

音響エネルギー密度による遮音測定に関する解析的検討

小田 智 弘 渡 辺 充 敏
池 上 雅 之

Analytical Study on Sound Insulation Measurement by Acoustic Energy Density

Tomohiro Oda Mitsutoshi Watanabe
Masayuki Ikegami

Abstract

In the conventional measurement of sound pressure, the measurement results tend to vary in the lower frequency band owing to the characteristics of sound. To solve this problem, a basic study on a new sound insulation measurement method using acoustic energy density considering sound pressure and particle velocity was conducted by numerical analysis. By applying the acoustic energy density, it was possible to reduce the variation among the measurement points compared to the conventional measurement, even in spaces where the sound pressure distribution is not diffuse. This technology is expected to improve the stability of sound insulation measurements in the low-frequency range and contribute to the quality control of buildings.

概 要

建築物の遮音性能は、一般的には室内の音圧を測定して算出される。従来の音圧による測定では、音の特性上、低い周波数帯域ほど測定結果がばらつきやすい課題があった。この課題を解決するため、音圧と粒子速度を考慮した音響エネルギー密度による、新たな遮音測定方法に関する基礎的検討を数値解析により行った。音響エネルギー密度によれば、音圧分布に偏りが生じる空間においても、従来の測定と比べ測定点間のばらつきを抑えることが可能であった。また、音響透過損失や固体音の測定を数値解析により再現したところ、低い周波数帯域での測定点の選び方に起因する結果のばらつきが従来の測定よりも小さいことが分かった。本技術によれば、従来困難であった低い周波数帯域における遮音性能測定の安定性が向上し、建物の品質管理に貢献できると期待される。

1. はじめに

建築物の遮音性能を測定する際、一般的にはマイクロホンにより室内の音圧を測定し評価値を算出するという処理が行われる。

遮音性能の測定の際、測定対象とした室の躯体構造、室形状および内装仕上げが同一仕様であったとしても、遮音等級で±1ランク程度差が生じることがある¹⁾²⁾。測定結果に差が生じる要因としては、施工の仕上がりや使用する材料の違いなどに起因する施工的な影響や、音源位置・測定点の位置等に起因する測定誤差の影響が考えられる。

測定点の位置による測定誤差を大きくする要因としては、室内の音圧分布の不均一性があげられる。特に矩形の空間でかつ低い周波数帯域においては、室内の音圧分布の空間的な偏りが顕著となり、測定点ごとの音圧のばらつきが大きくなることがある³⁾。そのため、低い周波数帯域で遮音測定の結果に差が見られる場合、その差が施工的な要因なのか、測定誤差によるものなのかの切り分けが困難となる場合がある。

一方で、音圧と粒子速度を考慮した音響エネルギー密度

による、新たな遮音測定方法が近年注目されている。

羽入等⁴⁾は、複数のカーディオイドマイクを組み合わせた測定装置による音響エネルギー密度の測定に関し検討を行っている。音圧の偏りが生じやすい矩形残響室においても、音圧と粒子速度を考慮した音響エネルギー密度を測定することで、測定点ごとのばらつきを抑えることが可能であることを示唆している。竹林等⁵⁾は、音圧と粒子速度を同時に測定できるpuセンサを用いた音響エネルギー密度測定に関する検討を行っており、平光等⁶⁾は音響エネルギー密度の各種遮音測定への応用についても実験的な検討を行っている。近年の測定装置の進歩に伴い、音響エネルギー密度の測定例は増えつつあるが、音響エネルギー密度の空間分布について、詳細に検討された事例はまだ少ない。

そこで本論文では、音圧分布に空間的な偏りが生じやすい矩形残響室において、音響エネルギー密度測定の安定性を明らかにすることを目的に、以下に示す基礎的検討を有限要素法による解析により行った。はじめに、矩形残響室内の音圧と音響エネルギー密度を算出し、空間分布と測定点ごとのばらつきについて検討した結果を示す。次に、矩形残響室を用いた音響透過損失解析を行い、音

圧と音響エネルギー密度からそれぞれ算出した音響透過損失の値の差について示す。更に、矩形残響室の上階床を加振した際に発生する固体音の解析を行い、音圧および音響エネルギー密度で評価した場合の結果の差を示す。

2. 音場と音響エネルギー密度の関係

音波が十分に拡散し、音圧の分布が一様である理想的な拡散音場においては、音響エネルギー密度 E (W/m^3) は以下の式で表される。

$$E = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで、 P は音圧(Pa)、 ρ は空気の密度(kg/m^3)、 c は音の伝搬速度である音速(m/s)を表す。

一方、矩形残響室のように、平行な壁面で囲われた空間においては、室の各辺(X, Y, Z)の寸法比に応じた音場の固有振動の影響が顕著となる。

室のX方向のみに卓越する1次の固有周波数における、音場内の音圧と粒子速度の振幅をFig. 1に示す。なお、粒子速度とは音波が伝搬する媒質である空気の振動速度のことを指し、音速とは異なる。固有振動における音圧と粒子速度の振幅は位置により決まっており、波形が進行しない定在波として表すことができる。音圧の振幅を見ると、室の中央で最小(節)、室の端部で最大(腹)となっており、音圧分布に偏りが生じていることがわかる。

このような、音波が十分に拡散せず、定在波の影響が顕著となる音場においては、音圧と粒子速度を考慮することで、音響エネルギー密度を精度よく測定することが可能となる。この場合、音響エネルギー密度は音圧 P による位置エネルギー密度 E_p と粒子速度 u (m/s) による運動エネルギー密度 E_k の和で与えられる。

$$E = E_p + E_k = \frac{p^2}{2\rho c^2} + \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

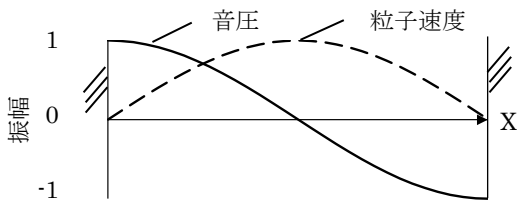


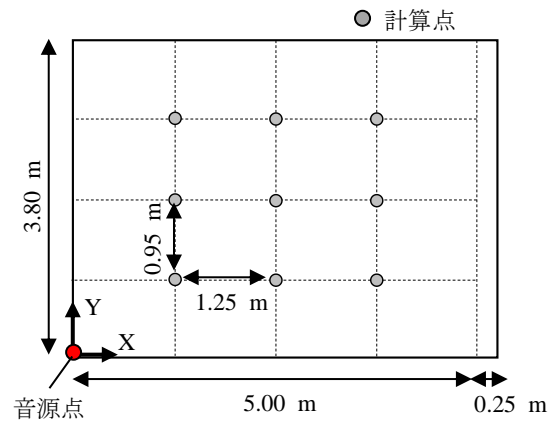
Fig. 1 X方向の1次固有周波数における音圧と粒子速度の振幅

Sound Pressure and Particle Velocity Amplitude at 1st Order Natural Frequency in the X-Direction

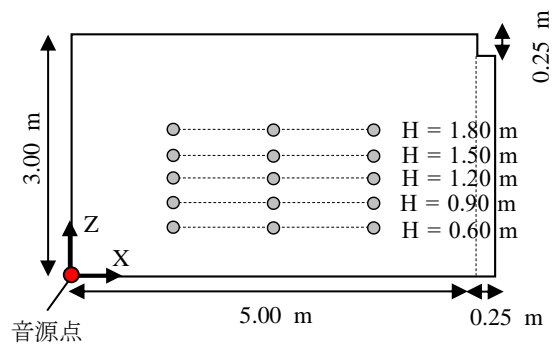
3. 矩形残響室での E_p , E_k , E の解析

3.1 解析概要

解析対象とした矩形残響室をFig. 2に示す。床面から1.5 mの高さに、0.1 m 間隔の格子点1989点を、コンター



(a) 平面図



(b) 断面図

Fig. 2 解析対象とした室 Room for Analysis

Table 1 解析周波数と要素分割の設定 Analysis Frequency and Element Division Settings

媒質	解析周波数	要素数	節点数	最大要素長さ
空気	20~707 Hz	156244	216966	160 mm

描画用の計算点として配置した。また、X方向Y方向の各辺を4等分する格子点上の9点を、高さ方向に5平面配置した計45点を、音圧および音響エネルギー密度の測定点ごとのばらつきを確認するための計算点として配置した。

有限要素法で周波数領域の解析を実施した。解析対象周波数は1 Hzステップで20 Hz~707 Hzまでとし、各計算点における音圧および粒子速度を算出した。空間分割には10節点4面体の流体要素を用いた。流体要素の密度には、空気の密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ を与え、空気中の音速は $c = 343.7 \text{ m/s}$ とした。空間分割時の最大要素長さは、オクターブバンド500 Hz帯域の上限周波数(707 Hz)の波長の1/3以下とした。解析周波数と要素分割の設定をTable 1に示す。音源位置は室隅部の1点とし、無指向性の点音源を配置した。吸音設定としては、室表面に吸音率0.01に相当する音響インピーダンスを実部のみに与えた。

3.2 高さ1.5m平面の E_p , E_k , E の分布

音圧と粒子速度の解析結果より、各計算点の位置エネルギー密度 E_p 、運動エネルギー密度 E_k 、および音響エネルギー密度 E を算出した。なお、 E_p 、 E_k 、 E の値は、常用対数の10倍でdB換算した値で示す。

高さ1.5 m平面における E_p 、 E_k 、 E のオクターブバンドの31.5 Hz帯域から125Hz帯域の分布をFig. 3に示す。なお、 E_p 、 E_k 、 E の値については、各周波数帯域の結果において、全計算点の最大値で正規化している。

31.5 Hz帯域の E_p の分布を見ると、 E_p ではX方向の境界近傍でエネルギー密度が最大、中央で最小となっており、分布に偏りが見られる。解析対象とした室のX方向の長さを5.25mとした際の、1次の固有周波数理論値は32.7Hzであり、 E_p の分布は1次の固有周波数で生じる定在波の影

響を大きく受けていると推察される。一方 E_k の分布は、X方向の境界近傍でエネルギー密度が最小、中央で最大と E_p と逆の分布となっており、 E_p 、 E_k の分布はそれぞれX方向の1次の固有周波数の音圧と粒子速度分布の特徴を捉えていると考えられる。

E の分布を見ると、 E_p 、 E_k で見られた分布の偏りがなく、エネルギー密度の変動が小さい様子がわかる。これは E_p と E_k の空間分布の腹と節の位置がそれぞれ逆の分布となっていることから、 E_p と E_k を合成した際にその腹と節の分布が均されるため E のばらつきが小さくなったと考えられる。

63 Hz帯域の E_p の分布を見ると、 E_p ではY方向の境界近傍でエネルギー密度が最大、中央で最小となっている。これは室のY方向の1次の固有周波数の影響と推察される。

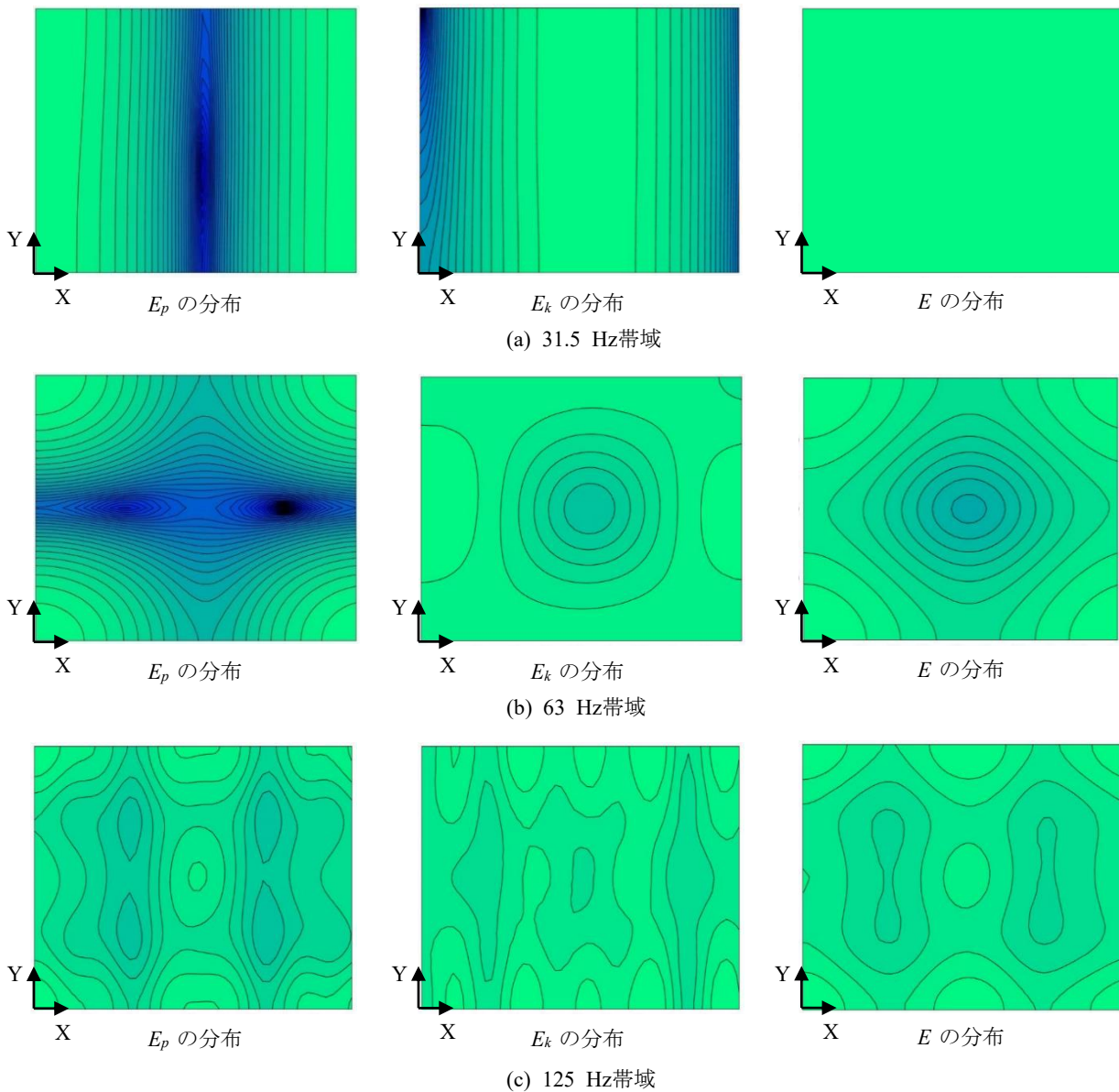


Fig. 3 各エネルギー密度の分布
Distribution of Energy Density

-30 -15 0dB

E の分布を見ると、室の中心部付近で若干エネルギー密度の低下が見られるものの、 E_p と比べるとエネルギー密度の偏りの程度が小さくなっている様子がうかがえる。

125 Hz帯域では、 E_p と E の分布が近づいている様子がわかる。これは周波数帯域が高くなるにつれ、帯域幅が大きくなることに加え、帯域幅に含まれる高次の固有周波数の数が増えることにより、音圧分布が一様である理想的な拡散音場へと近づいていくためと考えられる。

E_p , E_k , E の傾向は、羽入等⁴⁾による実測での空間分布と同様の傾向であり、各エネルギー密度分布の特徴が有限要素解析により捉えられていると言える。

3.3 計算点45点の E_p , E_k , E のばらつき

各計算点で E_p , E_k , E を算出し、1/3オクターブバンドの25 Hz～630 Hz帯域に整理した。計算点45点の E_p , E_k , E の標準偏差を比較した結果をFig. 4に、 E_p , E_k , E の算術平均値を標準偏差 $\pm\sigma$ の範囲と共に示した結果をFig. 5に示す。

E_p の標準偏差は25 Hz～125 Hz帯域の低い周波数帯域で大きかった。これは、前節でも示したように、低い周波数帯域では室内に生じる定在波の影響が顕著となり、音圧分布に偏りが生じているためと考えられる。

E_k の標準偏差は25 Hzと80 Hz帯域で大きかったが、すべての帯域で E_p よりも小さかった。

E の標準偏差は全帯域で E_p よりも小さかった。 E の標準偏差が E_p よりも小さいことは、通常の音圧レベル測定に比べ、 E を測定することで測定点ごとのばらつきを抑えた測定が可能であることを示唆している。

160 Hz帯域以上では、 E_p の標準偏差は2 dB以下と小さく、 E との差も小さかった。これは前節で示したように、周波数が高くなるにつれ、室内の音場が拡散音場に近づくため、 E_p と E の分布の差が小さくなったためと考えられる。

以上より、低い周波数帯域においては従来の音圧の測定と比べ、音響エネルギー密度を測定することにより、測定点ごとのばらつきが小さくなることが確認できた。

4. 矩形残響室での音響透過損失解析

4.1 解析概要

矩形残響室間に設置された壁材の音響透過損失を、解析により算出する。解析対象とした矩形残響室をFig. 6に示す。室容積が大きい室をRoom1(約228 m³)、小さい室をRoom2(約57 m³)とし、Room1とRoom2の間には試験体設置用の開口(2.75 m×3.80 m)を設けた。本解析では、厚さ220 mmのRC壁を試験体として開口部に設置した。計算点は、Room1, Room2ともに水平面内の9点を高さ方向に5平面配置した計45点とした。音源点と計算点位置をFig. 7に示す。なお各室の対角線上に位置する計算点については、P1～P5の記号を付している。

有限要素法で周波数領域の解析を実施した。解析対象周波数、空間分割に用いる要素、流体要素に与える物性

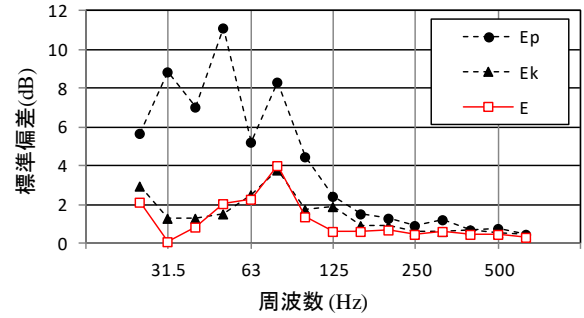
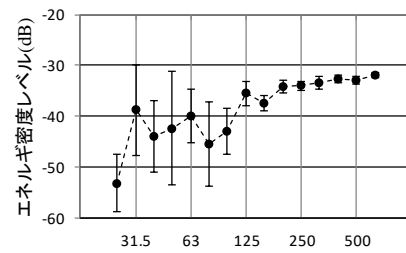
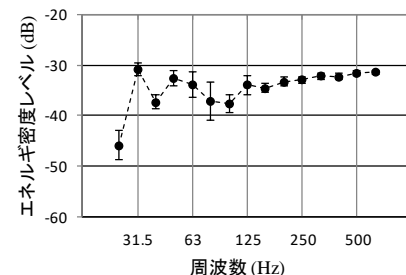


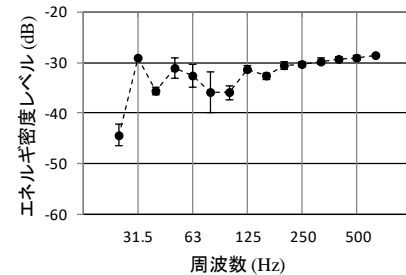
Fig. 4 E_p , E_k , E の標準偏差の比較
Comparison of the Standard Deviation of E_p , E_k , and E



(a) E_p の結果



(b) E_k の結果



(c) E の結果

Fig. 5 E_p , E_k , E の平均値と標準偏差
Mean and Standard Deviation of E_p , E_k , and E

値、および流体要素の最大要素長さは3章と同様とした。RC壁部には、流体要素と同様に、10節点4面体の固体要素を用いた。吸音設定としては、室表面に吸音率0.01に相当する音響インピーダンスを実部のみに与え、試験体としたRC壁の吸音設定も同様とした。固体要素には、密度2400 kg/m³、ヤング率 2.4×10^{10} N/m²、ポアソン比0.167、内部減衰率3 %をRCの物性値として与えた。固体

要素の最大要素長さは、オクターブバンド500 Hz帯域の上限周波数(707 Hz)における、固体中の曲げ波の波長の1/3以下とした。なお、RC壁の厚さ方向は2要素以上で分割している。解析周波数と要素分割の設定をTable 2に示す。RC壁の四周の支持条件は壁面外方向の変位のみ固定とした。なお、固体と流体要素の相互作用を含めた強連成条件での解析を行った。

Room1またはRoom2をそれぞれ音源室とする2つの場合について、解析を行った。Room1とRoom2の室隅部の床面に、無指向性点音源を1点ずつ設置した。なお、音響透過損失解析では、受音室への音の伝搬は、RC壁からの面音源放射によるものであり、前章までに検討した無指向性点音源の放射とは異なる伝搬状況となっている。

4.2 音響透過損失算出結果

音響透過損失は式(4)より求めた。

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (4)$$

ここで、 R は音響透過損失(dB), L_1 は音源室の平均音圧レベルまたは平均音響エネルギー密度(dB), L_2 は受音室の平均音圧レベルまたは平均音響エネルギー密度(dB), S は試験体面積(m²), A は受音室の等価吸音面積(m²)を表す。

各計算点の音圧レベルと音響エネルギー密度からそれぞれ音響透過損失を算出し、結果を比較した。JIS⁷⁾では、音圧の空間的な変動が大きい場合、拡散板の設置や室内の吸音調整により音圧の変動を出来る限り抑えるよう規定されている。本検討では、室の拡散性が悪い状況下での測定結果のばらつきを検証することを目的としているため、上記対策は行わず拡散性が乏しい状況下での測定を想定し検討を行っている。

音響透過損失算出に用いる計算点の選び方として、Table 3に示すCase-1~3の3ケース設定した。

音圧または音響エネルギー密度から音響透過損失を算出する際の計算点の選び方による、音響透過損失算出値の差をFig. 8に示す。ここでは、計算点45点を用いたCase-3から算出した音響透過損失の値を基準とし、Case-1・2で算出した音響透過損失の値から、Case-3の値を引いた値を、計算点の選び方による差とした。

Fig. 8(a)より、音圧から音響透過損失を算出した場合、80 Hz帯域においてCase-1とCase-3における音響透過損失の差が大きいことがわかる。計算点の高さを変えたCase-2では、Case-1と比べCase-3との音響透過損失の差が小さい。高さを変えたCase-1では、高さ方向に卓越する定在波等の影響により、室の平均音圧レベル算出結果に空間的な偏りの影響が含まれてしまうため、Case-3との差が大きくなると考えられる。

一方、計算点の高さを変えたCase-2の場合、少ない点数で室内の平均的な音圧レベルに近い値を得ることができていると考えられる。また、周波数が高くなるにつれ、Case-1およびCase-2とCase-3の差は小さくなっているが、

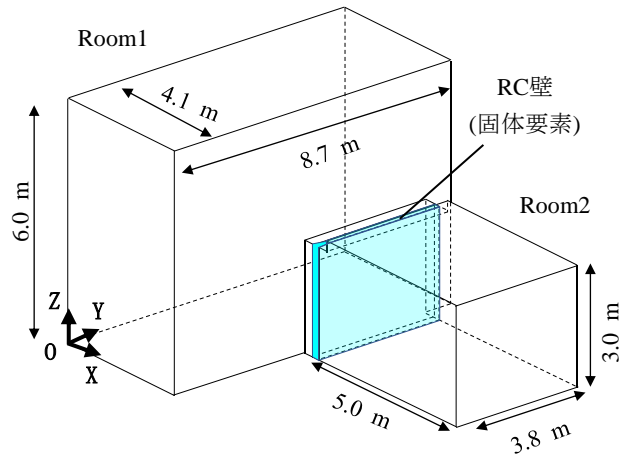


Fig. 6 解析対象とした矩形残響室
Rectangular Reverberation Rooms for the Analysis

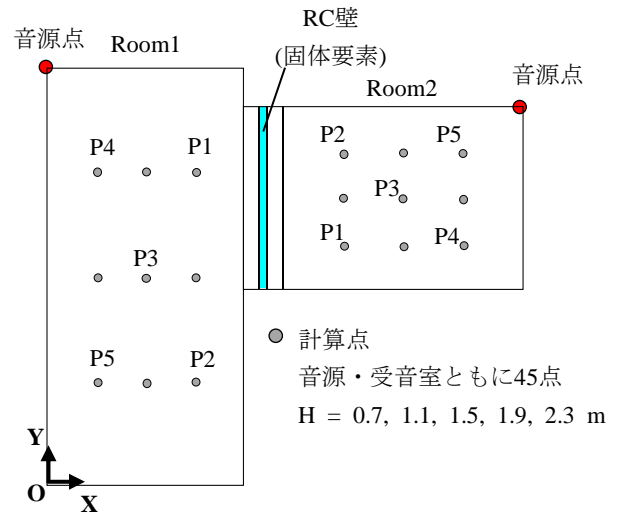


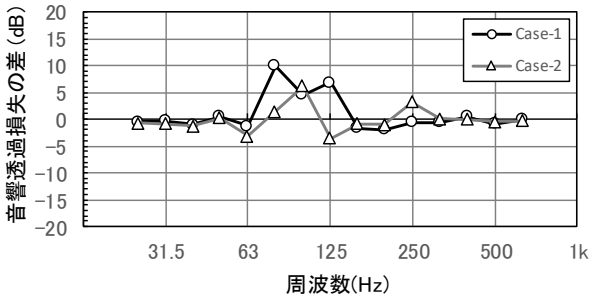
Fig. 7 音源点と計算点位置
Source Point and Calculation Point Locations

Table 2 解析周波数と要素分割の設定
Set the Analysis Frequency and Element Division

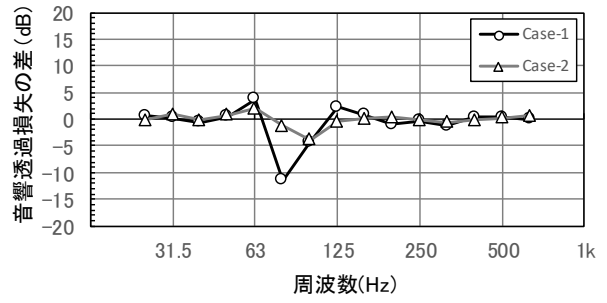
媒質	解析周波数	要素数	節点数	要素最大長さ
空気	20~707 Hz	715436	126572	160 mm
RC	20~707 Hz	6839	11558	160 mm

Table 3 計算点の選び方
Selected Calculation Points

計算点の選び方	計算点	計算点高さ
Case-1	同一平面における対角5点	P1~P5 H = 1.5 m
Case-2	高さを変えた対角5点	P1 H = 1.2 m
		P2 H = 0.9 m
		P3 H = 0.6 m
		P4 H = 1.5 m
		P5 H = 1.8 m
Case-3	全計算点45点	

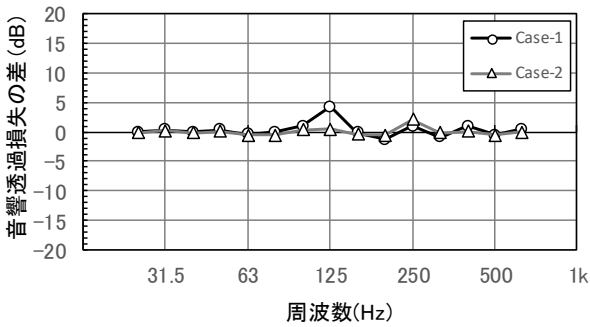


Room1(音源室) → Room2(受音室)の結果

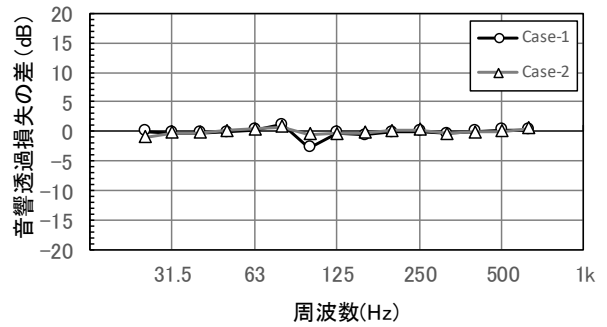


Room2(音源室) → Room1(受音室)の結果

(a) 音圧レベルから音響透過損失を算出した場合



Room1(音源室) → Room2(受音室)の結果



Room2(音源室) → Room1(受音室)の結果

(b) 音響エネルギー密度から音響透過損失を算出した場合

Fig. 8 計算点の選び方による音響透過損失の算出結果の差

Difference in the Calculation Results of Sound Transmission Loss Due to the Selection of Calculation Points

これは周波数が高くなるにつれ、室内の音場が拡散音場に近づくことで、音圧分布の偏りが小さくなったためと考えられる。なお、音源室と受音室を入れ替えた場合についても同様の傾向が確認できる。

一方、Fig. 8(b)の音響エネルギー密度から音響透過損失を算出した場合をみると、計算点の選び方による音響透過損失算出結果の差が小さいことがわかる。

音圧レベルより算出した音響透過損失(Case-1~3)と音響エネルギー密度(Case-1)より算出した音響透過損失の比較をFig. 9に示す。ここでは、Room1を音源室、Room2を受音室とした結果のみを示す。

音響エネルギー密度より算出した音響透過損失の値は、計算点5点のみから算出した値であるが、特に80 Hz、および100 Hz帯域において、音圧レベルより算出した音響透過損失のCase-3に近い値であることが確認できる。

以上より、音響エネルギー密度の測定を行うことにより、計算点の選び方に起因する音響透過損失の結果のばらつきを抑えることが可能になると考えられる。

5. 矩形残響室での固体音解析

5.1 解析の概要

矩形残響室で床を加振した際に生じる固体音を、解析により算出した。解析対象とした矩形残響室をFig. 10に

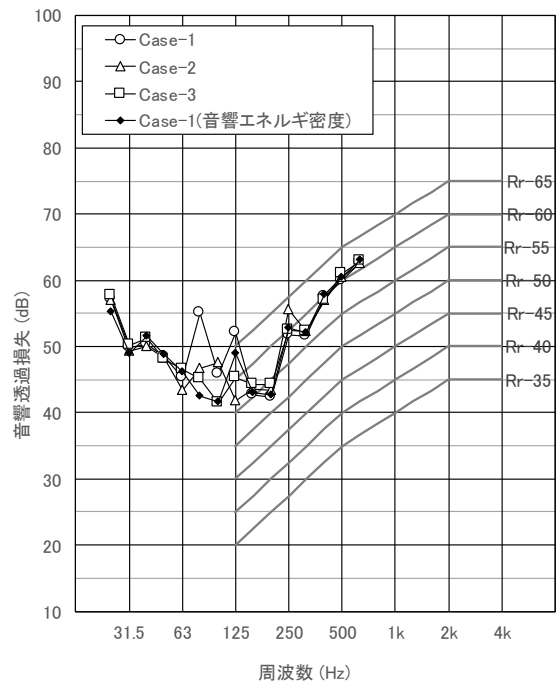


Fig. 9 音圧レベルおよび音響エネルギー密度より算出した音響透過損失の比較

Comparison of Sound Transmission Loss Calculated from Sound Pressure Level and Sound Energy Density

示す。躯体RCの物性値は前章に示すものと同様である。躯体RCの底面は固定支持とした。

計算点は、水平面内の9点を高さ方向に5平面配置した計45点とした。なお室の対角線上の高さを変えた5点については、P1～P5の記号を付している。

有限要素法で周波数領域の解析を実施した。各種解析の設定については、4章と同様である。解析周波数と要素分割の設定をTable 4に示す。

加振源位置は上階スラブの中央1点とし、鉛直下向き方向に単位加振力1Nを与えた。なお、固体と流体要素の相互作用を含めた強連成条件での解析を行った。

加振するスラブの下室へは、躯体RCからの固体伝搬音が伝わる。この際、下室には周囲の躯体RCからの放射音が生じることとなり、先述した無指向性点音源からの音の放射や、試験開口に設置されたRC壁からの放射とは異なる音の伝搬状況となっている。

吸音設定としては、室表面に吸音率0.01に相当する音響インピーダンスを実部のみに与えた。躯体RCの壁1面は試験用開口であるが、この面の吸音設定も上記と同様とし、開口からの音の周りこみはないものとした。

5.2 解析結果

計算点45点における E_p , E_k , E の標準偏差を1/3オクターブバンド毎にまとめた結果をFig. 11に示す。

E_p のばらつきは31.5 Hz～100 Hz帯域で大きく、室の定在波の影響を大きく受けていることが推察される。

E_p と E を比較すると、 E のばらつきは、 E_p よりも全帯域で小さかった。これは、無指向性点音源を音源とした、3章での検討結果と同様の傾向である。

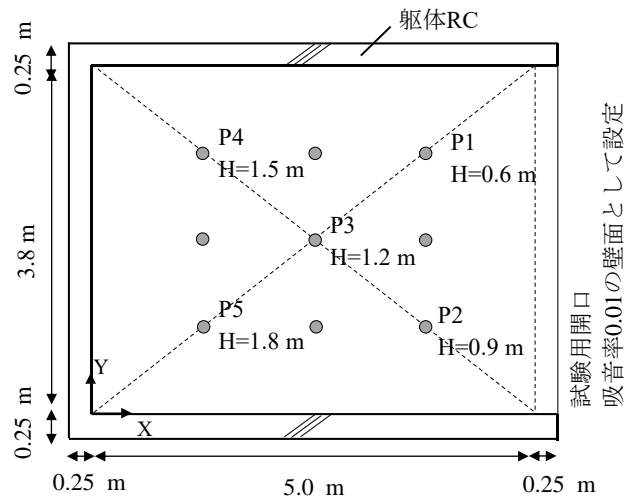
P1～P5における各点の結果と5点のエネルギー平均値の差を算出した結果をFig. 12に示す。なお、音圧および E から算出した差をそれぞれ示す。

Fig.12(a)の音圧の各点での値とエネルギー平均値の差をみると、40 Hz～80 Hz帯域において、エネルギー平均値に対する差が大きく、室内に生じる定在波による音圧分布の偏りの影響を受けていると推察される。

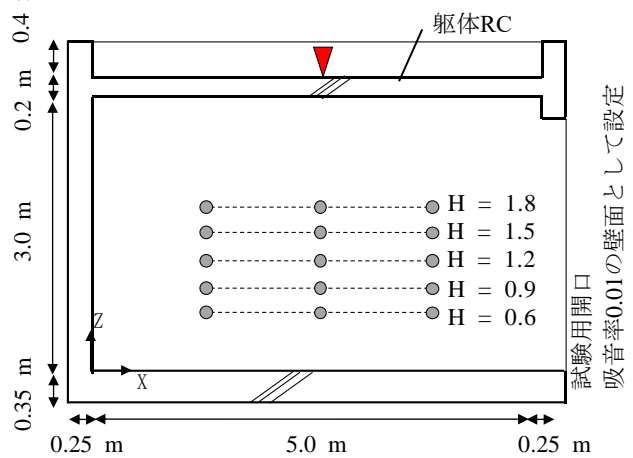
一方、Fig.12(b) E の各点の値とエネルギー平均値の差をみると、125 Hz帯域以上のP3で若干大きくなっているものの、音圧の結果と比べエネルギー平均値との差が小さくなっている様子がわかる。

P1～P5から算出される平均音圧レベルから平均音響エネルギー密度レベルの差を算出した結果をFig. 13に示す。40 Hz～100 Hz帯域にかけて、若干両者に差が生じていることがわかる。拡散音場においては、両者は一致するはずであるため、上記の帯域においては音圧分布の偏りにより、結果に差が生じていることが推察される。

以上より、床加振時の固体音測定を行う際は、音響エネルギー密度を測定することにより、低い周波数帯域において測定点ごとのばらつきを抑えた測定が可能と考えられる。



(a) 平面図



(b) 断面図

Fig. 10 解析対象とした室
A Room for analysis

▲ 加振点
● 計算点

Table 4 解析周波数と要素分割の設定
Analysis Frequency and Element Division

媒質	解析周波数	要素数	節点数	要素最大長さ
空気	20～707 Hz	156422	217232	160 mm
RC	20～707 Hz	65475	106366	160 mm

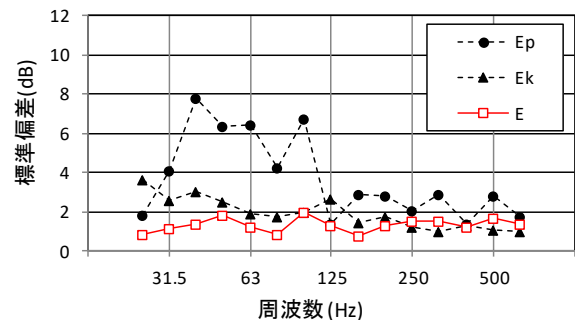


Fig. 11 E_p , E_k , E の標準偏差の比較
Comparison of the standard Deviation of E_p , E_k , and E

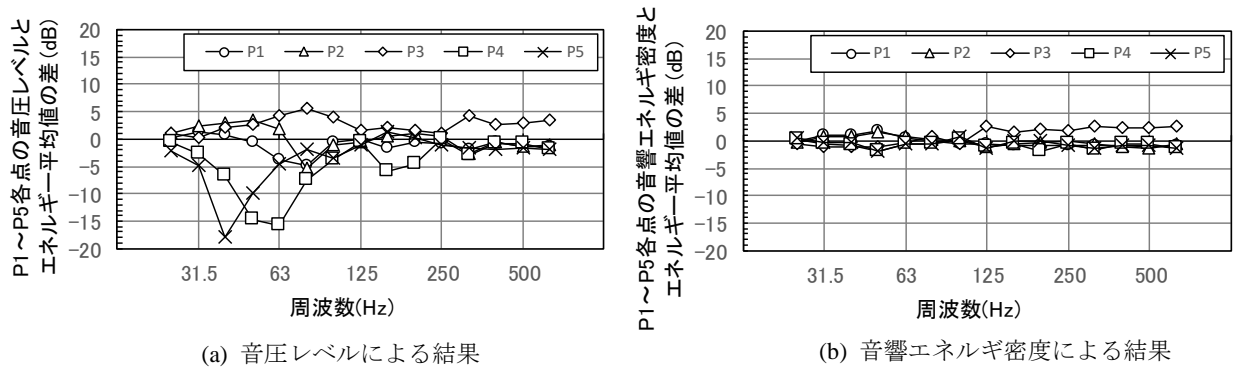


Fig. 12 P1～P5における各点での結果と5点のエネルギー平均値との差

Result at Each Point in P1-P5 and Difference Between the Energy Mean Value of the Five Points

6. まとめ

音圧分布に空間的な偏りが生じやすい矩形残響室において、音響エネルギー密度測定の安定性を明らかにすることを目的に、基礎的検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 定在波の影響により、音圧分布が偏在する音場においても、音響エネルギー密度によれば計算点ごとのばらつきは小さかった。
- 2) 音響透過損失算出時、音響エネルギー密度を用いることで、低い周波数帯域における計算点の選び方に起因する結果のばらつきを抑えることが可能であった。
- 3) 固体音のような複雑な音の放射条件においても、音響エネルギー密度によれば計算点ごとのばらつきは小さかった。

音響エネルギー密度を用いた測定が実用化されれば、従来困難であった低い周波数帯域における建築部材の遮音性能の把握が容易となり、建物の品質管理に貢献できると考える。今後は、音響エネルギー密度の実測を行い、解析結果の検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 折笠：ホテル客室間の遮音性能について，騒音制御 Vol. 9, No. 4, pp. 191-195, 1985
- 2) 山本，他：同一室形状での重量床衝撃音測定値のばらつき，騒音制御Vol. 25, No. 4, pp. 215-219, 2001

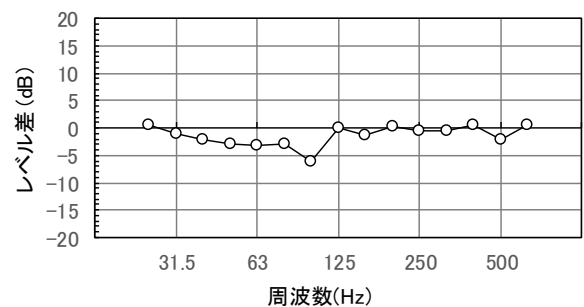


Fig. 13 P1～P5における平均音圧レベルと平均音響エネルギー密度レベルの差

Difference Between Average Sound Pressure Level and Acoustic Energy density level and at P1-P5

- 3) 松岡，他：受音高さ方向による重量床衝撃音測定値のばらつき，騒音制御Vol. 25, No. 4, pp. 220-223, 2001
- 4) 羽入，他：カーディオイドマイクを用いた室内音響エネルギー密度の測定，日本音響学会建築音響研究会資料, AA2009, 37
- 5) 竹林，他：PUセンサを用いた室内の音響エネルギー密度測定，日本建築学会学術講演梗概集（環境I），pp. 213-214, 2017
- 6) 平光，他：PUセンサを用いた音響エネルギー密度計測の応用例，日本建築学会学術講演梗概集（環境I），pp. 215-216, 2017
- 7) JIS A 1416:2000，実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法