

論文

残響室における空室時残響時間の予測と測定系の診断

中田 修* 神田浩一*

Measurement system test that predicts the reverberation time in an empty reverberation room

Osamu NAKATA and Koichi KANDA

Abstract The standard sample is not defined in measurement of sound absorption coefficients in a reverberation room. Instead of using a standard sample, the sound absorption coefficient is defined by the difference between two reverberation times when a specimen is placed in a reverberation room, and when it is not placed. The judgment methods of whether a measurement system is normal or not are the checking of the operation of instruments under measurement, investigating the measurement results, etc. This paper describes a synthetic test method of the condition of a measurement system. The method is to predict the reverberation time in an empty reverberation room which changes according to temperature and humidity, and to compare the predicted value with an actual measurement. In order to realize this, the sound absorption effect of an empty reverberation room was expressed with an equation. Then, the reverberation time was predicted with a 3% degree of accuracy to arbitrary temperature and humidity. Thus, it became possible to test the conditions of the measurement system synthetically.

Keywords Reverberation time, Sound absorption coefficient, Reverberation room

1. はじめに

建築音響材料や道路用吸音パネルなどの吸音性能の評価に、残響室法吸音率測定¹⁾と呼ばれる手法がよく用いられる。これは、吸音面に対し、あらゆる方向からランダムに音が入射した場合の吸音率を測定する方法で、実際の使用状態に近い値が得られる。測定は、図1に示す残響室内で、広帯域の可聴周波数成分を含むピンクノイズを発生させ、中に試験体を入れた場合と、何も入れない空室の場合の残響時間を測定し、それらの違いから計算で吸音率を求める。

このように吸音率は、規定条件のもと、試験体の有無による2つの残響時間により、定義されているので、残響室法吸音率測定には、基準となる標準試料というものが定められていない。測定系が正常に機能しているかの判断は、各機器の動作確認と測定結果の解析等によって行われている。

そこで総合的に測定系を簡易診断する方法として、毎回測定する空室時残響時間に着目した。空室時残響時間は、温度や湿度の影響を受け、残響室内の空気や壁による音の吸収により、複雑に変化するので、この予測値と

実測値が一致するか否かにより、診断が可能と考えた。

まず温湿度条件から空室時残響時間を予測する方法を検討し、その精度を評価して、測定系の簡易診断に利用できるか検討したので報告する。



図1 残響室（外観）

2. 空室時残響時間の予測

空室時の残響時間を支配するものは、大きく分けて、残響室内の空気による音の吸収と、壁による音の吸収の2つが考えられる。空気の吸収はJISの式¹⁾で求められるので、壁の吸収を数式化できれば、残響時間の予測が可能となる。

*光音計測技術グループ

音の吸収と残響時間の関係は、式(1)の Sabine の残響式で表されるので、解析は等価吸音面積で行い、適宜、残響時間に変換する。等価吸音面積とは、音エネルギーの吸収効果を、完全吸音面(吸音率 1)の面積に換算したものである。

$$A = \frac{55.3V}{cT} \quad (1)$$

ここで、 A は等価吸音面積、 V は室容積、 c は音速 ($c = 331 + 0.6t$, t : 温度), T は残響時間である。

以下、残響時間の実測データを基に、予測計算式を導いていく。

2.1 実験方法および実測データのサンプル

測定は、日本工業規格 JIS-A-1409 に準拠して行った¹⁾。測定システムは、図 2 のような構成になっており、様々な温湿度条件における空室時残響時間を測定した。ここでいう残響時間とは、残響室内でスピーカから約 100dB のピンクノイズを発生させ、停止後、音圧レベルが 60dB 減衰するまでの時間のことである。これを 100Hz から 5000Hz までの 1/3 オクターブバンド 18 周波数について測定する。温湿度計は、残響室の床中央から 3m の高さ

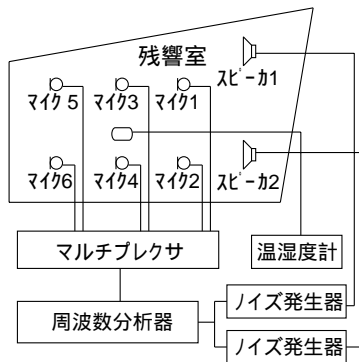


図2 測定システム

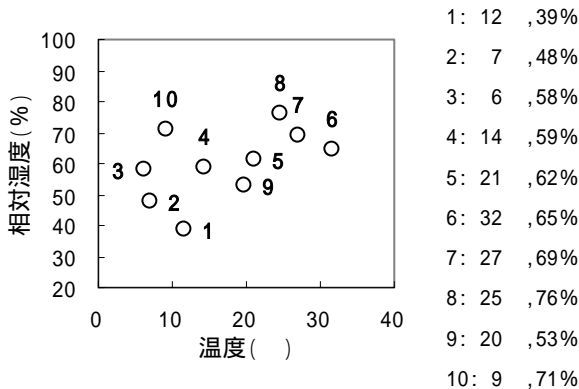


図3 サンプルの温湿度条件

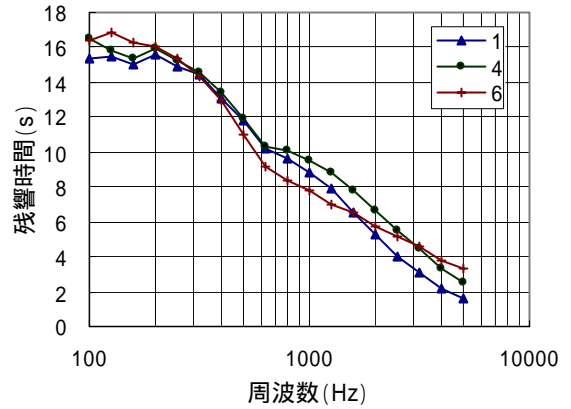


図4 空室時残響時間(実測値)

当所の残響室は、不整形七面体構造(室容積 451m³, 表面積 353m²)をしており、表面は人造石研ぎ出しになっている。残響特性を良くするため、内部に空調ダクトなどの設備は設けていない。このため、内部の温度と湿度は、気象条件によって変化するので、1年間にわたり、温湿度条件の異なる約 60 の空室時残響時間を測定した。

この中から、計算式を導くためのサンプルとして図 3 に示すように、温湿度条件が広範囲にわたる 10 個の空室時残響時間の実測データを用いる。これらの周波数 - 残響時間特性を図 4 に、それを Sabine の残響式を使って、等価吸音面積に換算したものを図 5 に示す。

なお、ここでいう周波数とは、1/3 オクターブバンド中心周波数のことで、以後、「周波数」と略す。

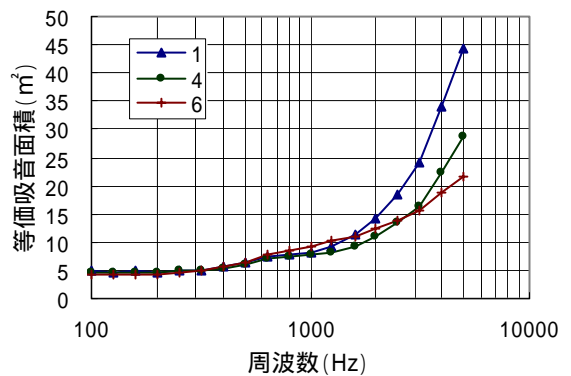


図5 室全体の等価吸音面積

2.2 空気による音の吸収

空気による音エネルギーの吸収は、式(2)のようになり、空気の音響吸収係数 m は、気圧を標準気圧と仮定した場合、式(3)のように周波数、温度、相対湿度を変数とする関数になる¹⁾。

$$A_{air} = 4Vm \quad (2)$$

$$m = M(f, t, h) \quad (3)$$

ここで、 A_{air} は空気の等価吸音面積、 m は空気の音響吸収係数、 f は周波数、 t は温度、 h は相対湿度、 V は室容積である。

これらの式に 10 個のサンプルの温湿度条件をそれぞれ入力し、計算した空気の等価吸音面積の周波数特性を、図 6 に示す。

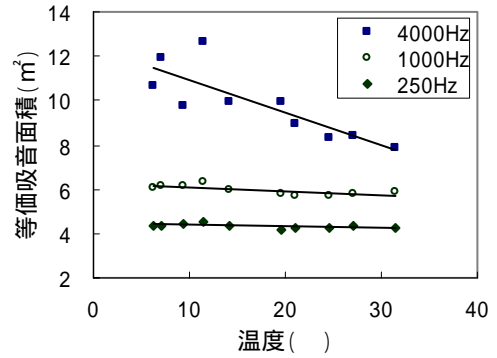
2.3 壁等による音の吸収

空室時の室全体の等価吸音面積 (図 5) から空気の等価吸音面積 (図 6) を引いたものを図 7 に示す。この中には、壁による吸収成分のほか、壁以外の諸要因による吸収成分も含まれていると考えられる。壁以外の諸要因として、空気による吸収の誤差成分や、残響室の構造およびスピーカなどの機器に起因する吸収成分などが考えられる。

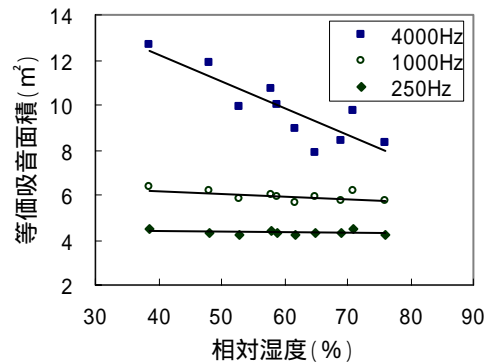
なお、図 7 の等価吸音面積を残響室内部の表面積で割ると、0.01~0.04 になり、コンクリートや大理石の吸音率²⁾が 0.01~0.03 といわれているので、値自体は妥当な値といえる。

壁と壁以外の諸要因による等価吸音面積を、厳密に分離することは困難なので、まとめて式で表すことにする。

傾向を調べるため、図 7 の等価吸音面積を周波数ごとに、温度と相対湿度をパラメータとするグラフに変換す



(1) 温度をパラメータ



(2) 相対湿度をパラメータ

図 8 壁等の等価吸音面積と温湿度の関係

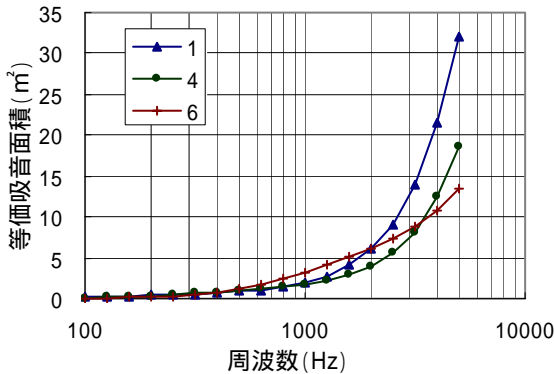


図 6 空気の等価吸音面積

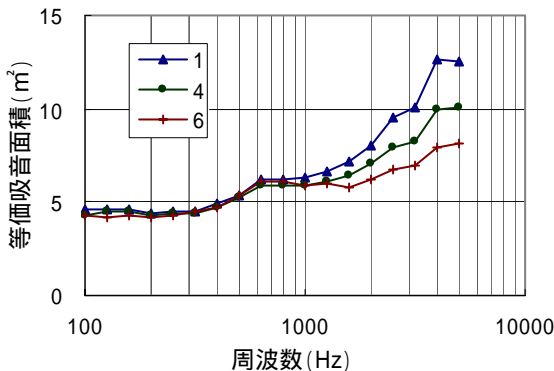


図 7 壁等の等価吸音面積

ると、それぞれ図 8 (1), (2) のようになり、どちらも直線的な傾向が見られた。そこで、壁等の等価吸音面積 A_{wall} を、式 (4) のように、温度 t と相対湿度 h を独立変数とする 1 次式 (線形重回帰式) で表すことにする³⁾。周波数ごとに最小二乗法で係数 a_0, a_1, a_2 を求め、その結果の一覧を表 1 に示す。

なお、これらの式は当所残響室の場合の式である。

$$A_{wall} = a_0 + a_1 t + a_2 h \quad (4)$$

表 1 壁等の等価吸音面積を表す式

1/3オクターブバンド中心周波数 f (Hz)	壁等の等価吸音面積 A_{wall}
100	$4.746 - 0.0167t - 0.0007h$
125	$4.623 - 0.0190t + 0.0014h$
160	$4.699 - 0.0150t - 0.0005h$
200	$4.355 - 0.0048t - 0.0009h$
250	$4.443 - 0.0055t - 0.0003h$
315	$4.447 + 0.0016t - 0.0008h$
400	$4.848 - 0.0048t - 0.0006h$
500	$5.327 - 0.0055t + 0.0002h$
630	$6.165 - 0.0040t - 0.0018h$
800	$6.195 - 0.0041t - 0.0028h$
1000	$6.477 - 0.0149t - 0.0045h$
1250	$6.886 - 0.0185t - 0.0068h$
1600	$7.677 - 0.0371t - 0.0108h$
2000	$8.839 - 0.0494t - 0.0163h$
2500	$10.845 - 0.0713t - 0.0286h$
3150	$11.481 - 0.0722t - 0.0324h$
4000	$15.026 - 0.1057t - 0.0561h$
5000	$14.832 - 0.0773t - 0.0603h$

2.4 予測の計算式

計算式は、周波数ごとに作成し、予測計算の際は、温度と相対湿度のみの入力で、残響時間が求まるようにした。式(5)で室全体の等価吸音面積を計算し、式(1)のSabineの残響式で残響時間に換算する。

$$A_r = A_{air} + A_{wall} \quad (5)$$

ここで A_r は室全体の等価吸音面積、 A_{air} は空気の等価吸音面積、 A_{wall} は壁等の等価吸音面積である。

3. 結果および考察

計算から求めた空室時残響時間の予測値を図9の実線で示す。図4の実測値を図9に点線で重ねると、両者はよく相関がとれており、予測式は温湿度条件に対する空室時残響時間の特徴をよく表している。

各予測値の実測値に対する誤差は、図10に示すように、概ね±3%程度に収まっている。ただし、低い周波数、特に100Hzでは、若干誤差が大きくなる傾向にあった。原因として、低周波数域における音圧分布の不均一性など

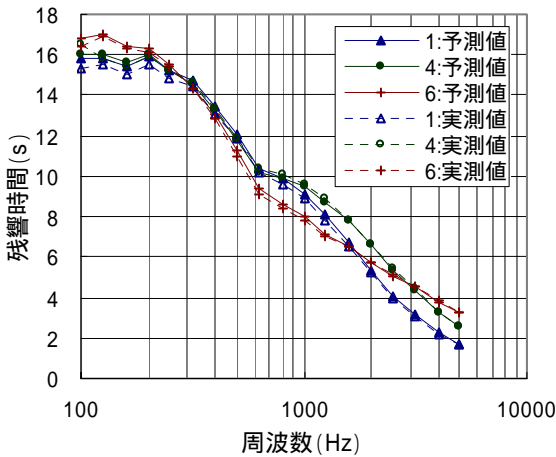


図9 空室時残響時間(予測値と実測値)

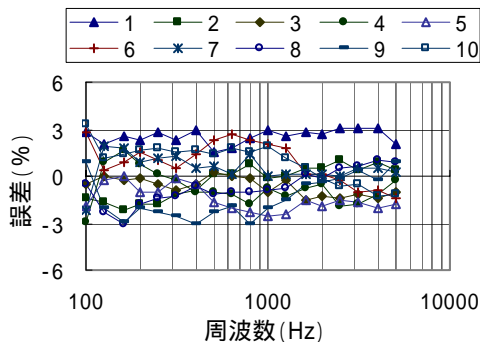


図10 予測値の誤差

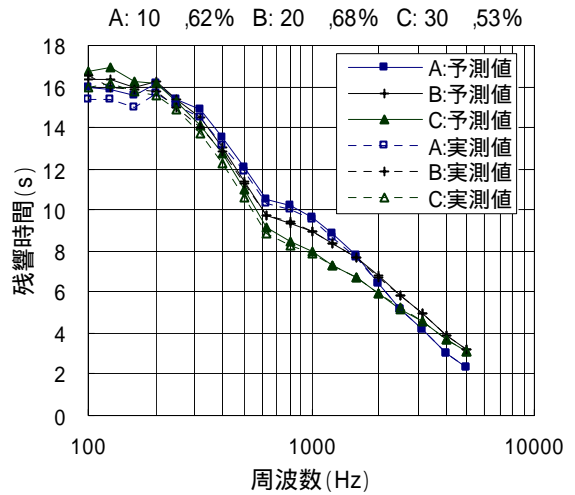


図11 サンプル以外の検証例

が考えられる。逆に高い周波数では、誤差は小さくなり、全周波数域を平均すると±3%(2標準偏差)であった。

残響時間の測定自体、同じ温湿度条件でも±1%程度、変動することがあるので、±3%という誤差は許容できる値といえる。予測式を使って、サンプル以外の事例についても検証した結果、やはり低い周波数域で、若干誤差が大きくなる傾向がみられるものの、全周波数域平均で、±3%の精度が得られた。その検証例を図11に示す。

以上のことから、空室時残響時間の予測値と実測値の比較による、測定系の簡易診断は可能であるといえる。また、サンプルの温湿度条件(図3)から、予測式は温度10~30℃、相対湿度40~80%という広範囲の温湿度条件に対して、成り立つことがわかる。

今回の診断方法を従来の方法、すなわち、各機器の動作確認や測定結果の解析等による方法と、組み合わせることによって、測定の信頼性が更に向上することが期待できる。

測定系診断以外への予測式の利用として、残響室法吸音率の温湿度補正なども考えられ、今後、予測精度の向上も含め、検討していきたい。

4. まとめ

当所の残響室における空室時残響時間を任意の温湿度条件に対して、±3%の精度で予測できるようになった。これを利用して、空室時残響時間の予測値と実測値の比較による、測定系の簡易診断が可能となった。

参考文献

- 1) 残響室法吸音率測定 JIS A 1409(1998).
- 2) 太田光雄 他:基礎物理音響工学,朝倉書店,217(1990).
- 3) 浅井 晃,村上正康 共訳:初等統計学,培風館,258(1981).

(原稿受付 平成16年8月6日)