

東京大学大学院 新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

2021年度  
修 士 論 文

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

2022年1月17日提出  
指導教員 佐久間 哲哉 教授

廣瀬 量子  
HIROSE, Ryoko

(余白)

# 目次

第1章	序論	5
1.1	研究の背景	5
1.1.1	先行例 ドイツ工業規格 DIN18041	5
1.1.2	推奨残響時間	8
1.1.3	推奨平均吸音率	9
1.2	研究の目的	10
1.3	論文の構成	11
第2章	理論的検討	13
2.1	緒言	13
2.2	前提理論式の検討	13
2.2.1	検討項目	13
2.2.2	結果と考察	16
2.3	パラメトリックスタディによる検討	22
2.3.1	結果	22
2.3.2	考察	22
第3章	シミュレーション解析	25
3.1	緒言	25
3.2	幾何音響解析	25
3.2.1	音場数値解析手法	25
3.2.2	音線法の計算方法	26
3.3	条件・モデルの設定	28
3.3.1	室規模の設定	28
3.3.2	吸音条件の設定	28
3.3.3	音源・受音点の設定	29
3.4	幾何音響解析による物理指標の算出	30

---

3.4.1	音響物理指標 . . . . .	30
3.4.2	解析結果と理論値の対応及び考察 . . . . .	32
第 4 章	暗騒音を含めた理論的検討 . . . . .	35
4.1	緒言 . . . . .	35
4.2	条件の設定 . . . . .	35
4.3	パラメトリックスタディ . . . . .	36
4.3.1	結果 . . . . .	36
4.3.2	考察 . . . . .	36
第 5 章	聴感心理実験による検討 . . . . .	39
5.1	緒言 . . . . .	39
5.2	6ch 音場再生システム . . . . .	39
5.3	実験概要 . . . . .	40
5.3.1	実験音源 . . . . .	40
5.3.2	評価方法 . . . . .	42
5.4	実験結果 . . . . .	44
5.4.1	実験結果と考察 . . . . .	44
5.4.2	物理量と心理量の対応 . . . . .	48
第 6 章	総括 . . . . .	55
6.1	研究の成果 . . . . .	55
6.2	今後の課題 . . . . .	56
図目次		58
表目次		59
参考文献		61
謝辞		63
発表論文一覧		65
付録		67

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

建築とは、使う人が居て初めて成り立つ空間である。人々がそこで様々な社会的、あるいは私的な活動をし、新しいものを生み出し、成長する場となる。建築を構成する要素の中でも、熱・光・空気・音などの環境的要因は人々が快適に過ごすために重要となる。中でも音環境は、目に見えず、季節による変化などもあまりない分見落とされがちな分野ではあるが、人間の五感の一つである聴覚に影響する重要な要素である。良質な音環境の確保には、遮音対策と共に吸音対策が重要である。しかし、上質な音響設計が必要とされるコンサートホールやスタジオのような空間以外の居室ではその重要性について社会的認識が低く、遮音対策に比べ設計基準なども未整備である。そこで建築学会では吸音設計基準の策定に向けてワーキンググループが作成され、検討開始の動きがある。実際、吸音材料の設置はその特性上、反射性の材に比べて維持管理が大変で、コストもかかり、過剰に設置すれば良いというわけにもいかない。しかし、近年の公共施設や教育施設、オフィスなどはオープンプランや吹き抜けなど、巨大空間のものが多く建てられるようになっている。巨大な空間になれば、響きの長さが増し、人が多く集まるところでの喧騒感が高まる。場合によっては、そこで指示をしなければならない立場の人などは喉を痛める健康被害も出る。また、非常時には非常用案内放送が確実に利用者の耳に届くことも求められる。様々な面で吸音対策は重要であるため、設計段階からイメージしやすく扱いやすい指標や基準が必要となる。本章では、吸音設計に関わる既存の物理指標などについて簡単に整理していく。

#### 1.1.1 先行例 ドイツ工業規格 DIN18041

吸音設計基準の先行例としてドイツ工業規格 DIN18041[1] があげられる。大きく二つの区分になっており、話者がいて聴衆が居るような、中・長距離の音声伝送品質の確保を想定した中・大規模の室区分 A と近距離の音声コミュニケーションを想定した小規模の室区分 B か

Table 1.1: 室区分 A の用途分類

類型	用途	室容積[m <sup>3</sup> ]	例
A1	音楽	30～1000	音楽室、演奏空間
A2	スピーチ・講義	50～5000	劇場、講堂、会議室、
A3	同上弱者配慮	30～5000	公民館、裁判所、議場
	教育・コミュニケーション	30～1000	教室、会議室、高齢者
A4	同上弱者配慮	30～500	施設、介護施設
A5	スポーツ	200～30000	体育館、プール

らなっている。室区分 A は表 1.1 にあるように音楽、スポーツなど用途別の 5 段階の分類となっている。一方室区分 B は表 1.2 のように、部屋の性質から騒音提言と残響抑制の観点から 5 段階の分類となっている。図 1.1 のように室区分 A は室容積のログに比例して目標残響時間が次式で定められている。

$$T_0 = a \lg V + b \quad (1.1)$$

$T_0$  : 目標残響時間 [s]  $V$  : 室容積 [m<sup>3</sup>]

係数 a と b は表 1.3 の通り類型による。音声明瞭度が必要となるに従って残響時間は短く設定されている。A5 のスポーツ用途では室容積に対して残響時間が急激に増加している。これは、吸音面を配置するに当たって現実的な制約を考慮したものと考えられる。室区分 B は B1 から順に騒音低減と残響抑制のためにの高度な吸音性能が求められる区分となっている。天井高 2.5m を境に次式の通り与えられている。

$$h \leq 2.5 \text{ m} \quad \frac{A}{V} \geq \gamma \quad (1.2)$$

$$h > 2.5 \text{ m} \quad \frac{A}{V} \geq \frac{1}{\delta + 4.69 \lg h} \quad (1.3)$$

$\frac{A}{V}$  : 室容積 [m<sup>3</sup>] に対する必要吸音面積 [m<sup>2</sup>]  $h$  : 天井高 [m]

係数 a と b は表 1.4 の通り類型による。室容積から必要吸音面積が算出され、吸音面積比は天井高が高くなると少し低い値が許容される。(図 1.2) 室容積と総吸音面積を集計するだけでなく、残響時間や平均吸音率の算出は不要という特徴がる。天井高の上昇に伴い残響時間の増加を若干許容する一方で床面積あたりの吸音面積をある程度増加させ、室内騒音レベルの抑制を図っている。[2]

Table 1.2: 室区分 B の用途分類

類型	性質	例
B1	滞在しない	エントランス・廊下・階段等の往来空間 (学校・保育所・病院・介護施設を除く)
B2	短時間滞在	受付のある往来空間、展示場、 スポーツ施設の更衣室
B3	長時間滞在	展示室、学校・保育所の往来空間、 病院・介護施設の待合室。休憩室、診察 室、検査室、手術室、実験室、図書室、食 堂、売店
B4	騒音低減・ 快適性を要する	オフィス・図書館の受付・カウンター、 研究室、調理場、公民館、役所、介護施 設の居室、オフィス(個室はB3)
B5	騒音低減・ 快適性を特に要 する	学校・保育所・病院・介護施設の食堂、 高騒音の作業所、コールセンター、制御室 集中治療室、守衛室、学校・保育所の遊 戯室・更衣室

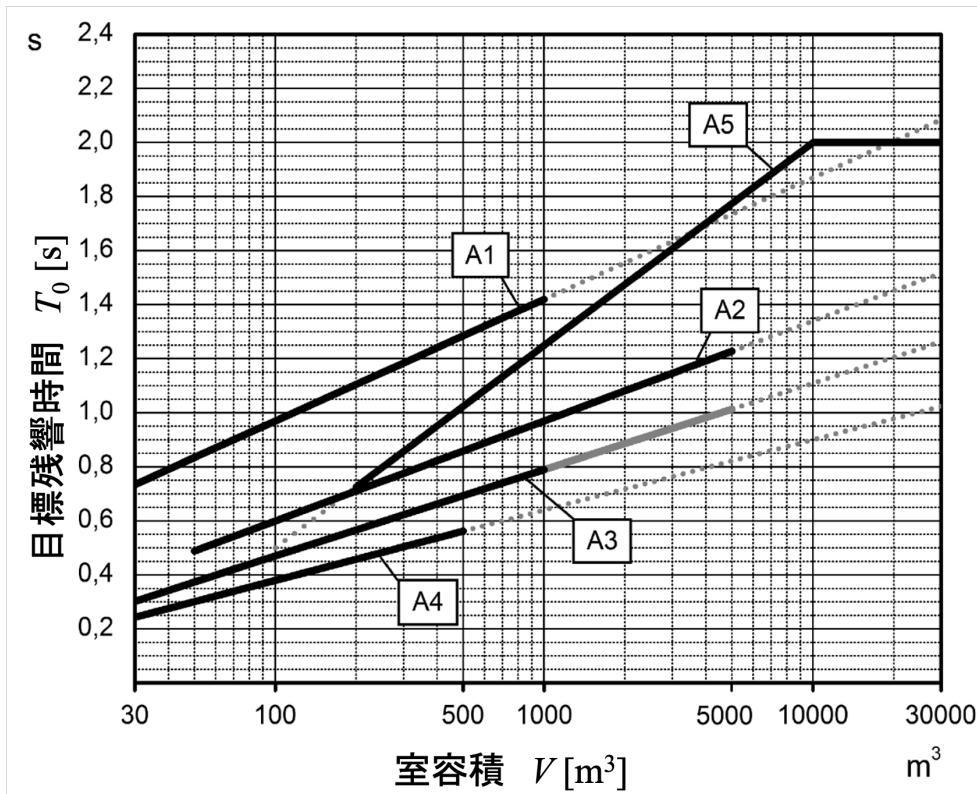


Fig. 1.1: 室区分 A における目標残響時間  $T_0$

Table 1.3: 用途類型 A1 ~ A5 の目標残響時間に係わる係数

係数	A1	A2	A3	A4	A5
a	0.45	0.37	0.32	0.26	0.75
b	+0.07	-0.14	-0.17	-0.14	-0.11

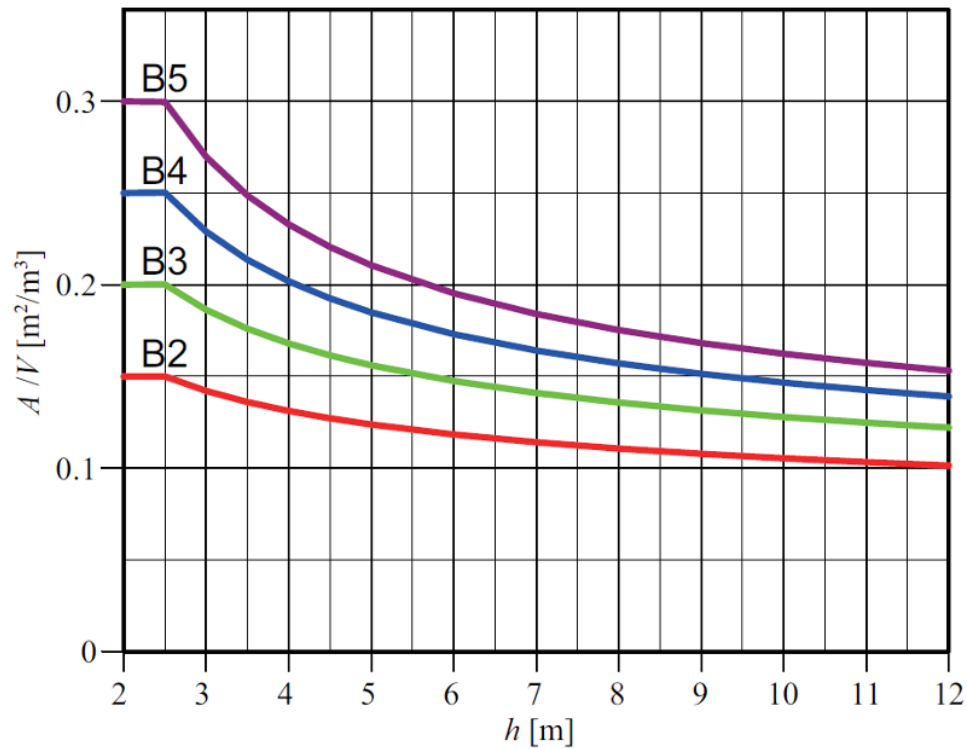
Fig. 1.2: 室区分 B における室容積  $V$  に対する必要吸音面積  $A$  と天井高  $h$ 

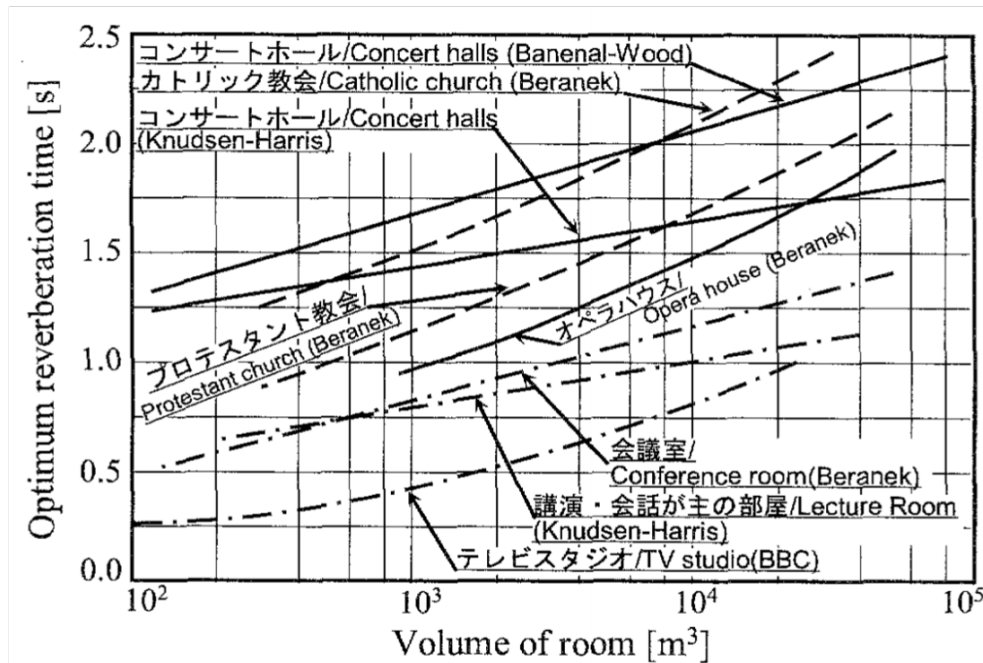
Table 1.4: 用途類型 B1 ~ B5 の目標残響時間に係わる係数

係数	B1	B2	B3	B4	B5
$\gamma$	N/A	0.15	0.32	0.26	0.75
$\delta$	N/A	4.80	3.13	2.13	1.47

### 1.1.2 推奨残響時間

建築の音響設計において長年広く使われているものに最適残響時間と呼ばれるものがある。最適残響時間としてよく用いられるものの一つを図 1.3 に示す。コンサートホールや教会などが多く、限定的な対象となっている。DIN で考えれば、用途と規模から室区分 A に該当する。しかし、理論的な根拠は明らかではない。残響時間の最適値については、Sabine[3] を始めと



Fig. 1.3: 最適残響時間  $T$ 

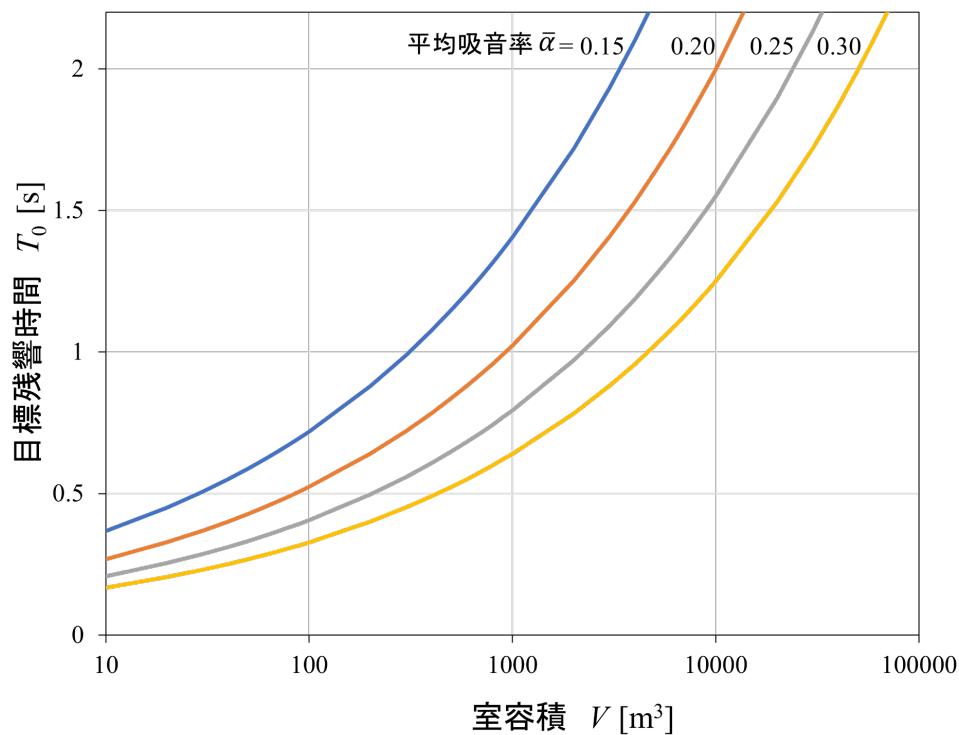
して多くの研究者が検討し、提案している。Lifshitz[4], Watsonらは音楽やスピーチに対する最適残響時間を吸音材や聴取者数を変化させることで検討した。Watson[5]は音響的に評判の良いホールから最適残響時間を割り出した。MacNair[6]やLifshitz[7]らは最適残響時間と室容積の関係を聴感実験をすることで検証した。Knudsen[8], Harris[9]らはスピーチと音楽の場合に分けて考えた。[10]このように、最適残響時間に関してはこれまで研究者が検証してきたものの、室用途が限られており、今日の公共空間や大きな会議室などの空間に対するものはまだ確立されていない。そのため、本論文では最適残響時間をあくまで推奨残響時間と呼ぶことにする。

### 1.1.3 推奨平均吸音率

また、建築音響設計において、用途によっては日本建築学会[11]によって表1.5のような平均吸音率の目安が提示されている。DINと比較すると全体的に高めの設定になっており、設計上はイメージもしやすく便利ではあるが、室容積や天井高は考慮されておらずただ平均吸音率のみで提示されている。そのため、平均吸音率と室容積、残響時間の関係を表すと、図1.4のようになっており、特に室容積が1000 m<sup>3</sup>程度を越えると残響時間は急激に長くなる傾向にあることがわかる。そのため平均吸音率のみで基準を守ろうとすると、残響時間を抑えるためにかなりの吸音が必要であるということになり、中・大規模の室を対象とした性能基準に向かない。

Table 1.5: 用途別 推奨平均吸音率

用途	平均吸音率
コンサートホール	0.20~0.23
オペラハウス	0.25
多目的ホール	0.25~0.28
教室、会議室	0.25~0.30
劇場、講堂、事務室、体育館	0.30
宴会場、集会場	0.30

Fig. 1.4: 平均吸音率  $\bar{\alpha}$  毎の室容積と残響時間の対応

## 1.2 研究の目的

これまで見てきたように、最適な響きの長さや明瞭性を得るためには吸音率を変化させることが解決の糸口ではある。しかし、1対1の単純な対応ではなく、室容積や室用途、どのような状況を想定しているのか、必要な明瞭性はどの程度でそれを達成するにはどの方法が適切か、複合的なファクターによる。本研究では、これらの関係を基礎的な検討から一つ一つ紐解いていくことで、吸音設計基準の策定に向けて何に留意し、どのような性能を達成すべきか検討する際のエビデンスとなるような理論的・実験的検討を行っていく。(図 1.5)

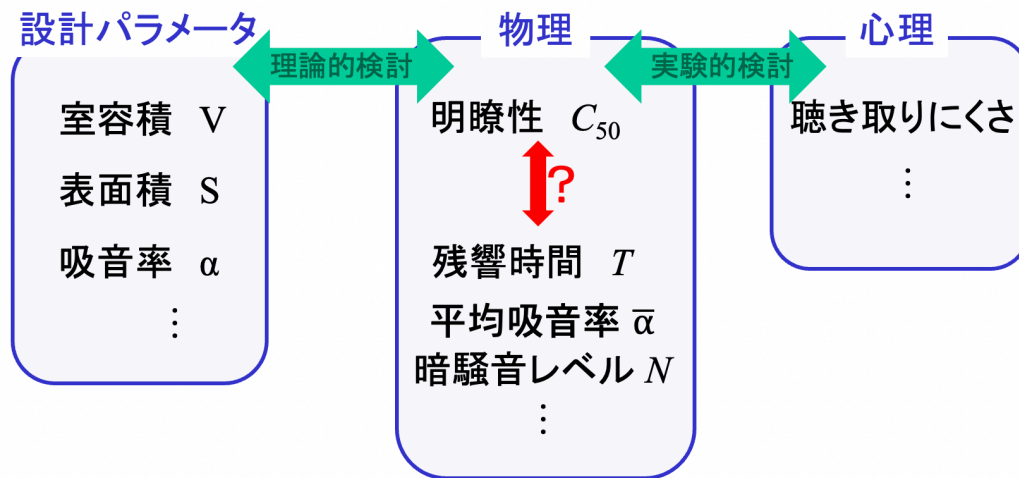


Fig. 1.5: 研究構成

### 1.3 論文の構成

以下に論文の構成を示す。

第一章では、研究の背景、既往の関連研究及び既存の吸音設計に関わる指標について概観を行った上で、本研究の目的について述べる。また、本論文の構成について示す。

第二章では、吸音について室容積と音源-受音点間距離をパラメータとして理論的検討を行う。第一節で概説を行い、第二節では用いる基礎理論式の検討を行い、第三節では理論的検討結果を踏まえた考察を行う。

第三章では、幾何音響シミュレーションによる検討を行う。第一節で概説を行い、第二節では用いるシミュレーションの手法について簡単に説明をする。第三節ではモデル作成と条件設定を行う。第四節では、シミュレーションにより得られたインパルス応答から物理指標の算出とその考察を行う。

第四章では、暗騒音を加味した理論的検討を行う。第一節で概説を行い、第二節では暗騒音レベルの設定について述べる。第三節ではパラメトリックスタディによって得られた結果を示し考察を行う。

第五章では、主管評価実験を行い、聴感との対応を確認する。第一節で概説を行い、第二節では用いる音場再現手法について簡単に述べる。第三節では実験条件の設定を行う。第四節では得られた結果から「聞き取りにくさ」と物理指標について分析と考察を行う。

第六章で得られた知見を整理し、今後の展望について述べる。



## 第 2 章

# 理論的検討

### 2.1 緒言

吸音に関わる代表的な物理量である残響時間や平均吸音率，明瞭性などの関係は単純な 1 対 1 の関係ではなく，複雑に絡み合っている。そこで本章では，パラメトリックスタディを通して明瞭性指標  $C_{50}$  について基礎的な検討からその関係を明らかにしていく。

### 2.2 前提理論式の検討

#### 2.2.1 検討項目

基礎的なパラメトリックスタディをするに当たって，1:1:1 の立方体室を想定し， $V/S$ (室容積/表面積) を 0.5 ~ 5.0 に設定した。これは，現実の室  $V$  が 3 m 角の立方体室で  $27 \text{ m}^3$ ，30 m 角の立方体室で  $27000 \text{ m}^3$  と，おおよそこの範囲に入るためである。平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.05 \sim 0.40$ ，音源-受音点間距離 (②, ③のみ)  $r = 2.5, 5, 10 \text{ m}$  とする。基礎理論は，残響時間  $T$  は Eyring の式 2.1，直接音エネルギー  $E_D$  には，無指向性点音源の距離減衰として式 2.2 を用いる。

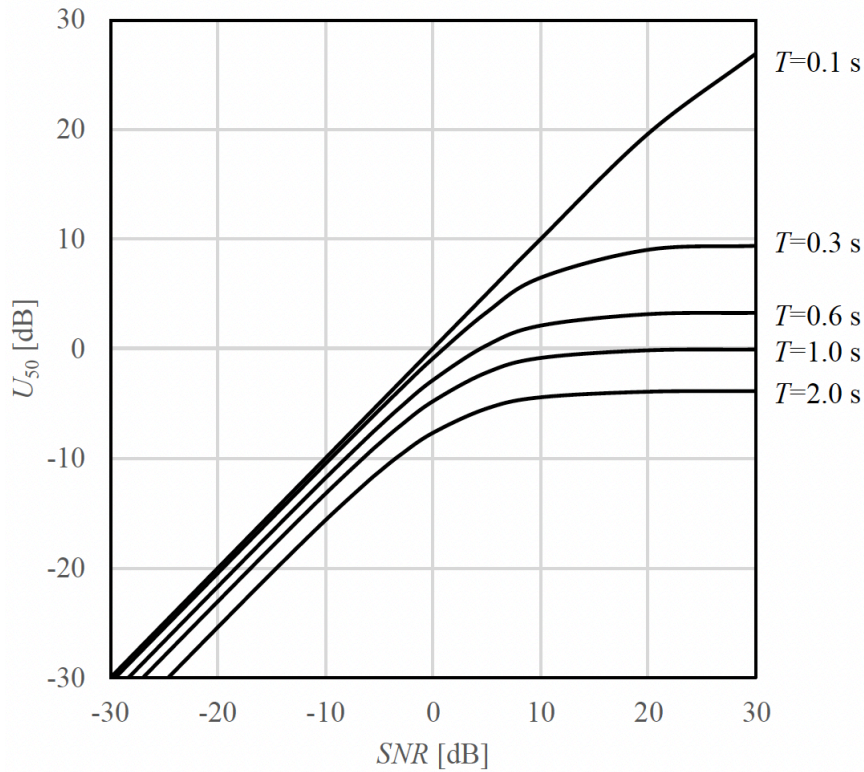
$$T = K \frac{V}{S[-\ln(1 - \bar{\alpha})]} \quad [\text{s}] \quad (2.1)$$

$$(K = 0.16)$$

$$E_D = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

前提として考えるエネルギーについて，以下の 3 パターンで検討を行う。

■①残響音のみ（直接音なし） 明瞭性と残響時間などの関係性について，日本建築学会による AIJES[12] では残響時間の変化による  $U_{50}$  と  $SNR$  の計算例 (図 2.1) などが明示されているが，直接音を含まない完全拡散音場における初期・後期反射音エネルギーと暗騒音の関係性

Fig. 2.1: 残響時間の変化による  $U_{50}$  と  $SNR$ 

のみで考えられているため、より安全側の値となっている。

残響音のみで考えた場合、音場の構成は図 2.2、 $C_{50}$  は次式で表される。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_E}{E_L} = 10 \lg \left( e^{\frac{6 \ln 10}{T} t} - 1 \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

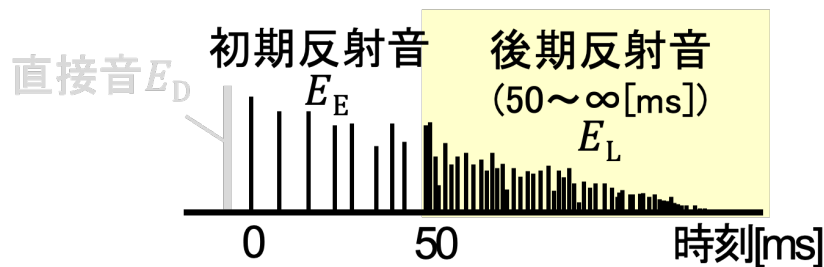


Fig. 2.2: 音場の構成①：残響音のみ

この場合、残響時間は  $C_{50}$  を用いて次式のように表すことができる。

$$T = \frac{0.3}{\lg \left( 1 + 10^{\frac{C_{50}}{10}} \right)} \quad [\text{s}] \quad (2.4)$$

そのため、室容積にはよらず、1対1の関係で  $C_{50}$  を用いて残響時間を逆算することができる。例えば、 $C_{50} = 0$  dB で  $T=1.00$  秒となる。

■②直接音+残響音 距離減衰の直接音もプラスして考えた場合、構成は図 2.3 で次式のようにになる。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_D + E_E}{E_L} = 10 \lg \left[ \left( 1 + \frac{r_c^2}{r^2} \right) e^{\frac{6 \ln 10}{T} t} - 1 \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.5)$$

ただし、臨界距離  $r_c$  は次式で表される。

$$r_c = \sqrt{\frac{R}{16\pi}} = \sqrt{\frac{S\bar{\alpha}}{16\pi(1-\bar{\alpha})}} \quad [\text{m}] \quad (2.6)$$

$R$ : 室定数,  $S$ : 表面積

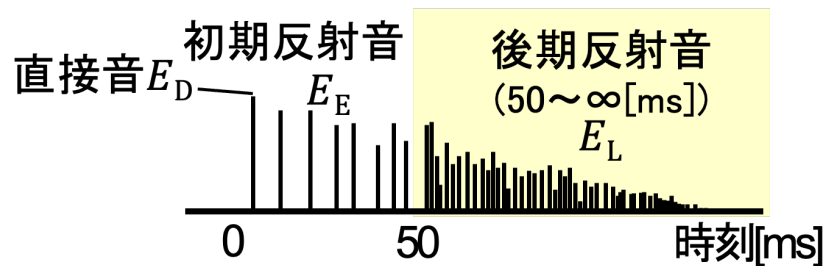


Fig. 2.3: 音場の構成②：直接音+残響音

■③直接音+残響音 (Barron の修正理論) Barron の修正理論 [13] とは、直接音よりも先に反射音が到来することはないとして、エネルギーの計算を直接音到来時刻からするものである。Barron の修正理論を加味した場合の  $C_{50}$  は次式で表される。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_D + E_E}{E_L} = 10 \lg \left[ \left( 1 + \frac{r_c^2}{r^2} e^{\frac{6 \ln 10}{T} \frac{r}{r_c}} \right) e^{\frac{6 \ln 10}{T} t} - 1 \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

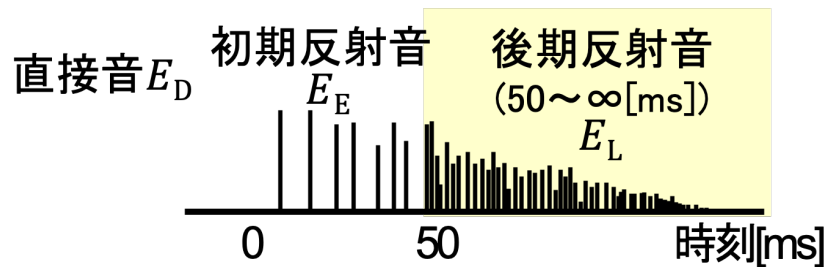


Fig. 2.4: 音場の構成③：直接音+残響音 (Barron)

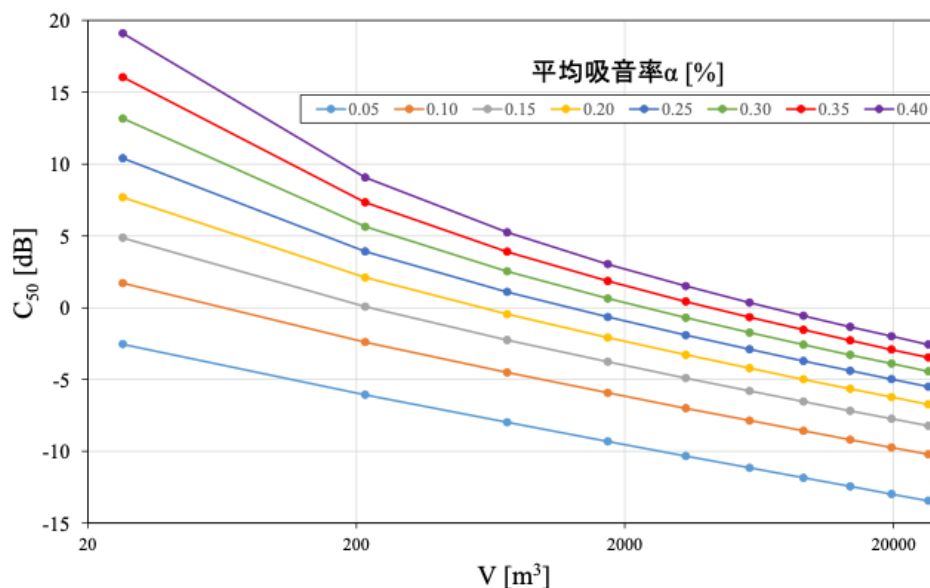


Fig. 2.5: ①：平均吸音率の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係

## 2.2.2 結果と考察

■①直接音のみ（残響音なし） 残響音のみで考える場合、音源-受音点の距離は十分遠方として考えるため、それ以外の要因で図 2.6 が描ける。今回は 1:1:1 の立方体で検討したが、アスペクト比が変化した場合でも図 2.6 のように室容積の目盛を読み替えることで検討することができる。平均吸音率が高ければ明瞭性  $C_{50}$  は高くなり、室容積が大きくなればなるほど全体的に右肩下がり明瞭性  $C_{50}$  は落ちていく。

また、室容積と平均吸音率をパラメトリックに変化させた時の明瞭性  $C_{50}$  についてコンタ図 2.7 を作成した。ある平均吸音率にした時、室容積が大きくなると明瞭性は緩やかに下がっていく。平均吸音率が低いほど室容積の変化による明瞭性の変化は小さく、平均吸音率が高いほど明瞭性の変化が激しい。

さらに、室容積と残響時間をパラメトリックに変化させた時の明瞭性  $C_{50}$  についてコンタ図 2.8 を作成した。前述したとおり、残響時間と  $C_{50}$  は一対一に決まるため、等値線は室容積が変化しても一定である。また、図 2.9 にあるように帯は吸音率による違いのため、右下へいくほど高い吸音率となる。

■②直接音+残響音 一方で、直接音も加味して検討を行ったものを図 2.10 で示す。室容積が小さいうちは①と同様に室容積が大きくなればなるほど全体的に右肩下がり明瞭性  $C_{50}$  は落ちていく傾向であるが、ある室容積を境に明瞭性が上がっていく傾向が見られた。距離が近ければ近いほど、明瞭性が上がる方へ切り替わる室容積が小さい。これは、一般に室容積が



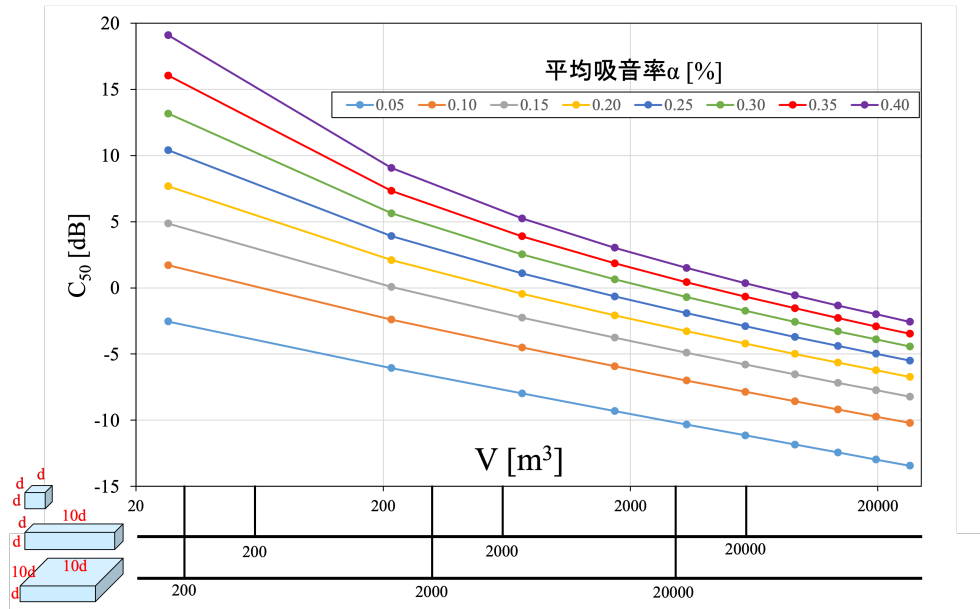


Fig. 2.6: ① : の室容積のアスペクト比の変化による横軸の読み替え

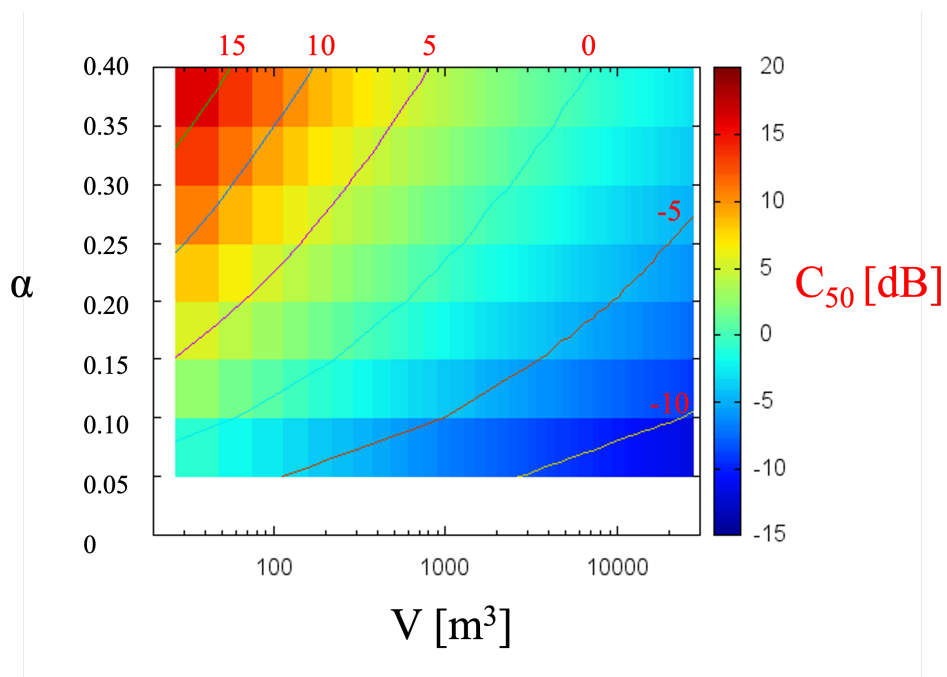
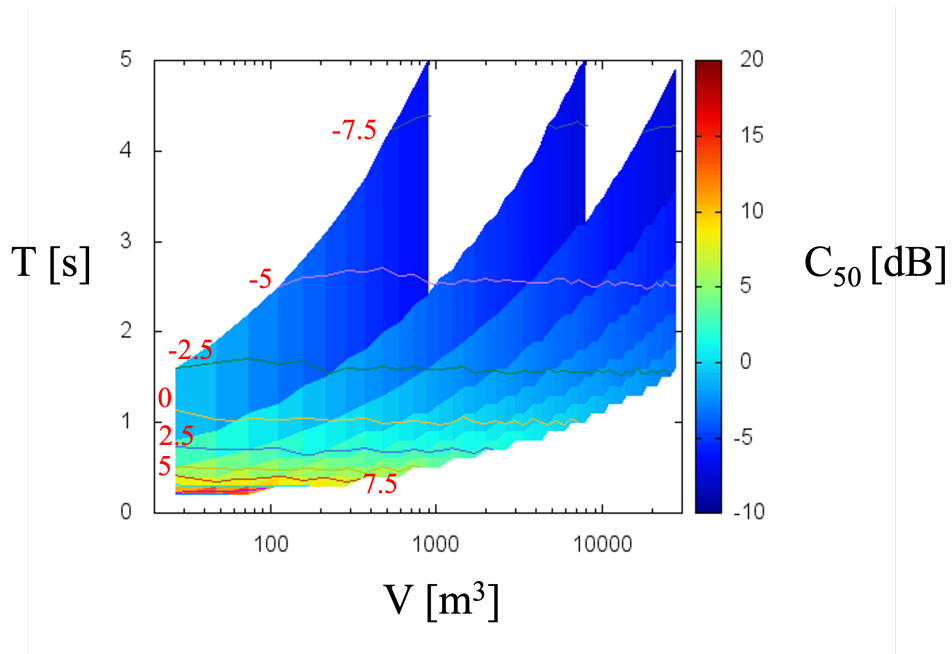
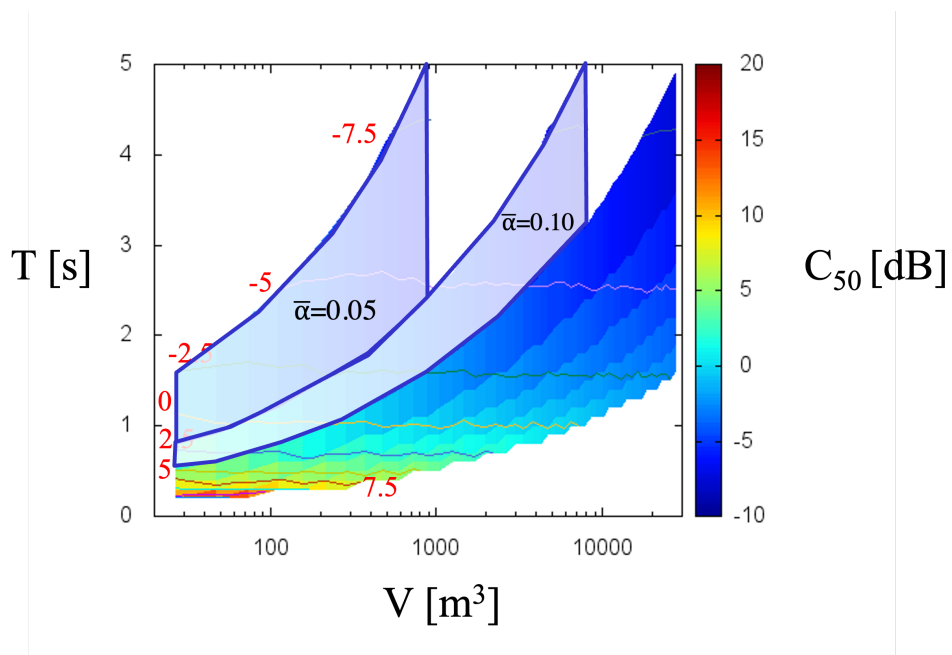


Fig. 2.7: 平均吸音率と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図

Fig. 2.8: 残響時間と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図 IFig. 2.9: 残響時間と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図 II

大きくなると残響エネルギーが大きくなり、妨害エネルギーが大きくなるため明瞭性が下がるが、ある程度室が大きくなると、音源-受音点距離が近いほど直接音の寄与が相対的に大きくなり、明瞭性が高まる方向へ切り替わると考えられる。どの程度の距離と室規模で切り替えが起きるのかに注目していく。

■③直接音+残響音 (Barron の修正理論) ②と同様の傾向が見られ、大きな差はない。(図 2.11) 先述したように、直接音到来時刻前の反射音は除かれるため、音源からの距離が大きくなると初期反射音と後期反射音 (=残響音) を合わせた全エネルギーが減少することになり、全反射音が場所によらず一定とする拡散御場の仮定から外れてしまうため、本研究では Barron の修正理論は不採用とする。[14]

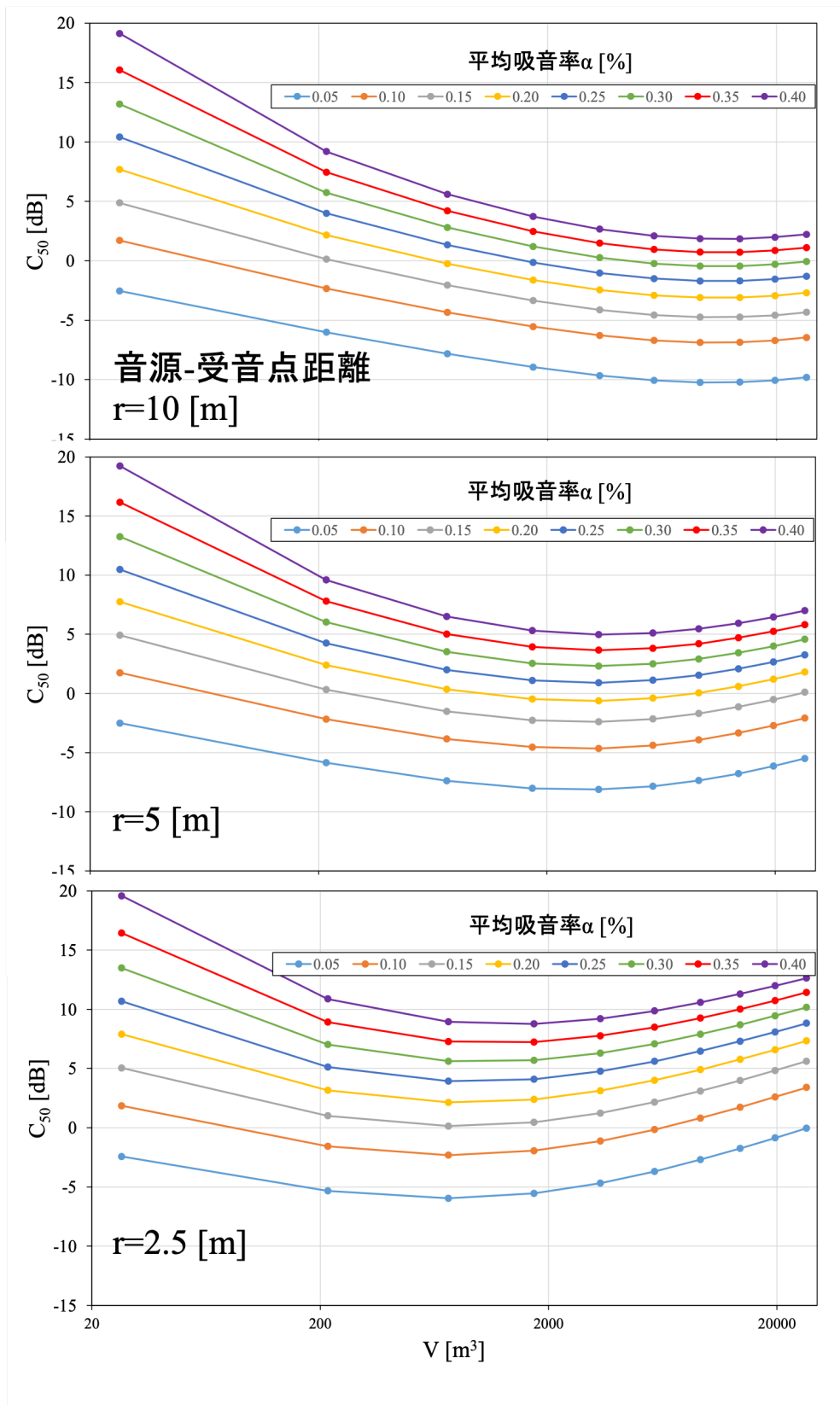


Fig. 2.10: ② : 平均吸音率の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係

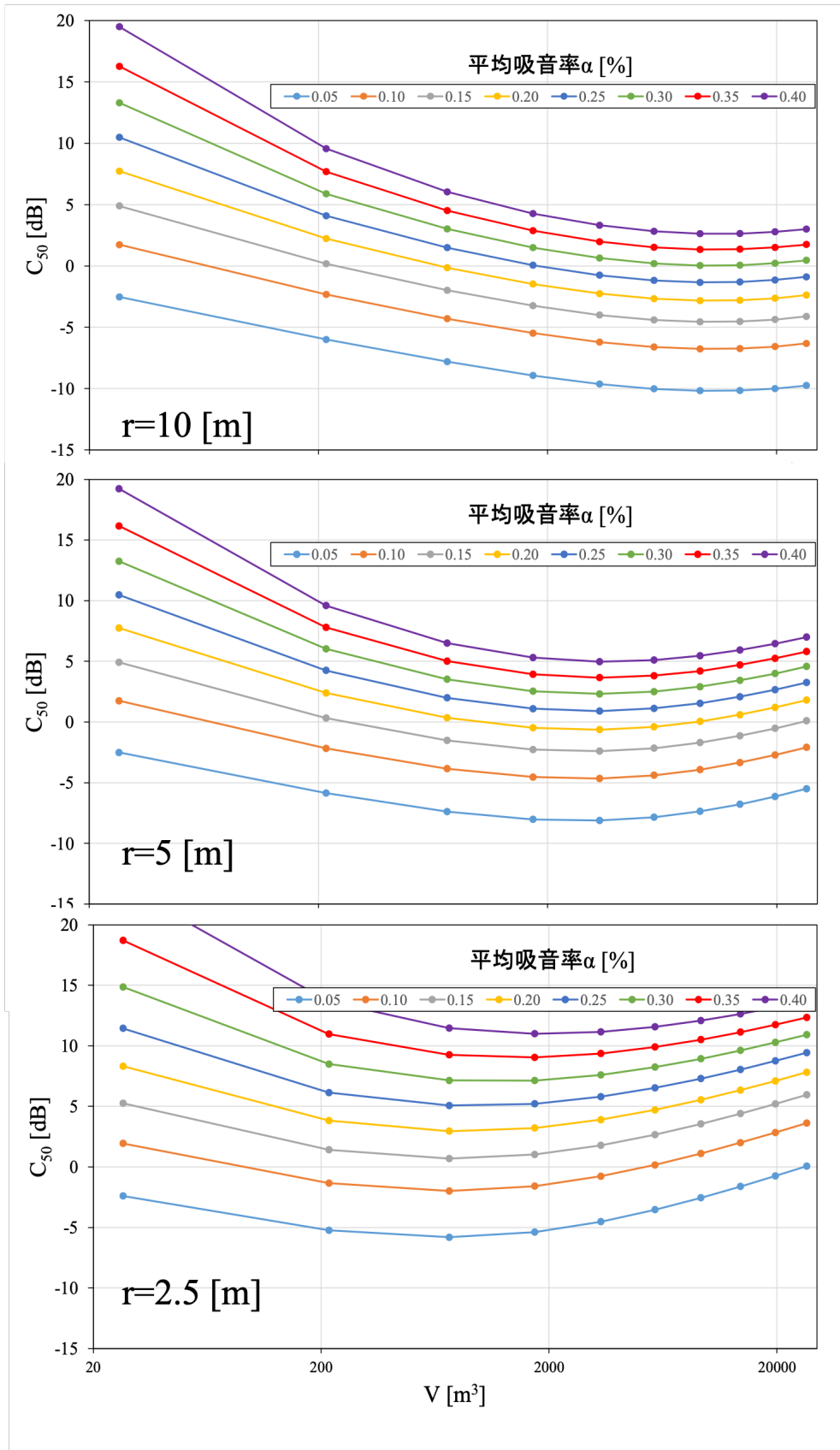
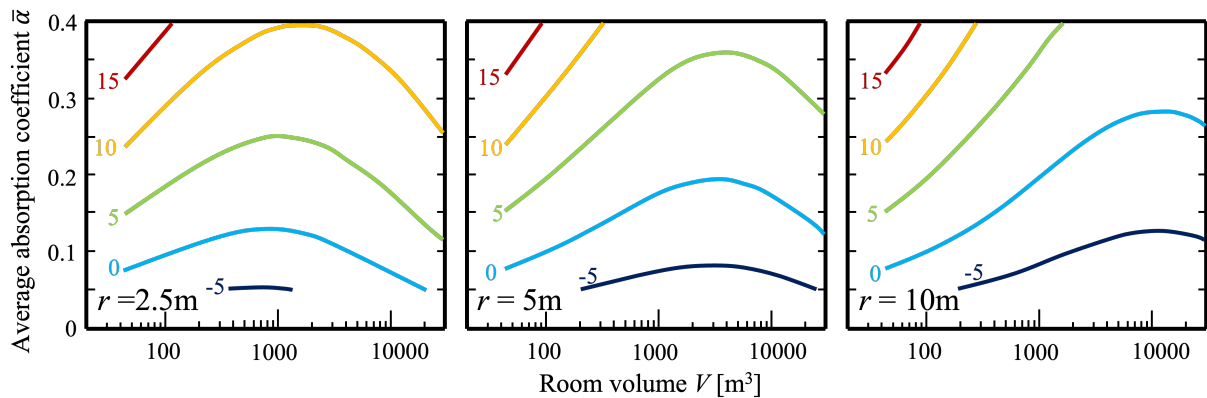
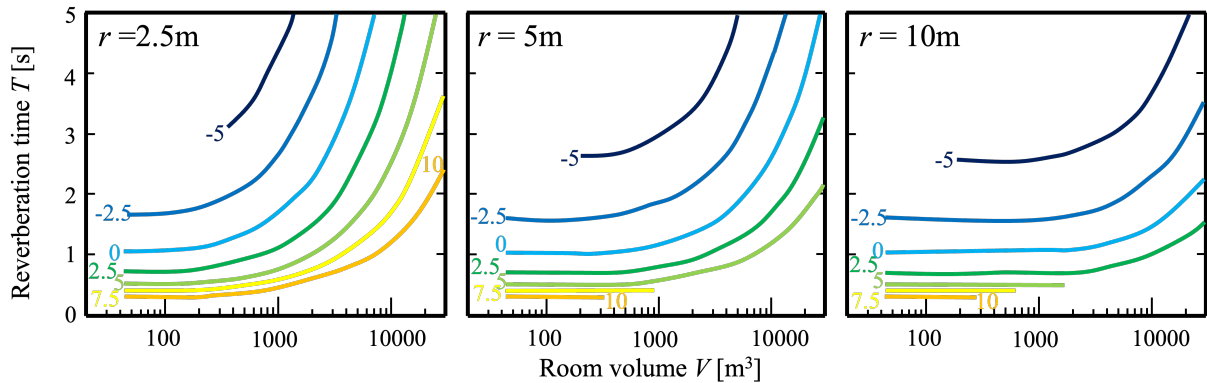


Fig. 2.11: ③：平均吸音率の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係

Fig. 2.12: 平均吸音率の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係Fig. 2.13: 残響時間の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係

## 2.3 パラメトリックスタディによる検討

### 2.3.1 結果

無指向性音源から距離減衰してくる直接音と拡散音場の仮定で考えられる残響音を用いて考える②の仮定のもと、改めてパラメトリックスタディを行う。今回はより現実的な室を想定し、1:2:4のアスペクト比を持たせる。従って室容積  $V$  は 43 ~ 43000  $\text{m}^3$ 、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.05 \sim 0.40$ 、音源-受音点間距離  $r = 2.5, 5, 10 \text{ m}$  とする。結果を図 2.12, 4.2 に示す。

### 2.3.2 考察

室容積と平均吸音率の組合せに対する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

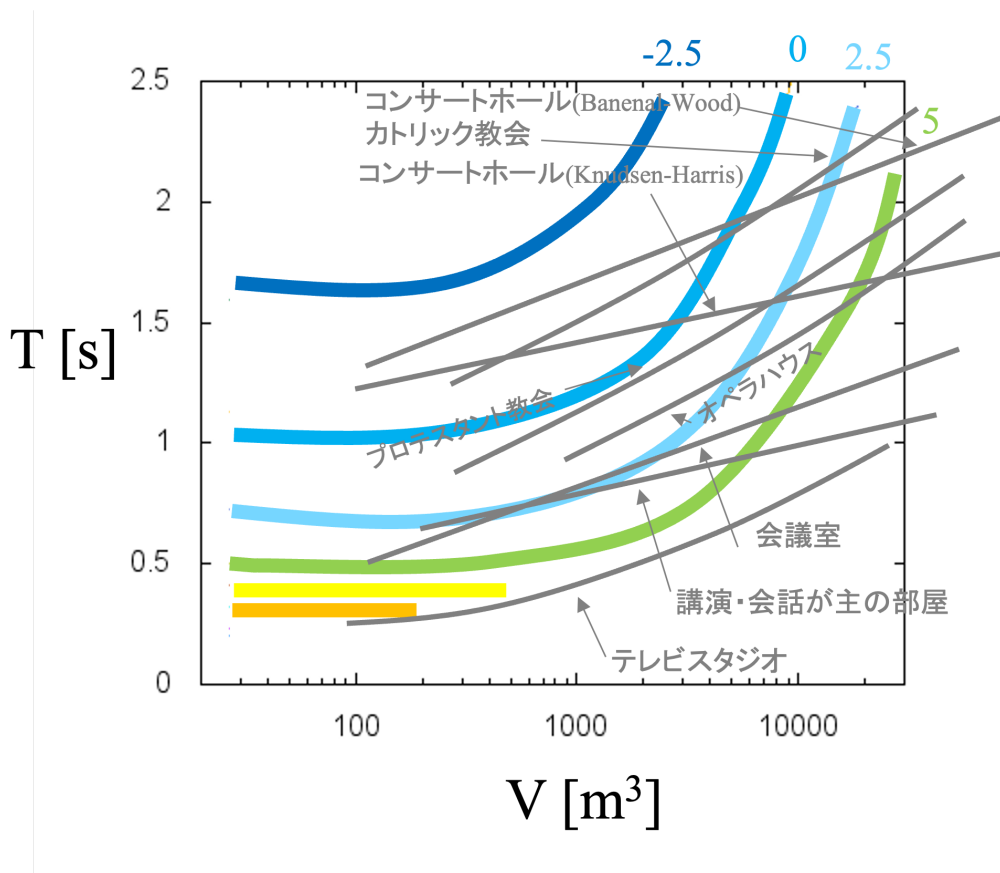


Fig. 2.14: 推奨残響時間を重ね合わせた残響時間の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係  $r = 5\text{m}$

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、 $r = 10\text{ m}$  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、 $r = 10\text{ m}$  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  $C_{50}$  の等値線は図 2.12 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。

最適残響時間のグラフに重ね合わせてみると、最適残響時間と平均吸音率と室容積の 3 者の関係が明らかになる。例えば、最適残響時間を参考に室容積  $1,0000\text{ m}^3$  の会議室を作ろうと考えた場合、 $10\text{m}$  毎にスピーカーを設置しようとする高い明瞭性を得るためには過剰な吸音が必要になってしまうことがわかり、最適残響時間をそのまま用いるのは非現実的であることがわかる。





## 第3章

# シミュレーション解析

### 3.1 緒言

幾何音響シミュレーションはコンサートホールを始めとする大規模な空間の設計に用いられる音響解析手法である。理論的な検討を通して、より大規模空間において吸音に関する様々なファクターが複雑に絡まり合うことがわかった。そこで本研究では音線法による幾何音響シミュレーションを用いて室規模や吸音率を始めとした建築的要因を変化させてパラメトリックスタディを行い、理論的検討との対応を確認する。また、シミュレーションで得られたエネルギーインパルス応答は、音場を再現し、人間の聴感と対応するか確認するために用いる。

### 3.2 幾何音響解析

#### 3.2.1 音場数値解析手法

音場の予測手法はこれまでに数多くの研究が行われており、一般に既往の音場解析手法は音場、振動場の偏微分方程式に基づく波動音響学的手法と、音の波動性を無視した幾何音響的手法の二つに大別される。

■**波動音響解析** 波動音響学的手法は近年の急速な計算機資源の増加に伴って用いられるようになった手法で、波動方程式を離散化し音の波動的な振る舞いを予測する手法である。音響分野では境界要素法 (BEM:boundary element method), 有限要素法 (FEM:finite element method), 時間領域有限差分法 (FDTD 法:finite-difference time-domain method) の3手法が主に用いられている。これらの手法はいずれも対象となる音場領域またはその境界面を細かく分割して解析を行うものである。理論的に波動性を考慮することから高精度の予測が可能であるが、対象の音場全体をセルに分割し解析を行うため、複雑な形状の音場の予測に向いている一方で、ホールや公共空間のような大空間の音場解析の際には計算負荷が大きくなり難しい。

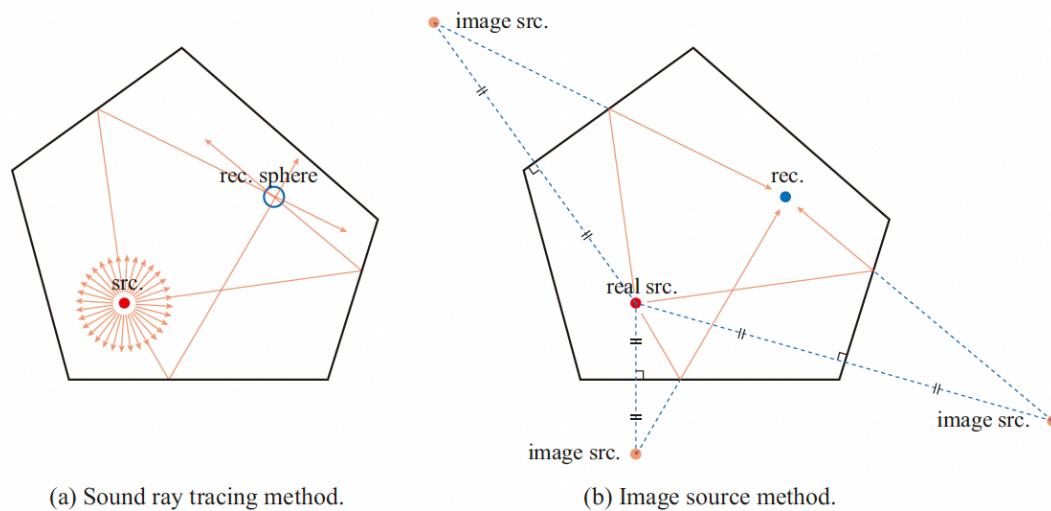


Fig. 3.1: 幾何音響解析

■幾何音響解析 幾何音響解析では、音の波動性を無視し、エネルギーの伝搬・拡散を幾何学的に予測する手法である。代表的なものに音線法、虚像法などがあげられる(図3.1)。音線法は音源から放出した多数の音線の反射とエネルギーの減衰を追跡し、受音点(受音球)に到来するエネルギーを求める手法である。虚像法は音源の鏡面反射点から音が発せられていると考え、その点(音源)の位置と出力の大きさを求め、受音点における総和を算出する手法である。どちらの手法も波動的な理論に基づかないため、散乱・回折などの波動性による現象の再現が不可能であり、波動音響解析と比較して再現性が劣ることは否めない。しかし、非常に短い計算時間で解析できるという利点があり、波動音響では解析が困難なホールのような大規模空間の音場を対象とした伝搬予測に広く用いられている。詳細な部材の設計や、複雑な形状の空間では厳密な予測が必要とされるため、波動音響解析や縮尺模型実験等を用いるが、大まかな室形状や壁面部材の検討には十分な予測精度が得られる。商用の幾何音響解析ソフトウェアを用いた音響設計も数多く行われている。

### 3.2.2 音線法の計算方法

研究室で使用している音線法のフローチャートを図3.2に示す。プログラムは入力・準備・計算・出力で構成されている。はじめに室の形状と各壁面の物性値として吸音率、乱反射率を設定し、音源・受音点の座標と受音球の半径などの各種パラメータを入力する。次に壁面や音源の設定を行う。続いて計算の根幹となる音線を追跡する部分を実行する、6チャンネル再生による音場再現を行うため、各チャンネルの指向性情報を持った音線を追跡し、計算結果の出力をする。得られたインパルス応答は計算中に随時出力し、チャンネルごとに整理した。

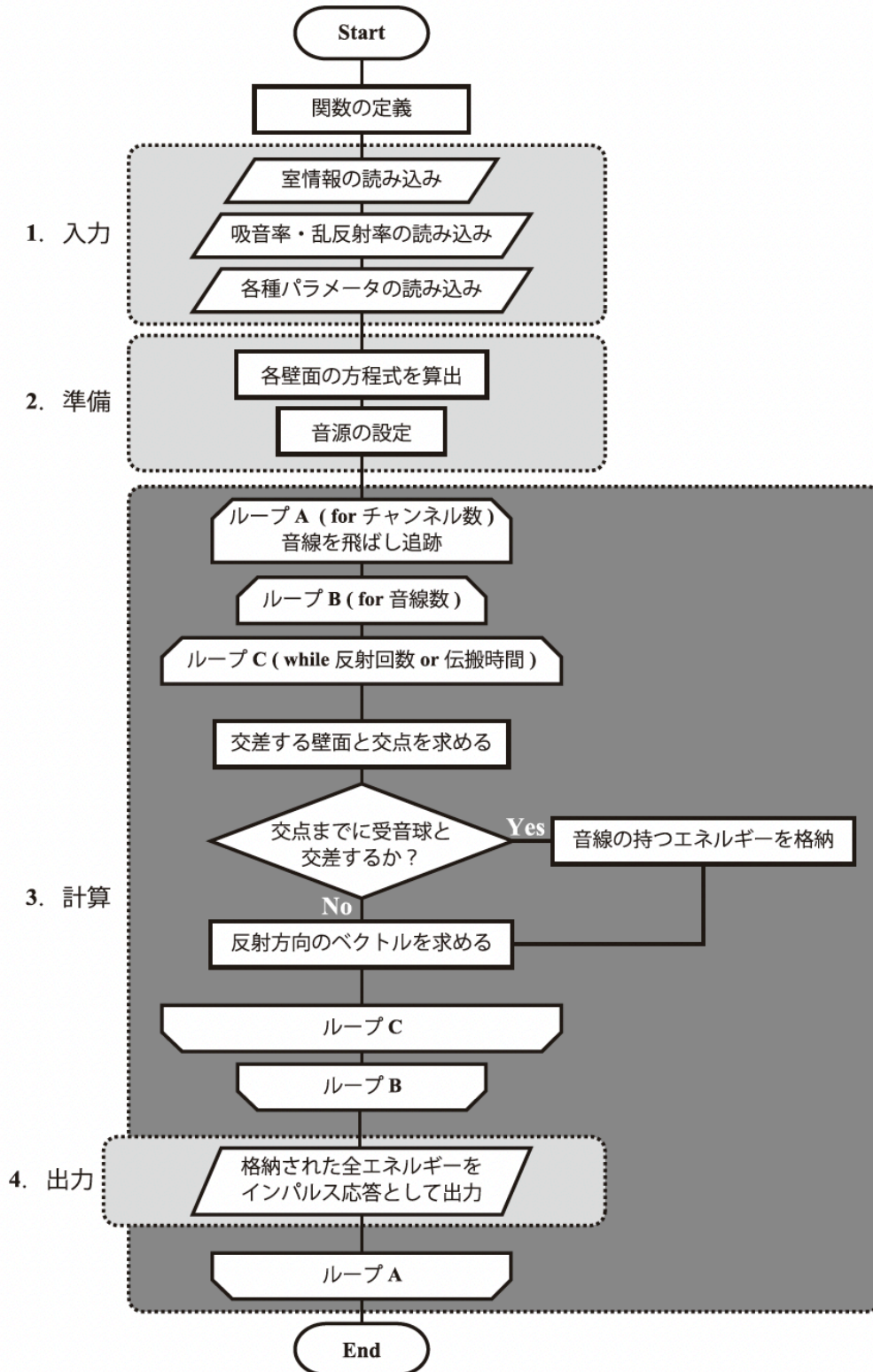


Fig. 3.2: 幾何音響解析 (音線法) プログラムのフロー [15]

Table 3.1: 空気吸収の減衰係数

	125	250	500	1k	2k	4k
減衰係数	0.0005	0.0013	0.0025	0.0044	0.0101	0.0320

■幾何音響解析の基本設定 音線法は、最後に反射した点(初めは音源点)から次の反射する点を明らかにし、その間に音線と受音球の交差の有無を判定し、交差する場合は音波が到来したもものとして、次の反射点における音線方向を求める方法で、要するにエネルギーを持った音線を球状に放射させ、追っていくものである。そのため、音線本数や受音領域についての適切な設定が必要となる。本シミュレーションでは、室温 18 °Cにおける音速として 342.25 m/s を設定した。音線本数は 10 万本、反射回数の上限は 100 万本と十分多く設定した。受音球半径は見附面積が約 1 m<sup>2</sup> となるように 0.56 m とした。解析時間は残響エネルギーがなくなる頃まで音線を追いかけていたので、各条件における Sabine 式による残響時間程度に設定した。また、境界面には乱反射率 1 を与えた。シミュレーションにより得られたインパルス応答に、周波数毎の空気吸収も考慮した。式 3.1 減衰率  $m$  から減衰係数  $e^{(-mct)}$  を算出し、時間領域で掛けることで空気吸収を模擬した。用いた減衰係数を表 3.1 に示す。

$$I_t = I_0 e^{-mct} \quad (3.1)$$

$I_t$ : t 秒後のエネルギー、 $I_0$ : 初期エネルギー

### 3.3 条件・モデルの設定

$V = 1,000, 5,000, 25,000 \text{ m}^3$ , 平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ , 音源-受音点間距離  $r = 2.5, 5, 10 \text{ m}$  の合計 36 条件について解析しを行い、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。条件設定の詳細について述べる。

#### 3.3.1 室規模の設定

理論的検討と同様に 1:2:4 の直方体室を想定し、室容積が大きくなると直接音の寄与が相対的に大きくなるため明瞭性が上がっていく現象を捉えることを大きな目的として室容積は  $V = 1,000, 5,000, 25,000 \text{ m}^3$  の 3 段階に設定をした。参照 図 3.3

#### 3.3.2 吸音条件の設定

今回は基礎的なパラメトリックスタディのため、天井・床・壁全ての吸音率を一律とした。平均吸音率は現実空間で低吸音から高吸音を網羅する  $\bar{\alpha} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  の 4 段階とした。

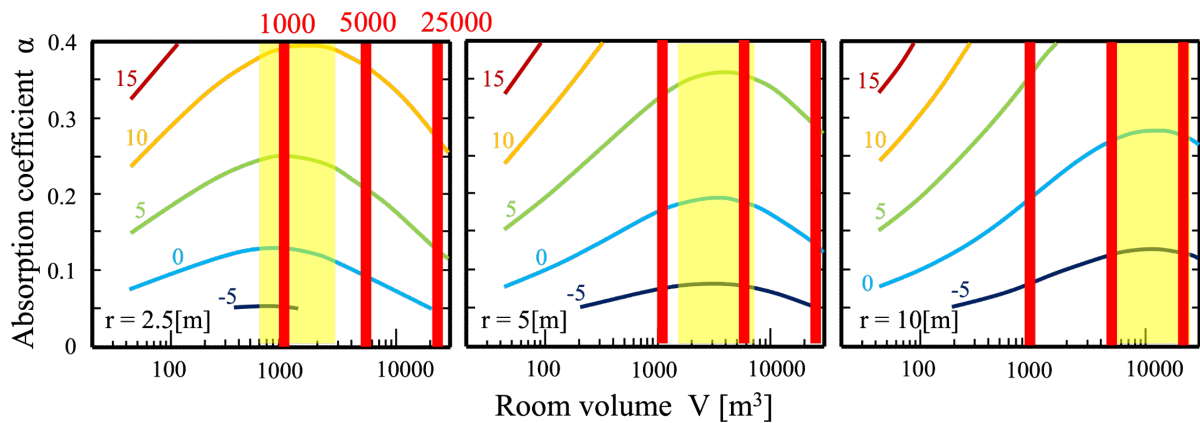
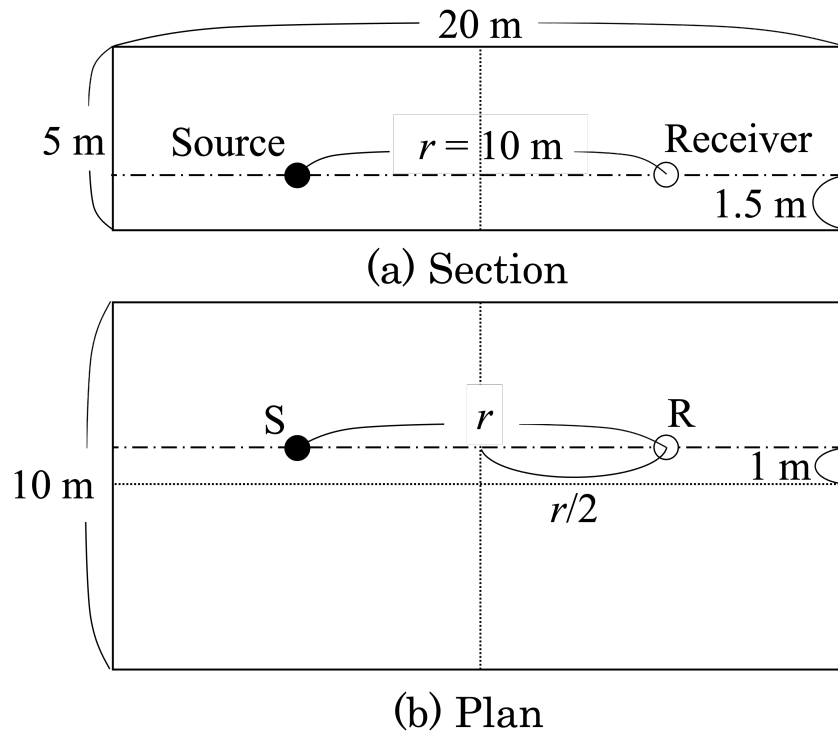


Fig. 3.3: 解析条件の室容積検討

### 3.3.3 音源・受音点の設定

音源-受音点間距離は通常消防法で非常用アナウンス設備としてスピーカーを 10 m 毎に設置する決まりから遠距離会話の想定を 10 m とし、その半分と、近距離会話の想定を 2.5 m とし、 $r = 2.5, 5, 10$  m の 3 段階で設定した。2.5 m 以内の会話では直接音の寄与が極めて高く、室のパラメータは要因としては小さくなるため、本研究では扱わない。図 3.3 に示すように、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。

Fig. 3.4: 解析モデル ( $V = 1000\text{m}^3$ )

## 3.4 幾何音響解析による物理指標の算出

### 3.4.1 音響物理指標

室内音響設計を科学的裏付けによって進めるため、評価指標として様々な物理指標（室内音響指標）が用いられている。本研究では、インパルス応答から容易に算出できる明瞭性に関する物理指標を用いる。各項目について概説したのち、解析結果と考察を述べる。また、本性の音響物理指標の解説には、後章で扱う  $U_{50}$  についても解説しておく。[16]

■残響時間 (Sabine,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) 室内の平均エネルギー密度が定常状態から 60 dB 減衰するのにかかる時間とされている。インパルス応答から得たエネルギー減衰波形の初期レベル (= 定常レベル) に対して、 $-5 \sim -25$  dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求めたものを  $T_{20}$ 、 $-5 \sim -35$  dB を回帰区間とした場合を  $T_{30}$  と呼ぶ。なお、拡散音場を仮定した場合の残響時間の理論値は、式 3.2 に示す Eyring-Knudsen の残響式によって求めた。これは室の吸音率と空気吸収による残響エネルギーの減少を加味したものとなっている。周波数帯域は設計でもよく用いられる 500 Hz・1 kHz 帯域を平均した値を用いた。

$$T = \frac{KV}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad [\text{s}] \quad (3.2)$$

$K : 0.16$ ,  $S$  : 吸音面積  $\text{m}^2$ ,  $m$  : 減衰係数

■デフィニッション ( $D_{50}$ ) スピーチの明瞭度評価に用いられる指標で、インパルス応答の直接音到来から 50 ms までの初期反射音エネルギーを明瞭度に貢献する因子とみなし、全エネルギーに対する割合 % で評価したもので次式で表される。周波数帯域は 500 Hz・1 kHz 帯域を平均した値を用いた。

$$\frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [\%] \quad (3.3)$$

$p(t)$  : インパルス応答音圧瞬時値

■クラリティ ( $C_{50}$ ) クラリティは音場の明瞭性評価に用いられる指標である。インパルス応答の、直接音到来から 50 ms までの初期反射音エネルギーを明瞭度に貢献する因子とみなし、それ以降を明瞭度に対する妨害因子とみなしている。ここでは周波数帯域は設計でもよく用いられる 500 Hz・1 kHz 帯域を平均した値を用いた。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_D + E_E}{E_L} [\text{dB}] \quad (3.4)$$

$E_D$  : 直接音のエネルギー,  $E_E$  : 50 ms までの初期反射音エネルギー

■ $U_{50}$  (Useful-to-detrimental-ratio) 日本建築学会による AIJES[17] では、インパルス応答の直接音到来からある時間までの初期エネルギーを貢献因子 (Useful)、それ以降の反射音エネルギーやターゲットとなる音声以外の背景騒音エネルギーを妨害因子 (Detrimental) として、両者の SN 比によって伝送路内の音声伝送性能を表す指標は一般に Useful-to-Detrimental Ratio や Signal-to-Noise Ratio などと呼ばれる。そのうち有効な初期応答の時間を 50 ms とし、簡潔に算出できるようにまとめられたものが式 3.5 に示す  $U_{50}$  である。A 特性の騒音エネルギーを用い、500 4kHz を有効帯域とした例が示され、定まった方法はないとされているが、本研究ではこの手法にしたがった。STI などと比較しても非常に相関が高いと報告されている。

$$U_{50} = 10 \lg \frac{E_D + E_E}{E_L + E 10^{\frac{SNR}{10}}} [\text{dB}] \quad (3.5)$$

$E_D$  : 直接音のエネルギー,  $E_E$  : 50 ms までの初期反射音エネルギー

$E_L$  : 50 ms 以降の後期反射音エネルギー,  $E$  : 全音エネルギー

$SNR$  : 音源信号エネルギー  $S$  と背景騒音エネルギー  $N$  の SN 比

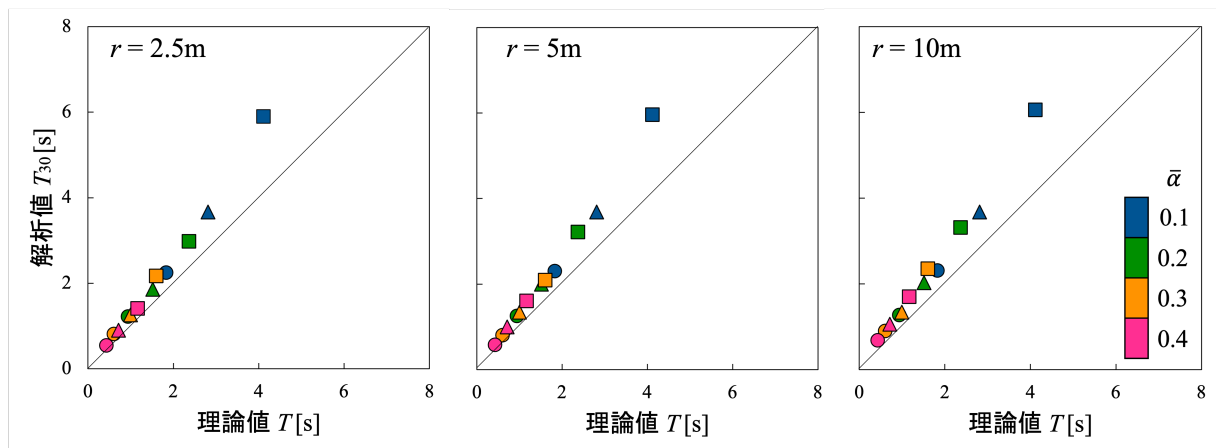


Fig. 3.5: 残響時間の解析値と理論値の対応 (○ :  $V=1,000$ , △ :  $5,000$ , □ :  $25,000$ )

### 3.4.2 解析結果と理論値の対応及び考察

■残響時間 (Sabine,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) 残響時間の解析値と理論値の対応を図 3.5 に示す。より低い吸音率と大きな室容積において理論値よりも解析値の方が残響時間が長くなっている。これは、より反射性の壁面においてシミュレーションを行うと完全拡散音場ではなくエネルギーが残り続けやすくなるためと考えられる。また、音源-受音点距離には依存しないことの確認ができた。

■クラリティ ( $C_{50}$ )  $C_{50}$  の理論値と解析値との対応関係を図 3.6 に示す。直接音の寄与が小さい  $r = 10\text{ m}$  では両者は良く対応しているのに対して、 $5\text{ m}$  及び  $2.5\text{ m}$  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。また、音源受音点間距離が長いほど行路差が少ないため、床からの反射音が直接音を増強させやすいことが、理論値と解析値の対応グラフの傾きに現れている。室容積が大きいほど初期反射音の到来が遅い。また、理論値で求めた  $C_{50}$  のコンタ図に  $C_{50}$  の解析値の値を重ね合わせたものを図 3.7, 図 3.8 に示す。一般に室容積が大きくなると残響エネルギーが大きくなり、妨害エネルギーが大きくなるため明瞭性が下がるが、ある程度室が大きくなると、音源-受音点距離に近いほど直接音の寄与が相対的に大きくなり、明瞭性が高まる方向へ切り替わる傾向が解析値においても確認できた。



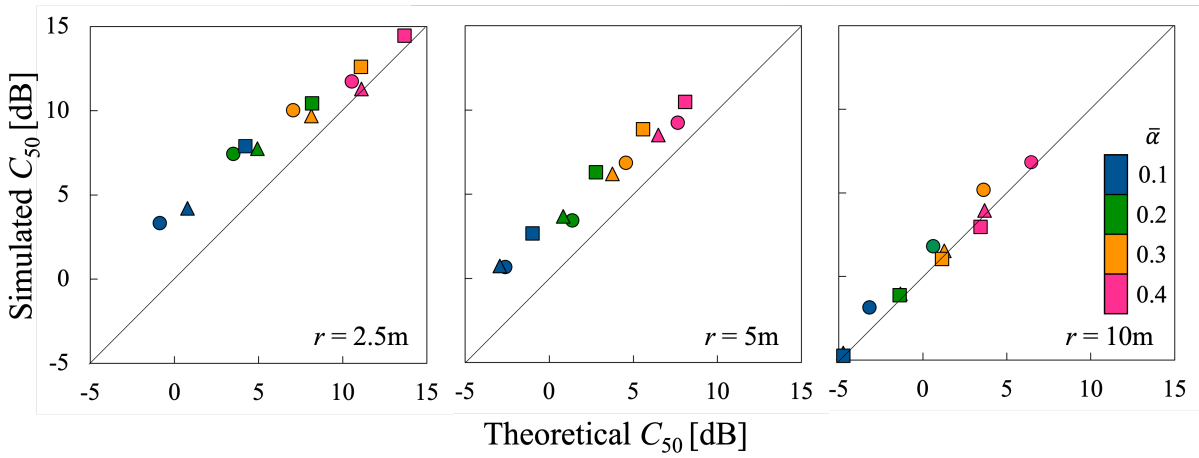


Fig. 3.6:  $C_{50}$  の解析値と理論値の対応 (○ :  $V=1,000$ , △ :  $5,000$ , □ :  $25,000$ )

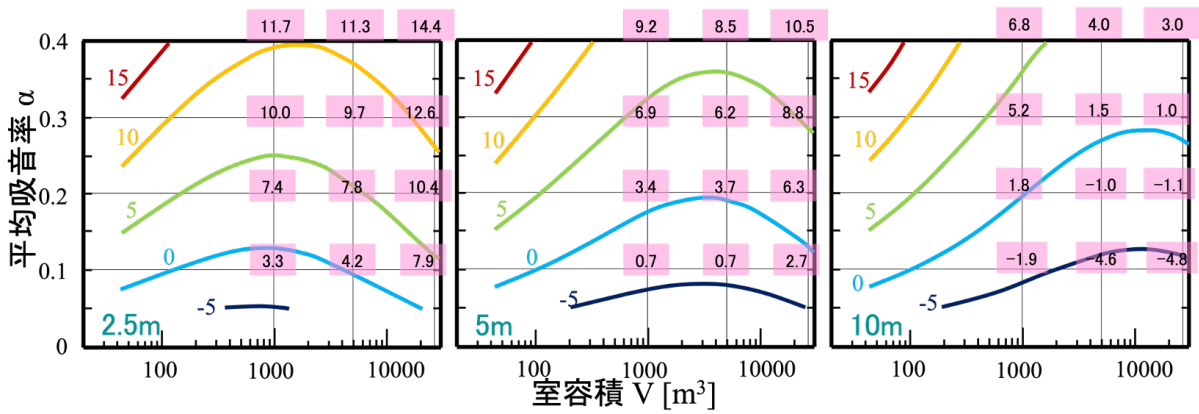


Fig. 3.7: 残響時間における  $C_{50}$  コンタ図と解析結果

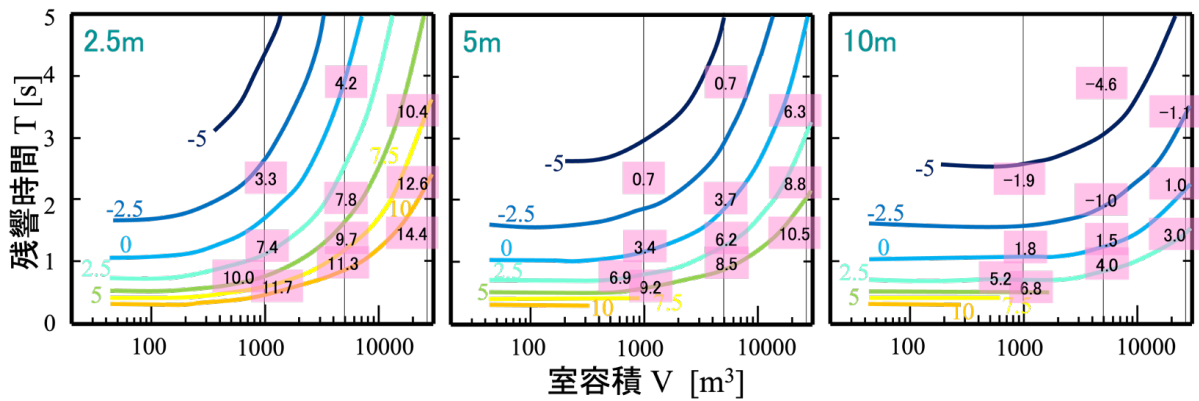


Fig. 3.8: 平均吸音率における  $C_{50}$  コンタ図と解析結果



## 第4章

# 暗騒音を含めた理論的検討

### 4.1 緒言

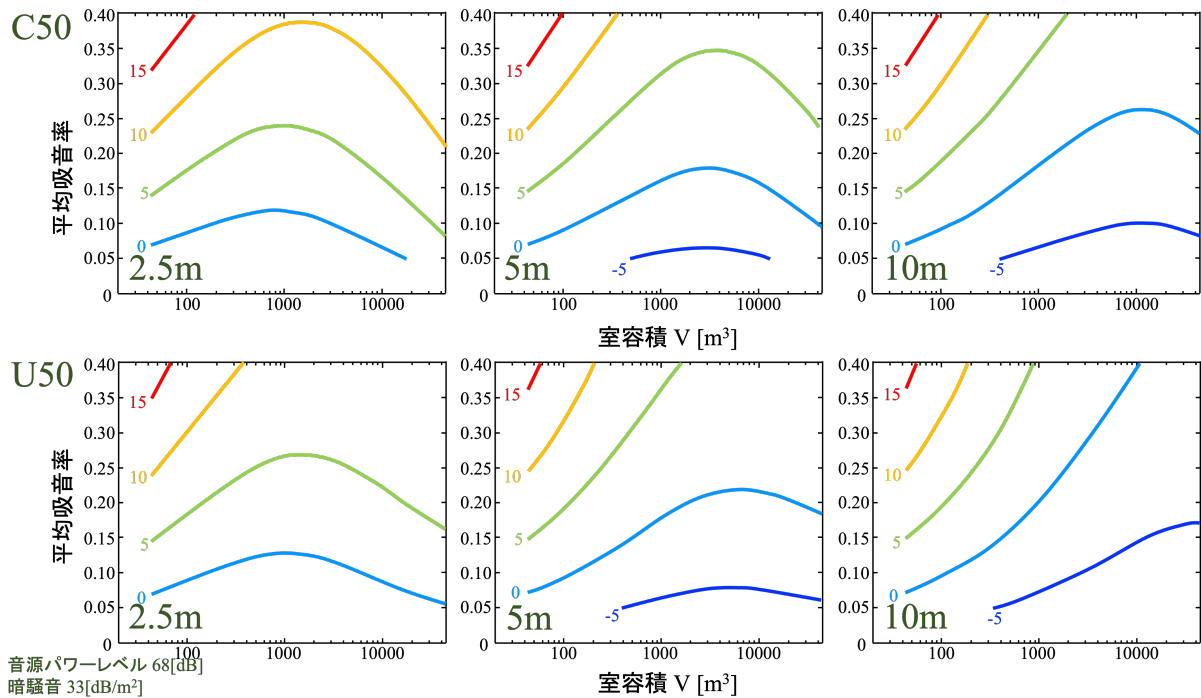
これまで、吸音設計と明瞭性  $C_{50}$  に関わる残響時間や室容積などの関係について基礎的な理論式と解析シミュレーションを通してパラメトリックに検討を行い、その傾向を掴んできた。もう一步実空間に近づけて考えた時、暗騒音を考慮する必要がある。暗騒音とは、目的となる音以外の音であり、空調騒音や建物外の自動車・鉄道騒音など様々なものがあげられ、明瞭性に関しては妨害側に寄与し、明瞭性を下げる。自動車・鉄道・飛行機などの騒音は付近を通過するときのみ発生する変動騒音と呼ばれる。今回は、基礎的な検討として変動騒音ではなく、空調騒音などを想定した定常騒音を暗騒音として明瞭性に加味して検討を行うこととする。

### 4.2 条件の設定

明瞭性  $C_{50}$  についての理論的検討と同様に 1:2:4 の直方体室を想定し、室容積  $V$  は 43 ~ 43000  $m^3$ 、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.05 \sim 0.40$ 、音源-受音点間距離  $r = 2.5, 5, 10$  m とする。また、周波数特性による空気吸収も考慮した。

■音源の設定 前章で概説したとおり、 $U_{50}$  は暗騒音エネルギーを含めた有効音エネルギーと妨害音エネルギーの割合で決まるため、音源パワーレベルと暗騒音レベル、共に絶対値を設定する必要がある。今回は日常会話を想定し、音源パワーレベル 68 dB、暗騒音レベルは空調騒音を想定し、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.2$  の時に暗騒音レベル  $N$  が基準値となるような床面積あたりの騒音レベルに設定し、吸音による騒音低減も加味した。ここではまず、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.2$  の時に  $N=40$  dB となるように 33 dB/ $m^2$  に設定した。この設定で 1:2:4 の直方体室の場合、吸音による騒音低減も加味した騒音レベルを求める式は次式で表される。

$$33 + 10 \lg(S_{床}) - 10 \lg(S\bar{\alpha}) + 6 \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

Fig. 4.1: 平均吸音率の変化における  $C_{50}$  と  $U_{50}$ 

## 4.3 パラメトリックスタディ

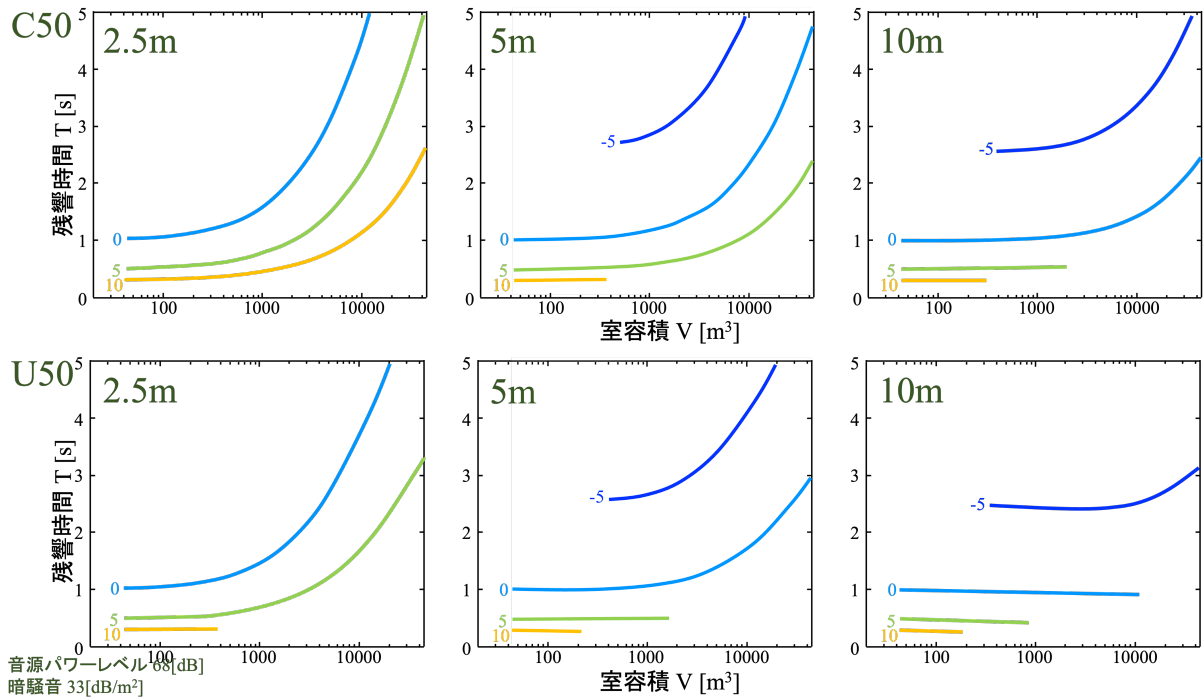
### 4.3.1 結果

2章で示した  $C_{50}$  のコンタ図と同様のものを作成した。(図 4.14.2) 同様の山型の傾向が少し崩れた形になっている。特に遠距離  $r = 10$  m かつ室容積が大きいと山型が崩れて急激に明瞭性が悪くなっていく。山の頂点はこの場合同程度になっている。吸音による効果に着目すると、室容積  $V = 1000$  m<sup>3</sup> 程度までは、吸音率を倍にすれば明瞭性も 3 dB 程度上がって、その効果が見られる。

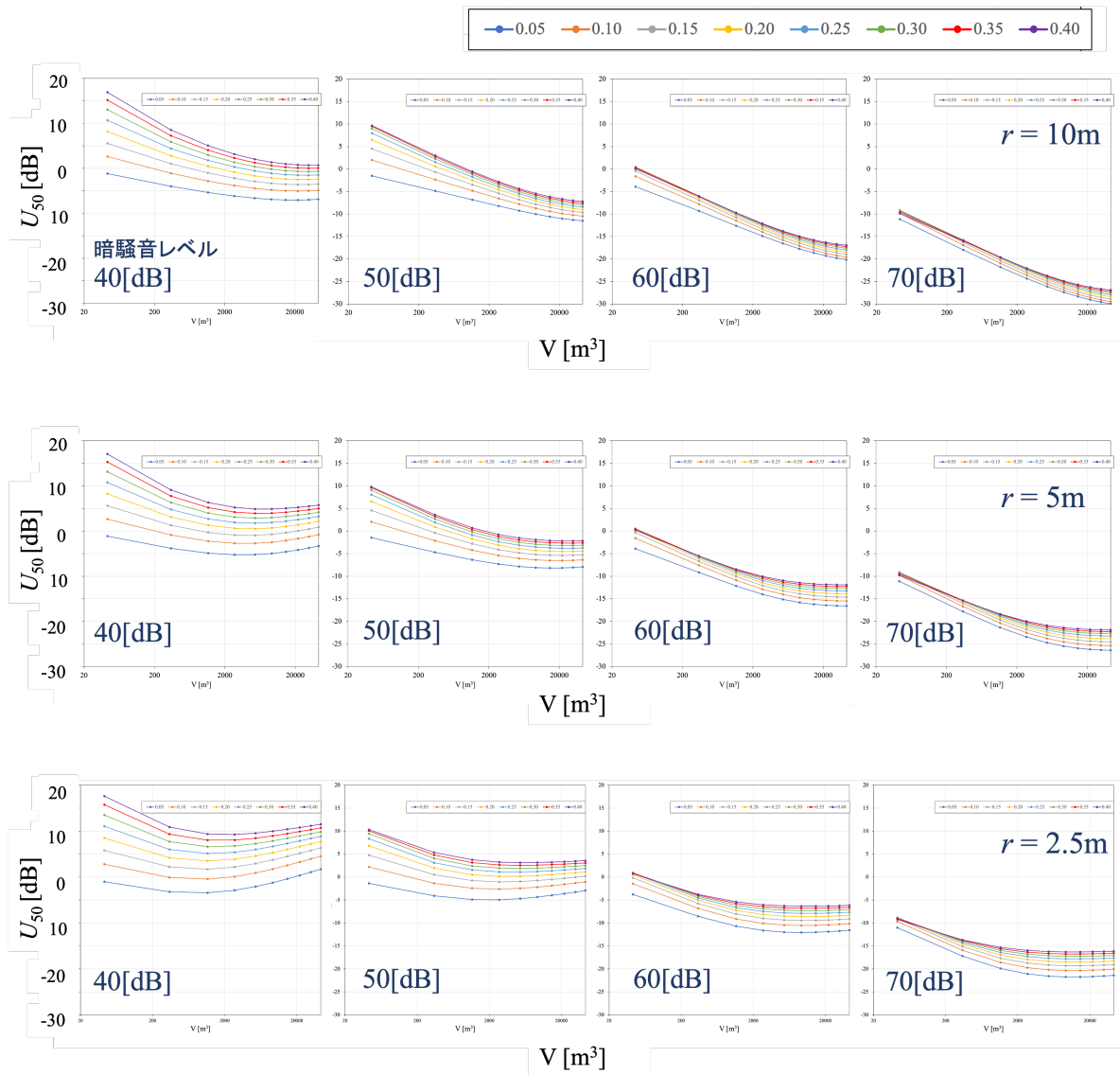
他に、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.2$  の時に  $N=40, 50, 60, 70$  dB となるような床面積あたりの暗騒音レベルを設定してグラフ 4.3 を作成した。音源-受音点間距離は  $r = 2.5, 5, 10$  m とする。

### 4.3.2 考察

図 4.3 において、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

Fig. 4.2: 残響時間の変化における  $C_{50}$  と  $U_{50}$ 

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  $E_N$  が支配的となるため、吸音率をあげても、吸音によるエネルギー低減で結果的に明瞭性に差は見られないと考えられる。

Fig. 4.3: 暗騒音別 平均吸音率の変化による  $U_{50}$

## 第5章

# 聴感心理実験による検討

### 5.1 緒言

前章までに、理論的な検討と幾何音響シミュレーションを通して、残響時間と明瞭性の関係について、室容積や吸音率、音源-受音点距離を変化させて検討を行ってきた。一般に室容積が大きくなると、残響エネルギーが増大し、明瞭性が低くなるが、ある程度大きくなると残響による妨害音よりも直接音の寄与が大きくなり、明瞭性が高くなることがわかった。また、室容積の増大や暗騒音がある場合でも吸音の効果が見られる場合も確認できた。この傾向について、人間の聴覚でも同様に感じ取ることができるか対応を確かめるために、本実験では聴感心理実験を行う。その前に、本実験で音場の再生に用いる 6ch の音響システムについて概説する。

### 5.2 6ch 音場再生システム

6チャンネル再生システムは、実際の3次元音場を、臨場感を伴って実験室内に再現し、主観評価実験を行うために考案・改良されてきた音場再生手法の1つである。これまでに建築音響・騒音分野における様々な音場を対象として、主観評価実験に適用されてきた。本システムは無響室内に直交配置された6台のスピーカーを通して音源を再生し、中心で受聴することで音場を再現するものである。音源としては、実音場の音を6チャンネルマイクロフォンで収録したものをを用いる場合もあるが、本研究では3章の数値解析シミュレーションによって算出した6方向のインパルス応答とドライソースを畳み込んで作成した音源を用いる。再生システムのブロック図を5.1に示す。本研究で使用した無響室と、再生系に用いる6台のスピーカ配置を5.2に示す。床面の1/3を除いた全面に吸音楔を設置しており、その上床面高さ1.2mにグレーチングが設置されている。スピーカはこのグレーチング上に4台と天井と床面に1台ずつ、受聴位置を中心とした半径2,170mmの円上に配置されている。グレーチング上のスピーカ高さはツイーター中心でグレーチング面から1,200mmである。[15]

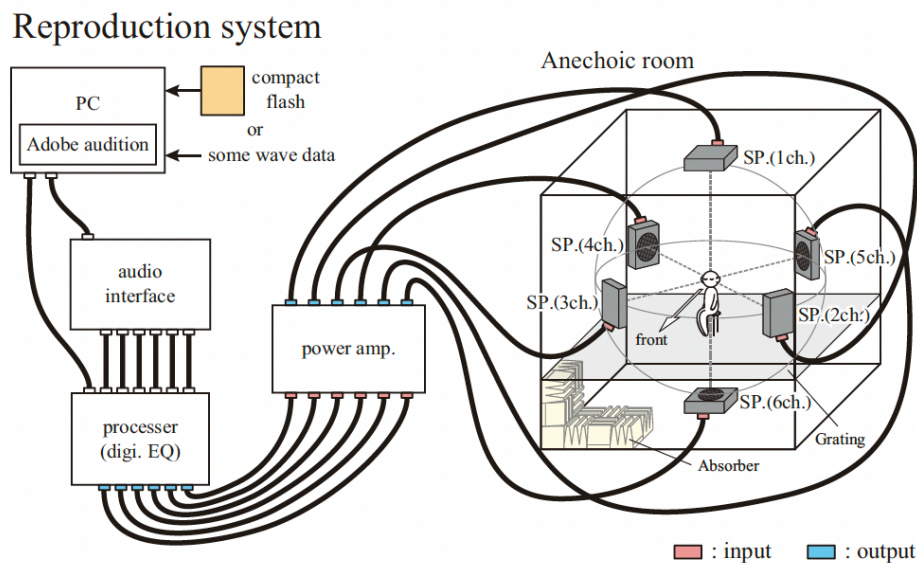


Fig. 5.1: 6ch 再生システムのブロック図

## 5.3 実験概要

解析シミュレーションを行ったものと同様の室容積の条件において、肉声でのスピーチを想定した音場を 6ch 音場再生システムを用いて再現し、被験者にスピーチの「聴き取りにくさ」について 4 段階で評価してもらった。実験は 写真 5.3 にあるように東京大学柏キャンパス環境棟地下一階の無響室にて実施した。被験者は 6 台のスピーカーの中心に着席し、筆記にて評価を行なった。実施期間は 2021 年 12 月中旬、被験者は正常な聴力を持つ 20 ~ 30 代の男女 16 名である。所要時間は休憩を含め、一人当たり 1 時間程度である。

### 5.3.1 実験音源

解析シミュレーションを行なったうちの、室容積  $V = 1000, 5000, 25000 \text{ m}^3$ 、音源-受音点間距離  $r = 5, 10 \text{ m}$ 、平均吸音率  $\bar{\alpha} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  の 24 条件に加えて、暗騒音  $N = 40, 50 \text{ dB}$  も含めた全 48 条件について音場を再現した。音源には日本建築学会の下作成された音源データベース SMILE2004 から女声のスピーチのドライソースを約 20 秒に切り取ったものを使用し、幾何音響シミュレーションで得られた各条件のインパルス応答を畳み込んだ。音量の設定は、音源パワーレベルが 68 dB とした。暗騒音は空調騒音を想定し、周波数特性を  $-5 \text{ dB/Oct.}$  に設定、空気吸収も考慮した hoth ノイズに近いものに、さらに室の吸音による騒音低減の効果も差し引いて Adobe Audition 上で作成した。スピーチの音声音源と暗騒音音源を Adobe Audition 上で重ね合わせたものを実験用音源として使用した。



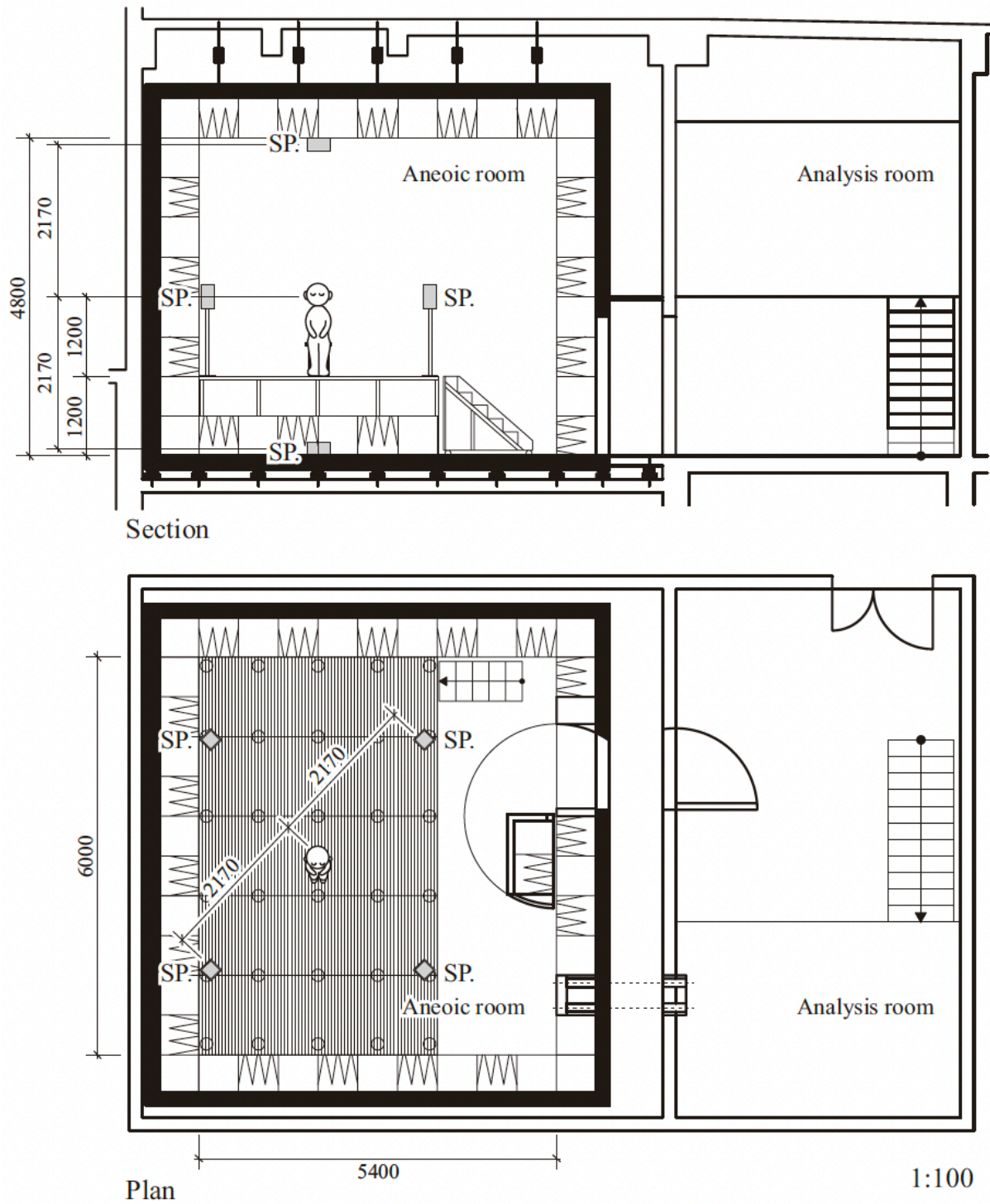


Fig. 5.2: 無響室の平面・断面図とスピーカー配置



Fig. 5.3: 実験の様子

### 5.3.2 評価方法

全 48 条件を乱数を用いてランダムに並び替えたものを 1 セットとし、約 10 分の休憩を挟んで一人 2 セットについて評価を行なった。一つの条件に対して 30 秒、内訳は音源が約 20 秒流れた後に回答時間として 10 秒を設け、次の条件へいく、1 セット 24 分で行なった。評価はスピーチの「聴き取りにくさ」について「聴き取りにくくはない」から「非常に聴き取りにくい」の 4 段階で行なった。「聴き取りにくさ」は従来の音声伝達性能評価がもつ問題点を解消する評価方法として、森本らが提案した [18]。特に多くの公共空間が含まれる、SN 比が 0dB から 15dB の空間では「聴き取りにくさ」による評価が適しているとされる。本実験では暗騒音  $N = 40\text{dB}$  がこの範囲に該当する。全体では SN 比が  $-10 \sim 15 \text{ dB}$  程度に散らばるような条件に設定した。実際に用いた回答用紙を 図 5.4 に示す。

## 居室空間の聴取環境評価実験

実験者：東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻  
佐久間研究室 修士2年 廣瀬量子

### ■実験内容

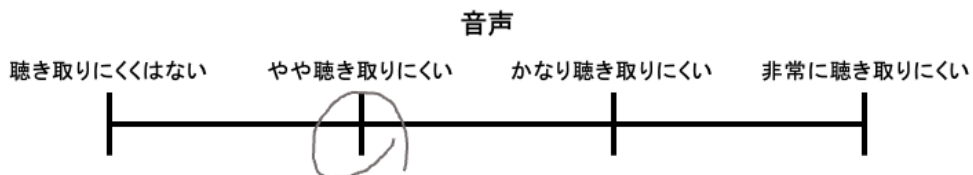
この度は実験にご協力いただき、誠にありがとうございます。  
本実験では、居室空間における会話の聴取を想定し、再現した音場について、音声の「聴き取りにくさ」を評価していただきます。  
所要時間は1時間程度(休憩10分)を予定しております。

### ■実験手順

- 無響室内の椅子に指定された向きで座っていただきます。
- 20秒間の音源を聴き、音声の「聴き取りにくさ」を4段階で評価していただきます。
- 評価及び音源の切り替え時間は10秒間程度設けています。
- 上記の評価を48種類の音源を1セットとして、2セットについて行っていただきます。

### ■評価項目・回答例

-以下の項目について直感的な印象で○をつけてください。



### ■注意事項

- 音源を聴いている時は目を閉じてください。
- 無響室内のスピーカーにはお手を触れないでください。ご協力よろしくお願いたします。

### ■実験参加への同意書

本実験に関する説明を理解し、自らの意志により本実験への参加に同意します。

日付	氏名	性別	年齢
年 月 日		男・女・他	

次ページから、実験の回答用紙になります。

Fig. 5.4: 聴感心理実験に用いた回答用紙

## 5.4 実験結果

### 5.4.1 実験結果と考察

■「聴き取りにくさ」の平均評点 「聴き取りにくくはない」から「非常に聴き取りにくくい」まで1点ずつ加算して与えた点数を「聴き取りにくさ」の評点として集計した。その平均を図5.5に示す。 $N = 40$  dBに比べ、 $N = 50$  dBの「聴き取りにくさ」の評価が全体的に高くなっている。グラフは全体的に右肩下がりになっており、平均吸音率が高くなると「聴き取りにくさ」が減ることがわかる。特に、 $\bar{\alpha} = 0.1$ から0.2にかけての減少が顕著でその後は緩やかである。また、 $r = 5$  mの近距離においては室容積 $V = 5000$ と $25000$   $\text{m}^3$ による違いはほとんど見られない。つまり、理論的検討で得られた、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が聴感的にも確認できた。

■「聴き取りにくさ」の割合  $LDR$  「聴き取りにくさ」の割合 [18] は式5.1で定義される。最も評価の高い「聴き取りにくくはない」以外の回答の合計が全回答数に対して占める割合であり、目指すべき音声伝送性能は「聴き取りにくさ」が0%の状態であると定義されている。算出結果を図5.6に示す。

$$LDR = \left(1 - \frac{n_1}{N}\right) * 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

$n_1$  : 「聴き取りにくくはない」の回答数,  $N$  : 全回答数

$N = 50$  dBではほとんどの条件が $LDR$  100%付近になっている。 $V = 1000$   $\text{m}^3$ かつ $r = 5$  mは吸音率によって右肩下がりになっているが、他の条件では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右肩下がり傾向が見られ、差もはっきりとわかる。傾きから特に、 $r = 5$  mでの $V = 5000, 25000$   $\text{m}^3$ と $r = 10$  mでの $V = 1000$   $\text{m}^3$ では吸音の効果が大いことがわかる。つまり、理論的検討で得られた、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が聴感的にも確認できた。

■音声伝送性能のクラス 日本建築学会は、音声による情報伝達が必要な空間に対して、音声伝送性能のクラスを定めている [17]。音声伝送性能のクラスは、「聴き取りにくさ」および「聴き取り間違い」を用いて、4段階に順序づけした尺度であり、空間の用途に応じて必要な伝送性能を表現するものである。1<sup>st</sup>クラスは、聴き取りにくさを感じない性能であり、音声による情報伝達が空間の重要な性能の一つと位置づけられ、かつ特別な配慮が必要な空間に適用する。2<sup>nd</sup>クラスは、聴き取りにくさをほとんど感じない性能であり、音声による情報伝達が空間の重要な性能の一つと位置付けられる場合に適用する。3<sup>rd</sup>クラスは、聴き取りにくさを感じることもあるが、聴き取り間違いは生じない性能であり、音声による情報伝達が空間の性能の一つとして位置付けられる場合に適用する。4<sup>th</sup>クラスは、聴き取りにくさを感じるこ

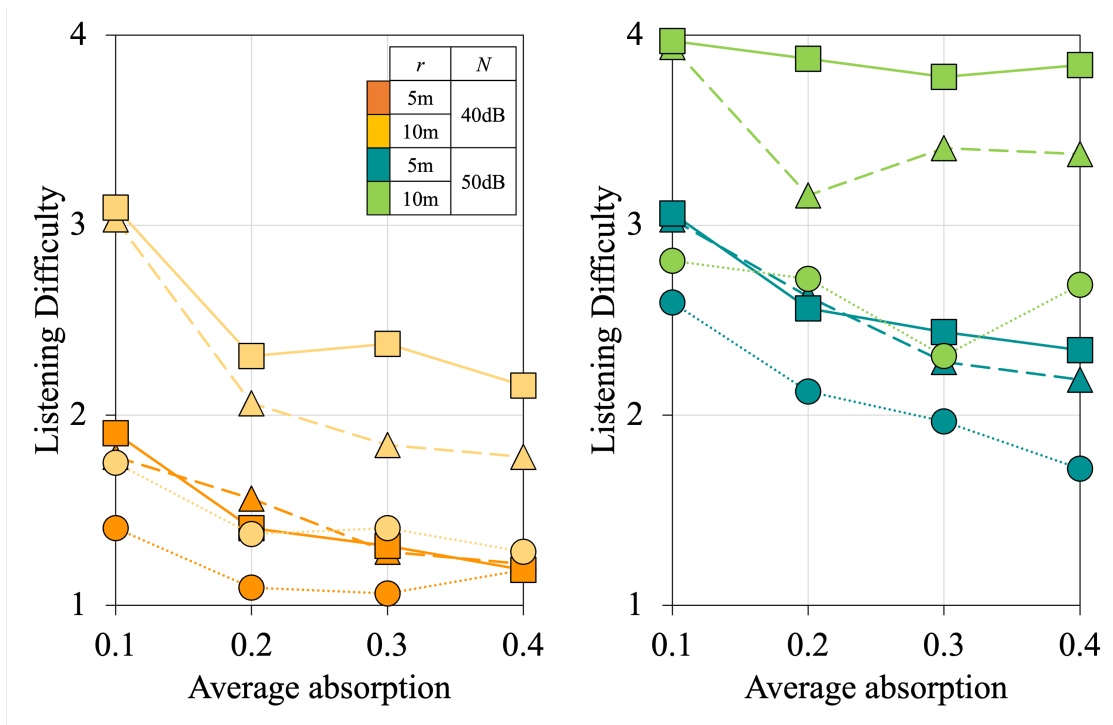


Fig. 5.5: 「聞き取りにくさ」の平均評点

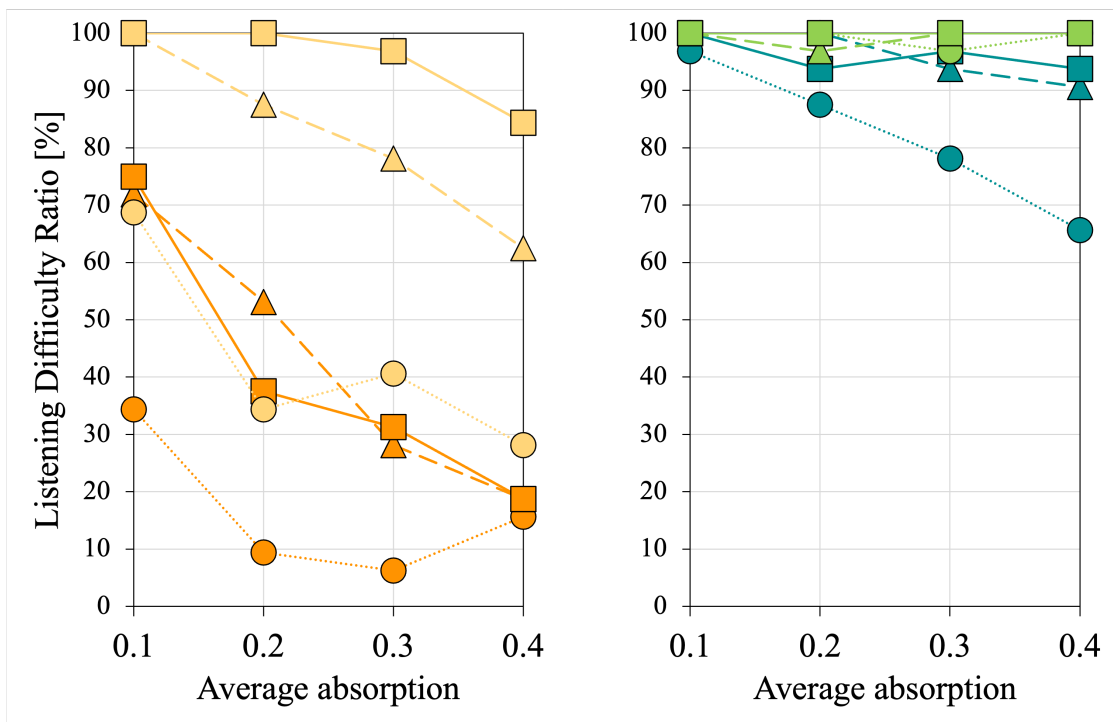


Fig. 5.6: 「聞き取りにくさ」の割合  $LDR$

あり、かつ聴き取り間違いが生じ始める性能である。これは音声による情報伝達が空間の一つとして位置付けられるが、残響過多あるいは騒音抑制が困難な場合に適用するものであるとされる。各クラスと「聴き取りにくさ」および「聴き取り間違い」との対応関係は表 5.1 のようになっている。また情報伝達の形態・伝送種別に応じ、表 5.2 に示すクラスを下回らないことが望ましいとされる。カテゴリ I は音声による情報伝達のみが目的であるか、または他の目的を遂行するのに良好な情報伝達が必要不可欠である空間用途に適用するものである。カテゴリ II は I に含まれない空間用途に適用する。いずれにしても  $LDR$  は 50% 以下の値が求められるため、本実験条件の場合、 $r = 10 \text{ m}$  の  $V = 1000 \text{ m}^3$  においては、平均吸音率を 0.1 から 0.2 にあげることで達成できる。暗騒音  $N = 50 \text{ dB}$  に関してはいずれの条件においても達成できていないことがわかる。

Table 5.1: 音声伝送性能クラス

クラス	「聞き取りにくさ」	「聞き取り間違い」
1 <sup>st</sup>	感じない(0~2%)	生じない(0~2%)
2 <sup>nd</sup>	ほとんど感じない(2~16%)	
3 <sup>rd</sup>	感じることもある(16~50%)	若干生じる(2~5%)
4 <sup>th</sup>		

Table 5.2: 音声伝送性能のクラスと音声による情報伝達の形態及び伝送種別の対応

情報伝達形態	伝送種別	クラス	
		カテゴリ I	カテゴリ II
(1) 会話	拡声なし	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
(2) スピーチ・講義	拡声なし	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
	拡声あり	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup> *
(3) 案内放送	拡声あり	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup> *

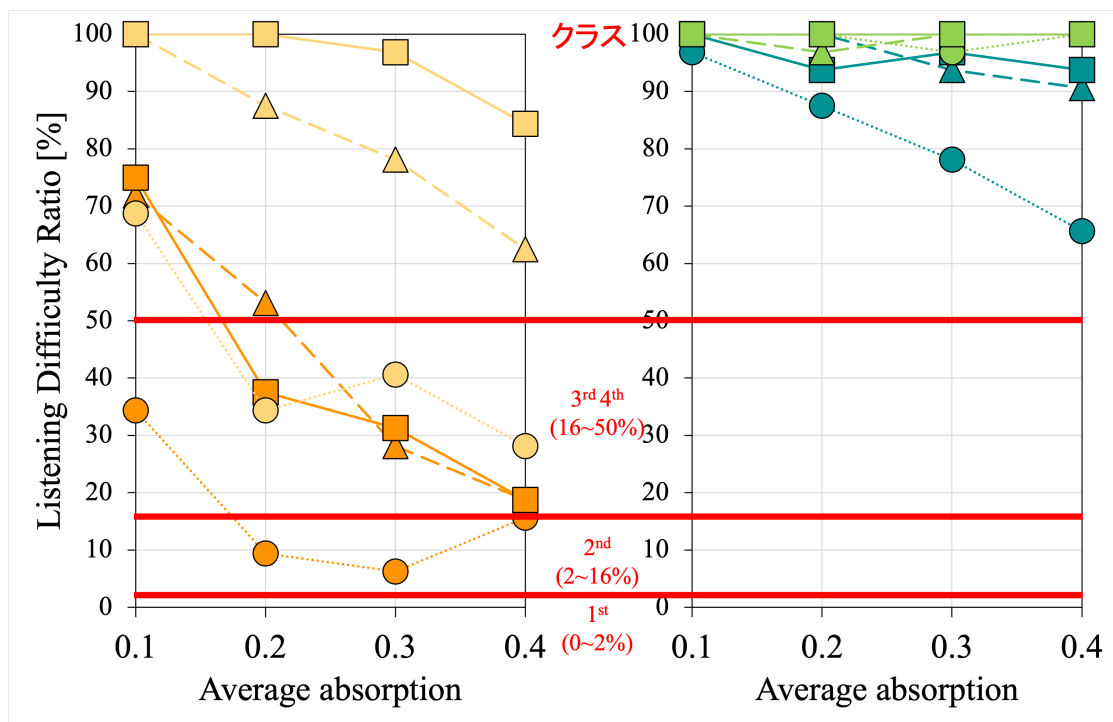


Fig. 5.7: 実験結果による LDR と音声伝送性能クラスの対応

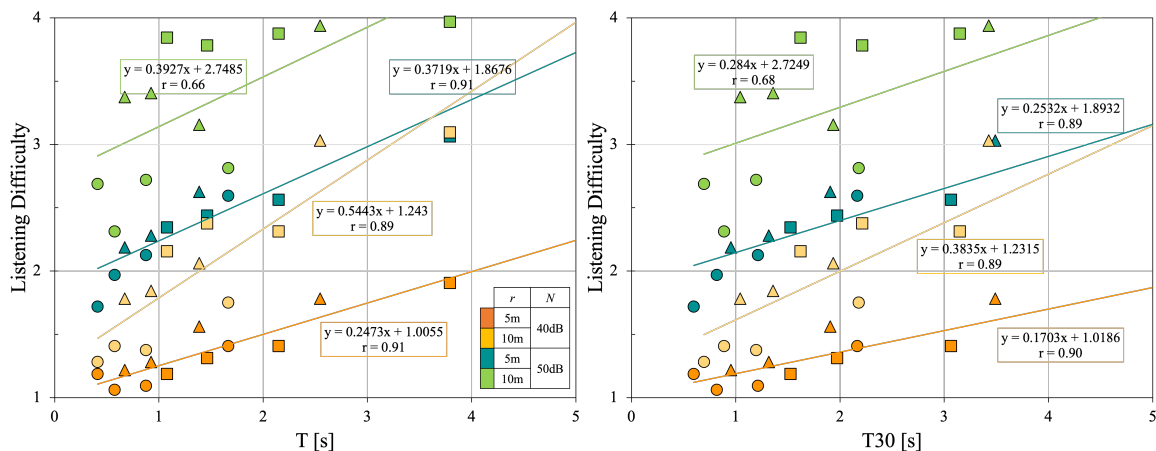


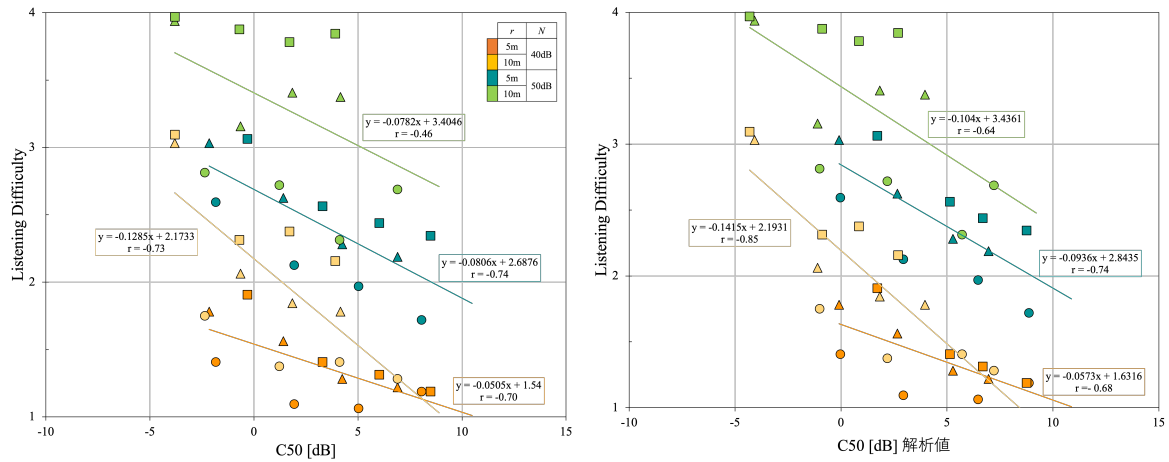
Fig. 5.8: 残響時間と「聴き取りにくさ」

#### 5.4.2 物理量と心理量の対応

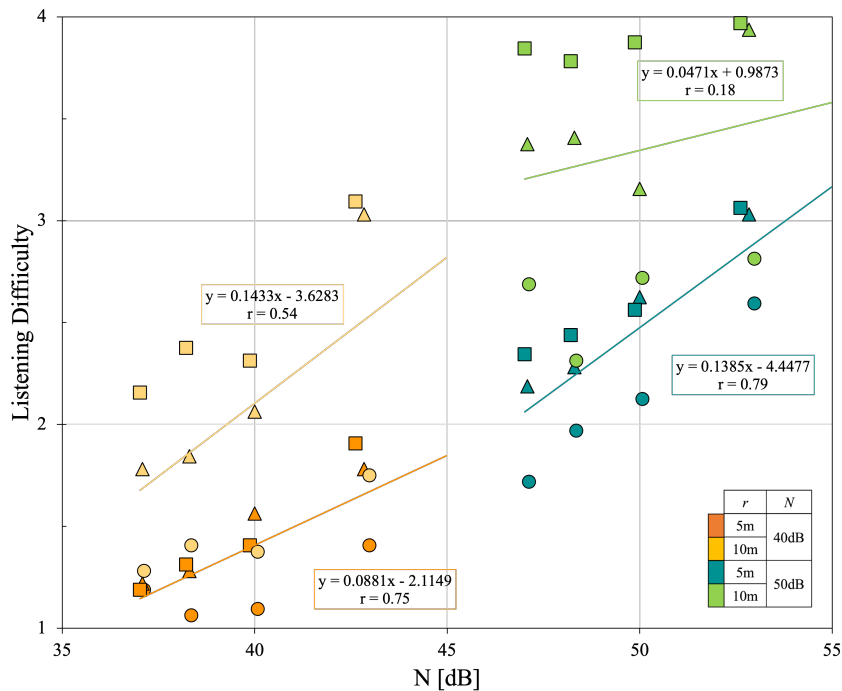
■平均評点と各物理量との対応 聴感心理実験で得られた平均評点と理論及び解析シミュレーションで得られた物理量の値との対応関係を確認するため、相関係数の算出を行なった。

残響時間と「聴き取りにくさ」の関係を図 5.8 に示す。左図が Eyring-Knudsen による理論式で得られた残響時間と対応させたもので、右図が解析シミュレーションによる  $T_{30}$  の値と対応させたものである。理論値と解析値の傾向はよく対応している。暗騒音と音源-受音点間距離別に残響時間が長いほど「聴き取りにくさ」が増す相関が強く出ている。特に、 $r = 10$  m での  $N = 50$  dB では暗騒音が大きい上、直接音の寄与も小さくなるため全体的な評価が悪く、ばらつきも大きい。逆に、それ以外の条件では残響時間が長くても「聴き取りにくさ」が抑えられている。全条件での相関係数は 0.43 のため、「聴き取りにくさ」は残響時間によるが、それ以外の要因の方が大きいと言える。



Fig. 5.9: クラリティ  $C_{50}$  と「聴き取りにくさ」

明瞭性指標クラリティ  $C_{50}$  と「聴き取りにくさ」の関係を 図 5.9 に示す。左図が理論式で得られた  $C_{50}$  と対応させたもので、右図が解析シミュレーションによるものである。理論値と解析値の傾向はよく対応している。暗騒音と音源-受音点間距離別に  $C_{50}$  が高いほど、「聴き取りにくさ」は改善する相関が強く出ている。ただし、全条件との相関係数は理論値で 0.47、解析値で 0.57 程度に留まっており、残響時間と同様に、 $C_{50}$  のみで「聴き取りにくさ」について議論するのでは不十分だと考えられる。

Fig. 5.10: 暗騒音  $N$  と「聴き取りにくさ」

暗騒音レベル  $N$  dB と「聴き取りにくさ」の関係を 図?? に、SN 比と「聴き取りにくさ」の関係を 図 5.11 に示す。全条件における、暗騒音レベル  $N$  dB と「聴き取りにくさ」の相関係数は 0.74、SN 比との相関係数は 0.85 と高い値を取っている。全体的には暗騒音レベル  $N$  dB が大きくなるほど「聴き取りにくさ」は増しているが、特に  $r = 5$  m での近距離において強い相関が見られる。一方で  $r = 10$  m での遠距離において「聴き取りにくさ」は暗騒音の影響も見られるが、室容積による違いも大きく見られる。SN 比においても、SN 比が大きくなるほど「聴き取りにくさ」は改善していく傾向が全体に見られるが、より遠距離において相関が高くなっている。つまり、より近距離においては直接音は十分に届くので、後は暗騒音次第で「聴き取りにくさ」が決まるのに対し、遠距離では直接音も届きにくくなるため、直接音と暗騒音のバランスで「聴き取りにくさ」が決まる事になる。そこで、やはり暗騒音も含めた明瞭性指標である  $U_{50}$  との対応に注視していく。

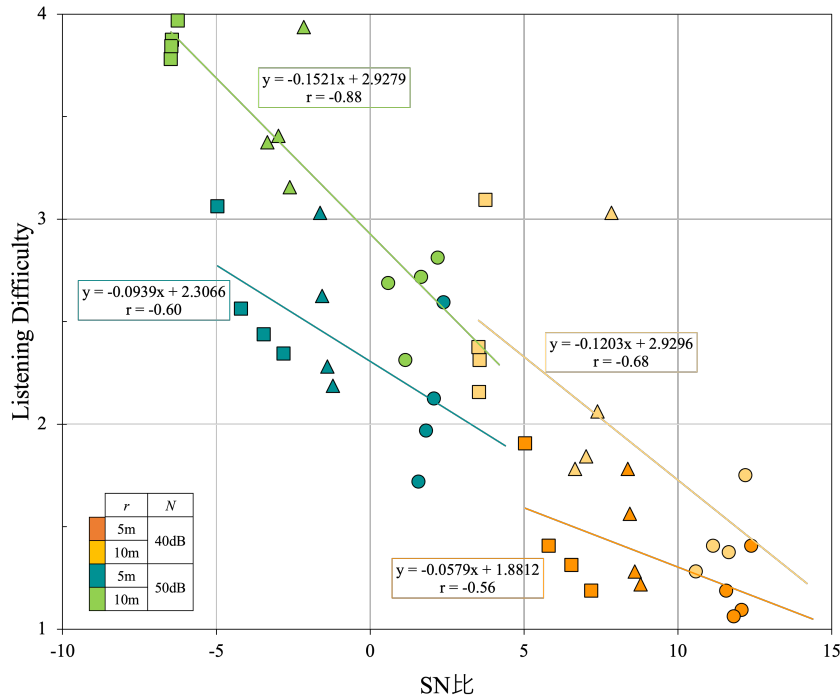
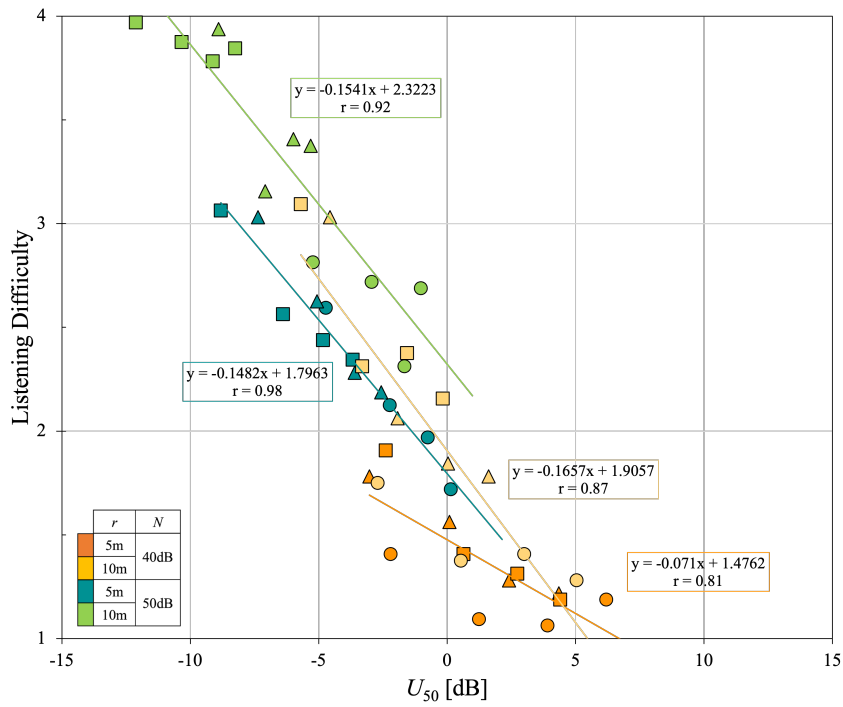
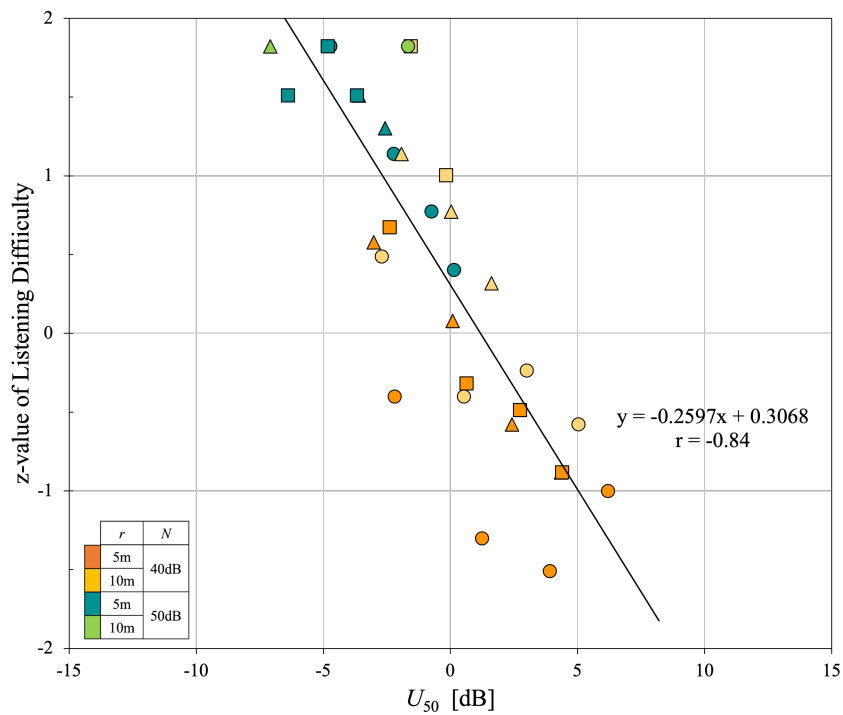


Fig. 5.11: SN 比と「聞き取りにくさ」

■ $U_{50}$  と  $LDR$  との対応  $U_{50}$  と「聞き取りにくさ」の関係を 図 5.12 に示す。全条件との相関は 0.92 と高く、距離と暗騒音別に見ても高い相関が得られている。「聞き取りにくさ」について正規化を行い、 $U_{50}$  との直線回帰式 5.2 を得た。( 図 5.13 )

$$z - value(LD) = -0.2597 * U_{50} + 0.3068 \quad (5.2)$$

これを元に  $LDR$  との対応関係を近似曲線とともに 図 5.14 に示す。一般に  $U_{50} = 0$  dB の時に 50% の人が聞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  $U_{50}$  は 3 dB 付近となった。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「聞き取りにくさ」の割合が大幅に改善されるということがわかる。ただし、図 5.11 より、SN 比が 0 dB を下回る際には、吸音率や室容積に関わらず「聞き取りにくさ」高くなる。今回用いた  $U_{50}$  の値は、理論値によるものである。理論値と解析値の  $C_{50}$  の結果によると、音源-受音点間距離が短いほど解析値が高くなっていた。これは近距離で反射性が高ければ高いほど、床や壁からの反射音が直接音を増強させるためと考えられる。そのため、解析値を用いた  $U_{50}$  では  $r = 5$  m、図のオレンジのプロットが  $U_{50}$  が増加する方向へ 3 dB 程度移動すると予想され、より近似曲線上にのり、精度の高い対応が見られるはずである。

Fig. 5.12:  $U_{50}$  と「聴き取りにくさ」Fig. 5.13:  $U_{50}$  と  $z$  値

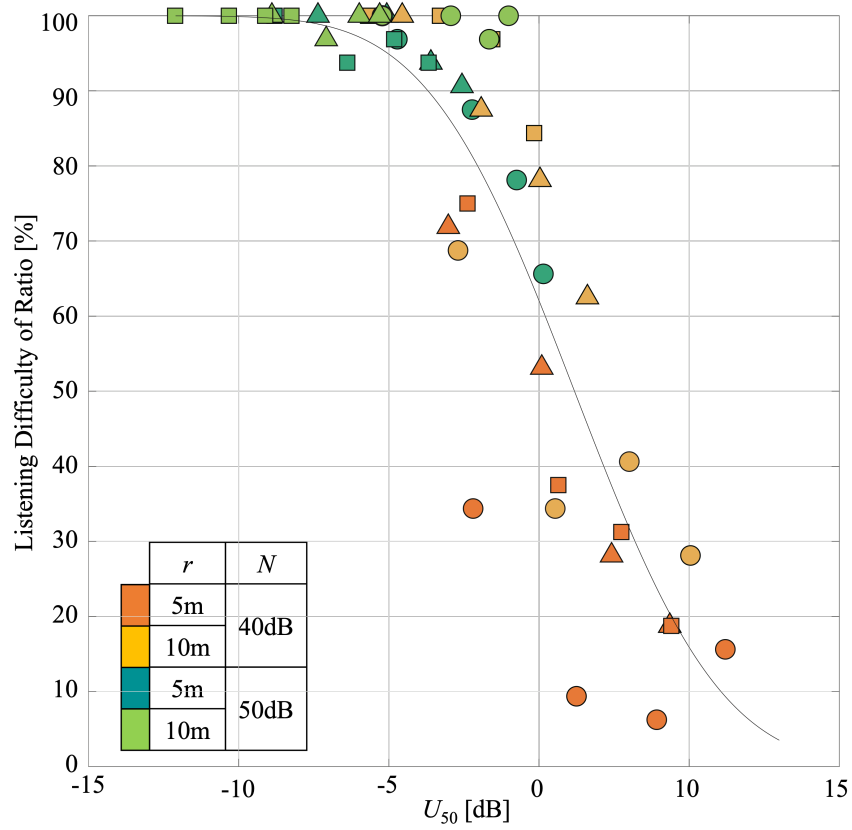


Fig. 5.14:  $U_{50}$  と  $LDR$



## 第6章

# 総括

本章では、本研究により得られた成果を総括し、今後の課題について述べる。

### 6.1 研究の成果

第二章では、明瞭性指標  $C_{50}$  について、平均吸音率、残響時間や室容積との関係を明らかにした。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が示唆された。等値線のピークとなる室容積は  $r = 2.5$  m では  $1,000$  m<sup>3</sup> 程度、 $r = 10$  m では  $10,000$  m<sup>3</sup> 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った。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が示唆された。第三章では、幾何音響シミュレーションを用いて物理指標を算出し、理論値との対応関係をみた。特に明瞭性指標  $C_{50}$  では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ことがわかった。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。一般に室容積が大きくなると残響エネルギーが大きくなり、妨害エネルギーが大きくなるため明瞭性が下がるが、ある程度室が大きくなると、音源-受音点距離が近いほど直接音の寄与が相対的に大きくなり、明瞭性が高まる方向へ切り替わる理論値で見られた傾向が解析値においても確認できた。第四章では、暗騒音を含めた明瞭性指標である  $U_{50}$  について、理論的検討を行い、吸音による騒音低減にも注目した。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たが、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、 $U_{50}$  を構成するエネルギー要素のうち  $E_E$  と  $E_N$  が支配的となるため、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も下がるので結果的に明瞭性に変化が見られないことがわかった。第四章では、これまで検討してきた、室容積や音源受

音点距離など様々なパラメータで複雑に変化する明瞭性について聴感でも対応が取れるか確認を行った。暗騒音も含めた明瞭性指標である  $U_{50}$  と  $LDR$  の対応について、理論からでも傾向を掴むことが可能であることが示唆された。

## 6.2 今後の課題

ここでは、本論文において残された課題について述べる。今後の課題として、 $C_{50}$  から基礎的な検討を行い、心理実験も行ったが、暗騒音を含めた  $U_{50}$  についても解析によるシミュレーションを行い、被験者実験を行った音場の理論ではなく、実際の物理指標と聴感がどう対応しているのかを確認することが挙げられる。

本研究が、建築空間の吸音設計における基準策定のどのような性能を担保すべきか、何を基準として満たすべきかという議論において、経験値のみではなく、理論的な根拠を持ったエビデンスとしての材料になることを期待し、本論文を締めくくる。



# 目次

1.1	室区分 A における目標残響時間 $T_0$ . . . . .	7
1.2	室区分 B における室容積 $V$ に対する必要吸音面積 $A$ と天井高 $h$ . . . . .	8
1.3	最適残響時間 $T$ . . . . .	9
1.4	平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 毎の室容積と残響時間の対応 . . . . .	10
1.5	研究構成 . . . . .	11
2.1	残響時間の変化による $U_{50}$ と $SNR$ . . . . .	14
2.2	音場の構成①：残響音のみ . . . . .	14
2.3	音場の構成②：直接音＋残響音 . . . . .	15
2.4	音場の構成③：直接音＋残響音 (Barron) . . . . .	15
2.5	①：平均吸音率の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 . . . . .	16
2.6	①：の室容積のアスペクト比の変化による横軸の読み替え . . . . .	17
2.7	平均吸音率と室容積の変化による $C_{50}$ のコンタ図 . . . . .	17
2.8	残響時間と室容積の変化による $C_{50}$ のコンタ図 I . . . . .	18
2.9	残響時間と室容積の変化による $C_{50}$ のコンタ図 II . . . . .	18
2.10	②：平均吸音率の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 . . . . .	20
2.11	③：平均吸音率の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 . . . . .	21
2.12	平均吸音率の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 . . . . .	22
2.13	残響時間の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 . . . . .	22
2.14	推奨残響時間を重ね合わせた残響時間の変化における $C_{50}$ と室容積 $V$ の関係 $r = 5m$ . . . . .	23
3.1	幾何音響解析 . . . . .	26
3.2	幾何音響解析 (音線法) プログラムのフロー [15] . . . . .	27
3.3	解析条件の室容積検討 . . . . .	29
3.4	解析モデル ( $V = 1000m^3$ ) . . . . .	30
3.5	残響時間の解析値と理論値の対応 (○： $V=1,000$ , △： $5,000$ , □： $25,000$ ) . . . . .	32

3.6	$C_{50}$ の解析値と理論値の対応 (○: $V=1,000$ , △: $5,000$ , □: $25,000$ ) . . .	33
3.7	残響時間における $C_{50}$ コンタ図と解析結果 . . . . .	33
3.8	平均吸音率における $C_{50}$ コンタ図と解析結果 . . . . .	33
4.1	平均吸音率の変化における $C_{50}$ と $U_{50}$ . . . . .	36
4.2	残響時間の変化における $C_{50}$ と $U_{50}$ . . . . .	37
4.3	暗騒音別 平均吸音率の変化による $U_{50}$ . . . . .	38
5.1	6ch 再生システムのブロック図 . . . . .	40
5.2	無響室の平面・断面図とスピーカー配置 . . . . .	41
5.3	実験の様子 . . . . .	42
5.4	聴感心理実験に用いた回答用紙 . . . . .	43
5.5	「聴き取りにくさ」の平均評点 . . . . .	45
5.6	「聴き取りにくさ」の割合 $LDR$ . . . . .	45
5.7	実験結果による $LDR$ と音声伝送性能クラスの対応 . . . . .	47
5.8	残響時間と「聴き取りにくさ」 . . . . .	48
5.9	クラリティ $C_{50}$ と「聴き取りにくさ」 . . . . .	49
5.10	暗騒音 $N$ と「聴き取りにくさ」 . . . . .	50
5.11	SN 比と「聴き取りにくさ」 . . . . .	51
5.12	$U_{50}$ と「聴き取りにくさ」 . . . . .	52
5.13	$U_{50}$ と $z$ 値 . . . . .	52
5.14	$U_{50}$ と $LDR$ . . . . .	53

# 表目次

1.1	室区分 A の用途分類 . . . . .	6
1.2	室区分 B の用途分類 . . . . .	7
1.3	用途類型 A1 ~ A5 の目標残響時間に係わる係数 . . . . .	8
1.4	用途類型 B1 ~ B5 の目標残響時間に係わる係数 . . . . .	8
1.5	用途別 推奨平均吸音率 . . . . .	10
3.1	空気吸収の減衰係数 . . . . .	28
5.1	音声伝送性能クラス . . . . .	47
5.2	音声伝送性能のクラスと音声による情報伝達の形態及び伝送種別の対応 . . .	47



## 参考文献

- [1] DIN. Acoustic quality in rooms specifications and instructions for the room acoustic design.
- [2] 佐久間哲哉. 吸音設計に関する基準設定の方向性について—din 18041 に関する考察—. 日本建築学会学術講演梗概集, 2020.
- [3] W.C.Sabine. Collected papers on acoustics, harvard university press, cambridge. pp. 3,71–75, 1992.
- [4] S.Lifshitz. Optimum reverberation for an auditorium, physical review. pp. 25,391–394, 1925.
- [5] F.R.Watson. Acoustics of auditoriums: Optimum time of reverberation. *Architecture*, Vol. 55, pp. 251–254, 1927.
- [6] W.A.MacNair. Optimum reverberation time for auditoriums. *J Acoust. Soc Am*, Vol. 1, pp. 242–248, 1930.
- [7] S.Lifshitz. Apparent duration of sound perception and musical optimum reverberation,. *J Acoust. Soc Am*, Vol. 7, pp. 213–221, 1936.
- [8] V.O.Knudsen. Architectural acoustics,. *John Wily and Sons Inc. New York*, pp. 59–62, 1932.
- [9] V.O.Knudsen and C.M.Harris. Acoustical designing in architecture. *John Wily and Sons Inc. New York*, pp. 192–195, 1950.
- [10] 古屋浩. 残響の主観印象と最適残響時間. 音響技術, Vol. 44, No. 169, pp. 31–36, 2015.
- [11] 日本建築学会パンフレット. 建築の音環境設計. 昭和 58 年.
- [12] 日本建築学会. Aijes—スピーチプライバシーの評価基準と設計指針—音声による情報漏洩防止—.
- [13] M.Barron and L.J.Lee. Energy relations in concert auditoriums. i. *J. Acoust Soc. Am.*, Vol. 84, pp. 618–628, 1988.
- [14] 森谷秀樹増田潔. 室内音響設計のための明瞭性指標 snrstat とその応用. 日本音響学会誌, Vol. 56, No. 4, pp. 232–242, 2000.
- [15] 西村裕喜子. 雑踏音場シミュレーションによる公共空間の音環境印象評価. 修士論文,

- 2014.
- [16] 土屋洵. 屋内移動空間の音場シミュレーションに基づく覚醒放送の聴取環境評価. 修士論文, 2020.
- [17] 日本建築学会. Aijes-s0002-2011-年空間における音声伝送性能評価基準・同解説.
- [18] 佐藤洋佐藤逸人. ”聴き取りにくさ”による音声伝達性能の評価. 日本音響学会誌, Vol. 63, No. 5, pp. 275-280, 2007.

# 謝辞

本論文は東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻修士課程において、同大学工学系研究科建築学専攻の佐久間哲哉教授のご指導のもと行った研究をまとめたものであります。オンライン上の研究打ち合わせが多くはありましたが、研究に対する姿勢から広い知見と経験をお持ちだからこそその助言やアイデア、細やかなご指導をいただきました。また、学会への論文執筆や他分野・他大学との交流を兼ねた合同ゼミ等、初めて経験する発表の機会においても、筆者の拙い文章や表現に的確な指導をしてくださいました。心から感謝申し上げます。

副指導教員である同大学新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻の小崎美希准教授には、大変お忙しい中、時間を作っていただき、同じ建築環境心理分野としての視点や、音環境の意味では専門外としての立場からも幅広く助言していただき、普段見落としがちな根本的な部分を補えるようにご指導いただきました。ここに感謝申し上げます。

また、2019年度まで本研究室の特任助教をされていた前橋工科大学の井上尚久講師には、研究上必要な基礎的な知識からプログラミングまで、勉強会等で丁寧にご教授いただきました。ここに感謝申し上げます。

本研究室の先輩である中津成博氏には、研究打ち合わせにも同席していただき、足りない部分を多く補っていただきました。また、具体的な研究機器の操作手法についても教えてくださいました。本研究室OBで、本研究の先行となる研究をされた土屋洵氏には、卒業後もお忙しい中時間を割いて相談に乗っていただきました。また、本研究室の先輩である劉金雨氏は、いつも気にかけていただき、親身になって助言をしてくださいました。同じく先輩の曹達氏にも、実験の準備等を快く手伝っていただきました。先輩方である榎本貴之氏、山崎泰知氏、孔敬受氏、那須端早氏、田主望氏、同期の船津出帆さん、後輩の中島美百合さん、深田竜岐さん、石田肇さん、板垣大稀さん、萩原諒さん、松永響さん、研究生の陳科吉さん、章さんも研究生生活を送る中で、様々な形でお世話になりました。ここに心から感謝申し上げます。

コロナの流行が本格化すると同時に本修士課程へ入学することになり、佐久間先生ご自身は所属が新領域から工学系研究科へ異動されるタイミングで、研究環境から学生生活まで想像とは違う日々の中で大変なことも少なくはありませんでしたが、研究を進めることができるように様々な面で支えてくださった皆様に感謝申し上げます。

最後になりましたが、筆者の学生生活を見守り、経済面や精神面において支えてくださった家族に多大なる感謝の意を表します。

2022年1月17日

廣瀬 量子



# 発表論文

修士論文梗概

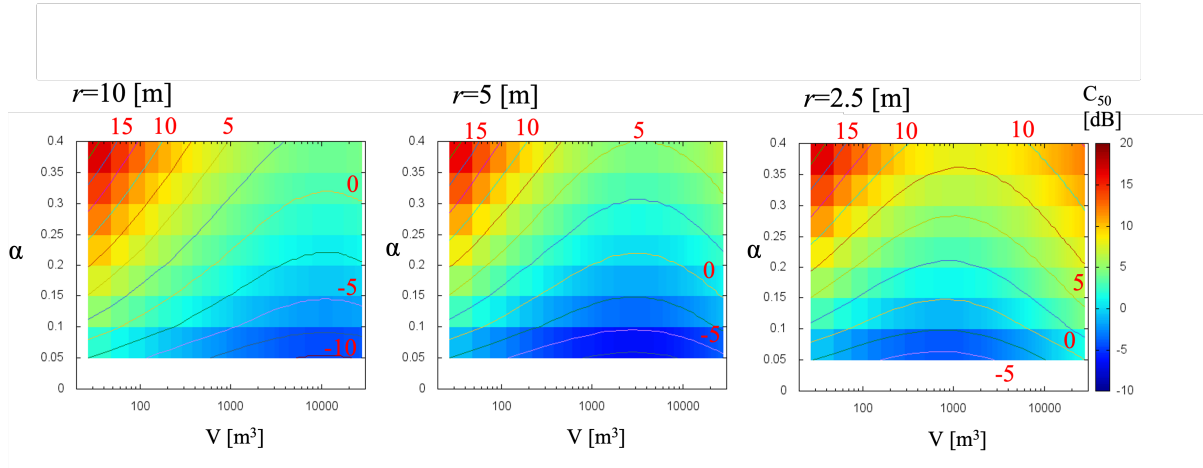
本研究に関する発表論文

1. 廣瀬量子, 佐久間哲哉: 室内の残響時間と音声明瞭度の関係性に関する理論的検討, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2022.4.

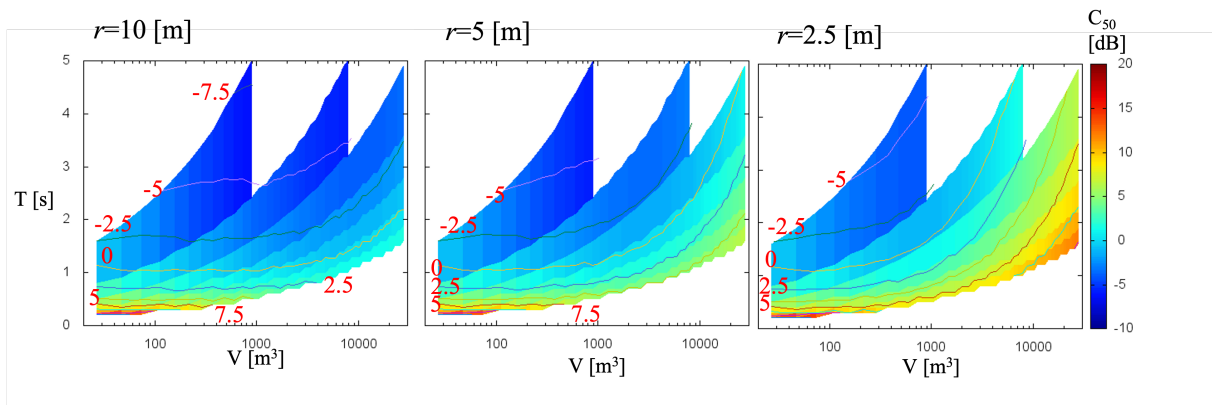


# 付録

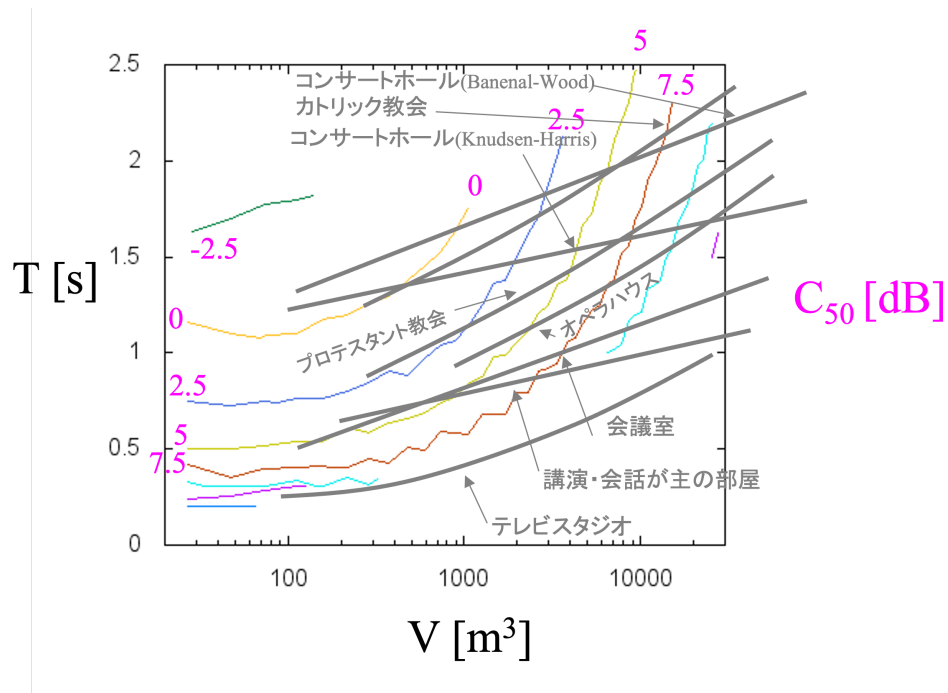
■  $C_{50}$  の理論的検討：②直接音＋残響音



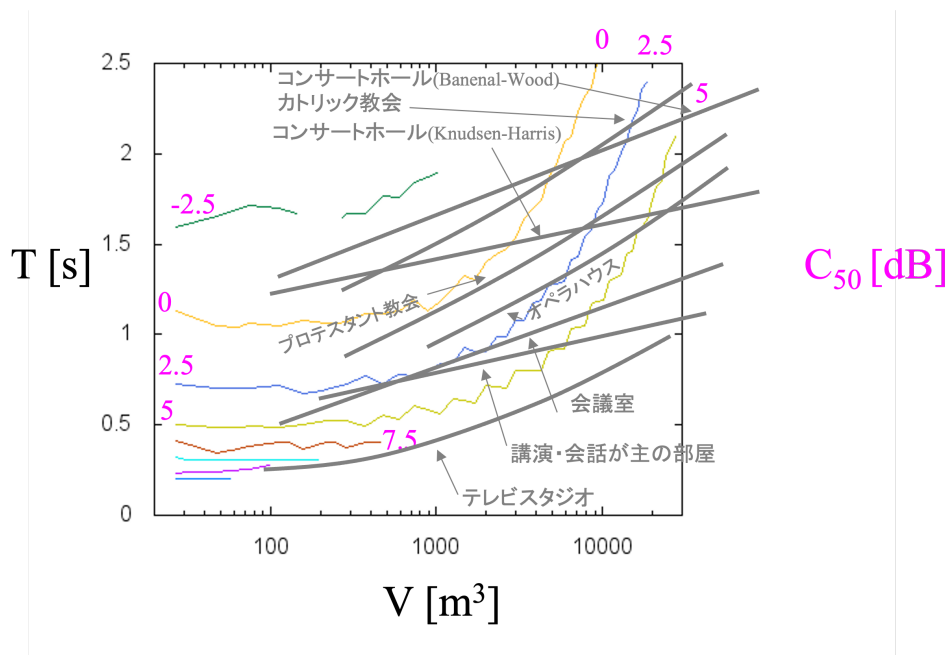
1. ②：平均吸音率と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図



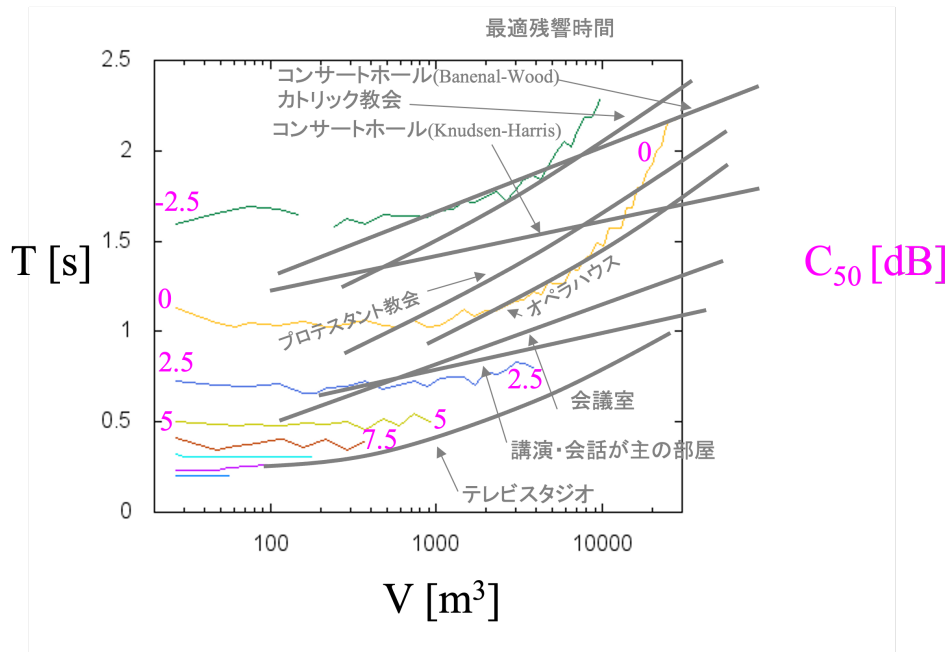
2. ②：残響時間と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図



3. ②：推奨残響時間を重ね合わせた残響時間の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係  $r = 2.5$  m



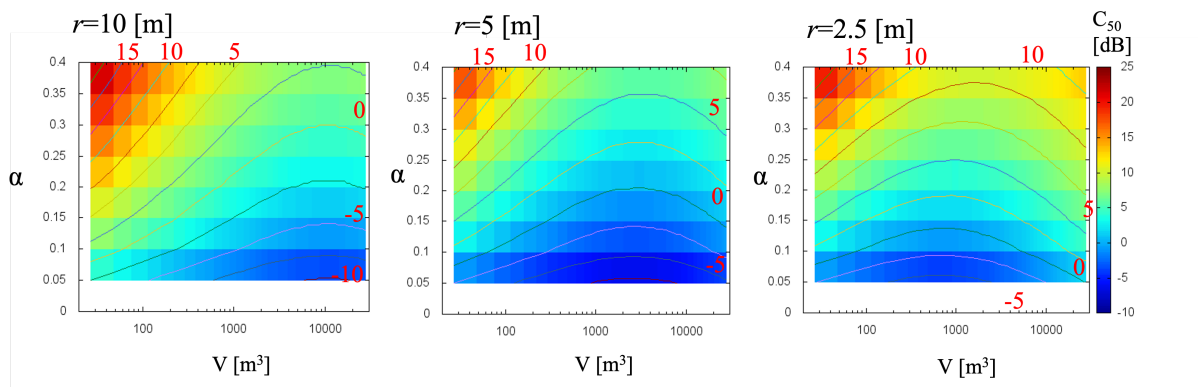
4. ②：推奨残響時間を重ね合わせた残響時間の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係  $r = 5$  m



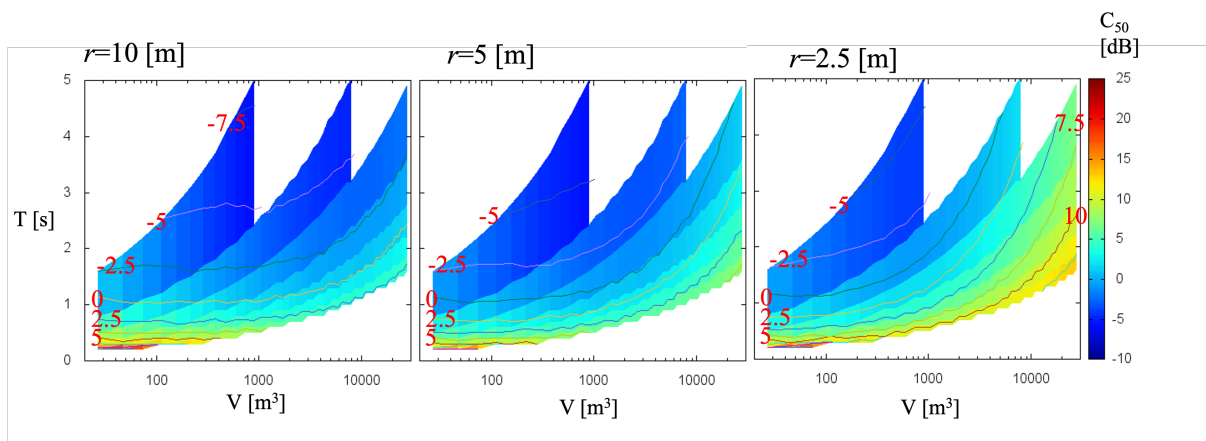
5. ②：推奨残響時間を重ね合わせた残響時間の変化における  $C_{50}$  と室容積  $V$  の関係  $r = 10$  m

■  $C_{50}$  の理論的検討：③直接音+残響音（Barron の修正理論）

[h]

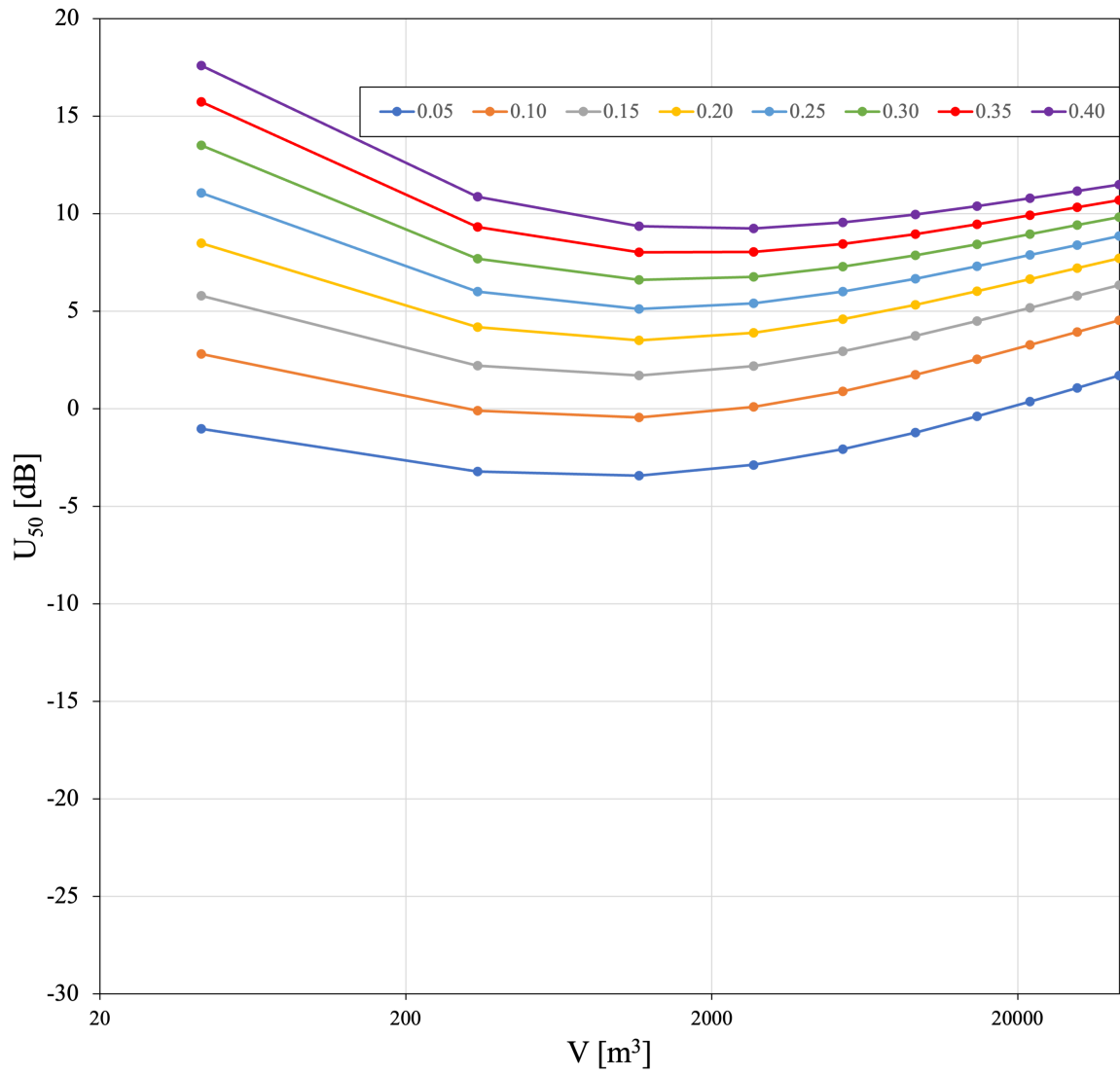


1. ③：平均吸音率と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図



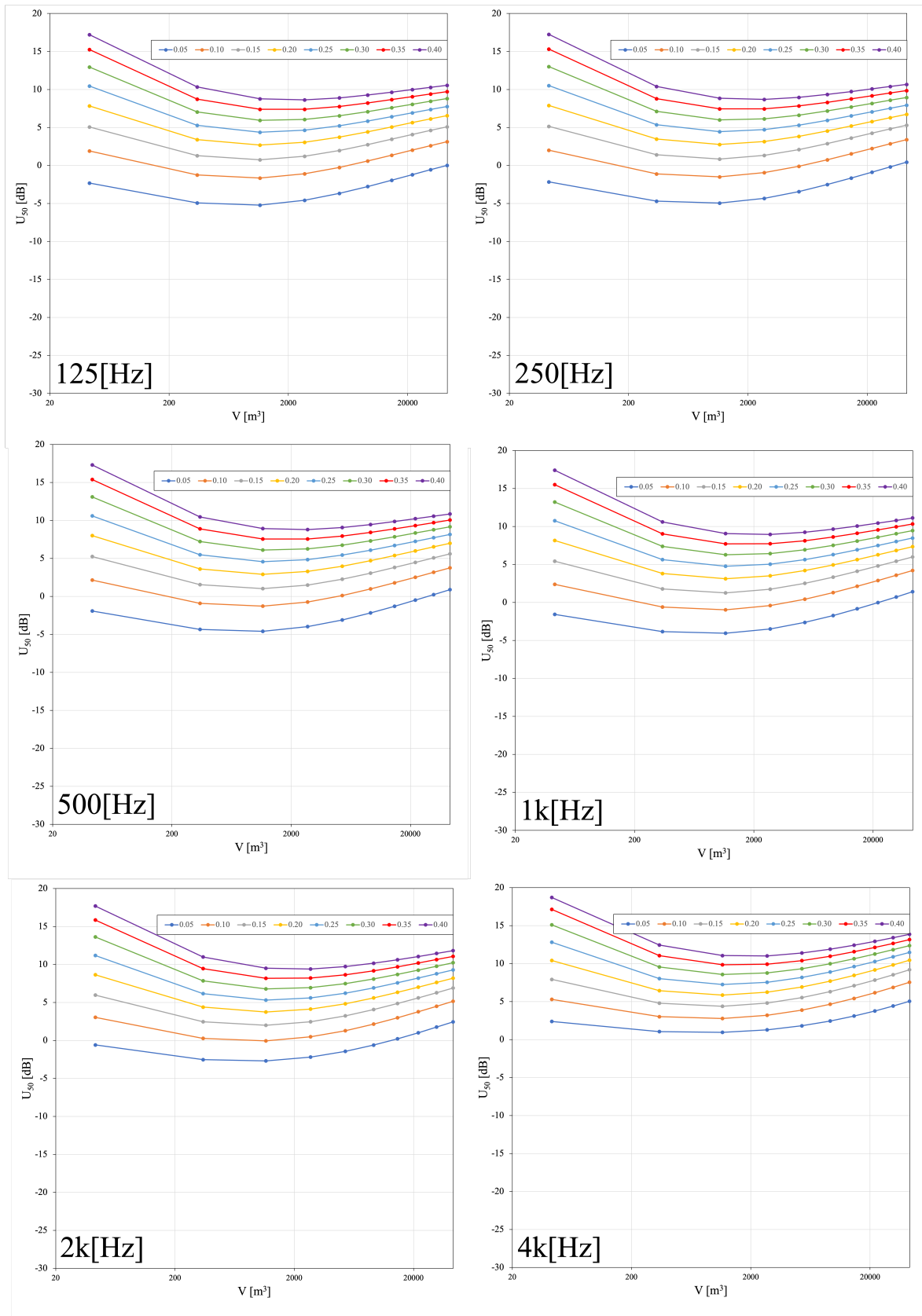
2. ③：残響時間と室容積の変化による  $C_{50}$  のコンタ図

■  $U_{50}$  の理論的検討 40 dB

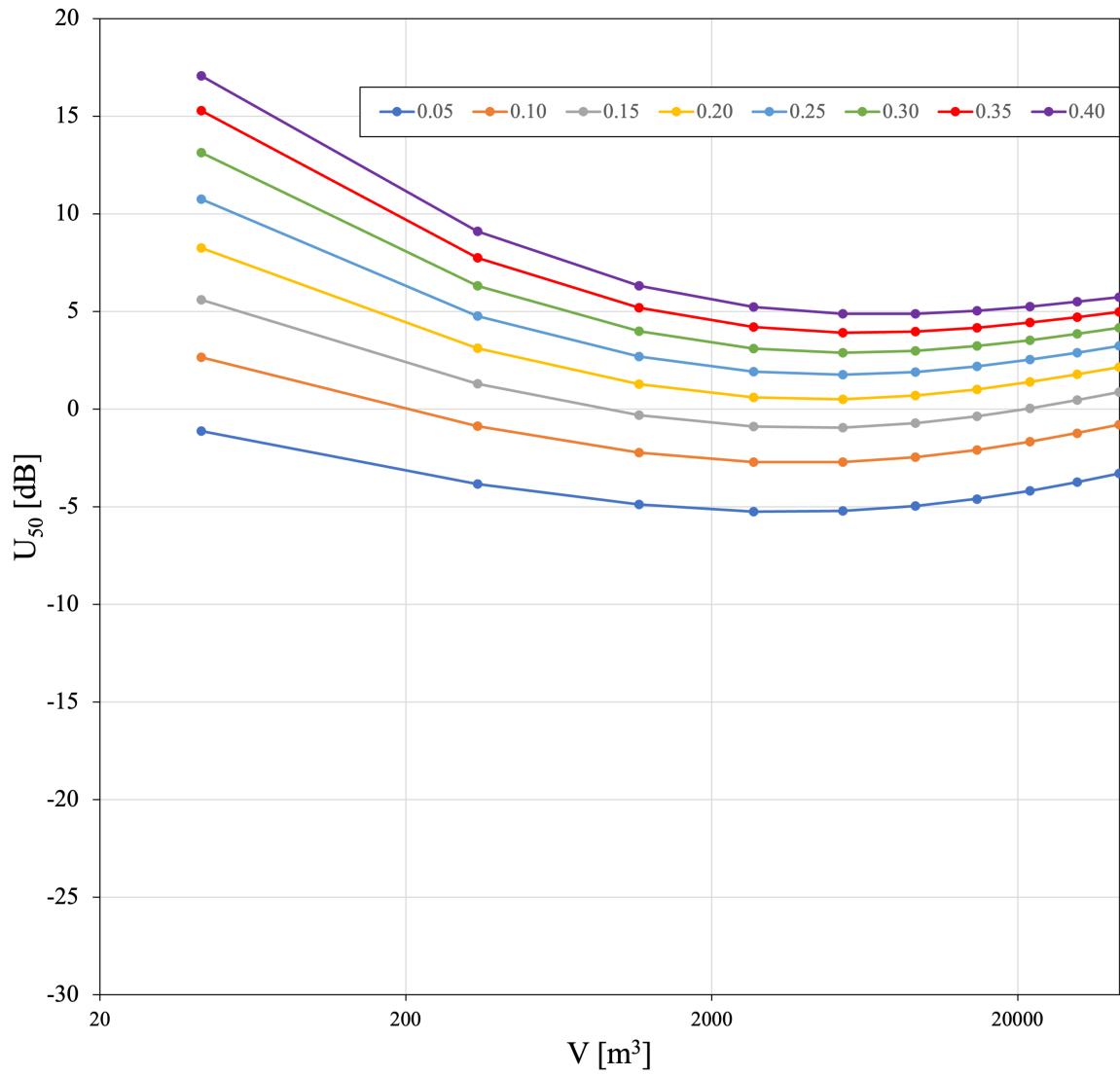


1. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m

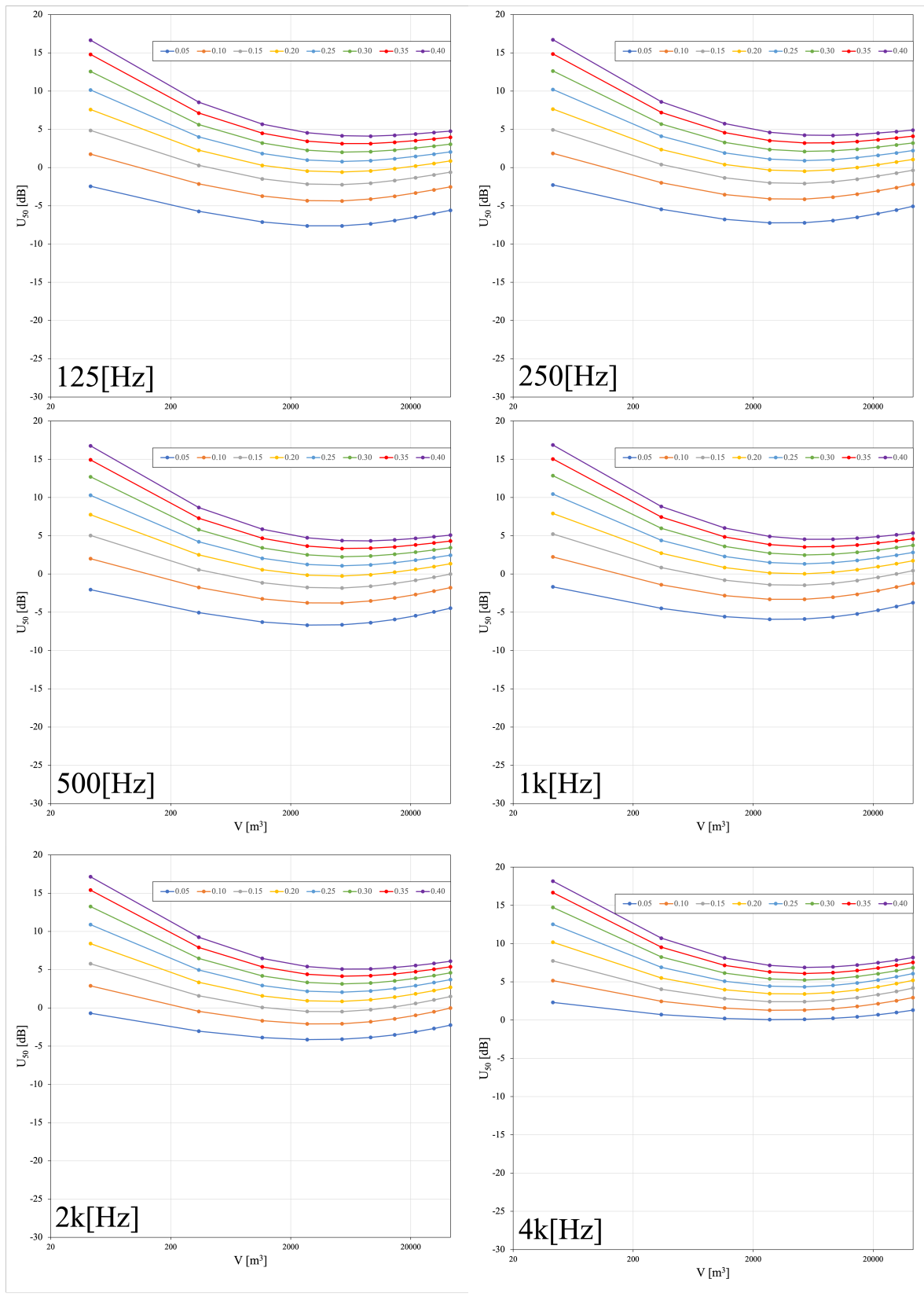




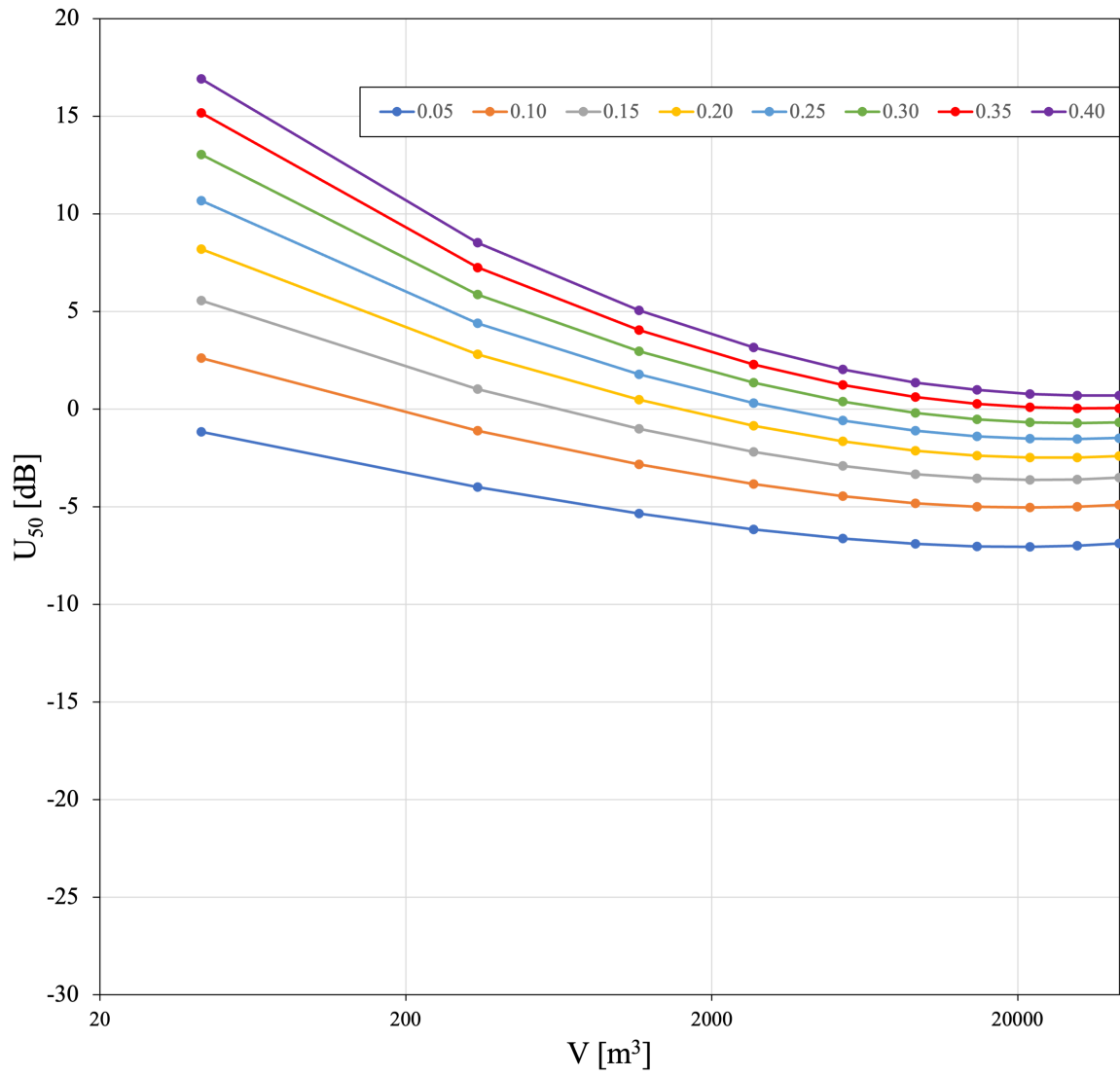
2. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m(各周波数)



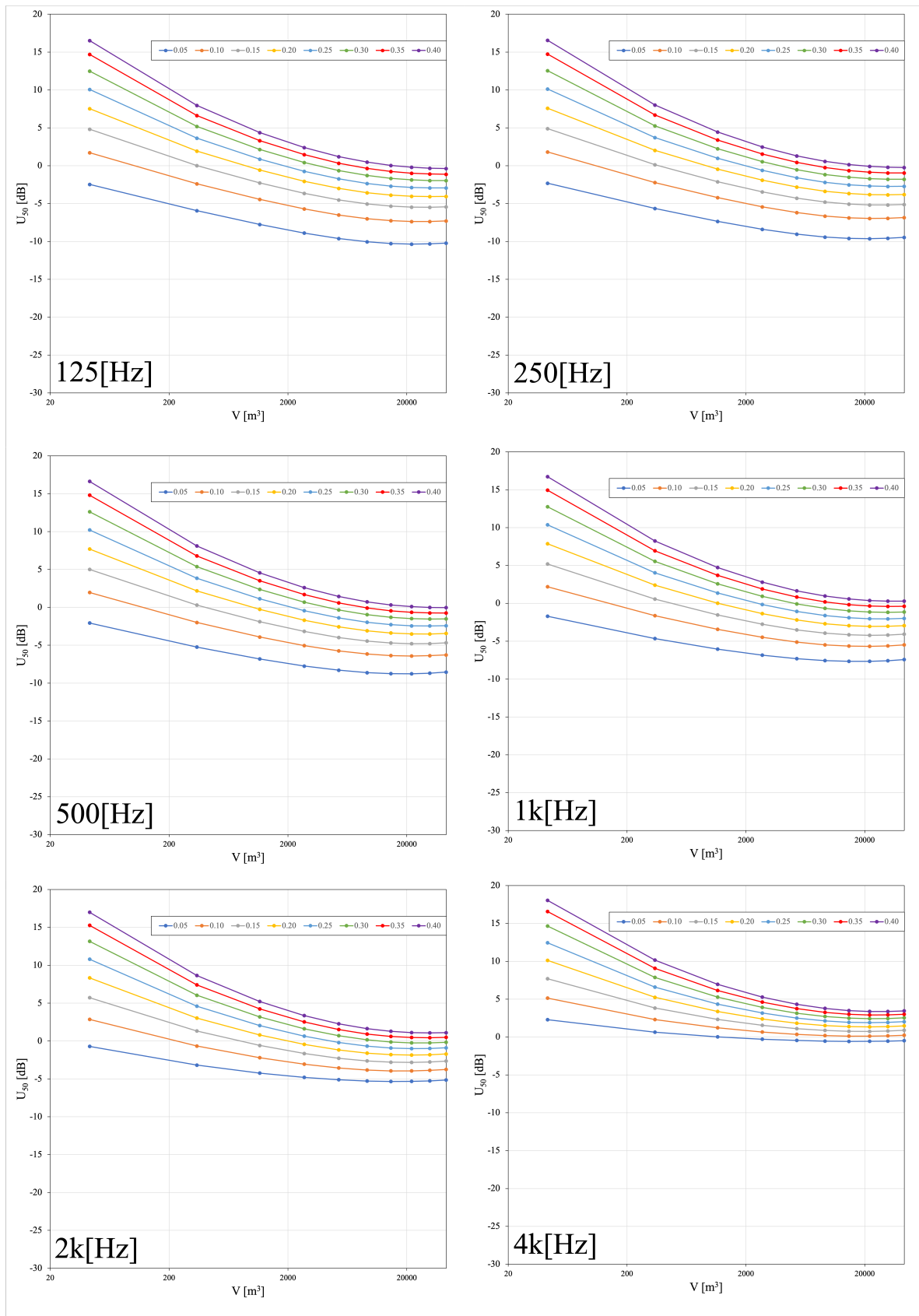
3. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m



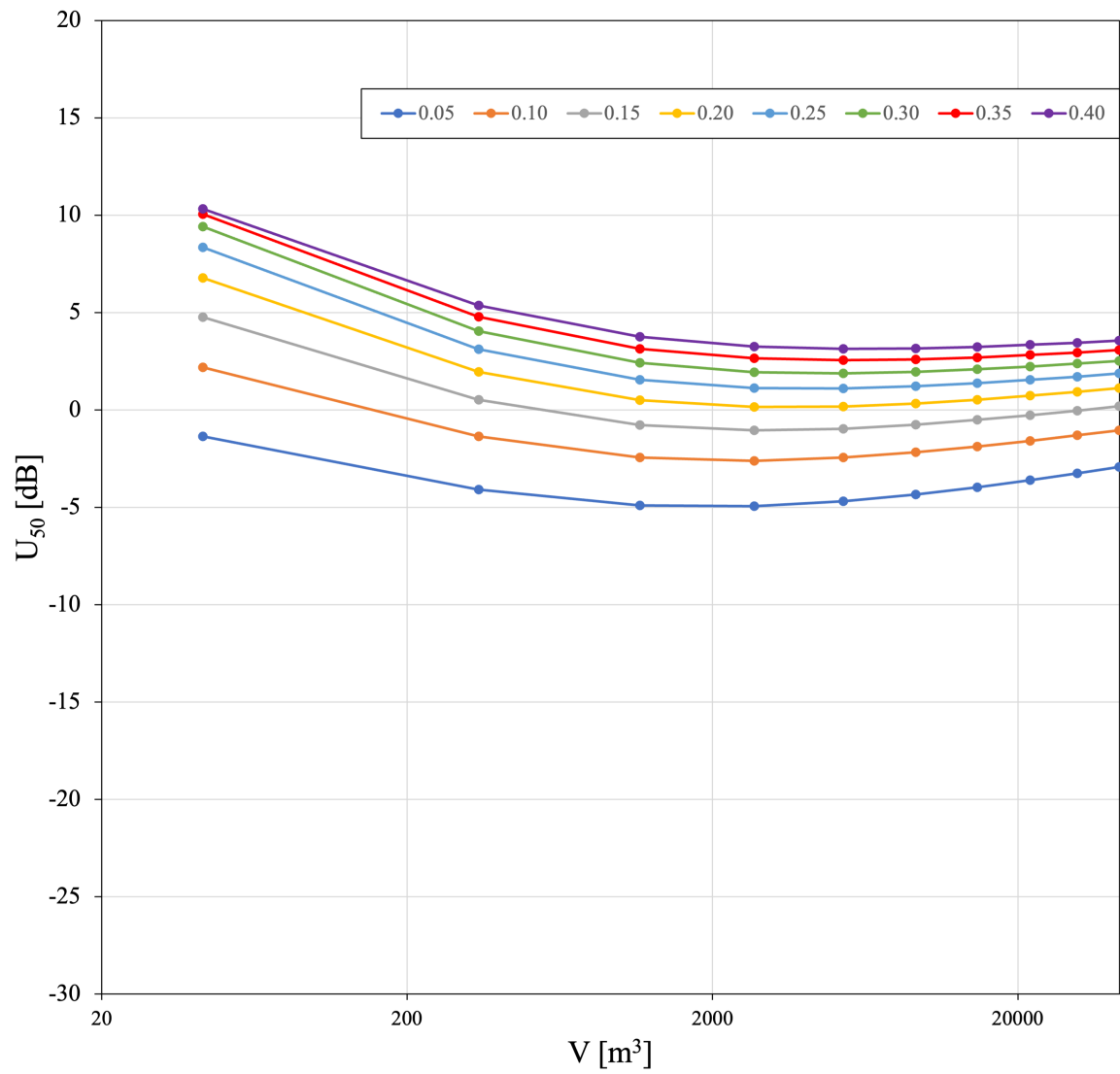
4. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m(各周波数)



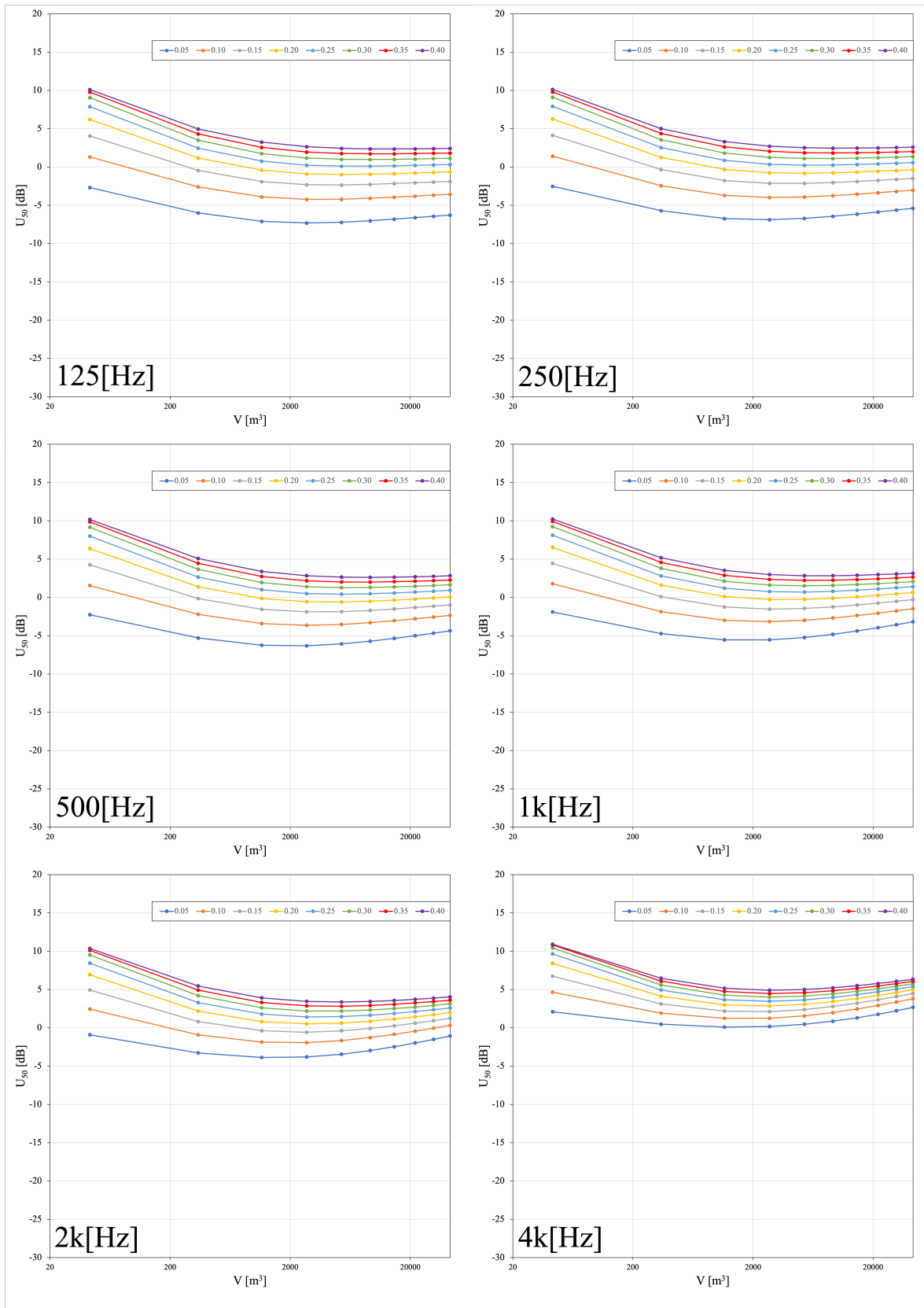
5. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m



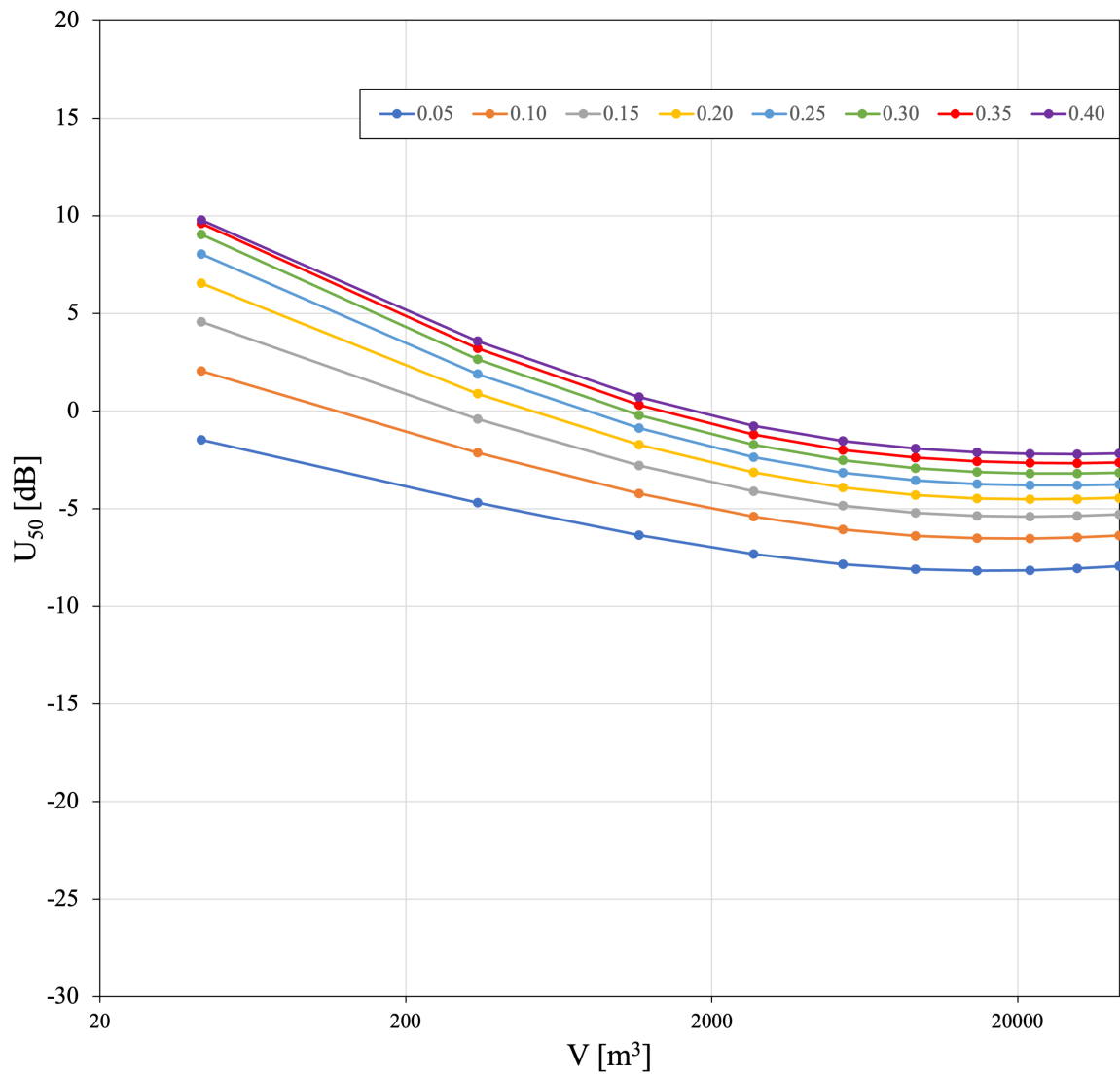
6. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m(各周波数)

■  $U_{50}$  の理論的検討 50 dB

1. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m

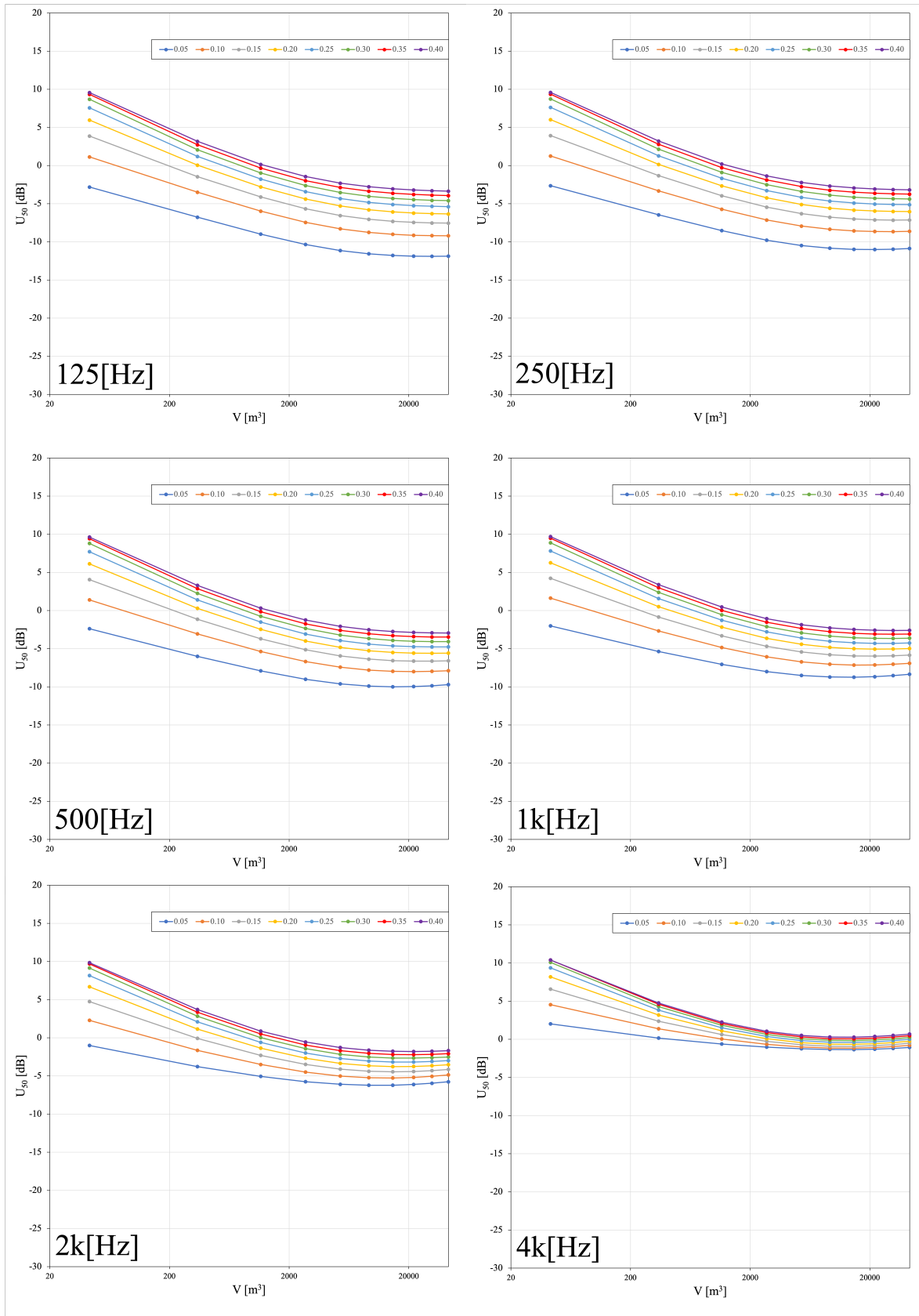


2. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m(各周波数)

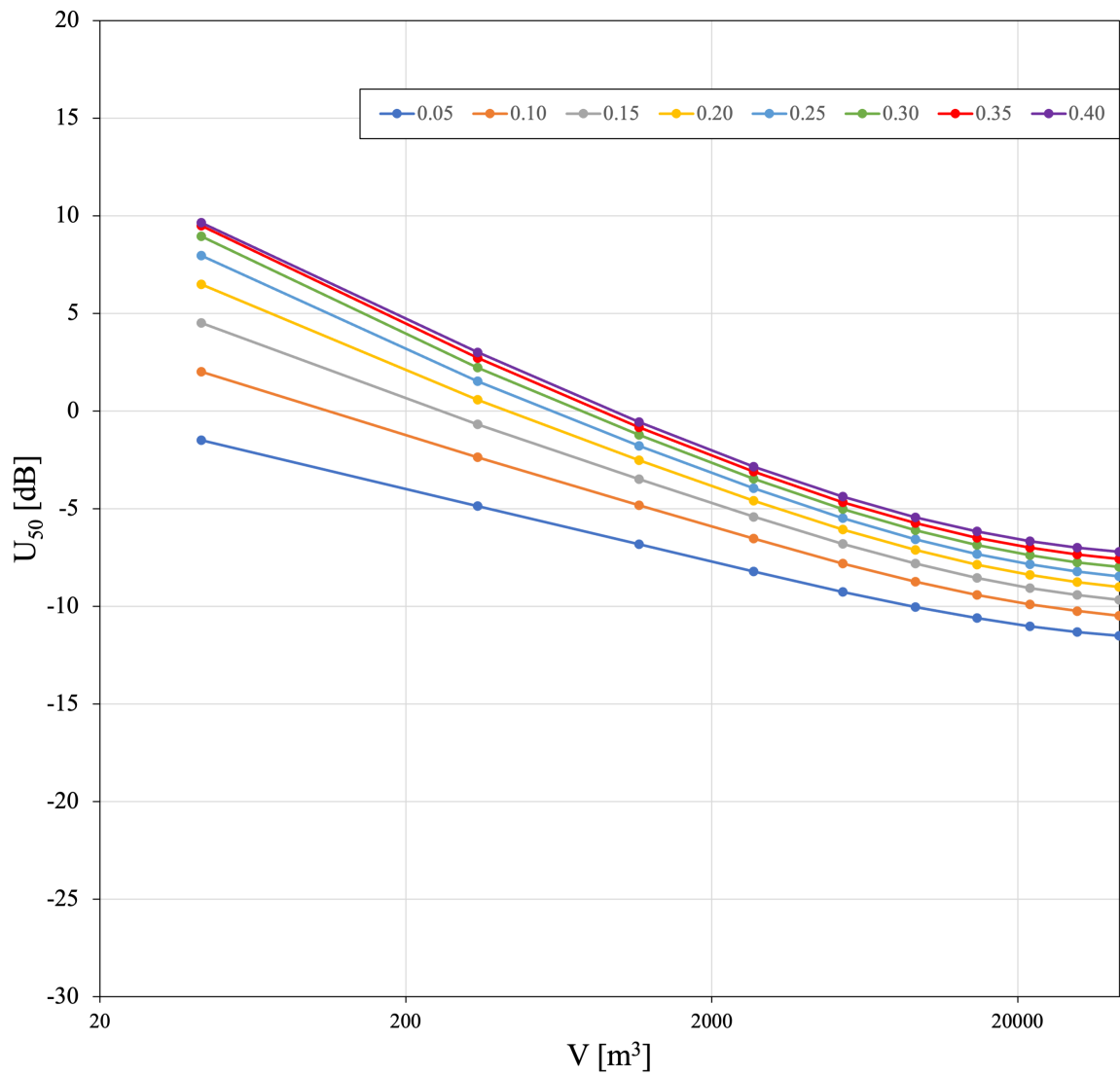


3. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m

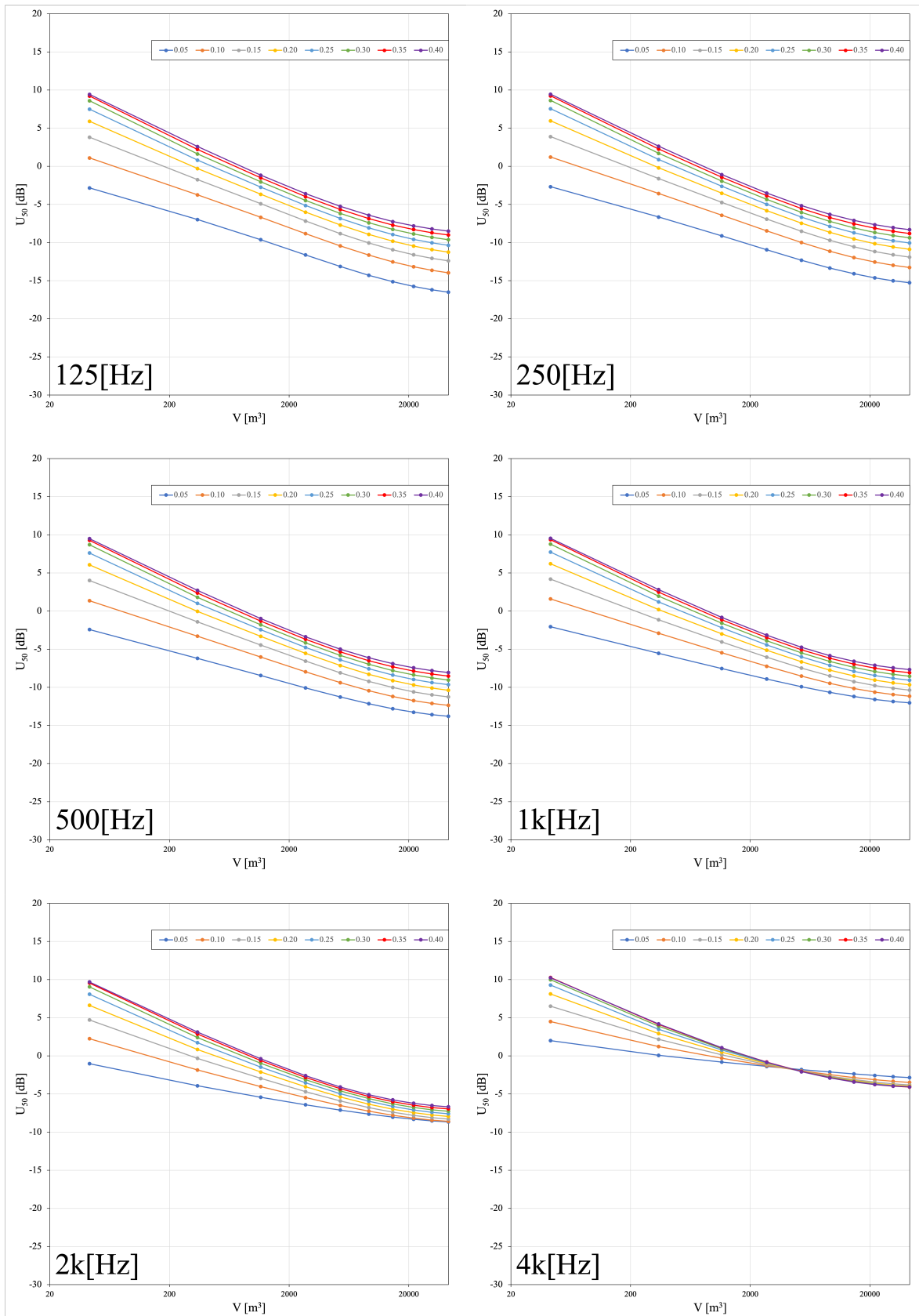




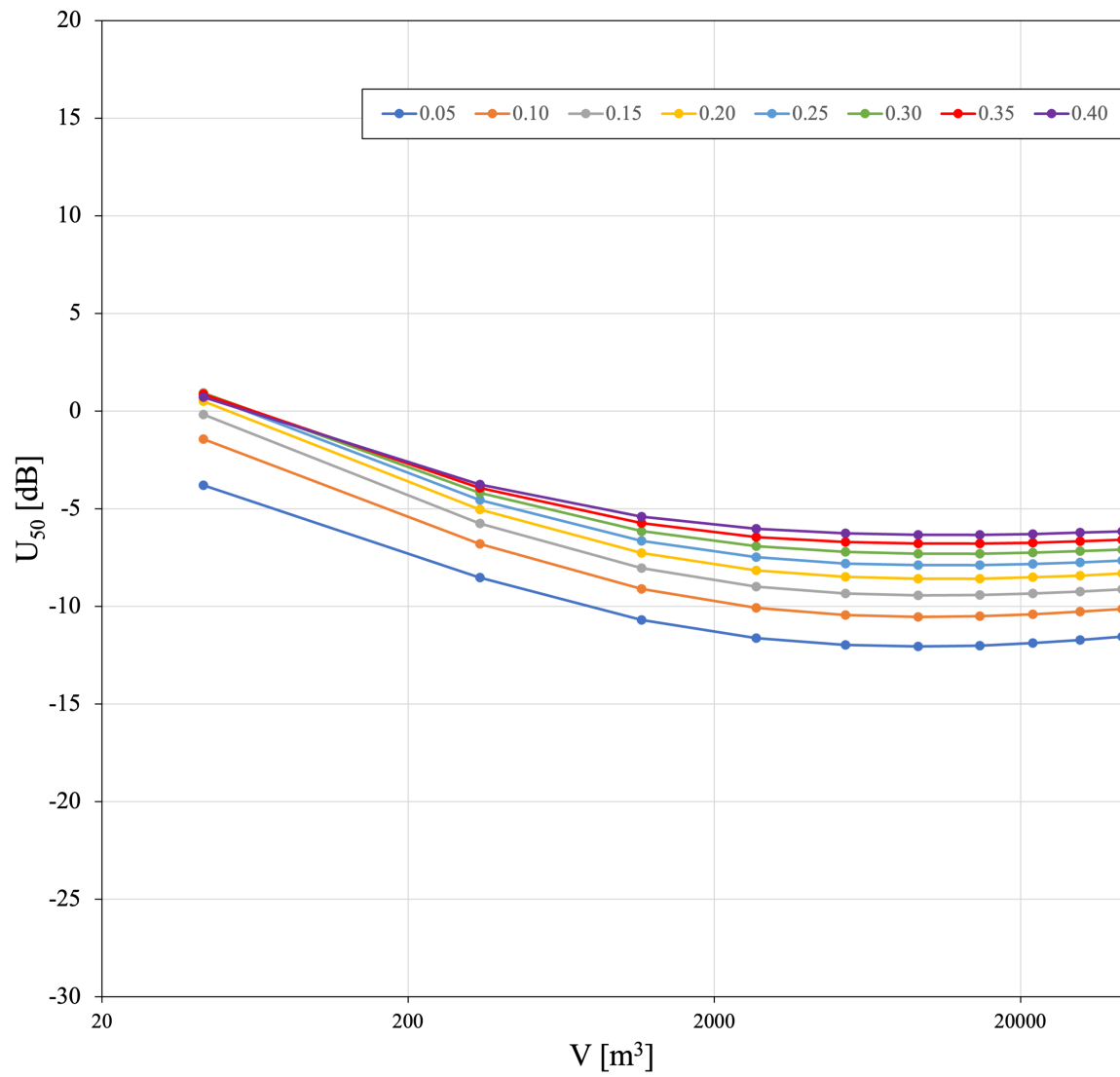
4. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5 \text{ m}$  (各周波数)



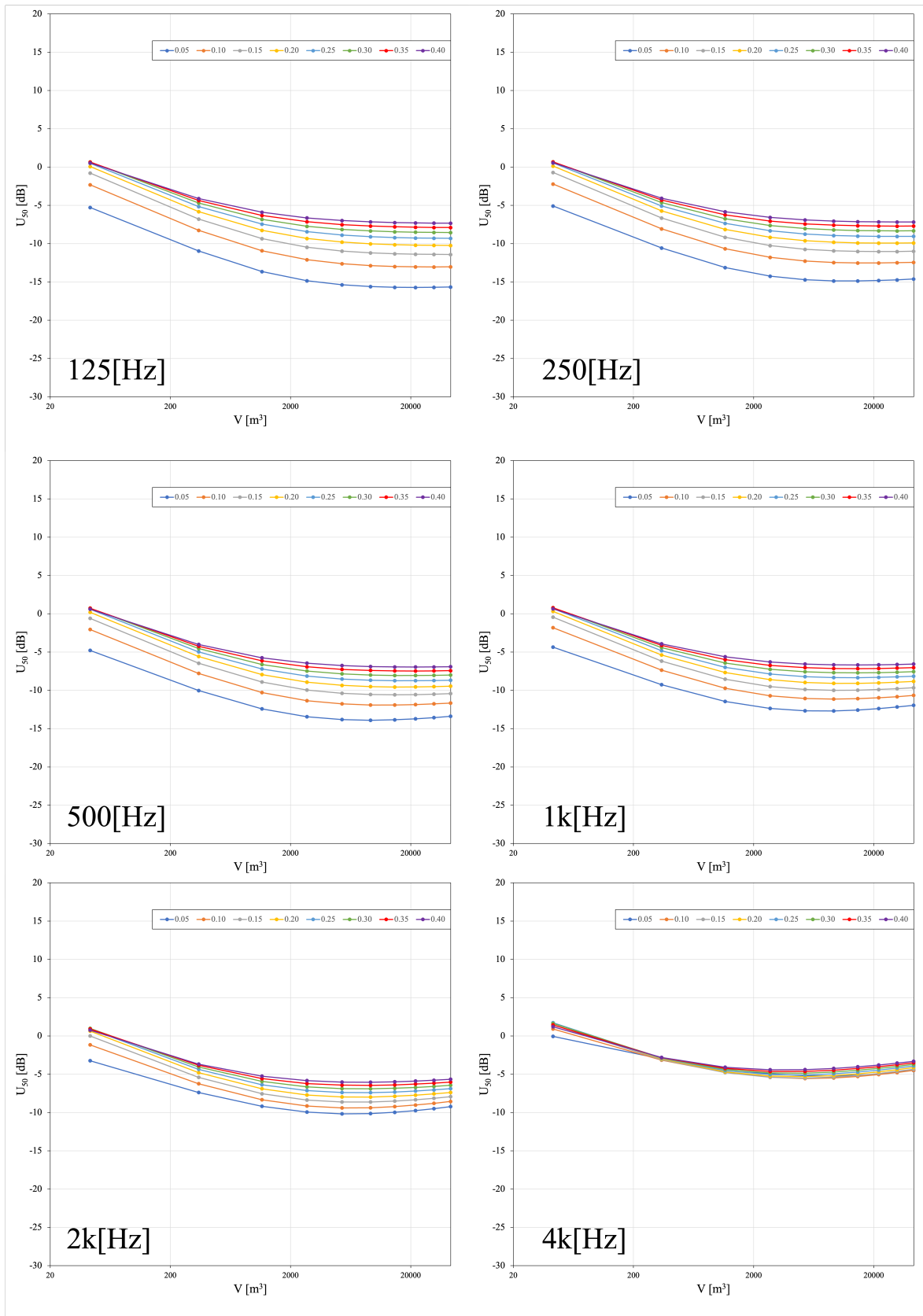
5. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m



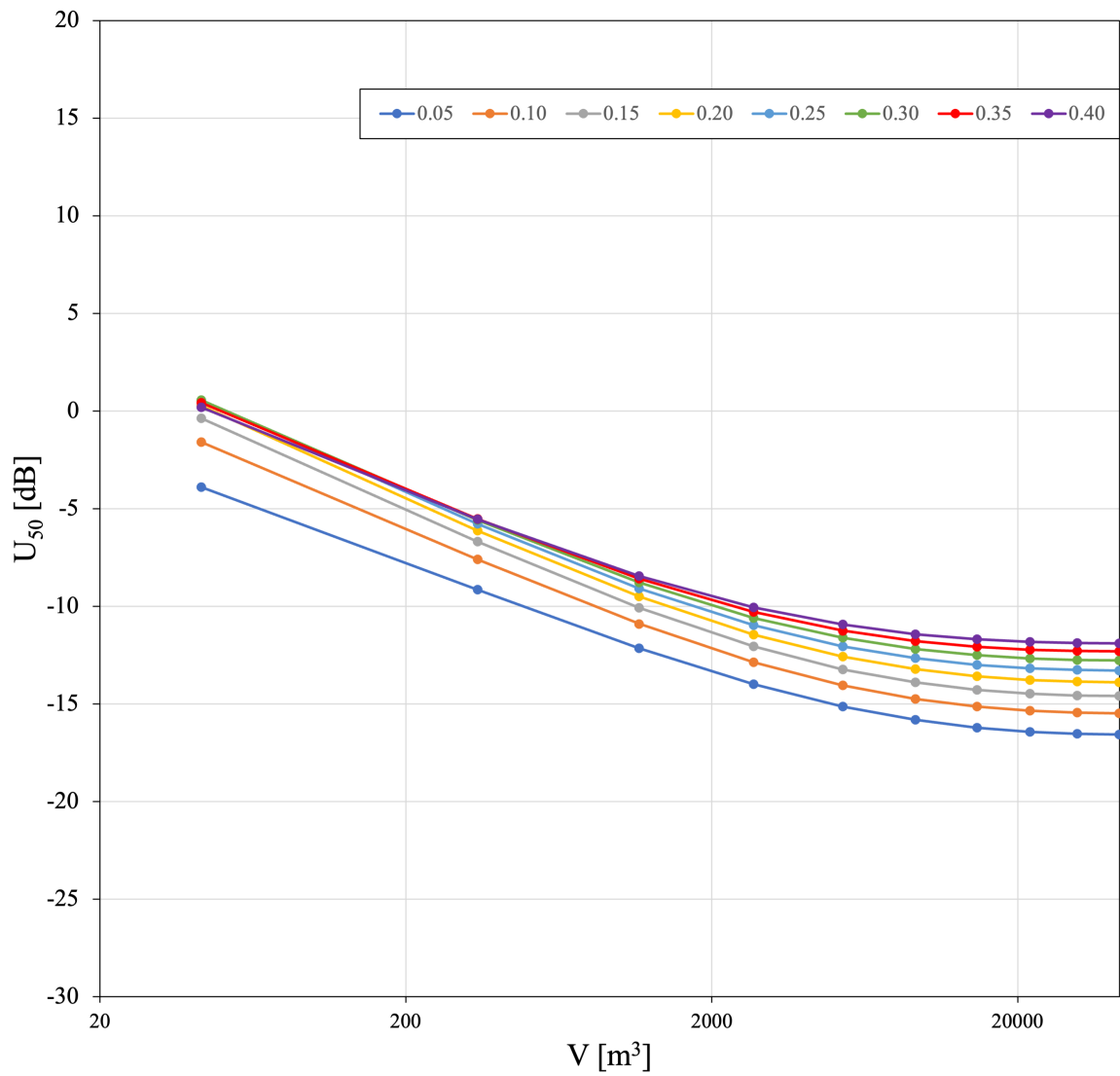
6. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m(各周波数)

■  $U_{50}$  の理論的検討 60 dB

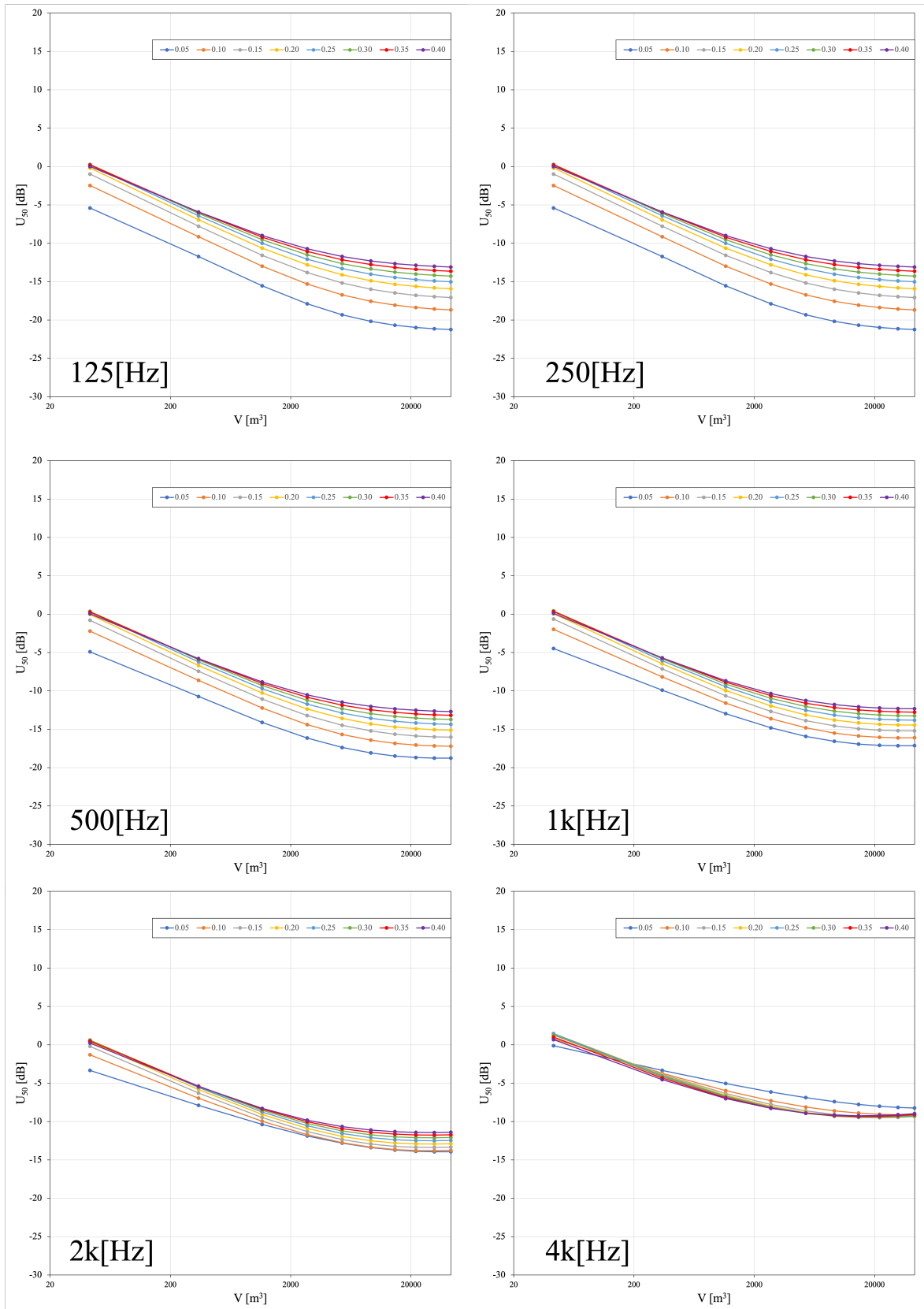
1. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m



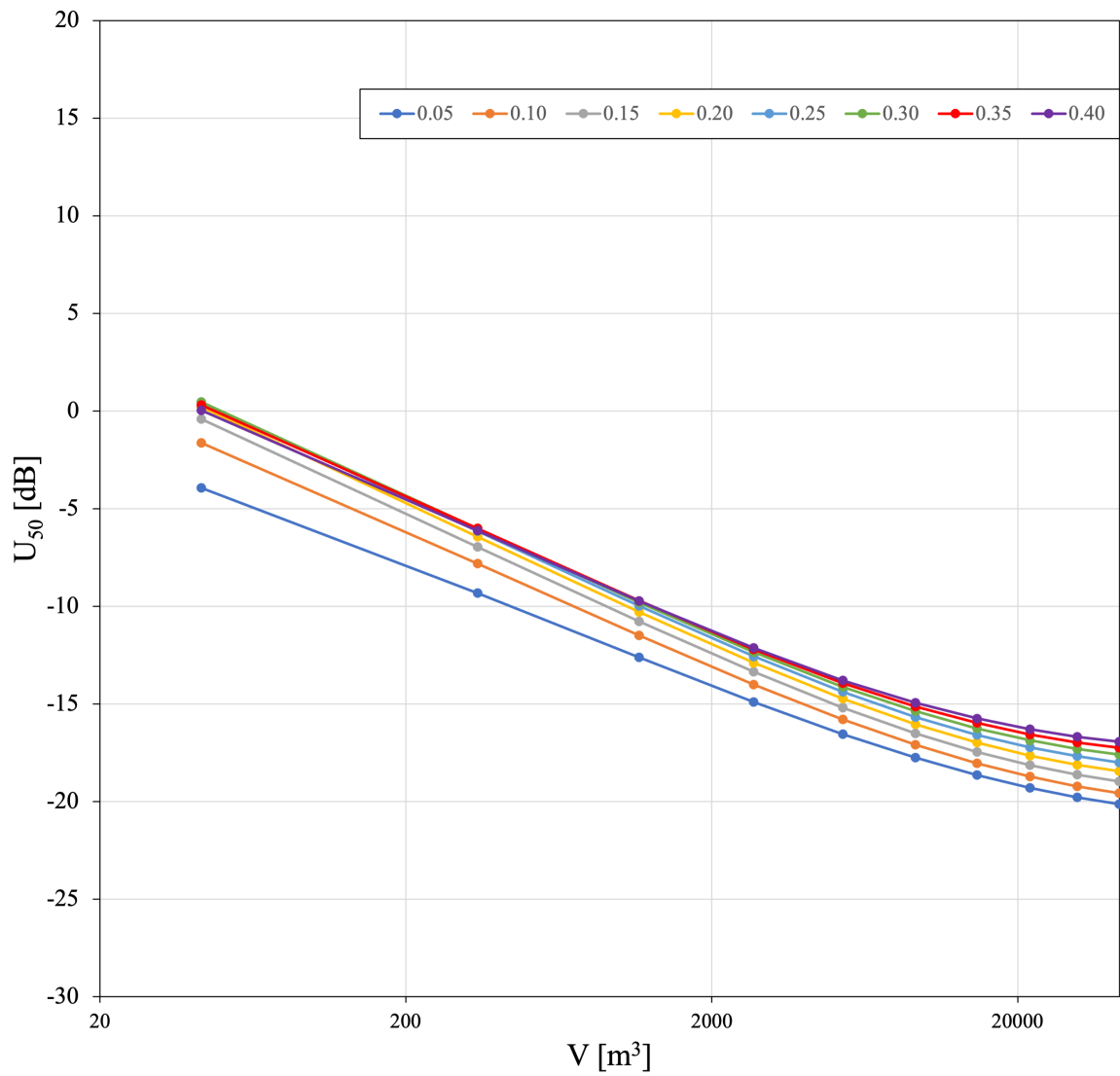
2. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m(各周波数)



3. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m

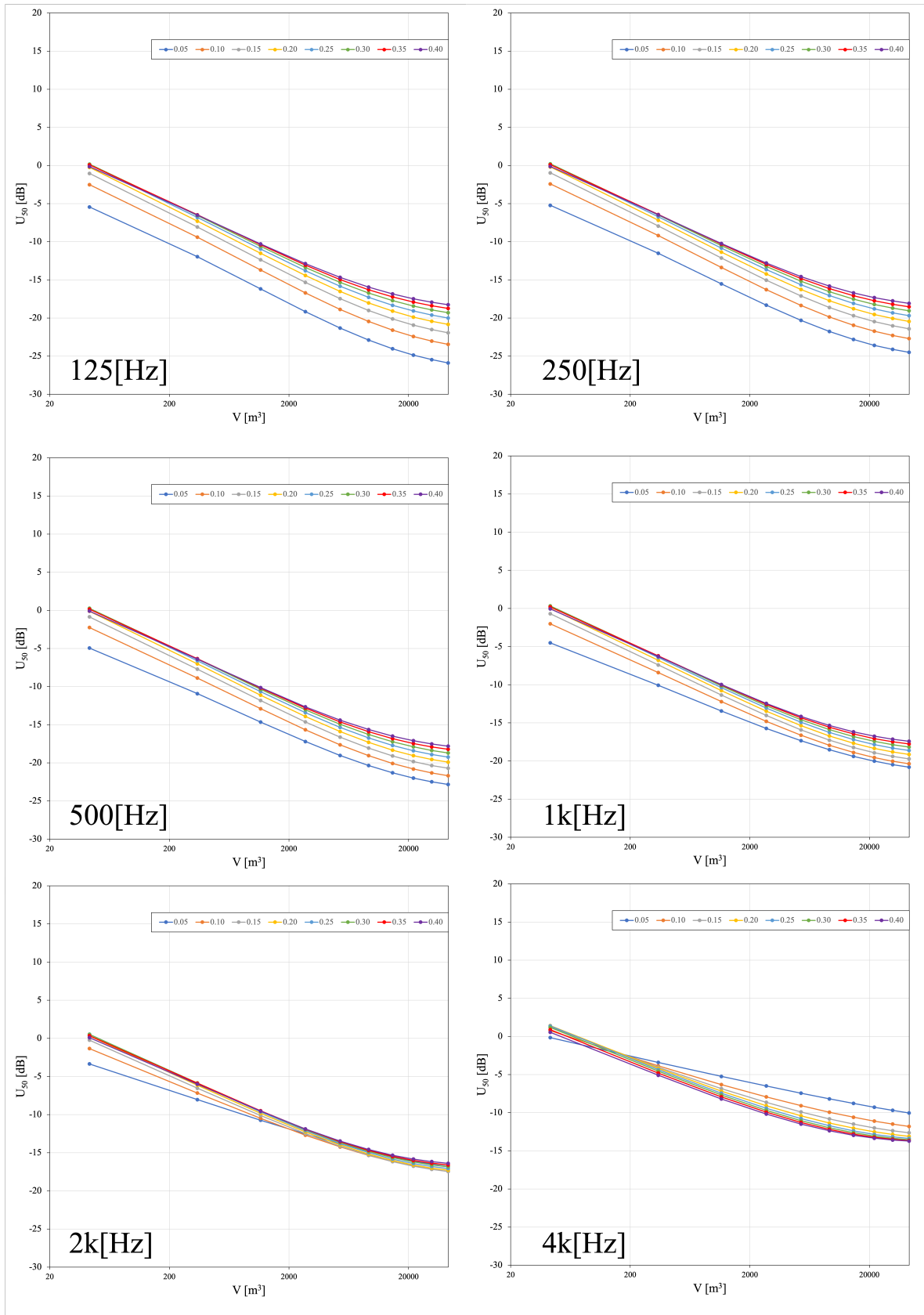


4. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m(各周波数)

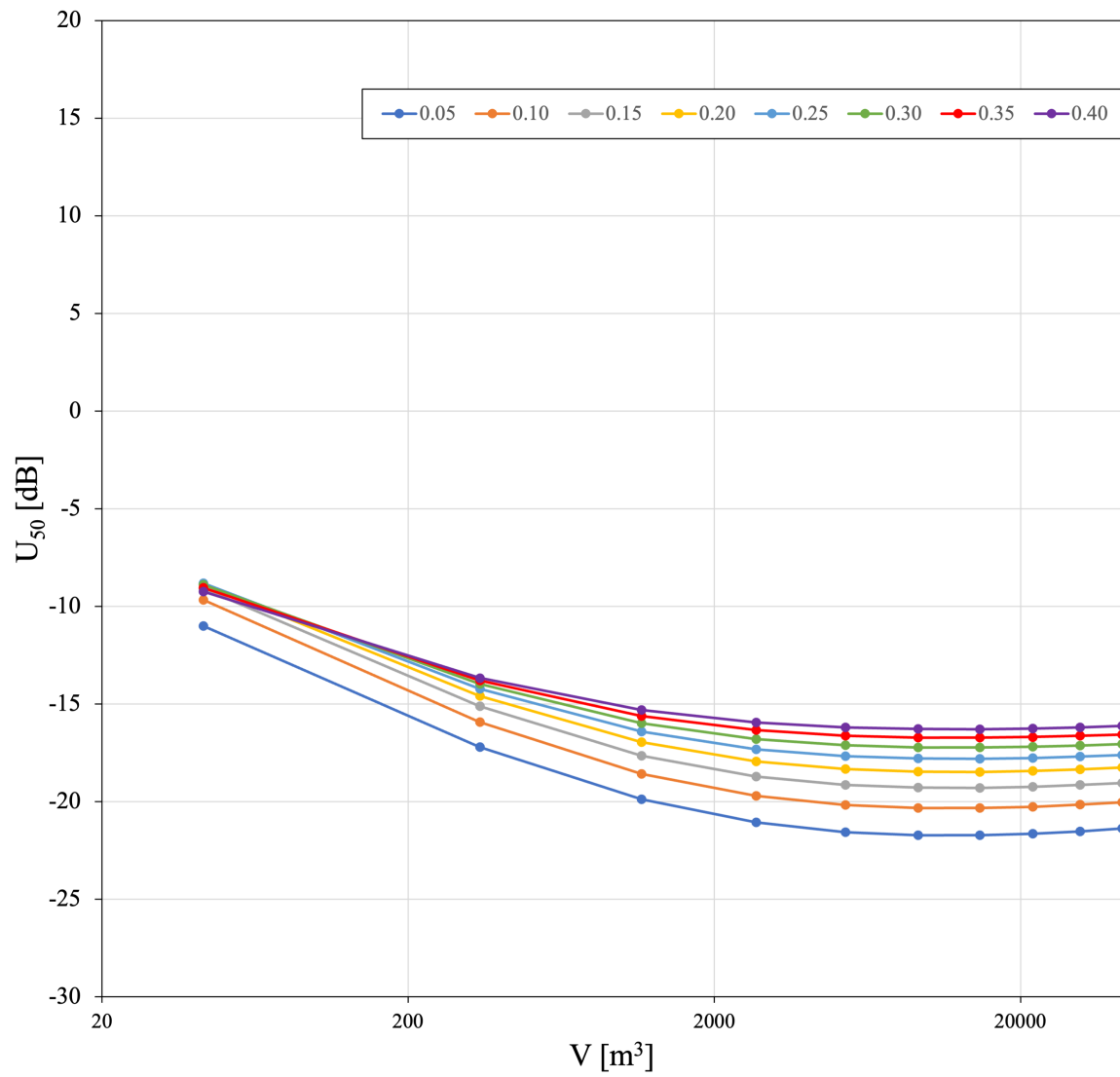


5. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m

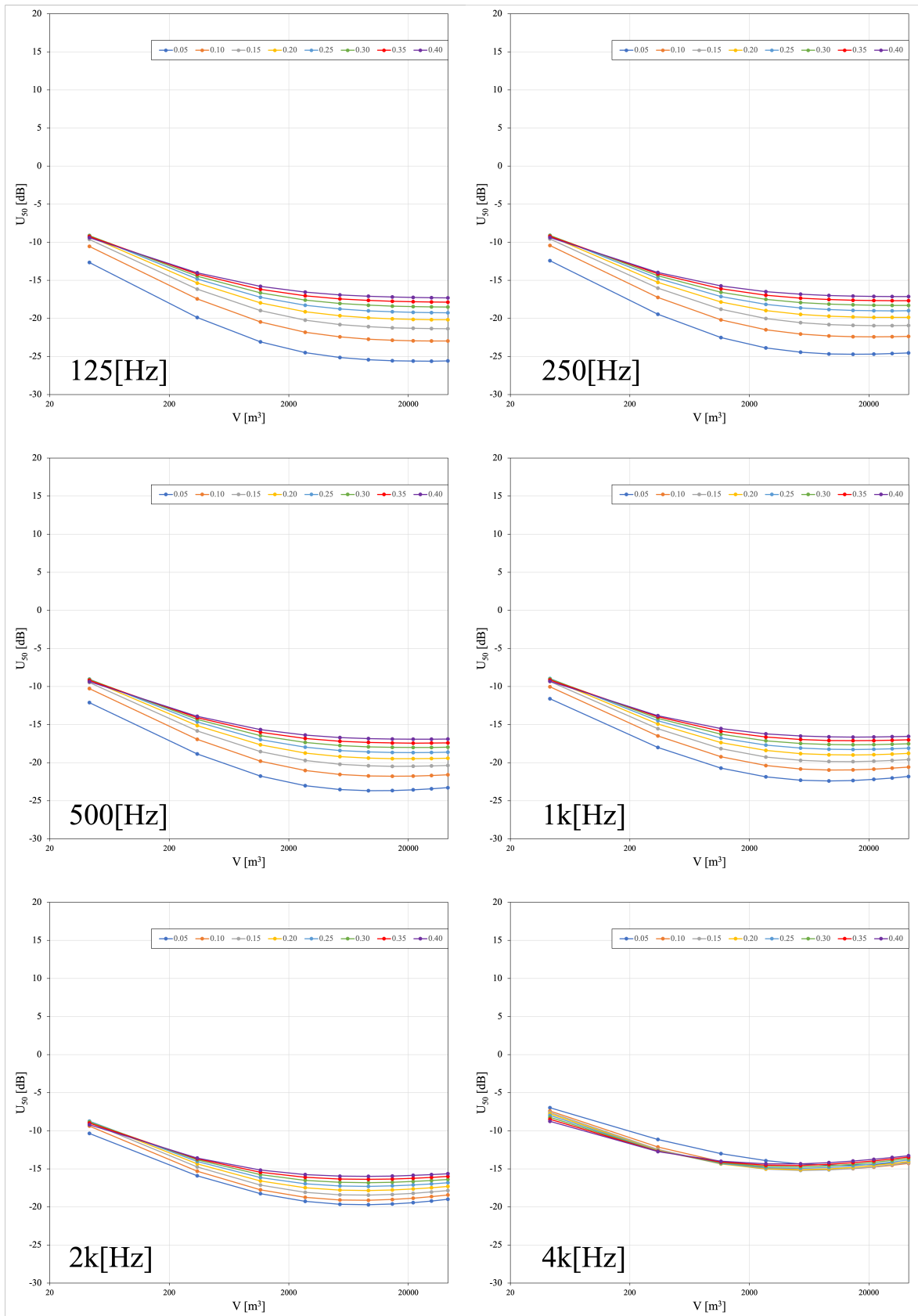




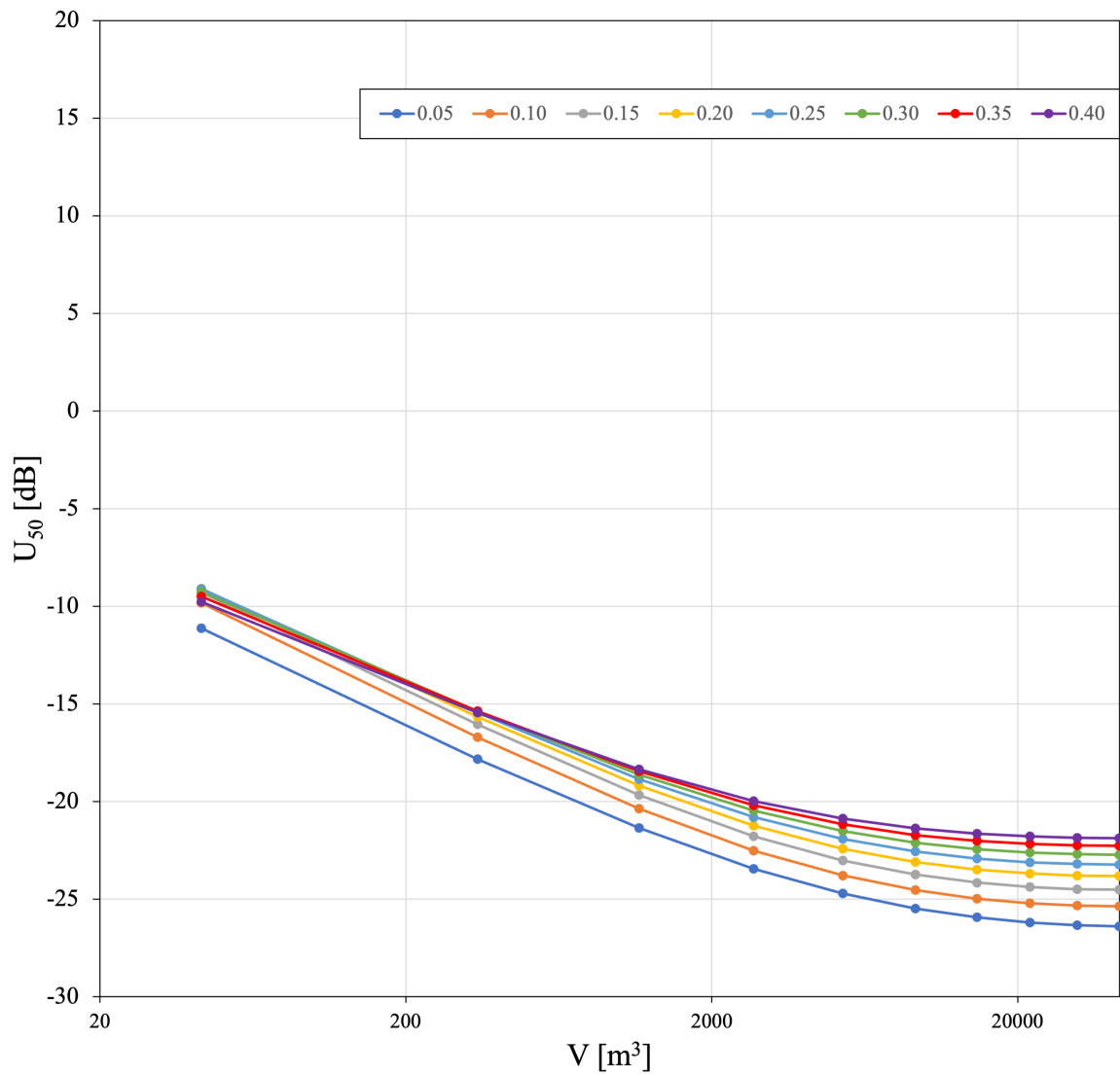
6. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m(各周波数)

■  $U_{50}$  の理論的検討 70 dB

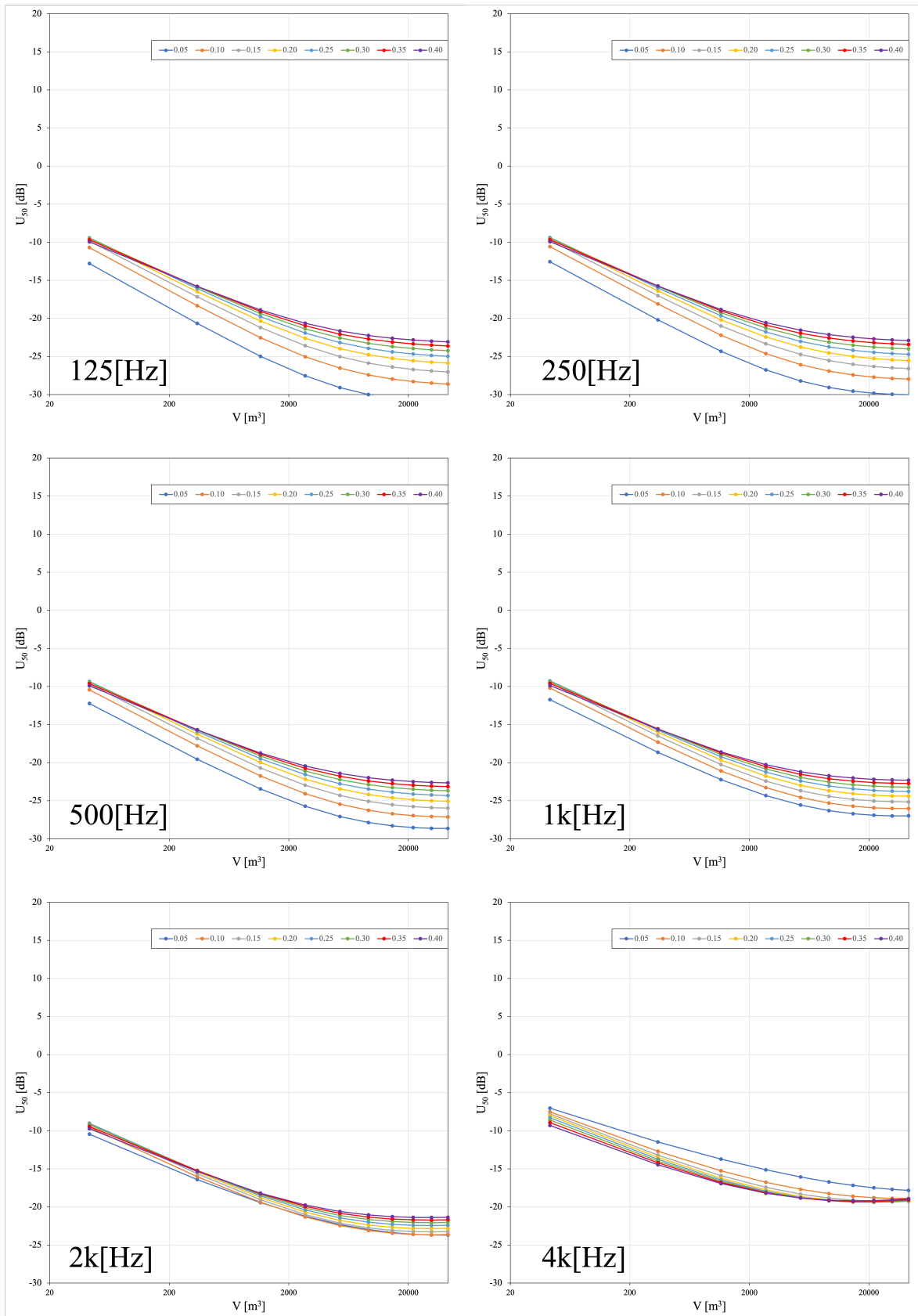
1. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5$  m



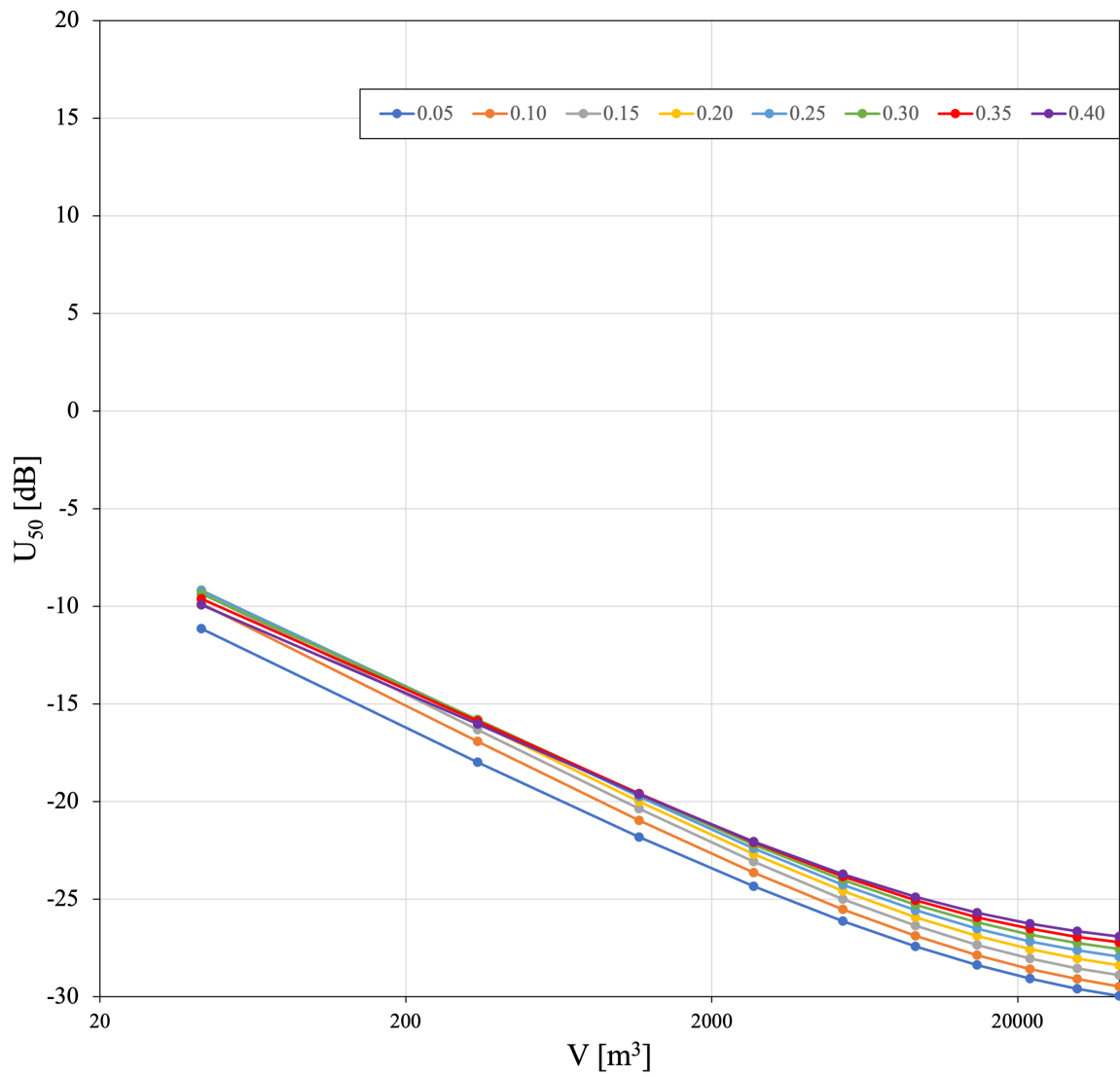
2. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 2.5 \text{ m}$ (各周波数)



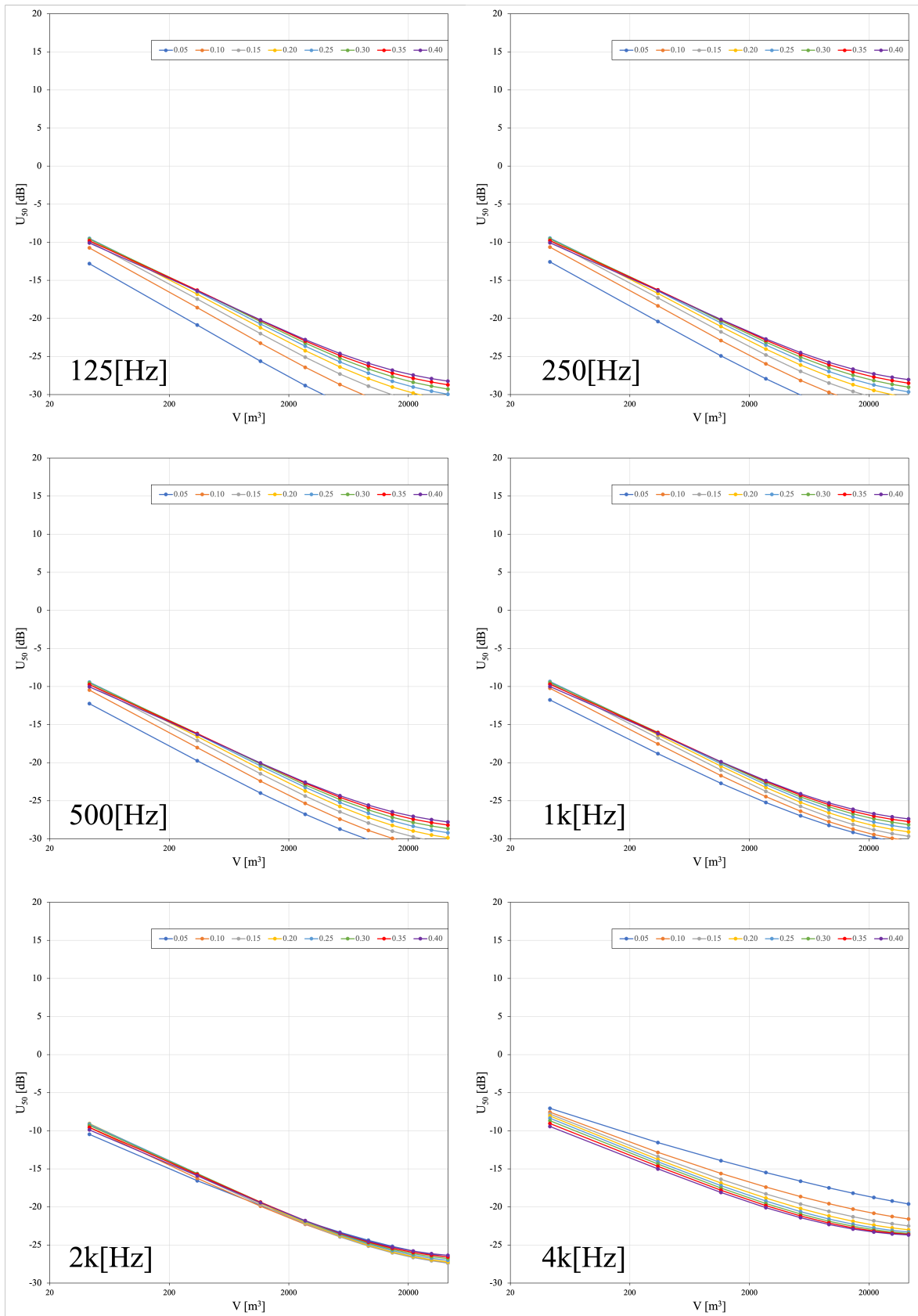
3. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m



4. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 5$  m(各周波数)



5. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m



6. 平均吸音率の変化による  $U_{50}$  の推移  $r = 10$  m(各周波数)

■暗騒音相対レベル

条件No.	S床	S	V	a	周波数					
					m					
					0.0005	0.0013	0.0025	0.0044	0.0101	0.032
fスペクトル					0	-5	-10	-15	-20	-25
1	200	700	1000	0.1	4.44	-0.75	-6.02	-11.41	-17.42	-24.96
2	200	700	1000	0.2	1.49	-3.61	-8.75	-13.97	-19.55	-26.27
3	200	700	1000	0.3	-0.25	-5.32	-10.41	-15.56	-20.98	-27.28
4	200	700	1000	0.4	-1.49	-6.54	-11.61	-16.73	-22.05	-28.10
5	578	2023	4913	0.1	4.35	-0.96	-6.38	-11.99	-18.41	-26.58
6	578	2023	4913	0.2	1.44	-3.72	-8.95	-14.29	-20.18	-27.52
7	578	2023	4913	0.3	-0.28	-5.39	-10.55	-15.79	-21.44	-28.30
8	578	2023	4913	0.4	-1.51	-6.60	-11.72	-16.90	-22.41	-28.96
9	1682	5887	24389	0.1	4.21	-1.29	-6.95	-12.82	-19.71	-28.44
10	1682	5887	24389	0.2	1.37	-3.90	-9.27	-14.80	-21.09	-29.08
11	1682	5887	24389	0.3	-0.33	-5.51	-10.77	-16.16	-22.14	-29.63
12	1682	5887	24389	0.4	-1.55	-6.69	-11.89	-17.19	-22.98	-30.13

1. 室の吸音条件と空気吸収を加味した暗騒音の相対レベル