、図 2.14 のようにスピーカとマイクロホンを設置する。スピーカから Lin TSP または Log TSP を放射し、各マイクロホン位置におけるインパルスレスポンスを算出する。無響室内面からの反射音を除去し (図 2.15~図 2.20 参照)、直接音成分を対象とする L_{pE} を純音スペクトルとして求める。仮想球面上で各マイクロホン位置が受け持つ面積により重み付けしながら L_{pE} の値を加算し、 L_j を算出する。

なお、インパルスレスポンスのうち直接音区間の時間長さは 6.1msec であり、164Hz の 1 周期に相当する。これより低い周波数範囲では、直接音として抽出した区間に 1 周期未満の波形しか含まれていないため、測定結果が正確でない可能性がある。

図 2.29 に Lin TSP に関する音響エネルギーレベルの測定結果を、図 2.30 に Log TSP に関する音響エネルギーレベルの測定結果を示す。縦軸は L_j を表すが、TSP 信号の長さや FFT 点数など分析条件の影響を受ける相対値であり、予備測定で示した L_j の絶対値 (図 2.26~図 2.28) とは異なることを示すため、「未校正」と表示した。

L_j の周波数特性の形状は、Lin TSP と Log TSP の間でほぼ同一となる。TSP 信号をインパルスレスポンスに変換してから周波数分析したためであり、TSP 信号をそのまま周波数分析した図 2.26 が掃引速度の影響を受けるのとは異なる。

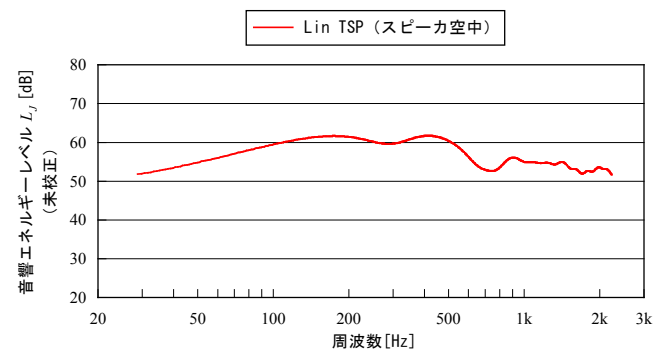


図 2.29 音響エネルギーレベル(未校正)：
Lin TSP、スピーカ空中

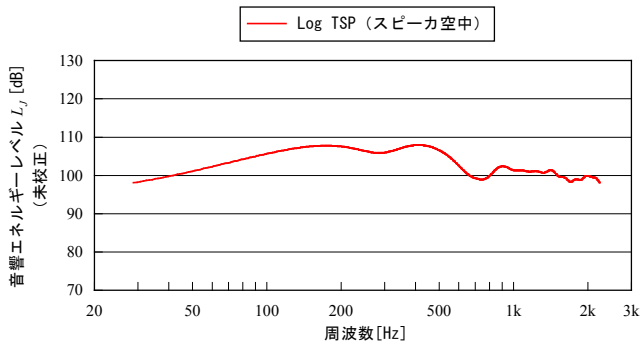


図 2.30 音響エネルギーレベル (未校正) :
Log TSP、スピーカ空中

室の隅に置かれたスピーカの音響エネルギーレベル

予備測定で示したように、空中にあったスピーカを室の隅に移動すると、音響エネルギーレベル L_j が増加する。無響室法ではこの影響を測定できないため、予備測定の結果から影響を推定して L_j を求める。

スピーカを空中から室の隅に移動することによる L_j 変化を、図 2.31 のように推定する。125Hz 以上の帯域においては、予備測定で得られた空中と室隅の 1/3 オクターブバンド L_j の差を周波数軸上で補間し、純音スペクトル L_j における空中と室隅のレベル差とする。125Hz 以下の帯域においては、予備測定で 125Hz と 160Hz の値から補外する。その際、1Hz では室隅の影響が理論値どおりの 9dB になると仮定し、125Hz、160Hz の値をあわせた 3 点のデータから 2 次補間する。

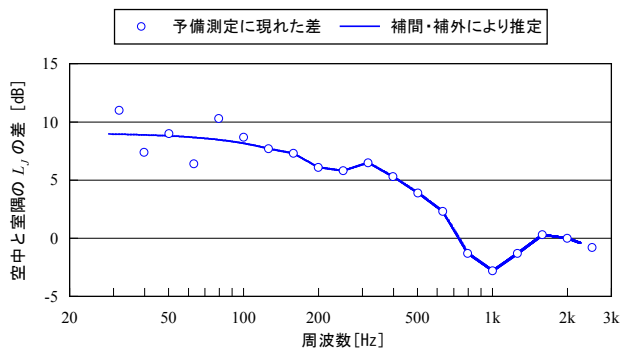


図 2.31 スピーカを室の隅に置くことによる
音響エネルギーレベル変化の推定

室隅の影響 (図 2.31) を空中における L_j (図 2.29、図 2.30) に加算し、室隅における L_j とする。図 2.32 に Lin TSP の L_j を、図 2.33 に Log TSP の L_j を示す。低周波数域で L_j が増加する一方、1kHz 周辺では逆に減少する。これらの値を、2.6 節および 2.7 節の音響透過試験における試験スピーカの音響エネルギーレベルとして用いる。

前述のとおり、残響室法は純音スペクトル L_j の測定には不適切である。参考のため、図 2.34 に残響室法 (隅) で測定した Lin TSP の L_j を、図 2.35 に残響室法 (隅) で測定した Log TSP の L_j を示す。全体的な傾向としては、残響室法は無

響室法と似ているが、非常に激しい山谷をもつ周波数特性となり、シングルコーンスピーカの周波数特性としては極めて不自然である。試験スピーカの L_j としては不適切であると考えられるため、採用しない。

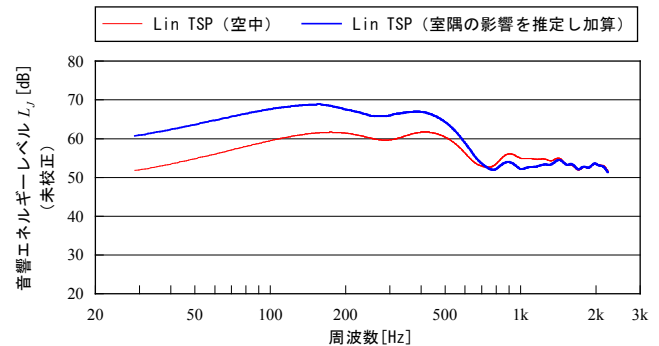


図 2.32 音響エネルギーレベル (未校正) :
Lin TSP、スピーカ室隅

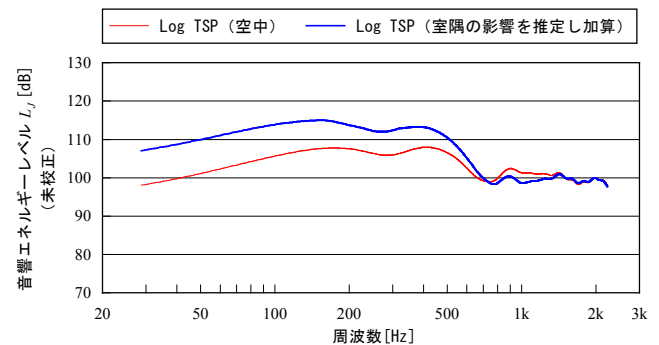


図 2.33 音響エネルギーレベル (未校正) :
Log TSP、スピーカ室隅

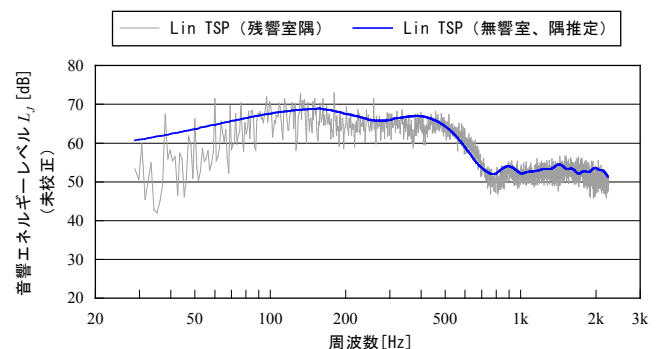


図 2.34 音響エネルギーレベル (未校正) :
Lin TSP、残響室法と無響室法の比較

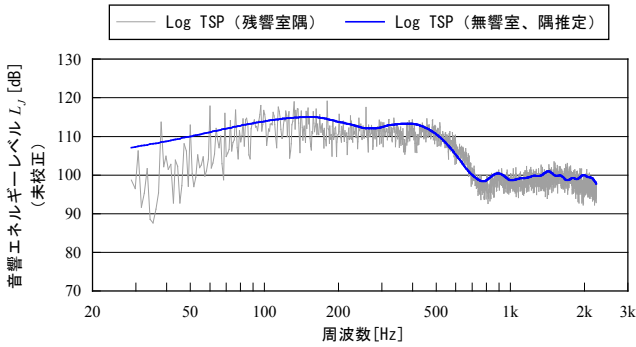


図 2.35 音響エネルギーレベル (未校正) :
Log TSP、残響室法と無響室法の比較

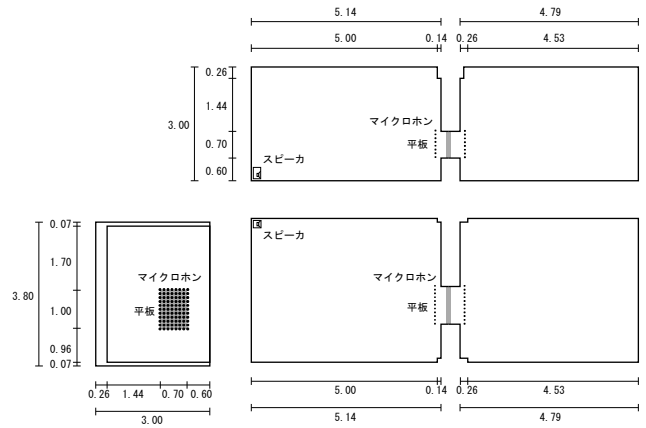


図 2.36 残響室—無響室試験の配置 (単位 m)

2.6 残響室—無響室試験

平板を透過する音について、入射側を残響室、透過側を無響室の状態にして、測定を行う。

2.6.1 測定方法

図 2.36 および図 2.37 のように、直方体の残響室の隅にスピーカを置き、開口部に設置された平板の表裏にマイクロホンを $11 \times 8 = 88$ 点ずつ配置する。スピーカから Log TSP 信号を放射し、各マイクロホン位置でインパルスレスポンスを測定する。縦に並んだ 8 点で同時に測定を行うものとし、マイクロホンを固定した支柱を 11 ヶ所に移動しながら測定を繰り返す。

図 2.38 に平板を埋め込んだ界壁の構造を示す。十分な遮音性能を持たせるため、石膏ボード 12.5mm + コンクリート 170mm + 石膏ボード 12.5mm の 3 重壁とした。石膏ボードとコンクリートの間の空間の共鳴を防ぐため、グラスウールを挿入した。

図 2.39 に音源側試験室の様子を示す。この室は、基本的に ISO 15186-1 の要件 (ISO 140-1 と共通) を満たす。ただし、数値解析における境界条件設定を容易にするため、音源室内の壁面に設置された吸音材や拡散体は除去してコンクリートの露出面積を多くし、完全反射面に近い状況で試験を行う。

図 2.40 に透過側試験室の様子を示す。厚さ約 100mm の吸音材を並べた仮設無響室になっている。吸音材の厚さが十分でないため、特に低周波数域で反射音が生じ、無響室条件を実現できていない可能性が懸念される。

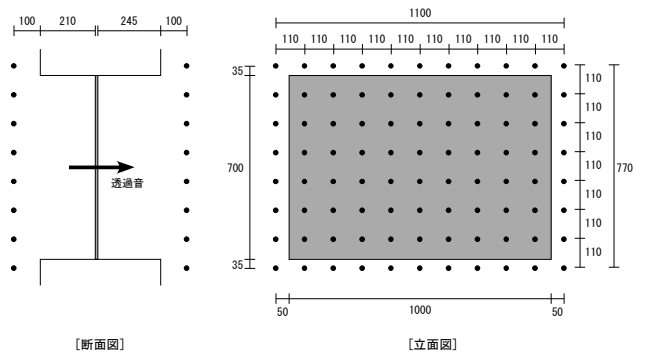
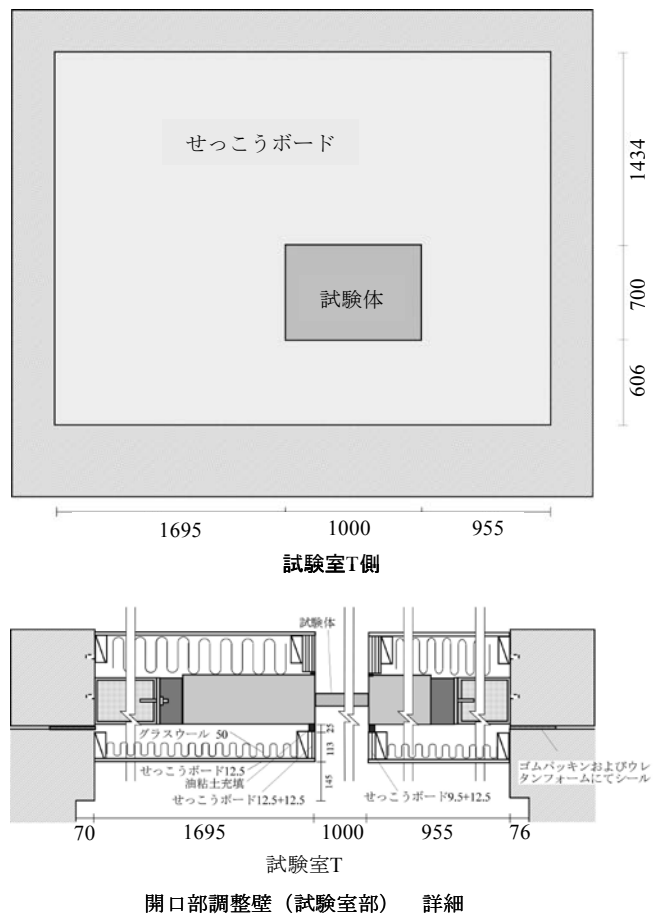


図 2.37 試験体とマイクロホンの位置関係 (単位 mm)



開口部調整壁 (試験室部) 詳細

図 2.38 界壁の構造 (単位 mm)



図 2.39 音源側試験室の様子

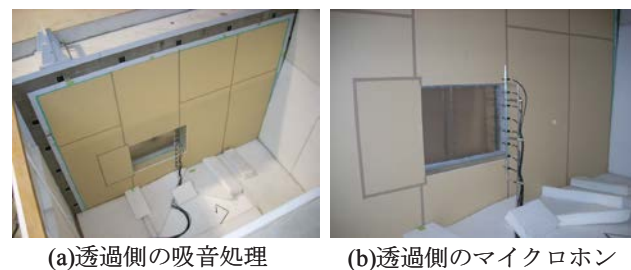


図 2.40 透過側試験室の様子

仮設無響室部における反射音の取り扱い

以下に記す音響透過試験では、試験スピーカから TSP 信号を放射し、透過音をインパルスレスポンスとして測定する。前述のとおり、透過側は常設の無響室ではなく、仮設の吸音材により簡易的に作られた無響室である。吸音材の厚さの不足などにより、吸音処理はおそらく不完全であり、図 2.41 の経路 A のように透過音の測定結果に影響を及ぼしているものと考えられる。

無響室部の床面の反射は、原理的には図 2.17 の方法でインパルスレスポンスの時間波形から除去可能である。しかし、時間波形から経路 A 以降の成分を除去すると、音源室内を拡散音場とするために必要な経路 B の反射成分も同時に除去される。すなわち、本来の測定対象である経路 B を残したまま経路 A だけを除外することはできない。

したがって、以下に記す測定では、経路 A などの仮設無響室部における反射音を除外せず、インパルスレスポンスの全時間区間を FFT 分析の対象とする。仮設無響室部における反射音の影響については、後述の 2.6.4 節で検討する。

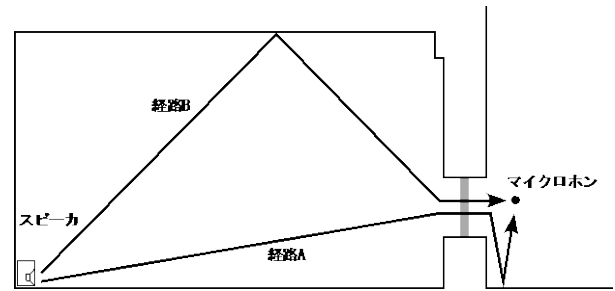


図 2.41 仮設無響室の反射（経路 A）と音源側試験室内壁の反射（経路 B）

分析方法、結果の表示方法

音源側 88 点、透過側 88 点の各マイクロホン位置において TSP 信号を収録し、長さ 262144 点（約 11 秒）のインパルスレスポンスを測定する。インパルスレスポンスの全時間区間を対象として FFT 分析を行い、単発音圧暴露レベル $L_{pE}[\text{dB}]$ 相当値を純音スペクトルとして算出する。 L_{pE} を音源の音響エネルギーレベル $L_J[\text{dB}]$ で基準化した音圧レベル $L_{p,norm}[\text{dB}]$ を次式で算出し、音場の伝達特性を表現する測定結果として表示する。

$$L_{p,norm} \equiv L_{pE} - L_J \quad (2.10)$$

$L_{p,norm}$ の定義については、2.5.3 節の式(2.6)～式(2.8)、表 2.11 を参照されたい。

$L_{p,norm}$ を算出する具体例を示す。図 2.42 は、試験音源の L_J (図 2.33 参照)、アルミ 10mm の平板を対象とした音源側 88 点の平均 L_{pE} 、透過側 88 点の平均 L_{pE} である。これらはすべて校正されていないため L_J や L_{pE} の絶対値を表してはいるが、すべて同じ分析条件で測定してあるため、相対レベル差は保証されている。式(2.10)にもとづき、 L_{pE} から L_J を差し

引いて求めた $L_{p,norm}$ をグラフ化したものが、2.6.2節に示す図2.43 および図2.46である。

以降では、すべて $L_{p,norm}$ を表示している。式(2.8)の定義により、音圧レベルを音響パワーレベルで基準化して $L_{p,norm}$ に換算する。

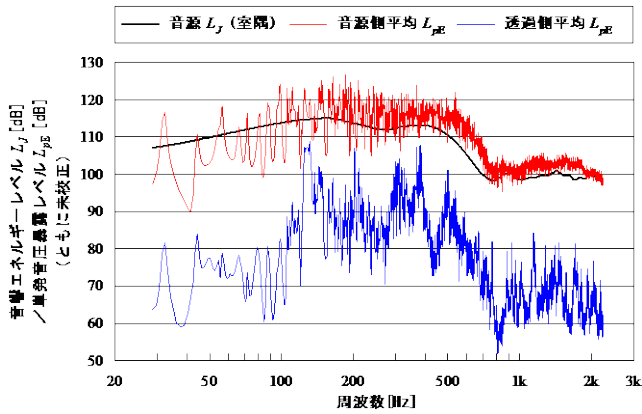


図 2.42 試験音の L_j 、音源側および透過側の平均 L_{pE}

2.6.2 測定結果：アルミ平板（厚さ 10mm）

厚さ 10mm のアルミ平板に関する測定結果を示す。

音圧レベルの周波数特性（低周波数領域）

図 2.43 に、音源側のマイクロホン 88 点で平均した $L_{p,norm}$ と透過側のマイクロホン 88 点で平均した $L_{p,norm}$ 測定結果とモード周波数の簡易計算値を示す。ここでは考察のため 200Hz 以下の結果を拡大して示す。

音圧レベルは複雑な周波数特性を示すが、音源側と透過側のグラフはおおむね平行に推移する。これは試験室の音響固有モードに関係しているものと推測される。試験室の音響固有モード周波数を $l_x \times l_y \times l_z$ [m] の直方体の室形状を想定した次式により簡易的に計算し、実測結果と比較する。

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad \text{[Hz]} \quad (2.11)$$

図 2.43 に、室寸法を $l_x=5.14$ 、 $l_y=3.80$ 、 $l_z=3.00$ [m] として計算した音響固有モード周波数と実測結果の比較を示す。100Hz 以下では、モード周波数の簡易計算値が、音圧レベル測定値のピークとよく合致する。100Hz 以上ではモード周波数が非常に混みあうため実測との比較は難しいが、モードが存在しないと予想される帯域 (100Hz~105Hz、125Hz~130Hz、150Hz~155Hz など) は実測結果とよく合致する。

図 2.44 に同じ簡易計算式を用いた 1/3 オクターブバンドに含まれる音源側試験室における固有モードの数の推定を示す。高周波数域では非常に密な間隔で音源室のモードが出

現することになる。

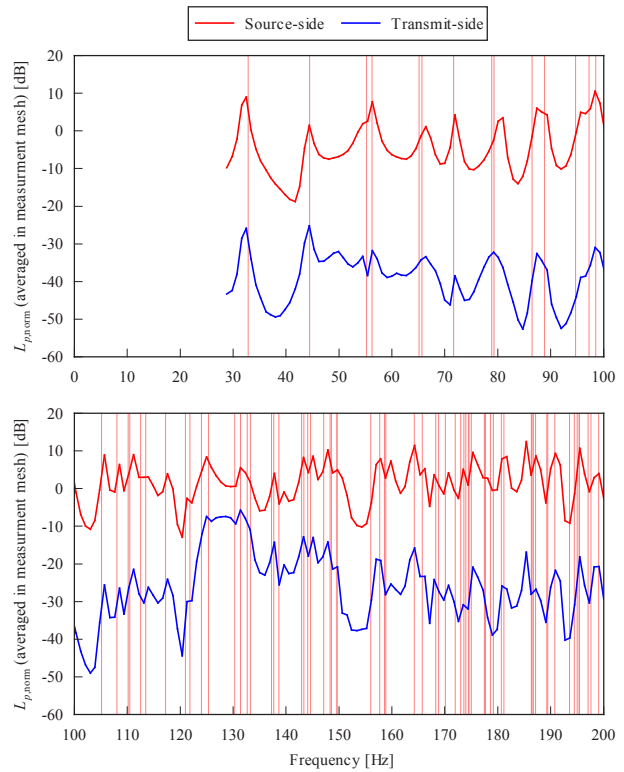


図 2.43 $L_{p,norm}$ 測定結果とモード周波数簡易計算値（音源室）の比較

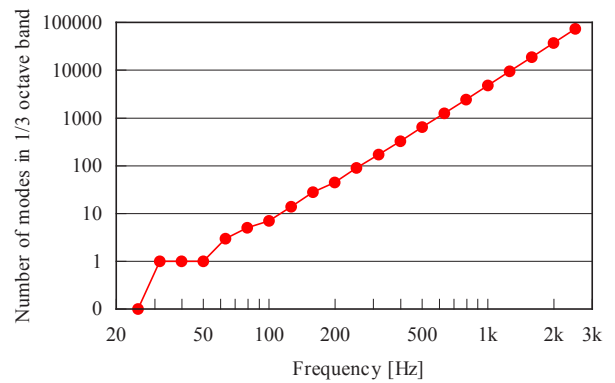


図 2.44 1/3 オクターブバンドに含まれる音源室の固有モード数の推定値

音源室内音場の固有モードに起因する音圧レベル分布

前述のとおり、測定された音圧レベルは音源室内の固有モードに強く影響されている。音源側マイクロホンによる測定結果から、音響固有モード形状が明確に現れている周波数を選び、音圧レベル分布を描画して図 2.45 に示す。この図は図 2.39(c)と同じ視点で描画されており、図中の外枠は壁面の概形を、破線はモードの節の推定位置をそれぞれ表す。

測定された音圧レベル分布の谷の位置は、モードの節の推定位置とおおむね一致している。図 2.43 に示した周波数特性の山谷は、音源室の固有モードの影響を受けた結果であるといえる。

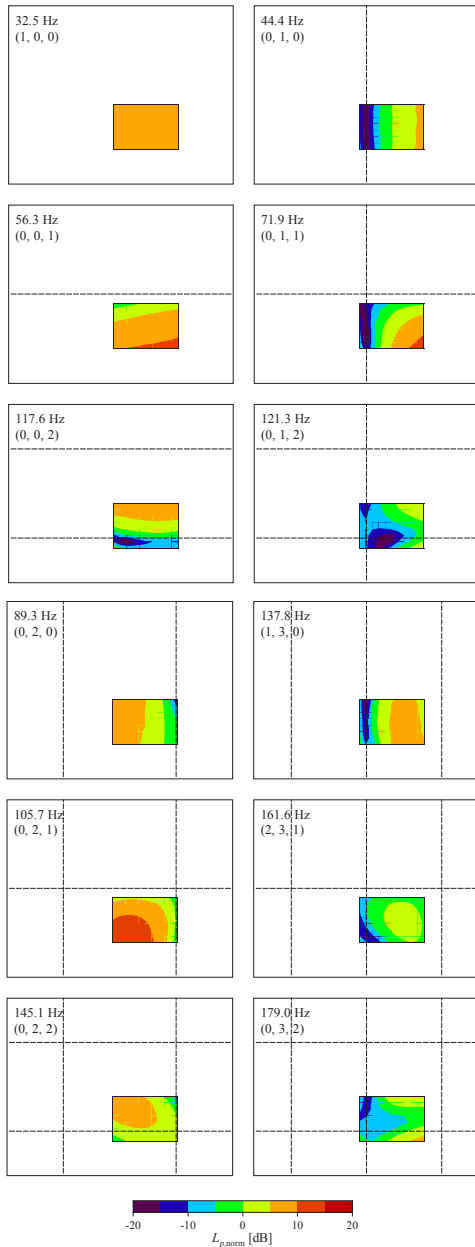


図 2.45 音源室内音場の固有モードに起因する音圧レベル分布（音源側測定面）

音圧レベルの周波数特性

図 2.46 に、透過側測定における暗騒音の $L_{p, norm}$ の周波数特性を示す。ほぼ全域で信号対雑音比（SN 比）が確保されている。音源側と透過側の音圧レベルが複雑な周波数特性を示すのは、前述のとおり、音源室の音響固有モードによるものである。

音源室の $L_{p, norm}$ は、500Hz 以上ではおおむね 0dB から 10dB の範囲にある。理想的な拡散音場では、室内の表面積を $S[m^2]$ 、平均吸音率を $\bar{\alpha}$ とすると、音源から $r[m]$ 離れた位置における $L_{p, norm}[dB]$ は、次式で計算できる。

$$L_{p, norm} = L_p - L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}} \right) \quad (2.12)$$

$S=90.5[m^2]$ 、 $r=5.53[m]$ とすると、おおむね $0.005 < \bar{\alpha} < 0.04$ の範囲で $0 < L_{p, norm} < 10[dB]$ となる。この $\bar{\alpha}$ の値はコンクリート面で囲まれた室の平均吸音率として妥当な範囲にあることから、 $L_{p, norm}$ の測定結果も妥当なものであるといえる。低周波数域の $L_{p, norm}$ が低いのは、モード密度が十分でなく拡散音場が成立していないことによるものと推測される。

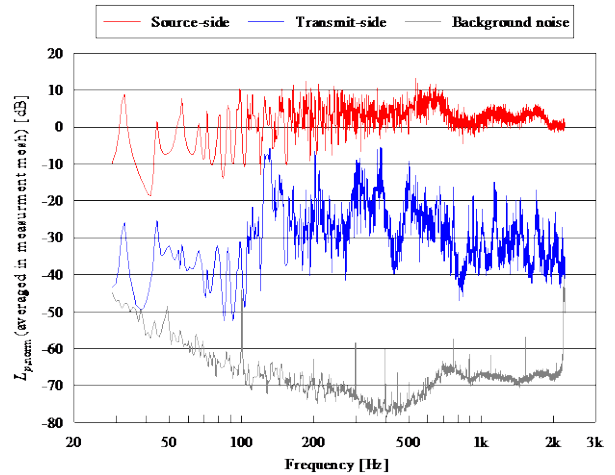


図 2.46 測定面内平均音圧レベル（音源側、透過側、透過側の暗騒音）：アルミ 10mm

平板表裏の音圧レベル差

音源側の平均 $L_{p, norm}$ と透過側の平均 $L_{p, norm}$ の差を計算し、平板の遮音性能について検討する。図 2.47 に平板表裏の音圧レベル差を示す。また参考のため、両 $L_{p, norm}$ を 1/3 オクターブバンドレベル化した値の差分もあわせて示す。

音圧レベル差を見ると、130Hz、200Hz、315Hz など特定の周波数で、音圧レベル差が極端に小さな値となる。これらの周波数は、3章の図 3.2 における平板の構造固有周波数に近い。また、後掲の図 2.49 における 131.4Hz、202.8Hz、311.7Hz の透過側音圧レベル分布が、平板の固有モード形状と同様になる。すなわち、板の固有振動による放射音が透過側の音圧レベルを増加させ、遮音性能の低下を引き起こしていると考えられる。これに関しては、3章で改めて考察する。

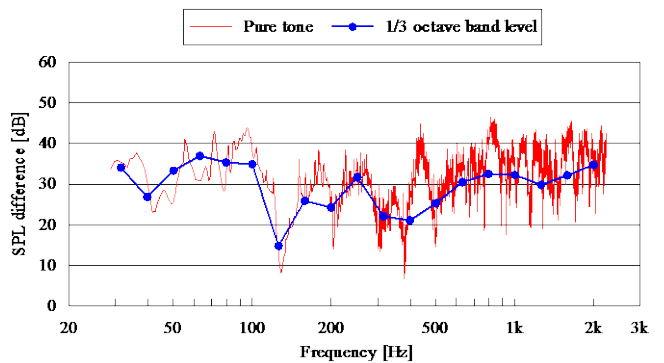


図 2.47 平板表裏の音圧レベル差：アルミ 10mm

平板振動の固有モードに起因する音圧レベル分布

図 2.48 に音源側観測点の音圧レベル分布を、図 2.49 に透過側観測点の音圧レベル分布を示す。これらの図は、透過側の平均 $L_{p,norm}$ が極端に大きくなる周波数をいくつか選んだ。また、8×11 点のマイクロホン格子における音圧レベル分布を等高線図で描画した。なお、音源側の図は図 2.39(c)と同じ視点で描画され、透過側の図もこれと同じ向き（音源室から壁を透視して見た向き）で描画されており、音源側と透過側の等高線図をそのまま重ねて分布を比較できる。

まず透過側の分布を見ると、平板の寸法に合わせたモード形状が非常に明確に現れている。板振動の固有モードによる音響放射の影響であると考えられる。

音源側の分布を見ると、透過側とは異なる傾向を示す。平板振動とは無関係に、音源室内音場の固有モード（図 2.45 参照）が支配的に作用しているものと考えられる。ただ、202.8Hz や 311.7Hz では、板の固有振動による音響放射が音源側マイクロホンでも観測されている可能性がある。

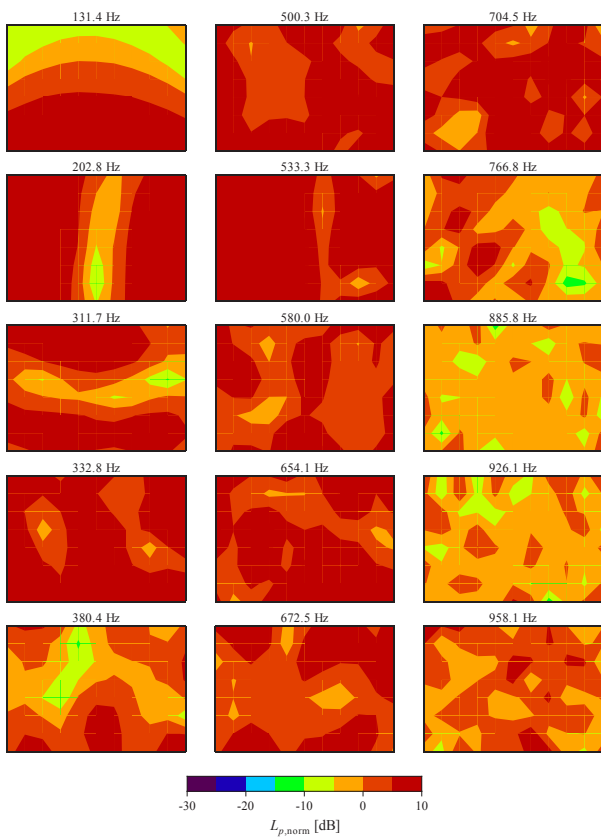


図 2.48 音源側の音圧レベル分布：アルミ 10mm

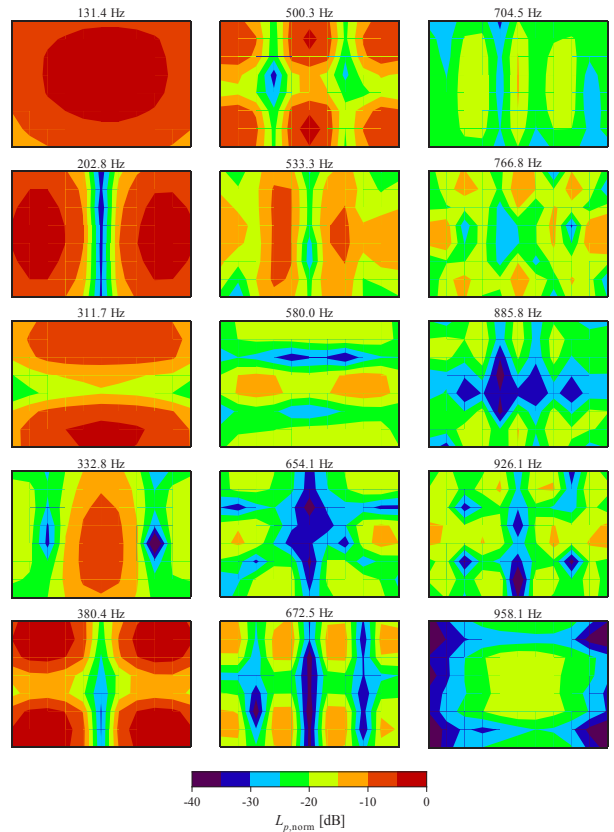


図 2.49 透過側の音圧レベル分布：アルミ 10mm

2.6.3 測定結果：アルミ平板（厚さ 15mm）

厚さ 15mm のアルミ平板に関する測定結果を示す。

音圧レベルの周波数特性

図 2.50 に測定面内平均音圧レベルを示す。アルミ 10mm の場合と同様、音源室の音響固有モードの影響を受け、非常に複雑な周波数特性となる。

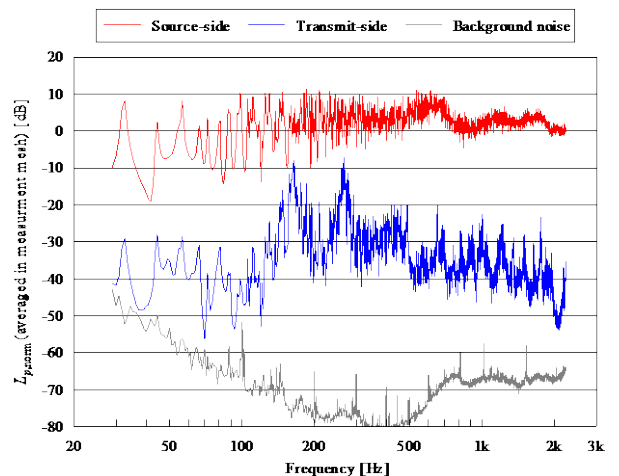


図 2.50 測定面内平均音圧レベル
(音源側、透過側、透過側の暗騒音)：アルミ 15mm

平板表裏の音圧レベル差

アルミ 10mm と比べて、全体的に音圧レベル差の値が大きい。厚さの増加により、遮音性能が向上したものと考えられる。

遮音性能が極端に低下する周波数が、アルミ 10mm に比べて高周波数側に移動する。厚さの変更にともない、板振動の固有周波数が変化したものと考えられる。これに関しては、3章で改めて考察する。

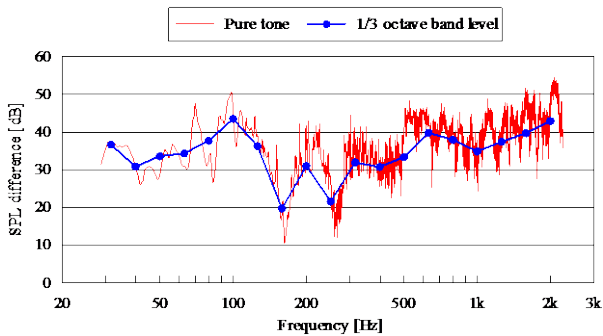


図 2.51 平板表裏の音圧レベル差：アルミ 15mm

音圧レベル分布

図 2.52 に音源側観測点の音圧レベル分布を、図 2.53 に透過側観測点の音圧レベル分布を示す。透過側に、板振動の固有モードに起因すると考えられる音圧レベル分布が現れる。固有モード形状の現れる順序は、アルミ 10mm の場合と同様である。

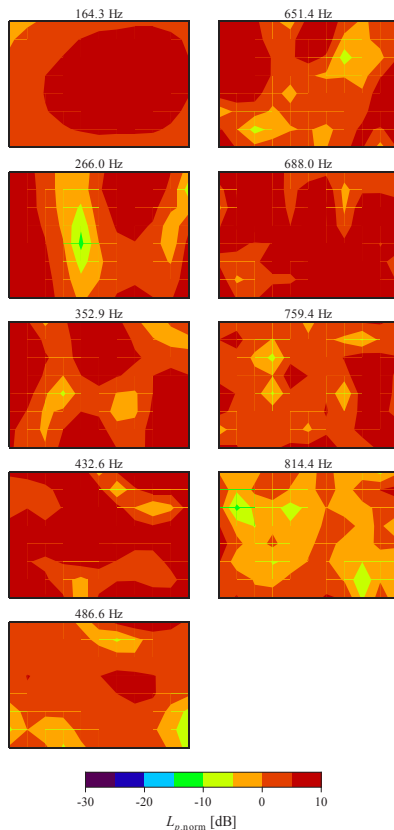


図 2.52 音源側の音圧レベル分布：アルミ 15mm

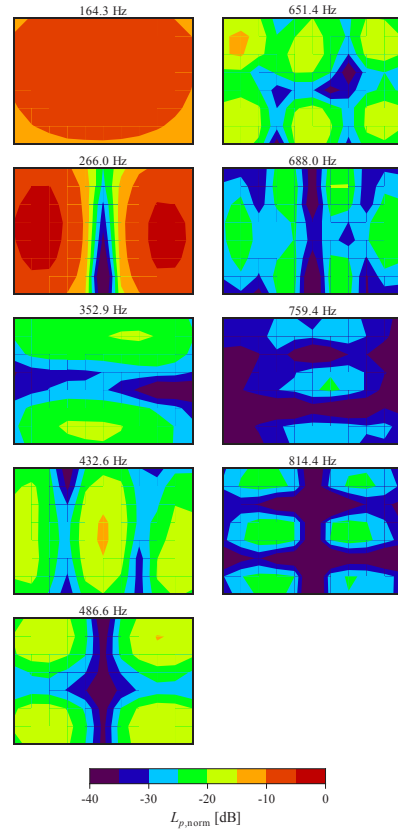


図 2.53 透過側の音圧レベル分布：アルミ 15mm

2.6.4 仮設無響室部における反射音の影響

透過側の仮設無響室部における吸音処理はおそらく不完全であり、透過音の測定結果に影響を及ぼしているものと考えられる。そこで、この仮設吸音面から反射される音の大きさについて、インパルスレスポンス測定により検討する。

測定方法

図 2.54 に仮設無響室部における反射音の測定を、図 2.55 に仮設無響室の様子を示す。試験スピーカの正面にマイクロホンを 1 本設置し、インパルスレスポンス測定を行う。スピーカとマイクロホンの距離 0.34m は、透過音試験における平板表面からマイクロホンまでの配置 (図 2.37 参照) を模して設定した。無響室部の床および周壁からの反射音を図 2.54(a) の測定で、建屋天井面 (図 2.55(c)) からの反射音を図 2.54(b) の測定で、それぞれ検討する。試験音には Log TSP 信号を用いる。

図 2.17 の方法を用い、インパルスレスポンスの時間波形のうち最も近い反射経路である、床面反射に相当する成分以降を除外する分析と、除外しない分析の結果を比較する。

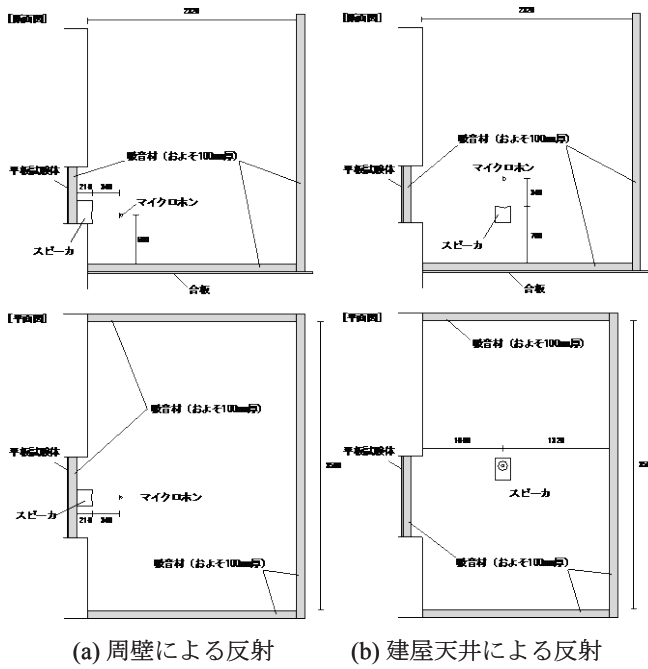


図 2.54 仮設無響室における反射音の測定

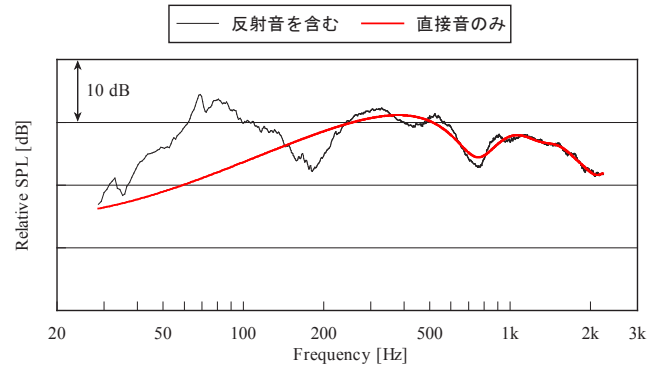


図 2.56 仮設無響室における周壁からの反射音に関する分析結果

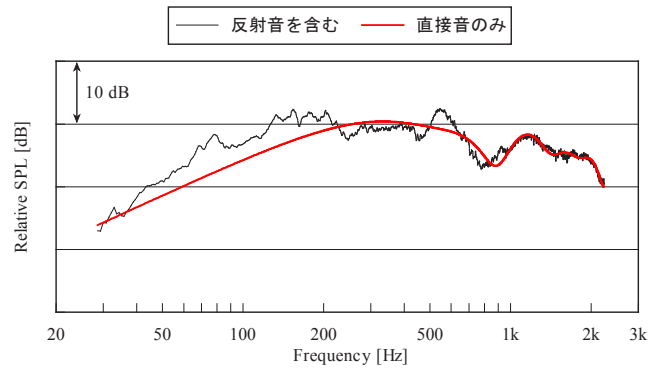


図 2.57 仮設無響室における建屋天井からの反射音に関する分析結果



(a) 周壁の反射



(b) 建屋天井の反射



(c) 建屋天井の反射

図 2.55 仮設無響室の様子

測定結果

図 2.56 に仮設無響における室周壁からの反射音に関する分析結果を示す。180Hz 周辺に生じる音圧レベルの谷は、直接音と床面反射音の経路差 0.91m に起因する干渉であると考えられる。また、低周波数域では反射音による音圧レベル増加がかなり大きい。

図 2.57 に仮設無響における建屋天井からの反射音に関する分析結果を示す。やはり低周波数域で反射音の影響が現れる。

全体的に、およそ 200Hz 以上の周波数範囲では、吸音面からの反射の影響は小さいといえる。

2.7 残響室—残響室試験

平板を透過する音について、入射側と透過側をともに残響室の状態にして、測定を行う。

2.7.1 測定方法

直方体の残響室の隅にスピーカを置き、開口部に設置された平板の表裏にマイクロホン^①を $11 \times 8 = 88$ 点ずつ配置する。スピーカから TSP 信号を放射し、各マイクロホン位置でインパルスレスポンスを測定する。アルミ平板 (10mm) の測定には Lin TSP 信号を、アルミ平板 (15mm) の測定には Log TSP 信号を用いた。縦に並んだ 8 点で同時に測定を行うものとし、マイクロホンを固定した支柱を 11 ヶ所に移動しながら測定を繰り返す。

音源側の試験室および平板を埋め込んだ界壁の構造は、2.6 節の残響室—無響室と同様である。図 2.36～図 2.39 を参照されたい。

図 2.58 に透過側の試験室様子を示す。両試験室は、基本的に ISO 140-1 の要件を満たす。ただし、数値解析における境界条件設定を容易にするため、音源室内の壁面に設置され

た吸音材や拡散体は除去してコンクリートの露出面積を多くし、完全反射面に近い状況で試験を行う。



図 2.58 透過側試験室の様子

2.7.2 測定結果：アルミ平板（厚さ 10mm）

厚さ 10mm のアルミ平板に関する測定結果を示す。

音圧レベルの周波数特性（低周波数領域）

図 2.59 に、音源側のマイクロホン 88 点で平均した $L_{p,norm}$ と透過側のマイクロホン 88 点で平均した $L_{p,norm}$ 測定結果とモード周波数の簡易計算値を示す。ここでは考察のため 200Hz 以下の結果を拡大して示す。

音源側試験室の音響固有モードとあわせて、透過側試験室 ($l_x=4.79$ 、 $l_y=3.80$ 、 $l_z=3.00$ [m]) の音響固有モードについても、式(2.11)による推定周波数を示す。透過側試験室の l_x (床の長辺) は音源室より短いため、音響固有モードは高周波数域に少しずつ現れる。35.2Hz、43.5 Hz、56.3 Hz、66.4 Hz で透過側 $L_{p,norm}$ に現れるピークは、透過側試験室の音響固有モードの影響を強く受けたものであり、残響室—無響室測定 の図 2.43 に比べて非常に大きな $L_{p,norm}$ の値となる。

図 2.60 に、同じ簡易計算式を用いて 1/3 オクターブバンドに含まれる音源側試験室の固有モードの数の推定値を示

す。音源側試験室と透過側試験室のモード密度は、高周波数域ではほぼ同等であり、低周波数域では若干の差異が生じる。音源側試験室の 55.2Hz のモードは 50Hz に含まれるが、透過側試験室の 56.3Hz のモードは隣接する 63Hz のバンドに含まれるため、これらのバンドに含まれるモードの数に差が生じる。

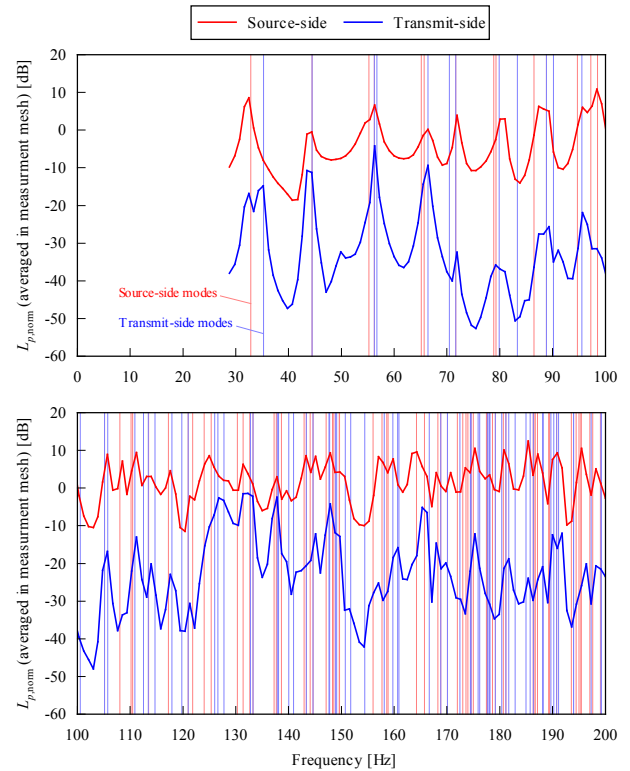


図 2.59 $L_{p,norm}$ 測定結果とモード周波数簡易計算値（音源室、透過室）の比較

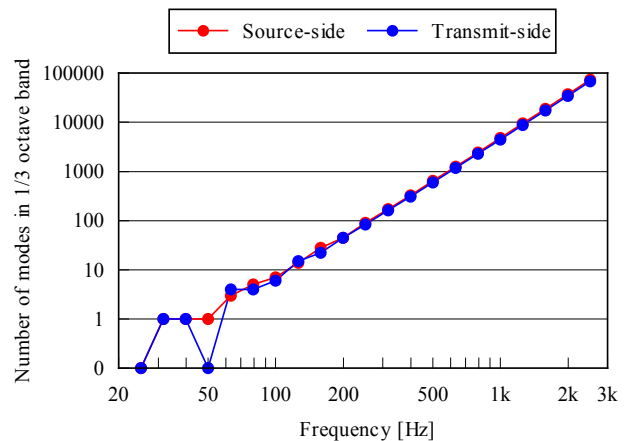


図 2.60 1/3 オクターブバンドに含まれる音源室の固有モード数の推定値

音圧レベルの周波数特性

図 2.61 に測定面内平均音圧レベルを示す。透過側では、残響室—無響室の試験結果に現れた音源室と板振動の固有モードに加え、透過側の試験室の音響固有モードも重畳され

てさらに複雑な周波数特性を示す。二つの室は奥行きが若干異なるため、例えば 32.5Hz と 35.2Hz のように、非常に近接した周波数でそれぞれの音響固有モードが現れる。

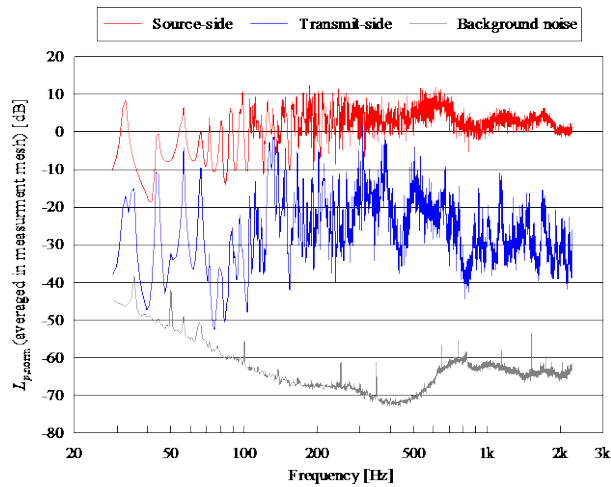


図 2.61 測定面内平均音圧レベル (音源側、透過側、透過側の暗騒音) : アルミ 10mm

平板表裏の音圧レベル差

図 2.62 に平板表裏の音圧レベル差を示す。音圧レベル差を見ると、130Hz など特定の周波数で音圧レベル差が極端に小さな値となる。これは、平板の固有振動周波数によるものである。すなわち、板の固有振動による放射音が透過側の音圧レベルを増加させ、遮音性能の低下を引き起こしているものと考えられる。これに関しては、3章で改めて考察する。

また、2.6節に示した残響室—無響室での結果に比べて、音圧レベル差が小さくなる。これは、板を透過した音が透過側試験室の内壁で反射され、マイクロホンに再度入射して音圧レベルが増加するためであると考えられる。

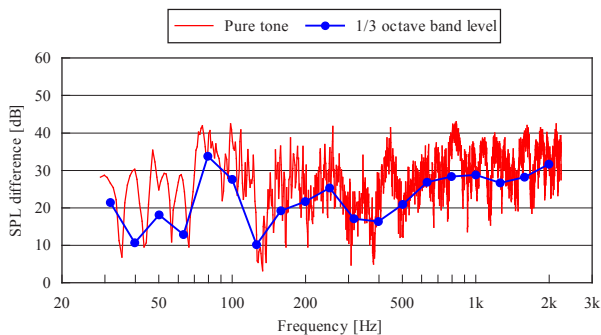


図 2.62 平板表裏の音圧レベル差 : アルミ 10mm

音圧レベル分布

図 2.63 に音源側観測点の音圧レベル分布を、図 2.64 に透過側観測点の音圧レベル分布を示す。透過側の結果 (図 2.64) には、板の固有振動の影響が現れる。2.6節の残響室—無響室条件の結果 (図 2.49) と比較すると、131.4Hz、331.7Hz、500.3Hz などでは似た形状の分布が現れるが、202.8Hz、

332.8Hz、380.4Hz などでは大きく異なる形状の分布となる。透過側試験室の音場に生じる音響固有モードと重なる周波数では、板振動の固有モードの影響が見えにくくなったものと考えられる。

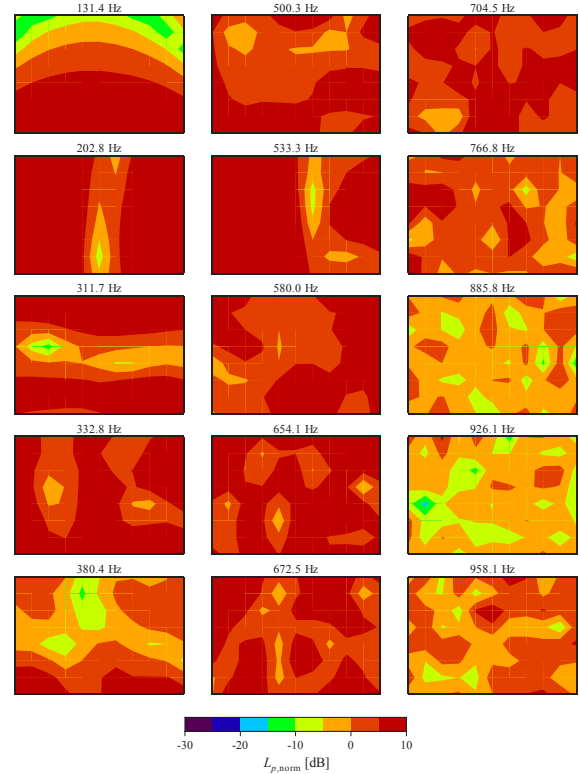


図 2.63 音源側の音圧レベル分布 : アルミ 10mm

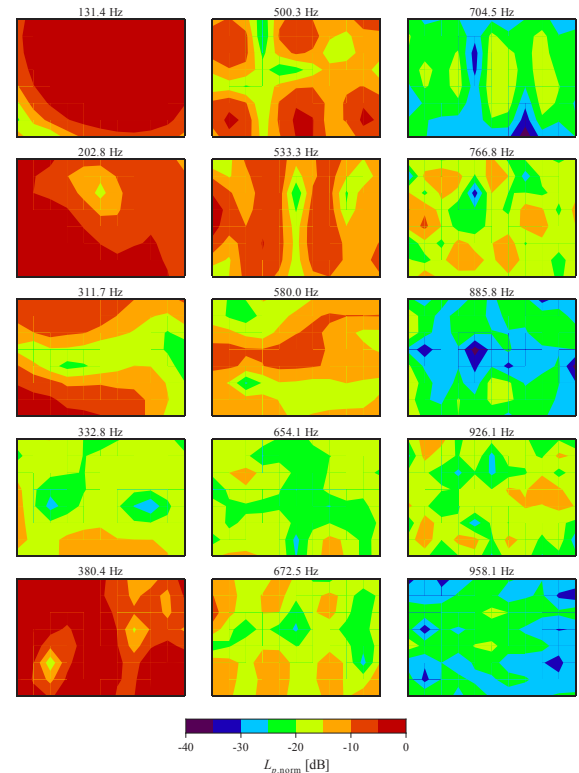


図 2.64 透過側の音圧レベル分布 : アルミ 10mm

2.7.3 測定結果：アルミ平板（厚さ 15mm）

厚さ 15mm のアルミ平板に関する測定結果を示す。

音圧レベルの周波数特性

図 2.65 に測定面内平均音圧レベルを示す。厚さ 10mm アルミ平板の場合と同様、透過側では、音源側試験室、板振動、透過側試験室の固有モードが重畳され、複雑な周波数特性を示す。

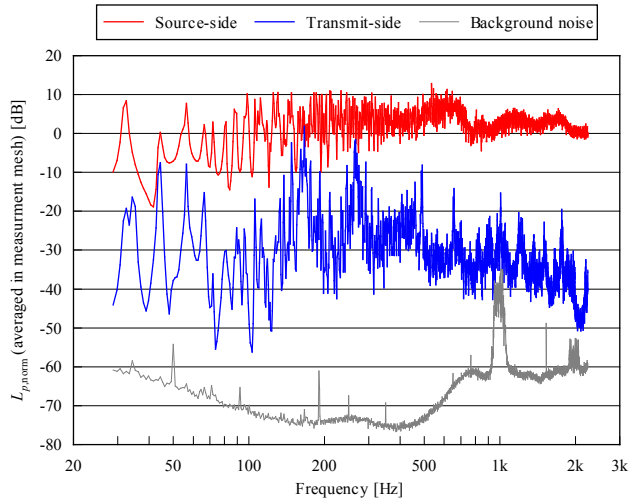


図 2.65 測定面内平均音圧レベル
(音源側、透過側、透過側の暗騒音)：アルミ 15mm

平板表裏の音圧レベル差

図 2.66 に平板表裏の音圧レベル差を示す。厚さ 10mm アルミ平板の場合と同様、160Hz など、平板の固有周波数と合致する周波数で音圧レベル差が極端に小さな値となる。

また、2.6 節の残響室－無響室の結果に比べ、音圧レベル差が小さくなる。

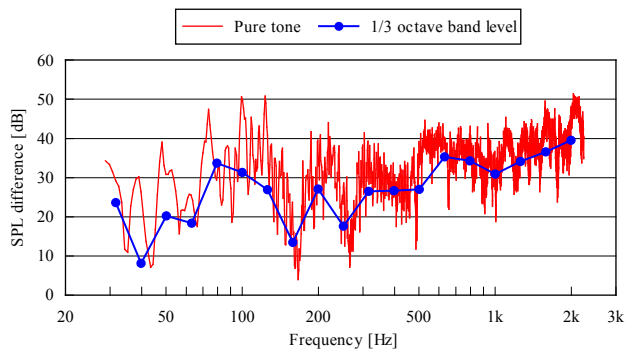


図 2.66 平板表裏の音圧レベル差：アルミ 15mm

音圧レベル分布

図 2.67 に音源側観測点の音圧レベル分布を、図 2.68 に透過側観測点の音圧レベル分布を示す。486.6Hz などの周波数では、板振動の固有モードが透過側試験室の音響固有モードにかき消されて見えなくなる。

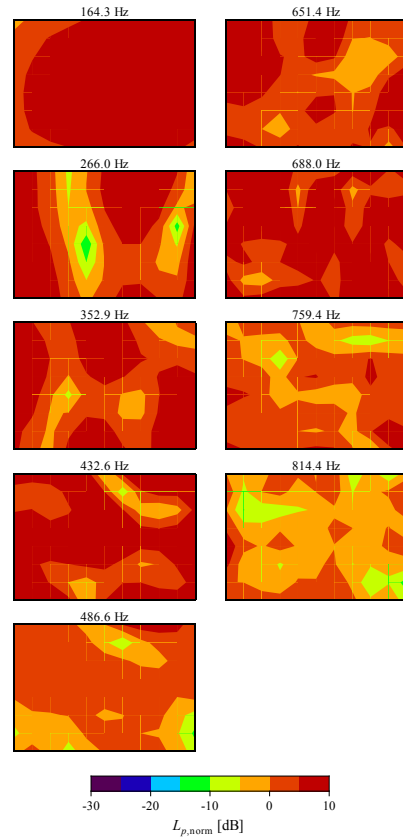


図 2.67 音源側の音圧レベル分布：アルミ 15mm

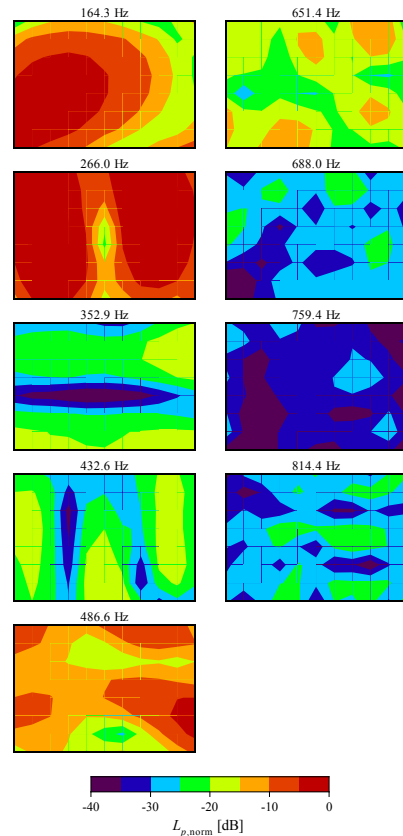


図 2.68 透過側の音圧レベル分布：アルミ 15mm

2.8 平板の遮音性能に関する検討

2種類の平板を対象とし、2.6節（残響室—無響室）および2.7節（残響室—残響室）の2ケースについて、平板表裏の音圧レベル差を測定した。各平板の遮音性能の比較、および手法間の測定結果の差異について検討する。

2.8.1 平板表裏の音圧レベル差と音響透過損失の関係

2.6節で行った残響室—無響室試験の概念図を図2.69(a)に示す。平板に入射するエネルギーを E_i 、反射されるエネルギーを E_r 、透過するエネルギーを E_t とすると、残響室—無響室で測定した平板表裏の音圧レベル差 ΔL_{Anecho} [dB]との間に次式の関係が成り立つ。

$$\Delta L_{Anecho} = 10 \log \frac{E_i + E_r}{E_t} \quad (2.13)$$

同様に、2.7節で行った残響室—残響室試験の概念図を図2.69(b)に示す。平板を透過したあとと室内で反射されて平板付近に戻ってくるエネルギーを E_{room} とすると、残響室—残響室で測定した平板表裏の音圧レベル差 ΔL_{Reverb} [dB]との間に次式の関係が成り立つ。

$$\Delta L_{Reverb} = 10 \log \frac{E_i + E_r}{E_t + E_{room}} \quad (2.14)$$

一方、板材の遮音性能を表す際に広く用いられている音響透過損失 R [dB]は、次式で定義される。

$$R = 10 \log \frac{E_i}{E_t} \quad (2.15)$$

すなわち、 R の定義は ΔL_{Anecho} および ΔL_{Reverb} と異なるため、2.6節および2.7節の測定結果は厳密には R と等価にはならない。

なお、上記の議論では、単純化のため、試験室の周壁と平板の間に生じる振動エネルギーの授受、および E_{room} が平板を透過して音源室に戻る寄与は無視している。

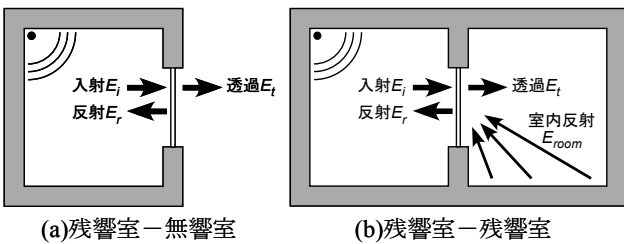


図 2.69 音圧レベル差測定概念図

平板がある程度の遮音性能を持っていれば、平板表面は反射性とみなすことができ、 $E_r \approx E_i$ となる。したがって、 ΔL_{Anecho} と R の間に次式の関係が成り立つ。

$$\Delta L_{Anecho} = 10 \log \frac{E_i + E_r}{E_t} \approx 10 \log \frac{2E_i}{E_t} = R + 3 \text{ [dB]} \quad (2.16)$$

すなわち、残響室—無響室で測定した音圧レベル差は、材料が持つ音響透過損失より 3dB 大きな値を示すことになる。

さらに、透過側の室内音場が拡散状態であれば、 $E_{room} \approx E_t$ となる。したがって、 ΔL_{Reverb} と R の間に次式の関係が成り立つ。

$$\Delta L_{Reverb} = 10 \log \frac{E_i + E_r}{E_t + E_{room}} \approx 10 \log \frac{2E_i}{2E_t} = R \text{ [dB]} \quad (2.17)$$

すなわち、元来の定義は異なるものの、 ΔL_{Reverb} と R は近い値を示すものと考えられる。さらに、式(2.16)から、 ΔL_{Anecho} と ΔL_{Reverb} の間に次式の関係が成り立つことになる。

$$\Delta L_{Reverb} \approx R \approx \Delta L_{Anecho} - 3 \text{ [dB]} \quad (2.18)$$

なお、 ΔL_{Anecho} 、 ΔL_{Reverb} 、 R の値は、平板周囲の支持条件により大きく変動するものと推測される。一般的な建築材料のカタログ等に掲載されている R の値は、試験体の周囲を木材やパテなどにより固定した状態で測定されており、本試験のようにコンクリートに端部を埋め込むような支持が行われることはほとんどない。周囲の支持条件が異なる場合には、式(2.18)の等式は成り立たない。つまり、本試験で得られた ΔL_{Reverb} を建材のカタログに掲載されている R の値と比較しても、材料の本質的な遮音性能の比較にはならない。

2.8.2 各平板の遮音性能の比較

アルミ 10mm の平板表裏音圧レベル差について、残響室—無響室（図 2.47 参照）と残響室—残響室（図 2.62 参照）の各測定結果を抜き出し、図 2.70 に示す。音響透過損失の表示方法に準じ、1/3 オクターブバンド音圧レベルの差として図示する。同様に、アルミ 15mm の結果を図 2.71 に示す。どの平板においても、200Hz 以上では、残響室—無響室と残響室—残響室のグラフがほぼ平行に推移する。逆に 160Hz 以下では、グラフ間の差が周波数ごとに大きく変動する。

3. 音響透過解析

前章で示した音響透過実験から得られた結果を、定常音響構造連成問題に対する 3D WBM の解析結果と比較し、解析の妥当性を検討する。そして、実験データに加えて、解析の信頼性の高い（しかし、高い周波数領域では計算コストの高い）既存の FEM による解析結果とも比較を行う。

3.1 解析モデル

図 3.1 に、音響透過実験設備に基づいた 3D 解析用のモデルの幾何形状を示す（形状は、3D WBM と FEM で共通）。このモデルは、音源室と受音室の 2 つの部屋を壁で仕切り、音源室の端にあるスピーカから音波を放射し、部屋の連結部に固定された弾性板を通じて受音室へ透過する音を測定した実験設備に基づいてモデル化した。弾性板の材質はアルミニウム A5052（ヤング率 $E=69.3[\text{GPa}]$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ 、密度 $\rho_s=2680[\text{kg/m}^3]$ ）であり、大きさは $700\text{mm}\times 1000\text{mm}$ 、厚さは 10mm と 15mm の 2 種類である。弾性板は 2 章の図 2.8 に示すように長手方向が横向きになり、固定方法はコンクリートで固めている。部屋（音源室及び受音室）は空気（密度 $\rho=1.2[\text{kg/m}^3]$ 、音速 $c=340[\text{m/s}]$ ）で満たされているものとする。

実験設備における音源室の内壁は、音波が弾性板へランダムに入射すること（残響室）を想定してコンクリート面が露出している。一方、受音室の内壁は、コンクリート面が露出したケース（残響室を想定）と壁面に吸音処理を施したケース（無響室を想定）の 2 種類を用いる。解析モデルにおける内壁の音響インピーダンスは実験で値を同定する必要があるが、ここでは簡単のため吸音処理を施した壁は、理想的な吸音材であると仮定して、空気の音響インピーダンス $Z=\rho c$ （自由境界）、一方、コンクリート面が露出している壁には、音響インピーダンス $Z=\infty$ （完全反射）を適用する。また、部屋の連結部に設置している弾性板の損失係数 η には周波数依存性があり、正確には実験で値を同定する必要があるが、損失係数は弾性板の共振周波数付近以外に与える影響が少ないことが分かったため⁴⁾、損失係数 η は 0% を用いて解析を行なった。

一方、WBM の比較対象として実施した FEM 解析のモデルは、90Hz までの周波数応答解析の解を保証する数値分散誤差を想定したメッシュを用いて、MSC.Nastran で解析する。このメッシュは、構造部分のシェル要素とキャピティ部分の音響ソリッド要素の 2 種類から成り、合計約 59 万節点、約 58 万要素である。全解析周波数にわたって音響波長よりも構造の曲げ波長のほうが小さいので、音響要素のサイズは、構造から離れるにつれて除々に大きくなるように構築した。このメッシュを用いて、実際には 700[Hz]まで解析を行うが、計算時間と計算リソースの制約から、この程度のメッシュに留めている。ちなみに、FEM の補間誤差を考慮すると、1次

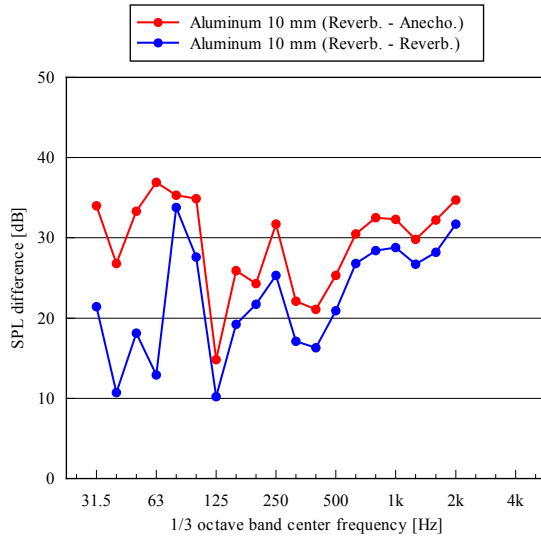


図 2.70 平板表裏の音圧レベル差：アルミ 10mm

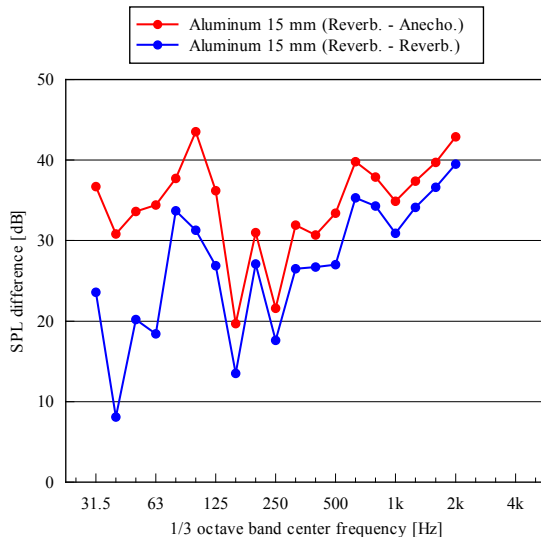


図 2.71 平板表裏の音圧レベル差：アルミ 15mm

2.9 音響透過実験のまとめ

厚さ 10mm と 15mm のアルミニウム板を対象とし、ランダム入射する音の透過を測定した。測定結果を音源の出力で基準化した音圧レベルとして表示し、数値解析と比較しやすい形で整理した。

残響室—無響室条件の透過音は、音源室内の音場の固有モードと、平板振動の固有モードに支配されていることが明確になった。残響室—残響室条件の透過音は、さらに透過側の試験室の固有モードの影響も重畳され、より複雑な性状を示すことがわかった。

要素の場合、応答波長を（解析周波数に依らず）最低6等分しなければならないという簡単な指標が得られ、通常はこの指標に基づいてメッシュを構築することが多い。一方、数値分散誤差の指標によると、さらにメッシュを細かく切らなければならない、1波長あたりに必要な最低要素数も周波数依存となる。ここで用いるメッシュに関しては、345[Hz]において、音響の1波長あたり最小で約7個に切られており、90[Hz]から345[Hz]（実際には構造に近い音響要素はさらに細かく切られているので、もう少し高い周波数）までの周波数領域におけるFEMの解析誤差は、ほぼ数値分散誤差であると考えられる。また、ここでのFEMの解析は、10mm厚の弾性板に対してのみ行なう。表3.1に実験および解析ケースを示す。

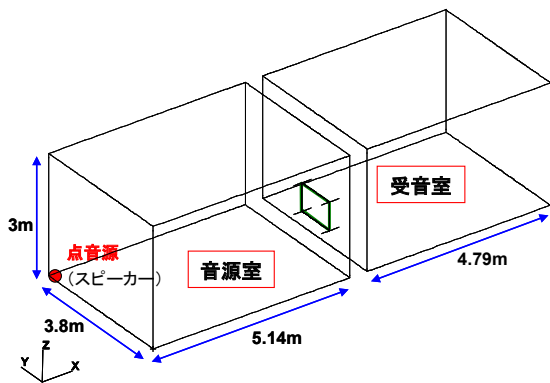


図 3.1 3次元解析モデル

表 3.1 実験および解析ケース

弾性板の厚さ	部屋の構成	ケース	実験	WBM	FEM
10mm	残響-残響	1	○	○	○
	残響-無響	2	○	○	○
15mm	残響-残響	3	○	○	
	残響-無響	4	○	○	

○は実験または、解析を行なったケース

3.2 3次元WBMの妥当性確認

WBMの解析結果及び実験結果を比較するために、式(2.9)に示す平板表裏の音圧レベル差 $SPL_difference$ を用いて解析結果と実験結果を比較する。

図3.2に厚さ10mm弾性板の固有モードを、図3.3に厚さ15mm弾性板の固有モードを示す。また、図3.4にケース1とケース2の $SPL_difference$ 比較グラフを、図3.5にケース3とケース4の $SPL_difference$ 比較グラフを示す。これらのグラフを見ると、100Hz以下の低い周波数において、実験結果が解析結果より最大40dB程度低めにでている。この理由は、実験においては部屋を仕切る壁（弾性板の周りの壁）を吸音加工したものの、低い周波数の場合に音が壁を透過し

たためであると考えられる。またグラフは、部屋の音響固有周波数（式(2.11)、図2.43、図2.44、図2.59、図2.60参照）の影響を受けて細かなピークが多く、雑音的になっている。さらに、弾性板の固有周波数付近で、 $SPL_difference$ に極小値がでていますが、あまり明確ではない。とくに残響-残響モデルに、この傾向が強い。

図3.6にケース1とケース2の $SPL_difference$ を10Hz毎に平均化したグラフを、図3.7にケース3とケース4の $SPL_difference$ を10Hz毎に平均化したグラフを示す。これらのグラフを見ると、解析結果における $SPL_difference$ の極小値と弾性板の固有周波数が一致する。これは、弾性板の振動が共振により励起され、受音室側へ音が透過しやすくなるために起こると考えられる。

しかし、実験結果における $SPL_difference$ の極小値を見ると、10mm弾性板モデル（ケース1とケース2）の場合は弾性板の固有周波数とほぼ一致するが、15mm弾性板モデル（ケース3とケース4）の場合は弾性板の固有周波数より低めにでる。この理由は、弾性板の板厚が厚くなるに従って、理想的なクランプ拘束が難しくなり（拘束が緩くなり）、弾性板の固有振動数が小さくなったためであると考えられる。

図3.4（ケース1とケース2）におけるWBMとFEMの結果を比較すると、630Hzを超えた辺り（弾性板の8次モード辺り）からFEMにおける $SPL_difference$ の低下する周波数が高めに出ていることが分かる。実際の系では、音響と構造が連成するのでそのモードは純粋な構造のモードとは若干異なるとはいえ、WBMは、より高い周波数領域においても、構造の共振振動に起因する現象を正確にとらえていることが分かる。これは、WBMにおいて、解析領域を細かなメッシュに離散化する必要がなく、数値解を展開する際に用いる波動関数が連続系の支配方程式を厳密に満たすことから、数値解に本質的に数値分散誤差が含まれないためである。一方、FEMでは、解析領域を小さな要素に分割しなければならない、連続系（無限自由度）から自由度を打ち切った離散系（有限自由度）は、一般に、連続系よりも剛性の高い硬い系となる。つまり、数値分散誤差によってFEMの解析で得られる固有周波数は、一般に、解析周波数が上がるほど高くなる傾向を示す。3.1節のFEMのメッシュに関して説明したように、345[Hz]程度までのFEMの解析誤差は、ほぼ数値分散誤差と考えて良いので、少なくとも3次モードのずれに関してはFEMの数値分散誤差が悪影響を与えているといえる。さらに、今回用いたFEMのメッシュは、90[Hz]までの数値分散誤差を考慮したに過ぎないので、さらに高い周波数領域における連成解析のためにはメッシュが粗すぎる（これを克服するためには、さらに詳細なメッシュが必要であり、計算コストや消費リソースの上昇に繋がる）。

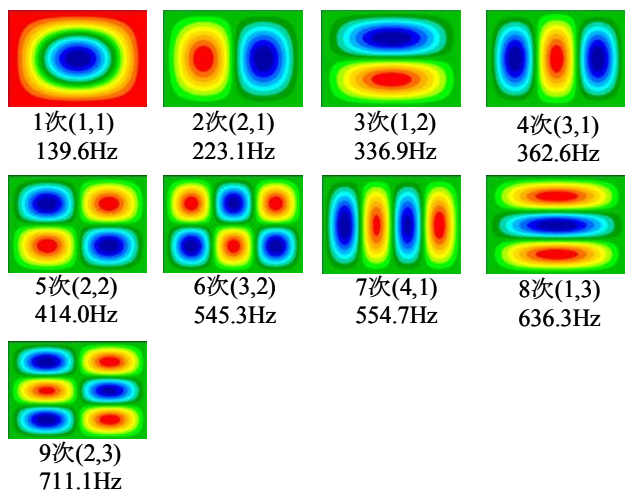


図 3.2 厚さ 10mm 弾性板の固有モード

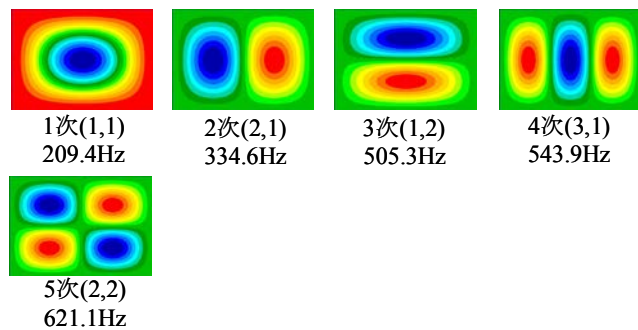


図 3.3 厚さ 15mm 弾性板の固有モード



図 3.4 厚さ 10mm 弾性板の $SPL_difference$ 比較グラフ

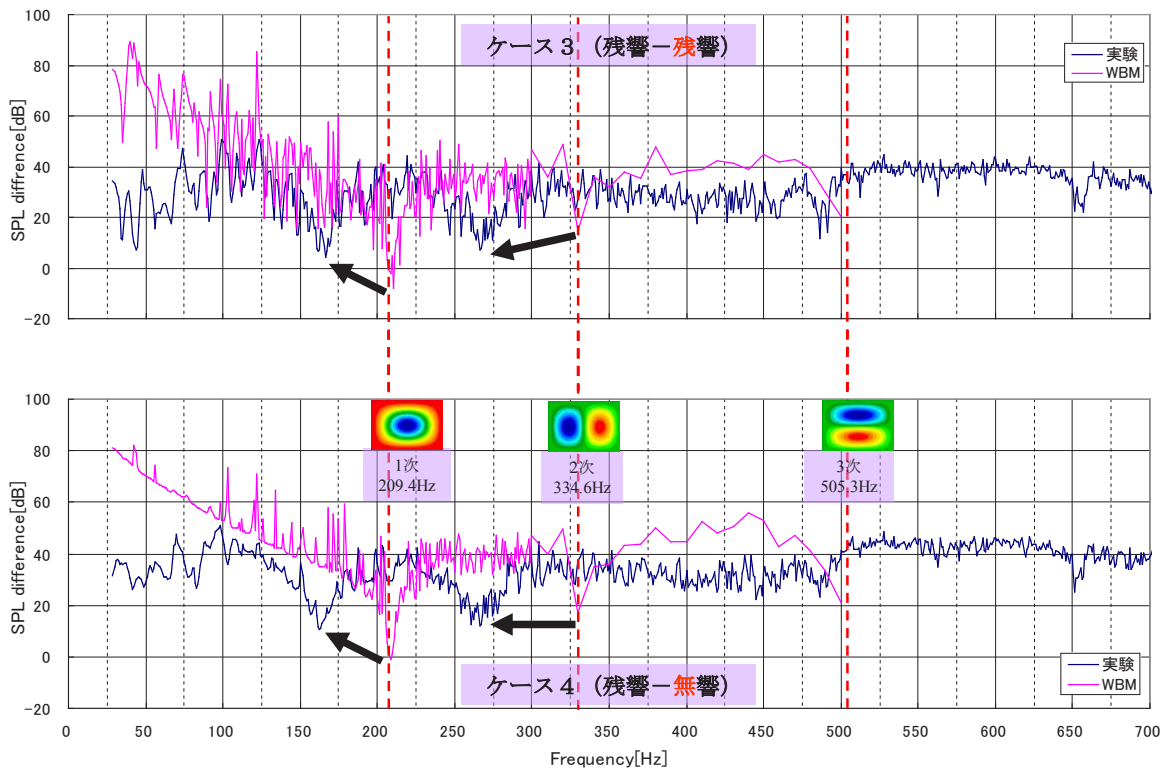


図 3.5 厚さ 15mm 弾性板の $SPL_difference$ 比較グラフ

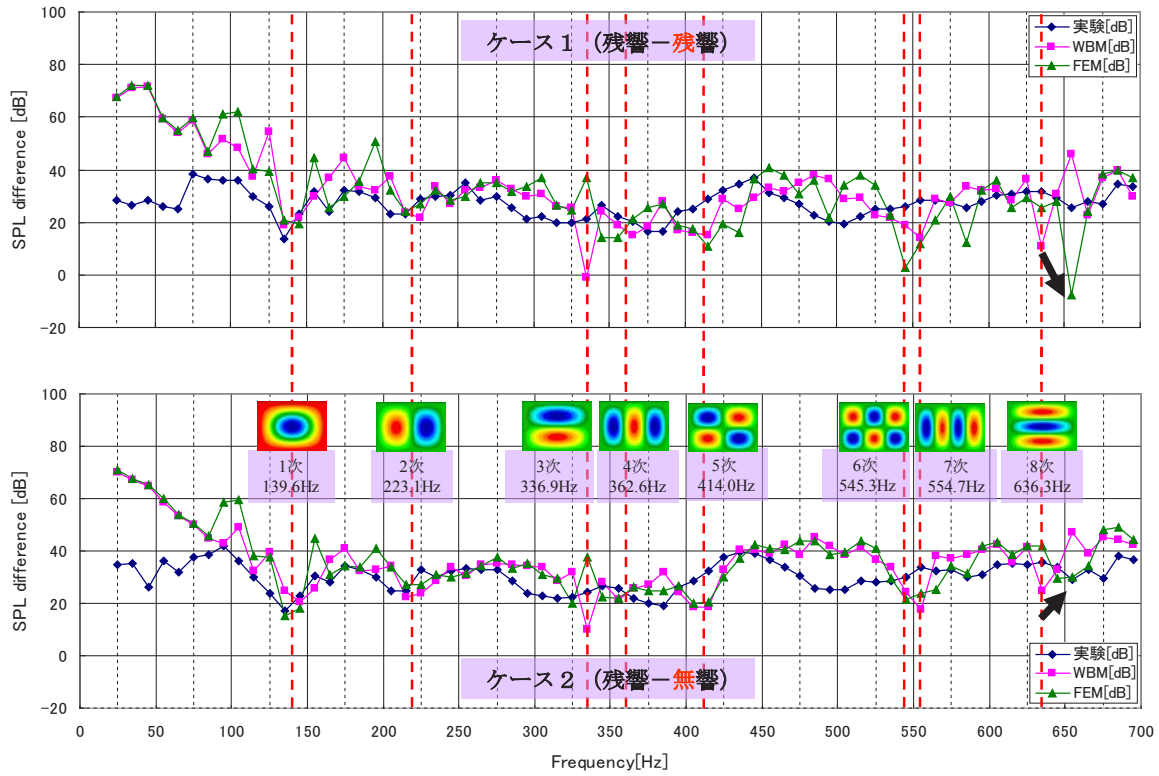


図 3.6 厚さ 10mm 弾性板の 10Hz 毎に平均化した $SPL_difference$ 比較グラフ

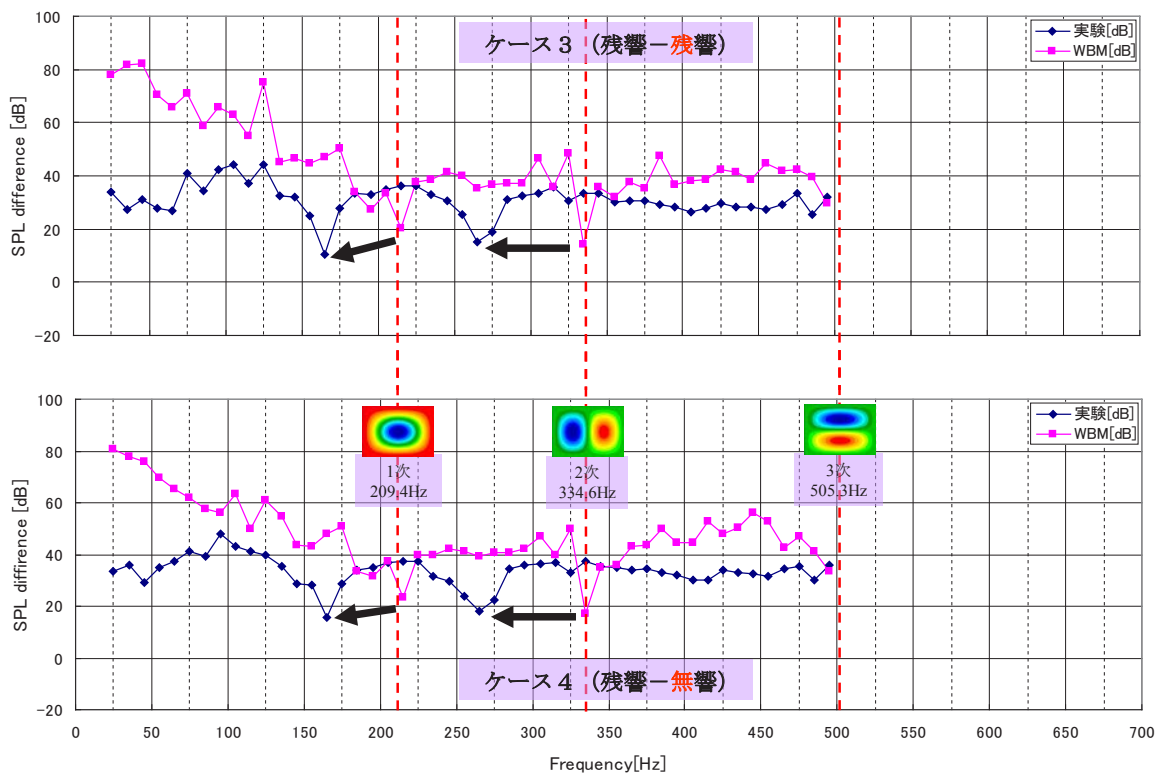


図 3.7 厚さ 15mm 弾性板の 10Hz 毎に平均化した $SPL_difference$ 比較グラフ

4. まとめ

3D WBM 解析コードの妥当性確認をするために、音響透過問題に対して、WBM の解析結果と、信頼性が高い（ただし、高い周波数領域では計算コストの大きい）FEM の解析結果、及び、実験結果との比較を行なった。平板表裏の音圧レベル差 *SPL_difference* の比較から、実験と両解析結果に同様の傾向を示すことが分かったので、3D WBM の妥当性が確認された。ただし、高い周波数領域において WBM と FEM の解析結果を比較すると、TL が低下する周波数にずれが生じている。このとき、WBM が構造の共振に起因する現象を正確にとらえているのに対し、FEM の解析結果は、数値分散誤差によって汚染されていることが分かった（本研究で用いたメッシュでは、348[Hz]以上になると補間誤差も含まれるが、少なくとも 250[Hz]あたりまでは、数値分散誤差のみの影響である）。この点から、数値分散誤差を本質的に含まない WBM は、特に高い周波数の解析における解析精度において、メッシュの切り方が解析結果に影響する FEM よりも安全で信頼性が高いといえる。

WBM の FEM に対する優位性を示すためには、今後さらに計算速度や必要な計算リソースについても比較する必要がある。解析解への収束速度は、FEM よりも WBM のほうが優っていることは指摘されているものの、ほぼ完全に最適化されている商用の FEM コードと計算速度等を比較するためには、インハウスの WBM コードもさらなる高速化を進めなければならない。

参考文献

- 1) Pluymers B., Van Hal B., Vandepitte D., and Desmet W., Trefftz-based methods for time-harmonic acoustics, *Archives of Computational Methods in Engineering*, DOI: 10.1007/s11831-007-9010-x, pp.343-381, 2007.
- 2) Ihlenburg, F. and Babuska, I., Finite Element Solution of the Helmholtz Equation with High Wave Number Part I: The h-version of the FEM, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol.30, pp.9-37, 1995.
- 3) 高橋 孝, 村上桂一, 青山剛史, 相曽秀昭, 音響振動解析のための数値計算法に関する研究, JAXA-RR-07-012, 2008.
- 4) 高橋 孝, 金田英和, 村上桂一, 橋本 敦, 青山剛史, 古賀 豊, 宮 信大, モハメド・カリル, 森 浩一, 中村佳朗, 2次元波動ベース法による音響透過及び伝播解析に関する研究, JAXA-RR-09-008, 2010.
- 5) 高橋 孝, 金田英和, 村上桂一, 橋本 敦, 青山剛史, モハメド・カリル, 村橋慶紀, 森 浩一, 中村佳朗, フェアリング部材の音響透過簡易試験と解析法の検証—アルミ平板の場合—, JAXA-RR-09-009, 2010.

