

# 室内の残響時間と音声明瞭度の関係性に関する理論的・実験的検討

## Theoretical and experimental study on the relationship between reverberation time and speech intelligibility in room

学籍番号 47-206735  
氏名 廣瀬 量子 (HIROSE, Ryoko)  
指導教員 佐久間 哲哉 教授

### 1 はじめに

建築空間における良質な音環境には遮音対策と共に吸音対策が重要となるが、日常空間を対象とした吸音性能の基準や設計指針は未整備であり、吸音性能と音声伝送性能との関係性の明確化が一つの鍵となる[1]。

そこで本研究では、室容積と音源-受音点間距離をパラメータとして理論及び幾何音響解析によるケーススタディを行い、吸音性能の指標となる残響時間及び平均吸音率と明瞭性指標の関係を検討する。

### 2 理論的検討

#### 2.1 検討条件

室内の拡散音場を仮定すると、直接音エネルギー $E_D$ と初期反射音エネルギー $E_E$ を有効音、後期反射音エネルギー $E_L$ を妨害音(Fig. 1)とした割合から明瞭性指標クラリティ $C_{50}$ は次式で表せる。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_D + E_E}{E_L} = 10 \lg \left[ \left( 1 + \frac{r_c^2}{r^2} \right) e^{\frac{6 \ln 10}{T} t} - 1 \right] \text{ [dB]} \quad (1)$$

ここで、 $t = 50 \text{ ms}$ 、残響時間 $T$ はEyring式によるものとし、 $r$ は音源-受音点間距離、臨界距離 $r_c$ は次式による。

$$r_c = \sqrt{\frac{R}{16\pi}} = \sqrt{\frac{S\bar{\alpha}}{16\pi(1-\bar{\alpha})}} \text{ [m]} \quad (2)$$

室条件として三辺が1:2:4の直方体室を想定し、室容積 $V = 43 \sim 27,000 \text{ m}^3$ 、平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.05 \sim 0.40$ 、音源-受音点間距離 $r = 2.5, 5, 10 \text{ m}$ の3条件を設定した。

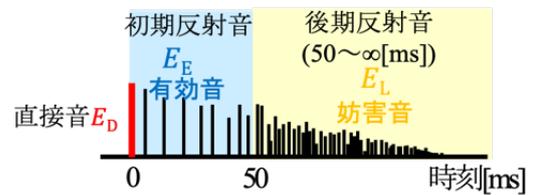


Fig. 1: Energy impulse response

#### 2.2 結果と考察

室容積と平均吸音率の組合せに対する $C_{50}$ の等値線をFig. 2に示す。等値線は山型となり、同じ明瞭性を確保するためには、室容積がある程度までは平均吸音率を増加する必要があるが、それ以上では逆に減少してもよいことを示唆している。等値線のピークとなる室容積は $r = 2.5 \text{ m}$ では $1,000 \text{ m}^3$ 程度、 $10 \text{ m}$ では $10,000 \text{ m}^3$ 程度となっており、音源-受音点間距離によって変化することがわかる。また、 $10 \text{ m}$ の場合でも平均吸音率を $0.3$ に設定すれば、室容積に依らず $C_{50}$ は $0 \text{ dB}$ を下回らないことが確認できる。

縦軸を残響時間とした場合の $C_{50}$ の等値線をFig. 3に示す。等値線はFig. 2でピークとなる室容積付近まではほぼ平坦であるが、それ以上では傾きが急激に大きくなっている。直接音を考慮しない条件では、理論的に $C_{50}$ は残響時間のみで決まり室容積に依存しないが、室容積がある程度以上では残響時間が多少長くなっても必ずしも明瞭性は低下しないことを示唆している。

### 3 幾何音響解析

#### 3.1 解析手法

本研究では中・大規模空間の音環境を対象とするため、幾何音響解析(音線法)を用いた。音線

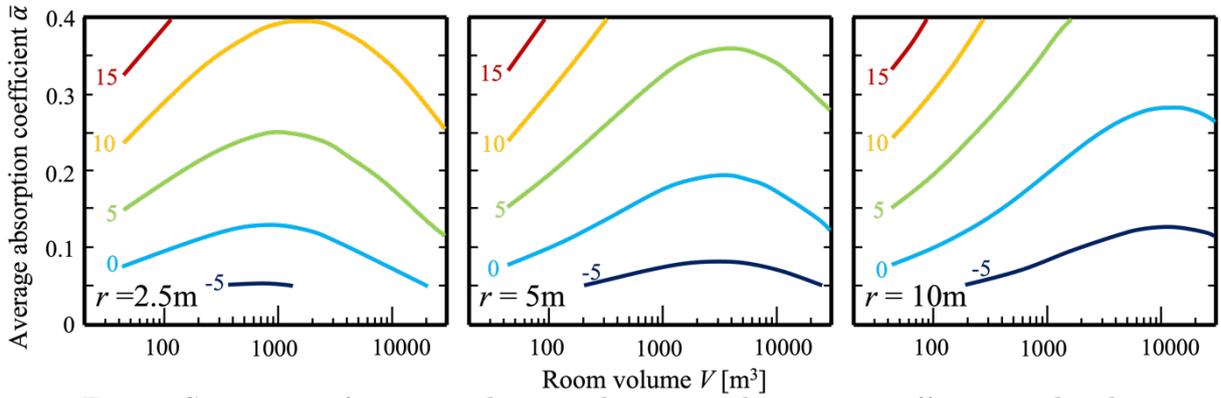


Fig. 2:  $C_{50}$  contours for room volume and average absorption coefficient under three

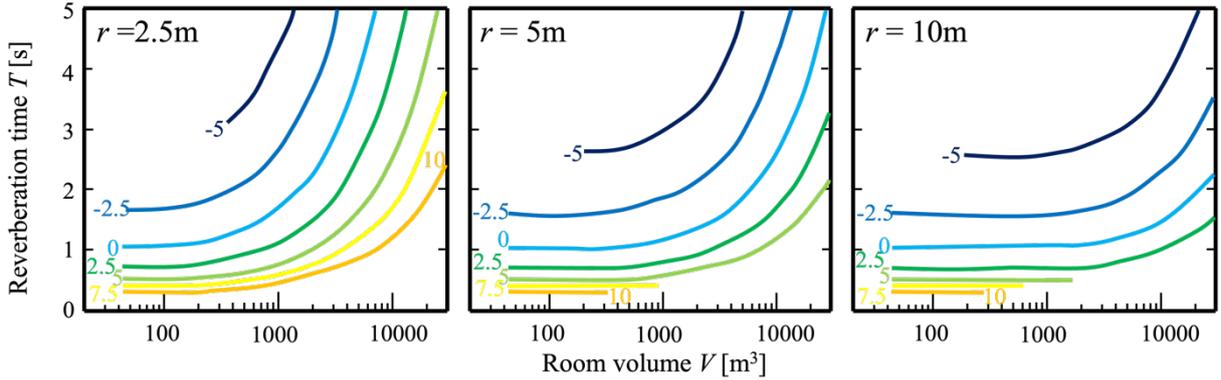


Fig. 3:  $C_{50}$  contours for room volume and reverberation time under three conditions of  $r$

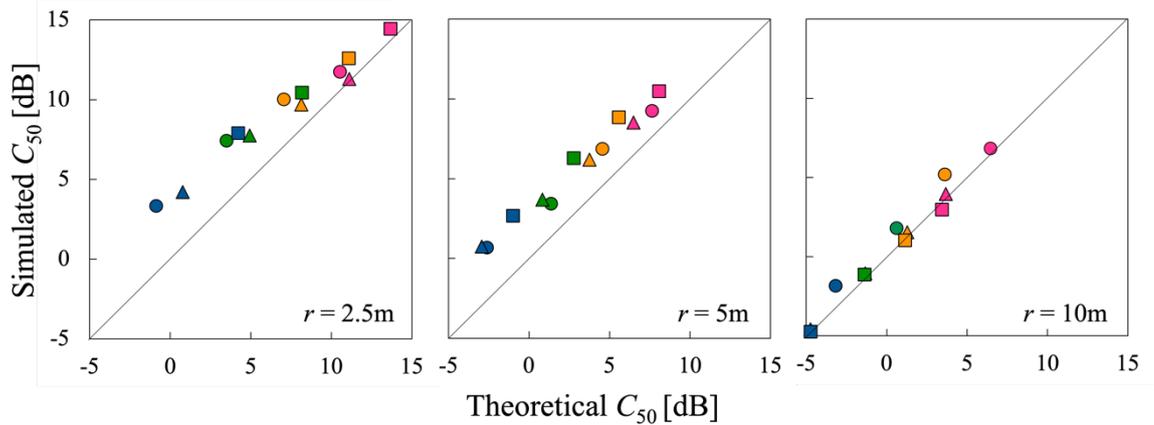


Fig. 5: Theoretical and simulated  $C_{50}$  under three conditions of  $r$   
 ( $\circ$  :  $V = 1000$ ,  $\Delta$  :  $5000$ ,  $\square$  :  $25000 \text{ m}^3$ )

法とは音源からエネルギーを持つ多数の音線を球状に放出し、それを追跡して、受信点に到来するエネルギーの分布をインパルス応答として求める手法である。得られたエネルギーインパルス応答から各室内音響物理指標を算出する。

### 3.2 解析条件

理論的検討と同様に 1:2:4 の直方体を想定し、音線法による幾何音響解析を行った。ただし、室容積  $V = 1,000, 5,000, 25,000 \text{ m}^3$ 、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 、音源-受信点間距離  $r = 2.5, 5, 10 \text{ m}$  の合計 36 条件について解析し、エネルギーインパルス応答から室内音響指標を算出した。な

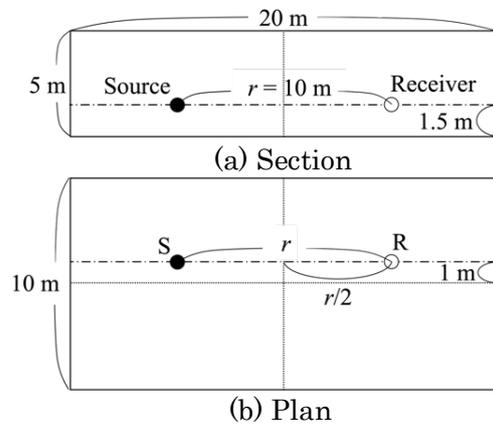


Fig. 4: Arrangement of source and receiver  
 ( $V = 1000 \text{ m}^3$ ,  $r = 10 \text{ m}$ )

お、音源と受音点の配置についてはFig. 4の通り、長手方向では中心から等距離、短手方向では特異点となる中心軸から1 m 外れた位置とし、高さは共に床上1.5 mとした。

### 3.3 結果と考察

$C_{50}$  の理論値と解析値との対応関係を Fig. 5 に示す。直接音の寄与が小さい  $r=10$  m では両者は良く対応しているのに対して、5 m 及び 2.5 m では解析値の方が高く、その傾向は吸音率が低いほど顕著となっている。その原因としては、床面からの1次反射音による直接音の増強が考えられ、反射性の床仕上げの場合、理論値を 3 dB 程度上回ると予想される。また、本検討では音源・受音点を室中央部に配置しているが、壁面近傍ではさらに  $C_{50}$  の解析値は上昇する可能性がある。

## 4 暗騒音を含めた理論的検討

### 4.1 検討条件

実空間では目的音以外の様々な騒音が妨害音として明瞭性を下げる要因になる。そこで、暗騒音も含めた明瞭性指標である  $U_{50}$  についても理論的に検討する。 $U_{50}$  は  $C_{50}$  の妨害音側に暗騒音エネルギー  $E_N$  が加わり、次式で表せる。

$$U_{50} = \frac{E_D + E_E}{E_L + E_N} \quad (3)$$

2 章と同様の条件において、音源パワーレベルを 68 dB とし、平均吸音率  $\bar{\alpha}=0.2$  の時、設定したい暗騒音レベル  $N$  dB となるような床面積辺りの暗騒音レベルを与え、室の吸音による騒音低減も考慮した。基準となる暗騒音は  $N = 40, 50, 60, 70$  dB の 4 段階に設定した。

### 4.2 結果と考察

音源-受音点間距離  $r = 5$  m の時の  $U_{50}$  の結果を Fig. 6 に示す。平均吸音率を上げることによる明瞭性向上の効果が見られる。ただし、暗騒音が大きい場合には音源-受音点間距離と室容積によっては吸音効果が得られにくいことがわかった。音源-受音点間距離が大きくなるほど直接音によるエネルギーは相対的に寄与しにくくなり、 $U_{50}$  を構成するエネルギー要素のうち  $E_E$  と  $E_N$  が支配的となる。しかし、吸音率をあげることで、 $E_E$  も  $E_N$  も低減され、有効音と妨害音どちらのエネルギーも下がるので結果的に明瞭性に変化が見られない。同様に室容積が小さくなると反射音の寄与が相対的に高くなり、 $E_E$  と  $E_N$  が支配的となるので、吸音率をあげても、その吸音によるエネルギーの低減が起き、明瞭性はあまり向上しないと考えられる。

## 5 聴感心理実験

### 5.1 音場再生手法

6ch 音場再生システムを用いて音場を再現し、被験者実験を行なった。これは、無響室内に設置された 6 台のスピーカーから各方向に対応する音源を再生することで、中央の受聴位置で再現された三次元音場を体験できるものである。

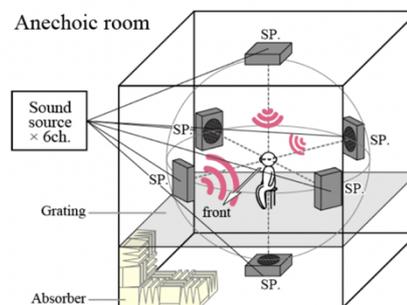


Fig. 7: 6ch system for reproduction sound field

### 5.2 実験条件

理論的検討で得られた傾向が聴感的にも対応しているか確認するため、同様に 1:2:4 の直方体を想定し、音場を再現して聴感心理実験を行なった。室容積  $V = 1,000, 5,000, 25,000$  m<sup>3</sup>、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 、音源-受音点間距離  $r = 5, 10$  m、暗騒音は平均吸音率  $\bar{\alpha}=0.2$  の時、 $N = 40, 50$  dB となるような床面積あたりの暗騒音レベルの合計 48 条件の音場について、約 20 秒のスピーチを各 2 回聞かせ、「聴き取りにくさ」を 4 段階で評価させた。被験者は 20-30 代の男女 16 名である。評価尺度は「聴き取りにくくはない」を 1 点の評点とし、「非常に聴き取りにくい」までの 4 段階とした。

### 5.3 実験結果と考察

「聴き取りにくさ」について得られた平均評点を Fig. 8 に示す。 $N = 50$  dB は全体的に評点が高くなっている。グラフは右肩下がりになっており、吸音率が上がるにつれて「聴き取りにくさ」が減っていることがわかる。特に  $\bar{\alpha} = 0.1$  から 0.2 にかけて顕著でその後は緩やかな減少である。また、 $r = 5$  m の近距離では  $V = 5,000$  m<sup>3</sup> と 25,000 m<sup>3</sup> による違いはほとんど見られない。

「聴き取りにくくはない」以外を選んだ割合である「聴き取りにくさ」の割合(LDR)を算出したものを Fig. 9 に示す。 $N = 50$  dB ではほとんどの条件が LDR 100 % 付近になっており室容積や吸音率による違いはほとんど見られない。一方  $N = 40$  dB では室容積や吸音率による変化について平均評点と同様の傾向が見られた。つまり、室容積がある程度以上では残響時間が多少長くなっても必ずしも明瞭

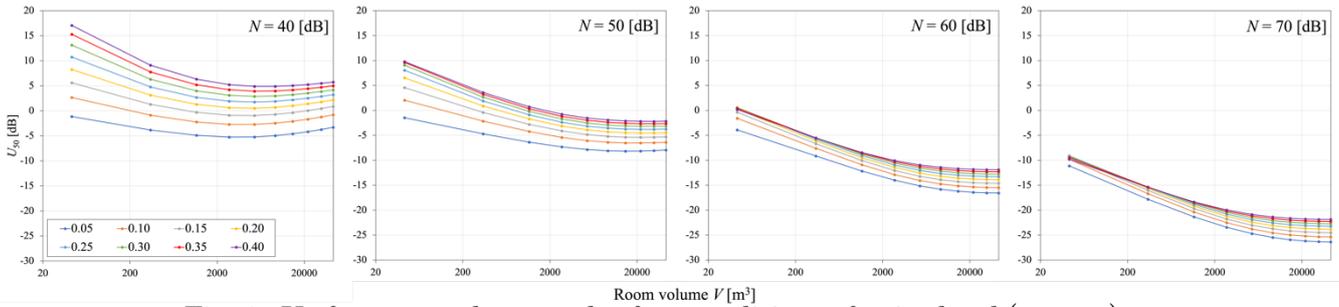


Fig. 6:  $U_{50}$  for room volume under four conditions of noise level ( $r = 5$  m)

性は低下しないことが聴感的にも確認できた。また、日本音響学会による音声伝送性能クラスによる区分と今回の結果の関係は Fig. 9 のようになっており、室用途によらないとしても  $LDR$  は 50 % 以下に抑えることが望ましいとされる。

### 5.4 実験結果に基づく分析

聴感心理実験による主観評価の結果と、理論及びシミュレーションで算出した物理指標との対応関係を確認するため、平均評点との相関係数を算出した。暗騒音別に算出すると、 $N = 40$  dB の時に残響時間  $T$  との対応が非常によい。音源-受音点間距離別では  $r = 5$  m で  $N$  との対応がよく、 $r = 10$  m では SN 比との対応が良いことがわかった。全 48 条件との相関係数を Tab. 1 に示す。 $U_{50}$  が最も相関が高く、正規化を行うと直線の回帰式が得られた。その式から  $LDR$  と  $U_{50}$  の対応を Fig. 10 に表した。一般に  $U_{50} = 0$  dB の時に 50% の人が聴き取りにくいと感じると言われているが、本実験結果では  $LDR = 50\%$  となる理論値  $U_{50}$  は 3 dB 付近となった。 $C_{50}$  の解析値を見ると  $r = 5$  m で 3 dB 程度高くなっているため解析値  $U_{50}$  と対応させるとより近似曲線に近い値をとると予想される。

吸音率の変化との対応をみると、 $U_{50} = 0$  dB 付近の場合、一段階でも吸音率をあげると「聴き取りにくさ」の割合が大幅に改善されるということがわかる。ただし、SN 比が 0 dB を下回る際には、吸音率や室容積に関わらず「聴き取りにくさ」は増す。

## 6 まとめ

吸音性能の指標となる残響時間及び平均吸音率と明瞭性指標の関係を理論的に検討した結果、室容積がある程度以上では残響時間が多少長くなっても必ずしも明瞭性は低下せず、平均吸音率を一定値以上に設定する必要がないことが示唆された。また、理論的に算出した  $U_{50}$  と聴感の対応も傾向を捉えられており、設計段階での推定に生かせる可能性が示唆された。

### 参考文献

[1] 増田潔他, 音響学会誌 56, 232-242 (2000)

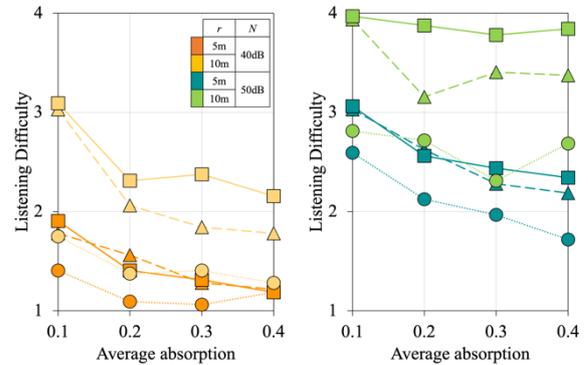


Fig. 8: Average score of Listening Difficulty ( $\circ$ :  $V = 1000$ ,  $\Delta$ :  $5000$ ,  $\square$ :  $25000$  m<sup>3</sup>)

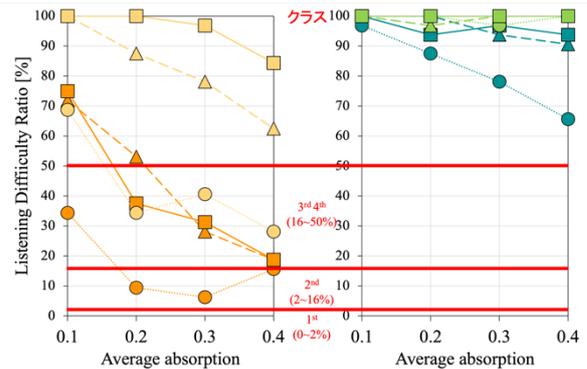


Fig. 9: Listening Difficulty Ratio [%]

Tab. 1: Correlation coefficient

	$T$		$C_{50}$		$D_{50}$		$N$ [dB]	SN比	$U_{50}$
	理論	解析	理論	解析	理論	解析			
相関係数 $r$	0.43	0.44	0.47	0.57	0.47	0.57	0.74	0.85	0.92

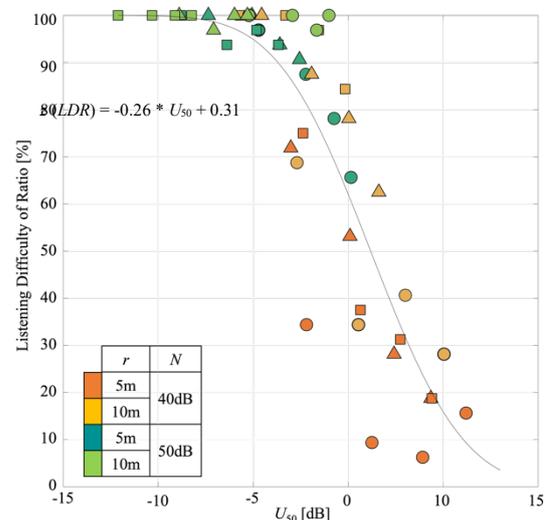


Fig. 10:  $LDR$  and  $U_{50}$