

居住空間の吸音設計目標値に関する理論的・実験的検討

Theoretical and experimental study

on target values for sound absorption design of living space.

学籍番号 47-176746
氏名 坂本 栞 (Sakamoto, Shiori)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1 はじめに

1.1 研究背景

建築音響はコンサートホールのような音楽用途のみでなく、音声コミュニケーションや静けさ確保の為の設計も含み、吸音と遮音の2つに大別される。室内で発生した音は反射、吸収及び透過するものに分かれ、このうち反射以外が吸音である。

居住空間の吸音には残響抑制と騒音低減の役割があり、設計の為の目標値として残響時間や平均吸音率がある。残響時間とは、室の残響の程度を量的に表し、発された音が止んでから 60 dB 減衰する時間を指す。平均吸音率とは室の総吸音力を全表面積で除した値で、室の平均的な吸音状態を表す。

学校の音環境に関する AIJES^[1]では諸室の目標値が示されているが、オフィスや保育所、公共空間等に関するものはなく、室用途や室寸法、騒音源との関係には不明な点がある。吸音は音響品質を確保する為に重要だが、指針が不十分であることや、設計者の知識不足等により吸音不足の空間が少なくないのが現状である。

1.2 研究目的

オフィスや保育所等の室に関して海外では吸音設計目標値が存在するが、我が国ではそれらの空間に関するものは存在しない。

本研究では、吸音設計目標値の設定方法について知見を得ることを目的に、残響抑制と騒音低減の両面から検討を行う。目標値の設定方法が、音声明瞭度と喧騒感に与える影響を理論的に検討した後、被験者実験を通し聴感的な変化について確認する。

2 吸音目標値に関する基礎的考察

2.1 吸音目標値の設定

本研究では、既存の目標値に加え、以下の4種類の吸音目標値に関して、拡散音場仮定の下、室寸法の変化に対する残響時間と暗騒音レベルの関係を理論式により求める。ここで、騒音源は空調騒音や人の活動音等を想定して、床面積当たりの音響パワーレベルを L_{ws} とし、パワーレベル一定と仮定する。残響時間は以下の Sabine の式に基づくものとする。

$$T = 0.161 \cdot S_f \cdot h / A \quad (1)$$

h :天井高[m], S_f :床面積[m²], A :吸音面積[m²]
暗騒音レベル L は、次式の床面積当たり音響パワーレベルに対するレベル差に着目する。

$$\Delta L = -10 \lg(A/S_f) + 6 \quad (2)$$

なお、各吸音目標値の基準条件として、 $h=h_0$ で $T=T_0$ 、 $\Delta L = \Delta L_0$ とする。

(a) 残響時間を一定: $T = T_0$ 、 ΔL は次式の通り h が高くなると低下する。

$$\Delta L = -10 \lg(0.161 \cdot h/T_0) + 6 \quad (3)$$

(b) 床面積当たり吸音面積(A/S_f)を一定：

式(2)より ΔL は一定となるのに対し、 T は次式の通り h に比例し増大する。

$$T = T_0 \cdot h/h_0 \quad (4)$$

(c) 上記2ケースの吸音面積の平均値を一定：

$$T = 2T_0/(1 + h_0/h) \quad (5)$$

$$\Delta L = -10 \lg[0.161(h_0 + h)/2T_0] + 6 \quad (6)$$

(d) 平均吸音率を一定： $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_0$ 、床面寸法によっても変化し、床面辺長 d mの正方形の場合を想定すると次式が得られる。

$$T = 0.161/\bar{\alpha}_0/(2/h + 4/d) \quad (7)$$

$$\Delta L = -10 \lg[\bar{\alpha}_0(2 + 4h/d)] + 6 \quad (8)$$

2.2 ドイツ工業規格の室内音響指標

2016年改定のDIN 18041^[2]では、大・中規模の室をA群、小規模の室をB群とし特に後者では残響抑制と騒音低減を考慮した推奨値が設定されている。表1の5つの室用途類型に対し、次式の通り A/V の下限值が h の関数として設定され、B2からB5にかけて T が短くなるよう規定している。

$$h \leq 2.5 \text{ [m]} : A/V \geq a \quad (9)$$

$$h > 2.5 \text{ [m]} : A/V \geq (b + 4.69 \lg h)^{-1} \quad (10)$$

2.3 待合室想定 of 各目標値の比較

DINでは待合室や休憩室等の会話・騒音のある空間をB3に区分している。ここで8 m×8 m×3 m(H)でのB3推奨値を便宜的に基準とし、5つの目標値を比較する。但し、(d)では $\bar{\alpha}_0 = 0.15$ を目標値とする。

図1に各目標値の T と ΔL の変化を示す。 $h = 2.5 \sim 5.0$ mの範囲において、(a)では ΔL が3 dB変化し、 h が低い時、騒音増大の可能性があり、(b)では T が0.7~1.4 sの変化となり残響過多の恐れがある。(c)では上記2ケースの中間的な性質を示し、 T が0.8~1.1 s、 ΔL が1.8 dBの変化となっている。 h が

表1. DIN B群の推奨値

用途	$h \leq 2.5$ [m]	$h > 2.5$ [m]
B1: 滞在することのない室	N/A	N/A
B2: 短期滞在の室	$a = 0.15$	$b = 4.80$
B3: 長期滞在の室	$a = 0.20$	$b = 3.13$
B4: 騒音低減と快適性を必要とする室	$a = 0.25$	$b = 2.13$
B5: 騒音低減と快適性を特に必要とする室	$a = 0.30$	$b = 1.47$

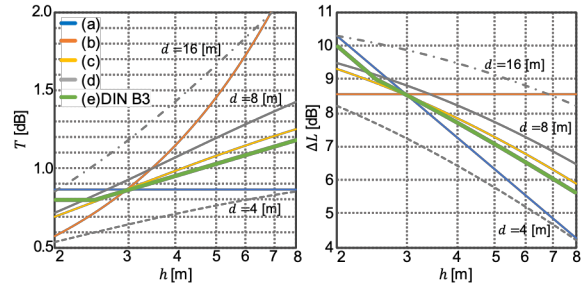


図1. 室寸法の変化に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化

高くなると T は若干増大するものの、 ΔL は若干低下しトレードオフが生じる。一方、(d)では(c)と同様にトレードオフが生じ、 h の範囲に加えて $d = 4, 8, 16$ mと想定すると、 T が0.6~1.6 s、 ΔL が4.2 dBの範囲で大きく変化することがわかる。(c)はDINと近い値となっている。

3 音声伝送性能指標による比較

前章での理論的考察を踏まえ、音声伝送性能指標 STI ^[3]に基づき、待合室想定空間における明瞭度の比較を行う。 STI は、発した音声の特徴が、聴取位置で保存されている程度を物理的に示す MTF ^[3]より算出される。理論計算で MTF を得るには、室容積や吸音率等の室条件や騒音源、発声者との距離(r)の設定が必要となる。 L_{ws} は多群会話を想定し50 dB、音声の音響パワーレベル L_{wsp} は68 dBとした。受音点での音声レベル L_{sp} は直接音レベル L_{spd} と拡散音レベル L_{spr} を足し合わせた次式で求まる。

$$L_{sp} = L_{wsp} + 10 \lg[Q/(4\pi r^2) + 4/R] \quad (11)$$

Q :指向係数, R :室定数 $S\bar{\alpha}/(1 - \bar{\alpha})$

本検討では、 r を近距離(1 m)、中距離(4 m)と想定し、次式でMTFを得る。

$$m(F) = \quad (12)$$

$$[1 + (2\pi FT/13.8)^2]^{-1/2} [1 + 10^{(-S/N)/10}]^{-1}$$

F : 変調周波数, S/N : 受音点の L_{sp} と L の差[dB]

得られたMTFをSTIに換算し、図2に(a)~(c)の場合の室寸法に対するSTIの変化を示す。(d)は最も室寸法の影響を受け、(e)は(c)と近い傾向を示すので除外した。暗騒音有無の影響をみる為、暗騒音無しのSTIを併記する。暗騒音無しの時は d が大きい程 L_{spr} より L_{spd} が支配的になることでSTIの値が大きいのに対し、暗騒音有りの時は d が大きい程 L_{spr} が小さく、SN比が小さくなることでSTIの値が小さい。 $r=1$ mの場合、暗騒音有りの時、無しに比べSTIの変化幅が小さい。これは、 r が臨界距離より小さいことと、暗騒音があることでSN比の補正がかけられる影響による。 $r=4$ mの場合、暗騒音有りの時、無しに比べてSTIの変化幅が大きい。これは r が臨界距

離より大きい為、暗騒音無しの際のSTIは T の変化で決まり、暗騒音有りの時はSN比が正から負の値をとりSTIが大きく変化するからである。目標値毎の変化は、(a) h が低いと L が大きくなり、(b) h が高くなると T が長くなり、各々STIは小さくなる。(c)は上記の中間的な性質を示す。

4 吸音目標値に関する実験的検討

前章までの理論的検討を踏まえ、音声明瞭度と周囲の音に対して同様な優劣を生じるか聴感実験を行い確認する。居住空間での音声聴取を想定して、表2に示す目標値(a)~(c)と室寸法($d=4,8,16$ m, $h=2.5,5$ m)毎の残響と騒音を付加し、 $r1$ 条件につき18音場を再現し、「聞き取りにくさ」と暗騒音がある時は「うるささ」も含み基準条件 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m(H)}$ との一対比較を行った。前章と同じく $r=1,4$ m, $L_{ws}=50$ dBとする。但し、暗騒音有無の影響を見る為、 L_{spr} が支配的な $r=4$ mの時は暗騒音無し

表2. 被験者実験の音源条件

条件数	目標値	室寸法		T [s]	L_{spr} [dB]	L [dB]
		d [m]	h [m]			
1	(a)	4	2.5	0.86	64.8	59.3
2	(a)	4	5	0.86	61.7	56.3
3	(a)	8	2.5	0.86	58.6	59.3
4	(a)	8	5	0.86	55.3	56.3
5	(a)	16	2.5	0.86	52.4	59.3
6	(a)	16	5	0.86	48.8	56.3
7	(b)	4	2.5	0.72	63.9	58.5
8	(b)	4	5	1.44	64.1	58.5
9	(b)	8	2.5	0.72	57.7	58.5
10	(b)	8	5	1.44	57.9	58.5
11	(b)	16	2.5	0.72	51.4	58.5
12	(b)	16	5	1.44	51.6	58.5
13	(c)	4	2.5	0.79	64.4	58.9
14	(c)	4	5	1.08	62.8	57.3
15	(c)	8	2.5	0.79	58.1	58.9
16	(c)	8	5	1.08	56.4	57.3
17	(c)	16	2.5	0.79	51.9	58.9
18	(c)	16	5	1.08	50.1	57.3
基準	(a)~(c)	8	3	0.86	57.8	58.5

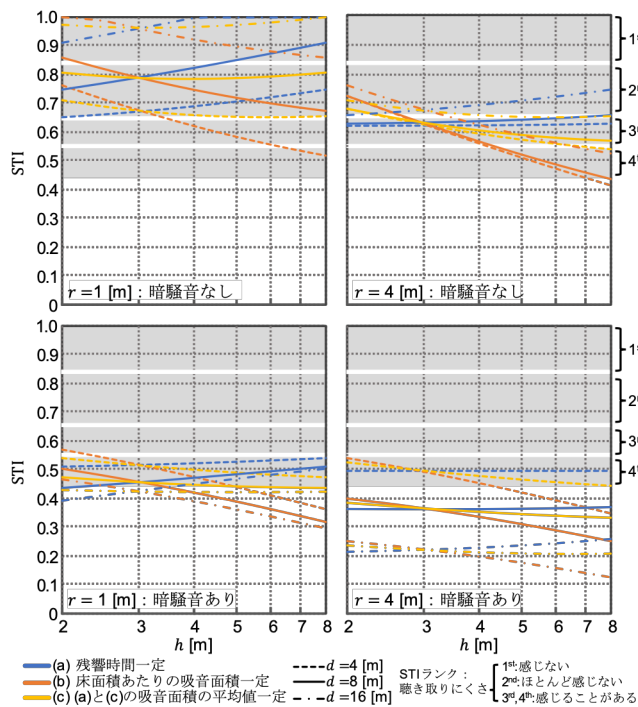


図2. 室寸法や暗騒音の変化に対するSTIの変化

注1:式(11)の L_{spd} 算出部分 $L_{sp} = L_{wsp} + 10 \lg [Q / (4\pi r^2)]$ より
 $r=4$ mで $L_{spd}=48$ dB, $r=1$ mで $L_{spd}=60$ dBとする
 注2: $r=4$ m想定の場合、暗騒音なし条件を含む
 注3:暗騒音レベルは騒音がある場合の値である

条件も含む。残響付加のインパルス応答は、便宜的に直接音を発してから 50 ms 以降のものとした。図 3 のシステムの 1~6ch で拡散音と暗騒音、被験者正面の 7ch で直接音を流す為、 L_{spr} と L_{spd} を分けてレベル設定した。音声音源は 30 代男性による 5 秒程度の音読音源^[4]、暗騒音音源は音声を加算し作成したバブルノイズ^[5]である。

評価結果を図 4 に示す。 $r = 4$ m 暗騒音無しの時、STI と同様に d が小さい程聴き取りにくいと感じ、 h に対する印象の変化幅が小さいのは(c)であった。 $r = 4$ m 暗騒音有りの時、明瞭度、喧騒感共に変化が小さい上、ばらつきが大きく有意差はほとんどなかった。これは、本実験で用いたインパルス応答の性質により L_{spr} が L_{sp} でなく、 L として捉えられた可能性があり、 L_{spd} が L でマスキングされ、基準、比較条件共に明瞭度が著しく悪い為だと考えられる。 $r = 1$

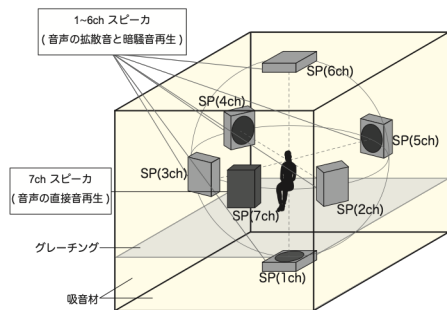


図 3. 実験の再生システム

m 暗騒音有りの時、 d が小さい程聴き取りにくく、うるさいと感じている。これは前述の L_{spr} を L と捉えている影響だと考えられ、STI と逆の傾向を示す。 h に対する「聴き取りにくさ」の変化幅が小さいのは、 $d = 4$ m で(a), $d = 8, 16$ m では(b)と d により変わる。 d が小さい時は T の変化、 d が大きい時は L_{spr}, L の変化の影響が大きいと考えられる。「うるささ」では、 d による L_{spr} の変化は聴き分けられているが、目標値毎の違いは聴き分けられているとは言えず、 L との対応は得られなかった。

5 おわりに

本研究では、居住空間の吸音目標値に関して理論的に検討し、被験者実験で聴感的な変化を確認した。理論的検討で、目標値によって残響過多や騒音増大となることが示唆された。実験より、暗騒音が無い時は理論値との対応が見られ、目標値として望ましいものが示されたが、本研究の焦点である暗騒音がある時の変化については対応が見られなかった。今後はシミュレーション等を用いて、より現実的な音場を再現した上で比較を行う必要があると考える。

参考文献 [1] 日本建築学会編, 学校施設の音環境保全基準・設計指針, 日本建築学会, 2008. [2] DIN 18041:2016, Acoustic quality in rooms-Specifications and instructions for the room acoustic design. [3] T.Houtgast et al., Acustica, 46, pp.60-72, 1980. [4] PASL-DSR, 筑波大学, 知能情報生体工学研究室, 1991. [5] 梶田他, 日本音響学会誌, 53, pp.337-345, 1997.

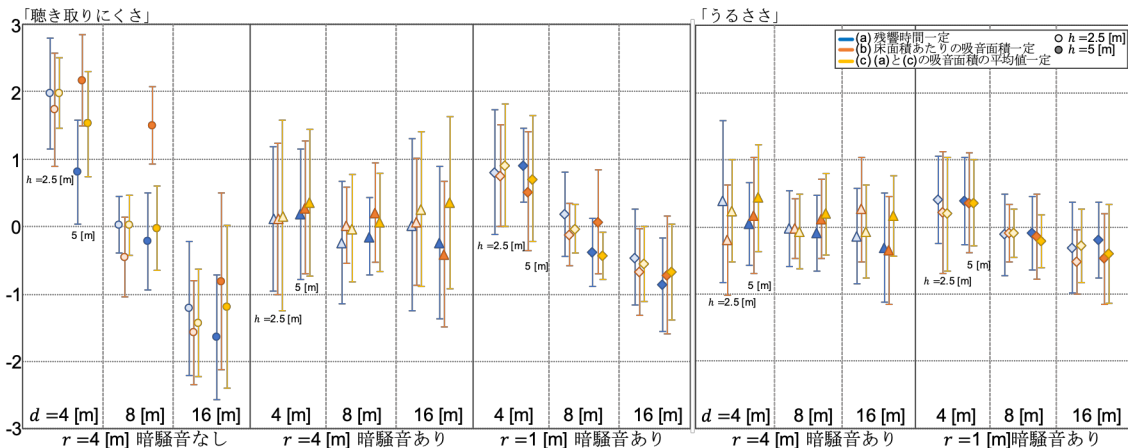


図 4. 「聞き取りにくさ」(左)と「うるささ」(右)の評価結果