

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

2018 年度
修 士 論 文

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 spaces.

2019 年 1 月 21 日提出

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

坂本 栞

SAKAMOTO, Shiori

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 居住空間における吸音設計.....	1
1.1.2 吸音設計の推奨値.....	2
1.1.3 海外における音環境に関する基準・規格.....	3
1.2 研究目的	4
1.3 論文の構成	5
第2章 吸音設計目標値の性質に関する基礎的検討	7
2.1 はじめに	7
2.1.1 検討内容と想定条件.....	7
2.1.2 検討する吸音設計目標値.....	8
2.2 ドイツ工業規格の室内音響指標	12
2.2.1 ドイツ工業規格.....	12
2.2.2 DIN 18041	12
2.3 室用途を想定した各目標値の比較	18
2.3.1 学校教室想定.....	18
2.3.2 待合室想定.....	19
第3章 音声明瞭度指標による比較	21
3.1 はじめに	21
3.1.1 物理的評価指標.....	21
3.1.2 STI の概要.....	23
3.1.3 STI の予測方法.....	27
3.2 学校教室を想定した音声伝送性能の比較	29
3.2.1 想定条件.....	29
3.2.2 C50による比較	29
3.2.3 STI による比較.....	31
3.3 待合室を想定した音声伝送性能の比較	40
3.3.1 想定条件.....	40
3.3.2 C50による比較	41
3.3.3 STI による比較.....	42

第4章 理論的検討の妥当性の検証	56
4.1 はじめに	56
4.1.1 実験目的.....	56
4.1.2 実験内容.....	57
4.2 実験方法	58
4.2.1 実験条件.....	58
4.2.2 使用音源.....	61
4.2.3 再生方法.....	63
4.2.4 評価方法.....	67
4.3 実験結果	69
4.3.1 実験結果と考察.....	69
4.3.2 物理量と心理量の対応.....	76
第5章 総括	84
5.1 本論文のまとめ	84
5.2 今後の課題	86
図目次.....	88
表目次.....	90
参考文献.....	92
謝辞.....	95
発表論文一覧.....	97

第1章

序章

1.1 研究背景

1.1.1 居住空間における吸音設計

建築音響設計というと、多くの人は音楽用途のコンサートホールに関する設計を思い浮かべるだろう。しかし、不特定多数の人々が滞在する居住空間においては、音声を媒体としたコミュニケーションや情報提供がなされ、音楽用途以外の空間でも音響設計は考慮されるべきである。したがって、居住空間において音声伝達は音響性能として基本的かつ重要である。

音響設計は、道路交通騒音や隣室の騒音等室外からの騒音を遮る遮音と、室内の人の話し声や空調騒音等室内で発生した音を抑制する吸音に分けられる。音声の明瞭度を確保するためには、室外の騒音が遮音により十分低減され、吸音により室内で発生した音が反射して響くのを抑制することが重要である。

居住空間の吸音設計には、音声が響いて聴き取りにくくなるのを抑制する残響抑制と、室内で発生した騒音を小さくする騒音低減の役割があり、快適な音環境の確保のために、わが国では2008年にAIJESで学校施設の音環境保全規準・設計指針が示された^[1]。これは学校の普通教室や音楽練習室等の室用途別に、残響時間や平均吸音率等の吸音設計における推奨値を示している。しかし、学校以外のオフィスや保育所、公共空間等では室寸法や騒音源が多様であり、そのような推奨値が示されていない。

上記のような空間を対象とした推奨値が既に示されている国もあるが、わが国では指針が整っておらず吸音不足の空間が多数存在しているのが現状である。例えば、保育所では吸音不足により子どもの活動音が増幅され、保育士が大きな声で呼びかけをすることにより音声障害を引き起こす等、身体的な問題が発生している^[2]。このような音環境障害を無くすため、居住空間の吸音設計の推奨値の設定が急務となっている。

1.1.2 吸音設計の推奨値

吸音設計を行う際に、参照されている評価値として示されているものを以下に示す^[1]。

- 残響時間 T
室内の残響の程度を表す量で、音源が停止してから音圧レベルが 60dB 減衰するのに要する時間。単位は秒[s]。
- 吸音率 α
建築材料の吸音性能を表す量で、入射音響パワーに対する材料内部で吸収されるパワーと背後に透過するパワーの和の比。同じ材料でも、厚さや背後の空気層厚さ等の設置条件、音の周波数によって変化する。
- 室内等価吸音面積 A
室内表面の各部位の表面積とその部分の吸音率との積の総和で、吸音力ともいう。単位は平方メートル[m²]
- 平均吸音率 $\bar{\alpha}$
室全体の吸音の程度を表す量で、室内等価吸音面積を室内全表面積で除した値。

前述の学校教室に関する推奨値としては、残響時間や平均吸音率が示されている。普通教室等の中庸な響きが適する室に比べ、ブラスバンドの練習室や難聴学級教室等の短めの響きが適する室は、短い残響時間且つ大きい平均吸音率で、また、合唱の練習室等長めの響きが適する室は、長い残響時間且つ小さい平均吸音率に設定されている。

1.1.3 海外における音環境に関する基準・規格

海外には諸室の音環境に関する基準・規格が存在し、一部の国と地域では法令レベルの指針を示している。本項では参考としてその一部を引用して紹介する^[3]。

- WHO : Guidelines for Community Noise ^[4]

会話聴取障害や聴力障害、睡眠妨害等の騒音の特異的健康影響を考慮して、それぞれのケースに対し騒音レベルの許容値を具体的に示している。また、住居や学校、幼稚園、病院等の特定の環境、室用途に対しても騒音レベルの許容値、指針値を具体的に示している。
- イギリス教育省 : Building Bulletin 93(BB93)^[5]

イギリス教育省による学校のための建築設計基準で、法令により 2003 年以降の建築はこの基準を満たす必要があるとされている。
- デンマーク経済商務省 : Building Regulations^[6]

デンマークにおける建築に関する規制事項を示し、法的拘束力を持ってそれらの方針を守るよう規定している。音に関しては、最低限の遮音性能基準を満たすような設計計画等を規定している。
- 米国国家規格協会 : ANSI/ASA S12.60-2010^[7]

アメリカにおける国家音響性能基準、設計要求事項や学校の設計に関するガイドラインを規定している。学校教室やその他学習空間における残響を抑制するための指針を示している。
- 南オーストラリア教育省 : DECD^[8], Early childhood facilities (birth to age 8) design standards and guidelines^[9]

DECD は南オーストラリアにおける保育・教育施設の設計指針を示し、0~8 歳の低年齢の子供に関する幼児施設の設計基準とガイドラインを[9]で規定している。新築の幼児施設の計画と設計、及び既存施設の再開発について説明している。
- ドイツ工業規格 : DIN 18041^[10]

この規格は 1968 年に初めて公表され、2004 年に 1 度目の改訂、2016 年に 2 度目の改訂がされた。この背景には、ドイツのあらゆる分野の人々が障害、民族、文化等にとらわれず平等であるべきという社会的な作用が関係している。また、建築の設計計画のガイドとして十分通用するような内容であり、規格内に残響抑制と騒音低減の 2 つを考慮した推奨値を示している為、本研究ではこの規格を参考にして検討を行った。内容については第 2 章で詳しく説明する。

このように海外では、学校教室等を含み、保育所や病院も対象とした基準を規定している。また、一部地域では、基準について法的拘束力を持って規定し、取り締まることで、良好な音環境を確保している。一方、我が国では、前述の様に学校教室に関する推奨値を示しているが、それを遵守する義務はなく、既存の施設には反映されていないこともある。その影響で、推奨値が示されている学校用途空間においても、音環境障害の事例は少なくない。

1.2 研究目的

前述したように居住空間の吸音不足により，快適な音環境が確保されておらず，様々な問題が発生している。そのため，吸音設計の目標値，推奨値を示し，快適な音環境を実現する指針を明確にする必要がある。

そこで本研究では，吸音設計の目標値の設定に関して知見を得ることを目的とし，残響抑制と騒音低減の両面から，吸音設計目標値の設定方法について検討を行う。吸音設計目標値の設定方法に関して理論的に検討を行い，考察結果の妥当性を被験者実験により検討する。研究の位置付けとしては，将来的に室用途に応じた吸音設計の目標値の設定をするための第一段階だと考える。吸音設計目標値を設定することで，図 1.1 に示すように，吸音不足による残響過多，騒音増大の空間を排除し，快適な音環境の確保につながる。

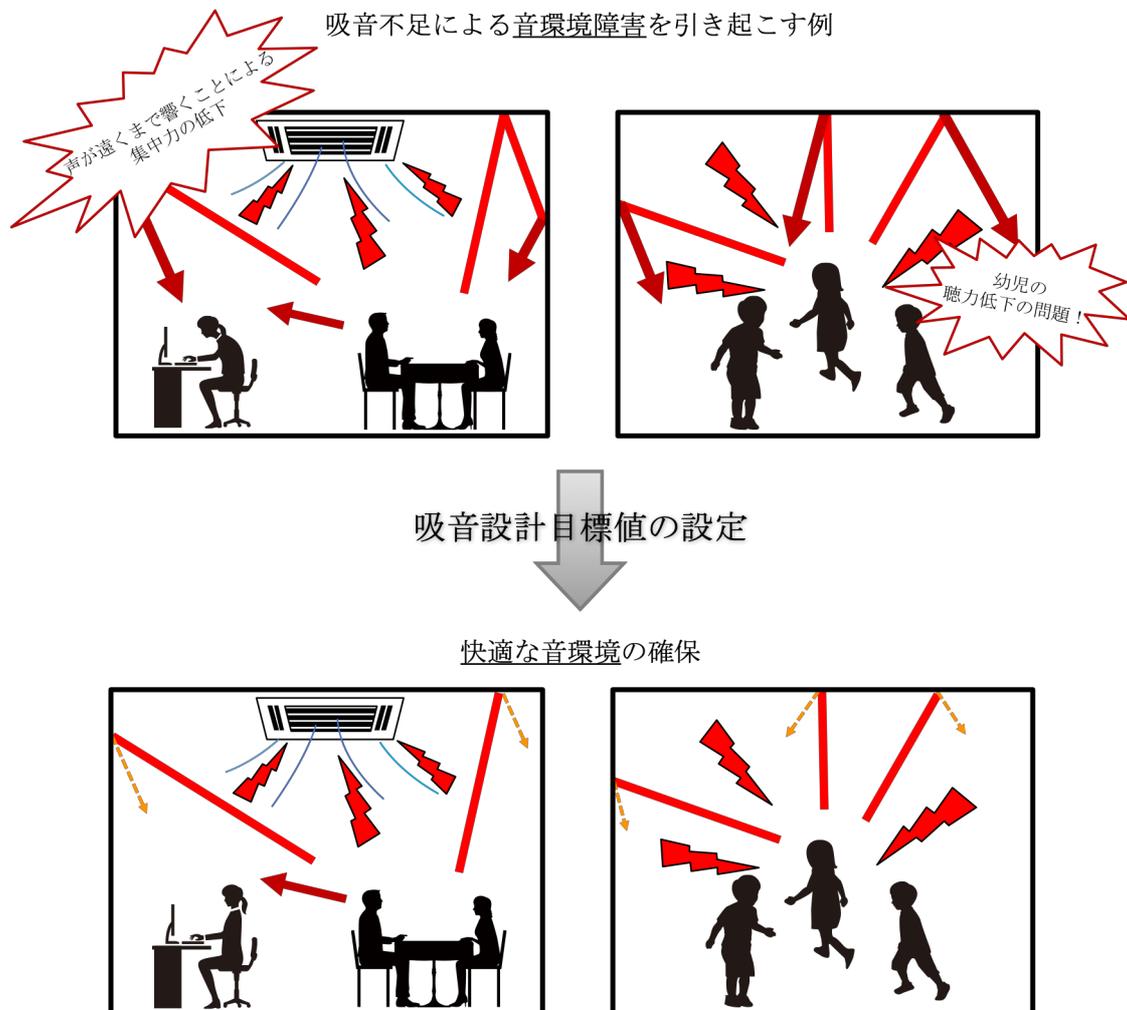


図 1.1 吸音設計目標値を設定するメリット

1.3 論文の構成

第1章では、居住空間における吸音設計の役割について、代表的な設計目標値とともに説明し、吸音設計指針の現状を述べ、これらを研究背景とし、本研究の目的をまとめた。

第2章では、本研究の前提条件について説明し、各吸音設計目標値を設定した場合の、室寸法の変化に対する音環境の変化について理論的に検討する。

第3章では、音声明瞭度指標に基づき、第2章で設定した各吸音設計目標値について、室用途を想定し、室寸法や騒音等の物理条件を変化させて比較を行う。

第4章では、第2章と第3章の理論的検討の妥当性について、無響室で想定音場を再現して聴感印象評価を行い、評価結果を通して検討する。

第5章では本研究を総括し、今後の課題について述べる。

第2章

吸音設計目標値の性質に関する基礎的検討

2.1 はじめに

2.1.1 検討内容と想定条件

吸音設計の目標値をいくつか設定し、残響抑制と騒音低減の効果が、室寸法や騒音源の変化によってどのように変化するか検討する。

矩形室の拡散音場を仮定し、室寸法の変化に対する残響抑制の評価量として残響時間と、騒音低減の評価量として暗騒音レベルの変化を理論的に検討する。また、騒音源は居住空間を想定するため、図 2.1 に示すような床面積に比例して増大する空調騒音や人の活動音とし、床面積あたりのパワーレベル L_{ws} として設定する。

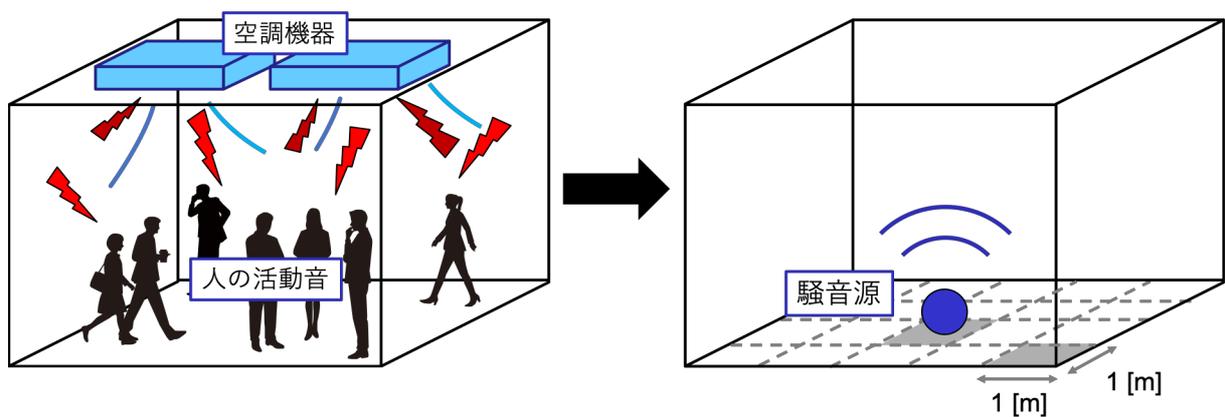


図 2.1 床面積あたりの騒音源

残響抑制の評価量

残響抑制の評価量である残響時間 T は、Sabineの式^[11]に基づくものとする以下で表される。

$$T = 0.161 \cdot S_f \cdot \frac{h}{A} \quad (2.1)$$

h : 天井高[m], S_f : 床面積[m²], A : 吸音面積[m²]

騒音低減の評価量

喧騒感に関わる暗騒音レベル L は、騒音源を床面積あたりパワーレベル L_{ws} とすると以下の式で表される。

$$L = L_w - 10\lg(A) + 6 = L_{ws} - 10\lg\left(\frac{A}{S_f}\right) + 6 \quad (2.2)$$

L_w : 騒音源のパワーレベル, L_{ws} : 床面積あたり騒音源のパワーレベル

ここで、本研究では(2.2)式の床面積あたりパワーレベル L_{ws} に対するレベル差 ΔL に着目し、騒音低減の評価量とする。 ΔL は以下の式で表される。

$$\Delta L = -10\lg\left(\frac{A}{S_f}\right) + 6 \quad (2.3)$$

この ΔL の値は小さいほど減衰量が大きく、騒音低減の効果が大きい。

2.1.2 検討する吸音設計目標値

前項で述べた残響時間とレベル差について、以下の吸音設計目標値を設定して検討する。

- (a) 残響時間一定
残響抑制の効果を持つ一般的な設計目標値
- (b) 床面積あたりの吸音面積一定
床面積に比例して増大する騒音源に対し低減の効果を持ち、室内の騒音レベルを一定に保つ目標値
- (c) 上記2ケースの吸音面積の平均値一定
残響抑制と騒音低減の効果を持つ目標値
- (d) 平均吸音率一定
一般的な設計目標値

上記の目標値を設定した際の、残響時間とレベル差の導出過程を以下に示す。なお、各吸音設計目標値の基準条件として、天井高 $h = h_0$ で $T = T_0$ 、 $\Delta L = \Delta L_0$ とする。

- (a) 目標値を残響時間一定と与えた場合

残響時間

$$T = T_0 \quad (2.4)$$

レベル差

$$\Delta L = -10\lg\left(\frac{A}{S_f}\right) + 6 = -10\lg\left(0.161 \cdot \frac{h}{T_0}\right) + 6 \quad (2.5)$$

T_0 : 基準残響時間[s]

目標値を残響時間一定と与えた場合、残響時間は天井高の影響を受けずに T_0 秒一定で、騒音源に対する減衰は天井高の対数に比例する。

- (b) 目標値を床面積あたりの吸音面積一定と与えた場合

残響時間

$$T = 0.161 \cdot \frac{S_f}{A} \cdot h = T_0 \cdot \frac{h}{h_0} \quad (2.6)$$

レベル差

$$\Delta L = -10\lg\left(\frac{A}{S_f}\right) + 6 \quad (2.7)$$

h_0 : 基準天井高[m]

目標値を床面積あたりの吸音面積一定と与えた場合、残響時間は天井高に比例して長くなり、騒音源に対する減衰は一定となる。

- (c) 上記2ケースの吸音面積の平均値一定と与えた場合

この目標値は残響抑制の(a)と騒音低減の(b)、2ケースの吸音面積の平均値を一定とする。(a)と(b)の残響式から、 $\frac{A}{V}$ を求め、以下に示す。

(a)の式

$$T_0 = 0.161 \cdot \frac{V}{A}, \quad \frac{A}{V} = \frac{0.161}{T_0} \quad (2.8)$$

(b)の式

$$\frac{A}{S_f} = 0.161 \cdot \frac{h_0}{T_0}, \quad \frac{A}{V} = 0.161 \cdot \frac{h_0}{T_0} \cdot \frac{1}{h} \quad (2.9)$$

上記の2式を足し合わせた平均値は以下の式で表される。

$$\frac{A}{V} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{0.161}{T_0} + 0.161 \cdot \frac{h_0}{T_0} \cdot \frac{1}{h} \right] = \frac{0.161}{2T_0} \cdot \left(1 + \frac{h_0}{h} \right) \quad (2.10)$$

残響時間とレベル差の式に代入し、以下に示す。

残響時間

$$T = 0.161 \cdot \frac{V}{A} = \frac{2T_0}{\left(1 + \frac{h_0}{h}\right)} \quad (2.11)$$

レベル差

$$\Delta L = -10\lg\left(\frac{A}{S_f}\right) + 6 = -10\lg\left(\frac{0.161}{2T_0} \cdot (h + h_0)\right) + 6 \quad (2.12)$$

残響時間は変数となる天井高が分母にあり、レベル差は天井高の対数をとる形になる。

以上3種類の設定に関して、天井高に対する残響時間とレベル差の変化を図2.2に示す。(a)残響時間一定では低い天井高でレベル差が増大、(b)床面積あたりの吸音面積一定では高い天井高で残響時間が増大し、天井高によって明確な優劣が生じる可能性がある。一方、(c)2ケースの吸音面積の平均値一定では(a),(b)の中間的な性質を示し、天井高が増すと残響時間は若干増大するものの、レベル差は若干低下し、トレードオフが生じる。

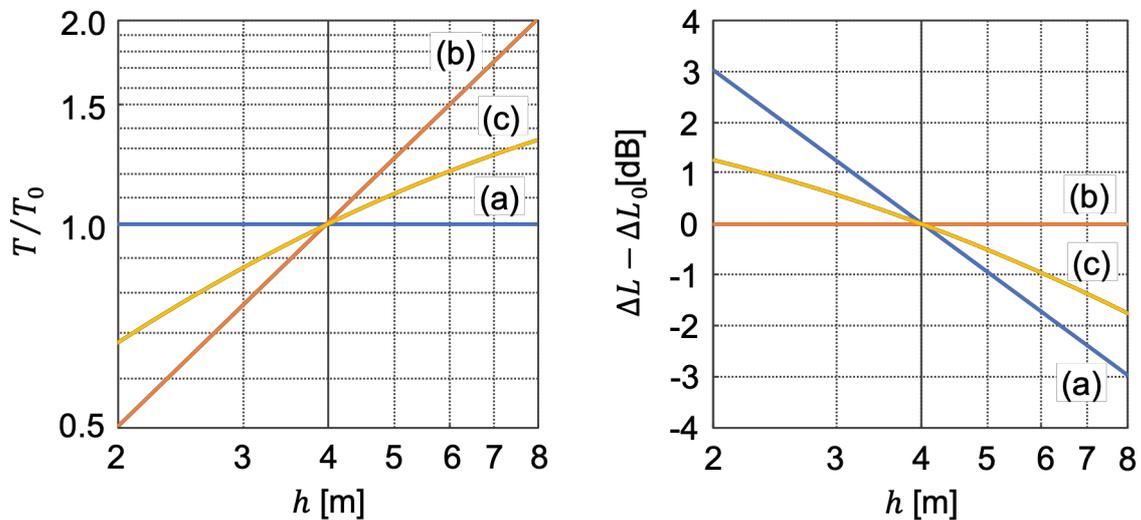


図 2.2 (a)～(c)条件の天井高に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化
 $h = 4$ [m]を基準値

(d) 平均吸音率一定と与えた場合

この場合，(a)～(c)の3条件と違い，床面寸法によっても残響時間とレベル差は変化するため，床面1辺 d m の正方形を想定すると以下の式で表される。

残響時間

$$T = \frac{0.161}{\bar{\alpha}_0} \cdot \frac{V}{S} = \frac{0.161}{\bar{\alpha}_0} \cdot \frac{1}{\frac{2}{h} + \frac{4}{d}} \quad (2.13)$$

レベル差

$$\Delta L = -10 \lg \left(\bar{\alpha}_0 \cdot \frac{S}{S_f} \right) + 6 = -10 \lg \left[\bar{\alpha}_0 \cdot \left(2 + \frac{4h}{d} \right) \right] + 6 \quad (2.14)$$

図 2.3 に $d=8$ m を基準条件とした場合の天井高に対する変化を示す。この場合，(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定と同様に残響時間とレベル差の変化にトレードオフが生じているが，床面寸法が大きくなると両者とも増大し，明確な劣化が生じることが示唆される。

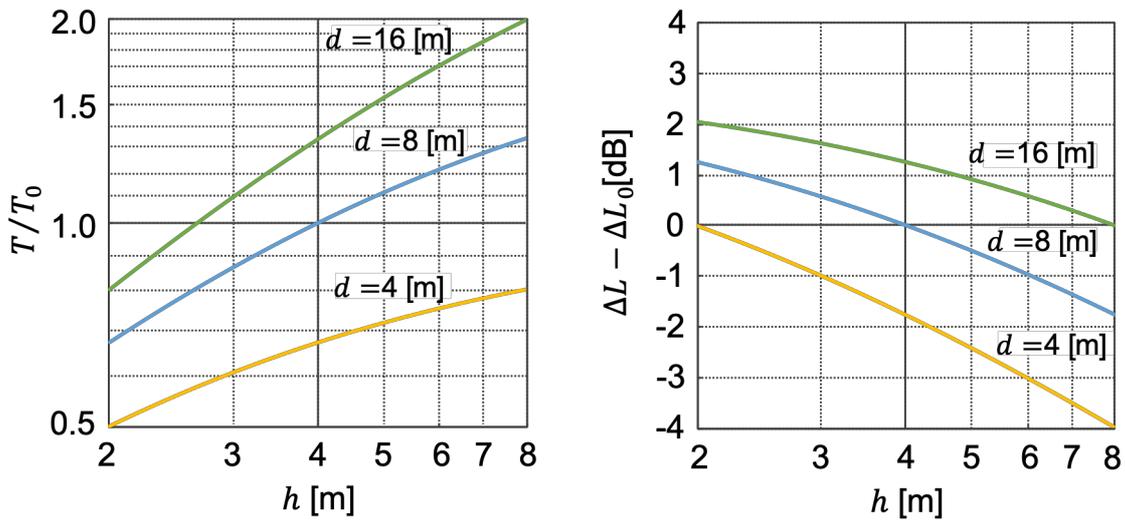


図 2.3 平均吸音率一定条件の室寸法に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化
 $h = 4$ [m], $d = 8$ [m]を基準値

2.2 ドイツ工業規格の室内音響指標

2.2.1 ドイツ工業規格

日本では居住空間の吸音設計に関する指針が整っていないが、外国では保育所等を対象とした指針が存在する。

Deutsche Industrie Normen により発行されているドイツ工業規格^[12](通称 DIN)も、そのような指針を含んでいる。DIN は日本でいう JIS に当たるもので、ドイツ連邦共和国の国家規格である。また、1917 年に設立され、産業、研究、社会のあらゆる分野において大きな役割を果たしている。

2.2.2 DIN 18041

DIN のうち、2016 年改定の DIN 18041^[10]は、室内音響設計のための必要条件、推奨および参考事項を示している。この規格は、最大 5000 m³の容積を有する空間に適用され、スポーツ施設およびプールについては最大 30000 m³に適用される。主に音声コミュニケーションのための必要事項を含め、明瞭度を確保するための室内音響要件、推奨事項、および設計のガイドラインを規定している。

基本的に 2 つのタイプに区別され、推奨値が設定されている。

- グループ A：中規模及び大規模の空間
学校教室(大学の大教室等)、デイケアセンターの多目的室、会議室、裁判所、講演会場、体育館、スイミングプール等
- グループ B：小規模の空間
居室、ダイニングルーム、食堂、遊戯室、学校教室、保育所、更衣室、エントランスホール、オフィス等

グループ A は、用途に適した残響時間とサウンドステアリングによって、中規模及び大規模の空間の室内音響品質が保証され、グループ B では、吸音と騒音の低減によって小規模での室内音響品質が保証されるよう規定している。

また、この規格は音楽や音声等の高音質の録音の分野だけでなく、劇場、コンサートホール、映画館、神聖な空間等の特別な要件を備えた室内音響は含まない。

この規格の推奨値は科学的に正確な数値や推論は示されていないが、十分大きな室内減衰が室内音響に望ましい効果を与えることが知られている。

この規格の推奨値は隣接する空間から伝達された騒音の制限、また室内の騒音の制限を前提条件として規定されている。隣接する空間または屋外からの騒音を低減するためには、十分な遮音を必要とする。

グループ A と B の目標値，推奨値について示す。

● グループ A

グループ A では表 2.1 に示すような室空間を対象に，室規模に応じた残響時間の設定とサウンドステアリングによって，音響品質が保証されるよう規定している。室用途に応じた残響時間は表 2.2 に示すように室容積の関数として与えられる。

表 2.1 グループ A の空間の説明と用途例

	用途	例
A1	「音楽」 主に音楽パフォーマンスを行う空間	音楽パフォーマンスを行ったり， 歌を歌う空間
A2	「スピーチ/講義」 発話者1人の音声プレゼンテーションを行う空間	裁判所，議会部屋，講義会場， 劇場，会議室，学校，講堂など
A3	「スピーチ/講義を含む」 A2のうち，特に良好な音環境を要求する空間	
A4	「教育/コミュニケーション」 複数人が同時に音声コミュニケーションを行う空間	教室，休憩室，会議室 セミナー室，老人ホーム 介護施設など
A5	「スポーツ」 複数人が同時に音声コミュニケーションを行う空間	

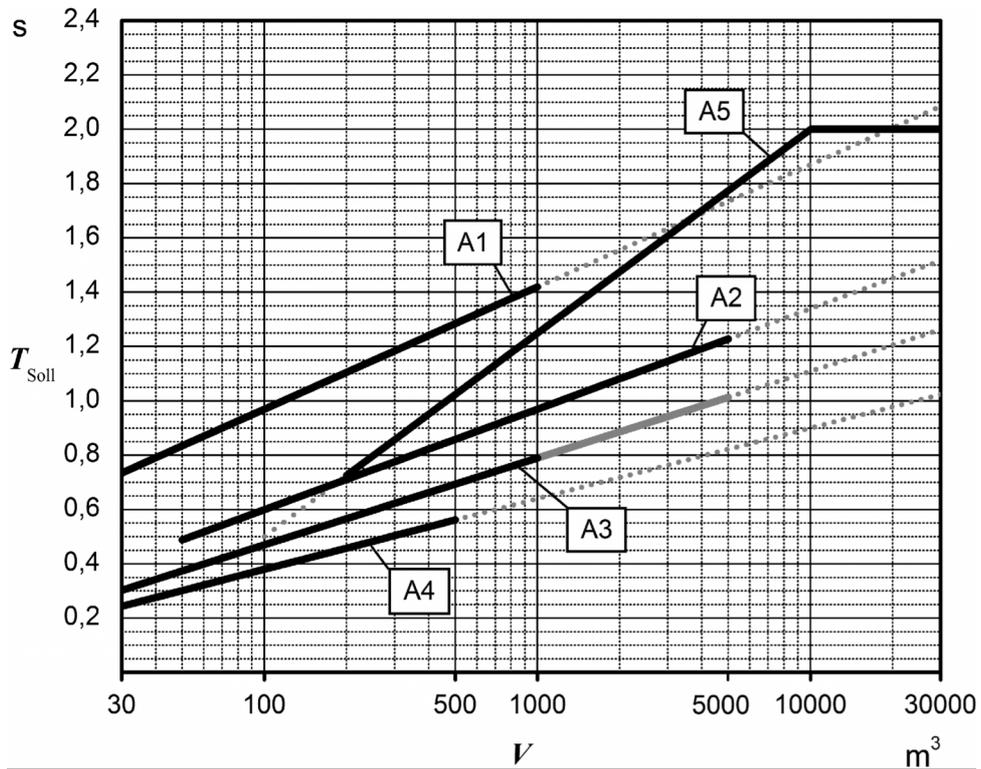
表 2.2 グループ A の目標残響時間

	目標残響時間 [s]	室容積 [m ³]
A1	$T = (0.45\lg V + 0.07)$	$30 \leq V < 1000$
A2	$T = (0.37\lg V - 0.14)$	$50 \leq V < 5000$
A3	$T = (0.32\lg V - 0.17)$	$30 \leq V < 5000$
A4	$T = (0.26\lg V - 0.14)$	$30 \leq V < 500$
A5	$T = (0.75\lg V - 1.00)$	$200 \leq V < 10000$
	$T = 2.0$	$10000 \leq V$

表 2.2 の目標残響時間をグラフ化したものが図 2.4 である。室容積が大きくなるほど目標残響時間は長くなる。残響時間が短いほど、室内の音は聴き取りやすい。母国語ではない言語でのコミュニケーションや、音声明瞭度を高める必要がある人々とのコミュニケーションには短めの残響時間が要求される。後者については、例えば、会話や音声処理障害、集中力または注意障害、パフォーマンス障害を受ける人のことである。

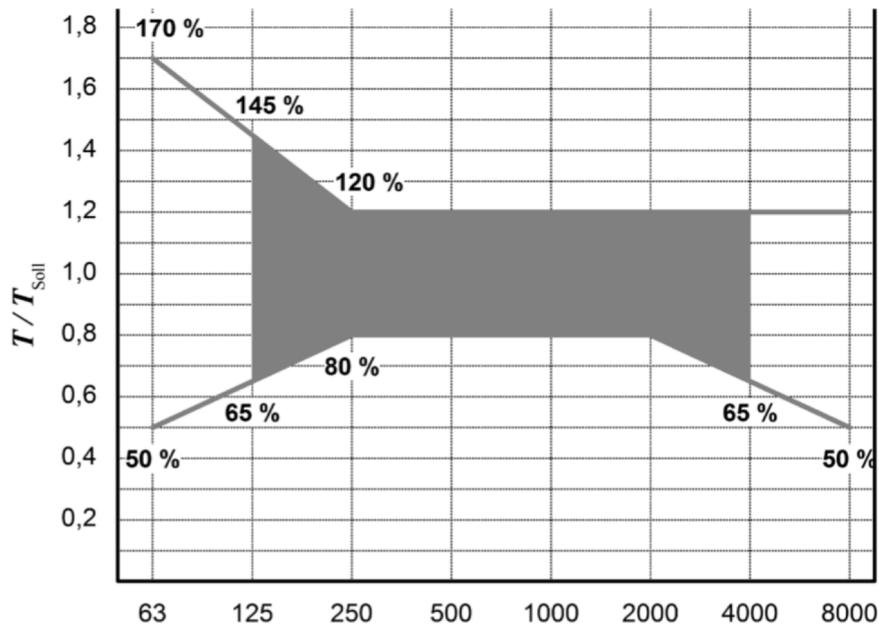
音楽レッスンや音楽リハーサルルームでの残響時間の要件については、通常はタイプ A1 と A2 の中間に位置するのが望ましい。音楽学生のための教室について、歌や録音等において演奏のために残響時間を長くする傾向がある。だが、音楽レッスンやリハーサルルームでは、ブラスおよび弦楽器の場合、A2 の設定値曲線に基づくことを推奨する。学校の音楽教室では、A1 と A3 の目標曲線の範囲をカバーするような残響時間の変動が求められる。さらに、パーカッションとそれに類する音が鳴る場合のバンドリハーサルルームでは、より高い室内減衰が必要となる。ここでは、A3 の残響時間を上限とする。

用途タイプ A1～A4 の目標残響時間 T_{soil} に対し、125 Hz から 4000 Hz までの周波数に依存する残響時間の許容範囲を図 2.5 に示す。タイプ A5 については、250 Hz から 2000 Hz までの目標残響時間に対し $\pm 20\%$ の精度で維持されなければならない。分割可能な体育館の場合、分割されていない場合と分割されている場合両方の要件が保証されていないなければならない。



T_{Soll} : 目標残響時間 [s], V : 室容積 [m^3]

図 2.4 DIN グループ A の目標残響時間^[10]



T/T_{Soll} : 目標残響時間と周波数帯域別の残響時間, f : 周波数 [Hz]

図 2.5 周波数帯域に対する残響時間の許容範囲^[10]

- グループ B

グループ B 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。吸音による室内減衰が推奨され、騒音レベルの低減と残響抑制が保証される。表 2.3 グループ B の空間の説明と用途例表 2.3 に示す 5 つの室用途類型に対して、表 2.4 に示す式の通り A/V の下限値が天井高の関数として設定されており、間接的に残響時間の上限値を定めている。

表 2.3 グループ B の空間の説明と用途例

	用途	例
B1	滞在することのない室	エントランスホール、廊下などの単なる往来エリア (学校、保育所、病院、介護施設を除く)
B2	短期滞在の室	エントランスホール、廊下、階段などのうち 居住性の高い往来エリア
B3	長期滞在の室	会話や騒音が想定される室(学校や保育所、 幼稚園など)の往来エリア、待合室、休憩室
B4	騒音低減と快適性を 必要とする部屋	オフィス、受付、カウンター
B5	騒音低減と快適性を 特に必要とする部屋	学校教室、保育所、 病院や介護施設等の特に騒音の大きい空間

表 2.4 グループ B の推奨事項

	部屋の高さ $h \leq 2.5$ [m]	部屋の高さ $h > 2.5$ [m]
B1		
B2	$A/V \geq 0.15$	$A/V \geq [4.80 + 4.69 \lg(h)]^{-1}$
B3	$A/V \geq 0.20$	$A/V \geq [3.13 + 4.69 \lg(h)]^{-1}$
B4	$A/V \geq 0.25$	$A/V \geq [2.13 + 4.69 \lg(h)]^{-1}$
B5	$A/V \geq 0.30$	$A/V \geq [1.47 + 4.69 \lg(h)]^{-1}$

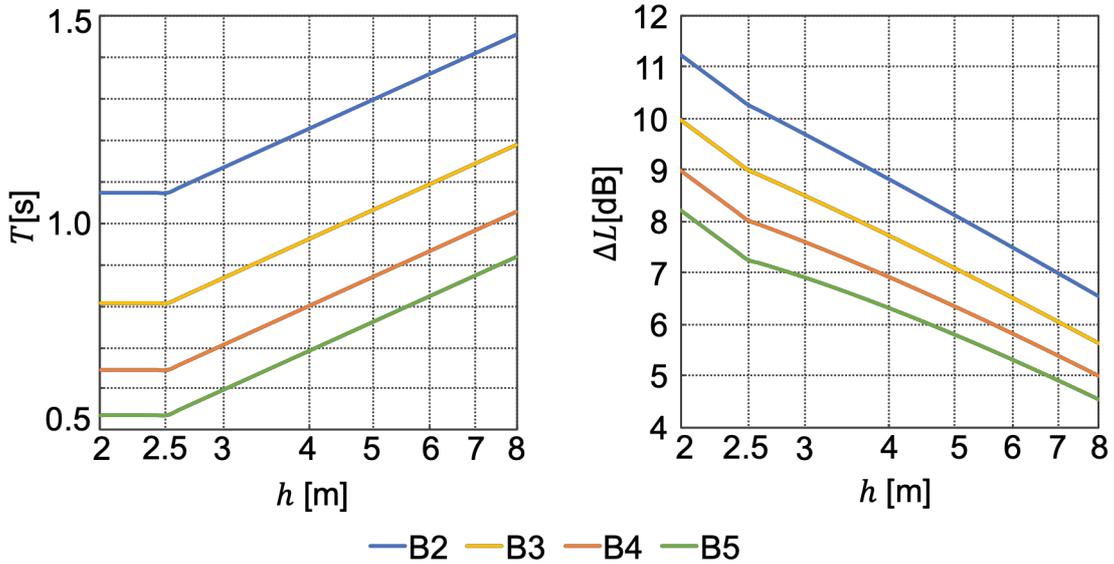


図 2.6 DIN グループ B の天井高に対する残響時間とレベル差の変化

上記の推奨事項の天井高に対する残響時間とレベル差の変化を図 2.6 に示す。2.1.2 の (c),(d)と同様に、天井高の上昇に対して残響時間の増大を許容しつつも、レベル差は低下することがわかる。但し、各室用途では、天井高の対数に対して残響時間の傾きは一定であるが、レベル差の傾きは B2 から B5 の順で緩やかになっている。

グループ B は残響抑制と騒音低減を考慮しており、本研究の参考値になりうるが、これらの推奨値の理論的な根拠は示されておらず、この推奨値も含めて検討を行う必要があると考える。

2.3 室用途を想定した各目標値の比較

室用途を想定して，残響抑制と騒音低減を考慮している DIN のグループ B の推奨値を含め吸音設計目標値を比較する。(a)~(d)は 2.1.2 における目標値で，DIN の推奨値を(e)とする。

2.3.1 学校教室想定

学校の普通教室を想定し，AIJES 推奨値に基づき，(a)~(c)の目標値を $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m(H)}$ で $T_0 = 0.6\text{ s}$ ，(d)では平均吸音率 $\bar{\alpha}_0 = 0.2$ とする。DIN では学校教室を含む B5 の推奨値と比較する。

図 2.7 に各目標値設定における天井高に対する残響時間とレベル差の変化を示す。天井高 $2.5\sim 5.0\text{ m}$ の範囲において，(a)残響時間一定ではレベル差が 3 dB 変化し，(b)床面積あたりの吸音面積一定では残響時間が $0.5\sim 1.0\text{ s}$ となっている。一方，(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定では残響時間が $0.5\sim 0.8\text{ s}$ ，レベル差が 1.5 dB の変化に留まり，変化幅は(d)平均吸音率一定と同程度である。特に(c)は DIN の値とほぼ一致している。

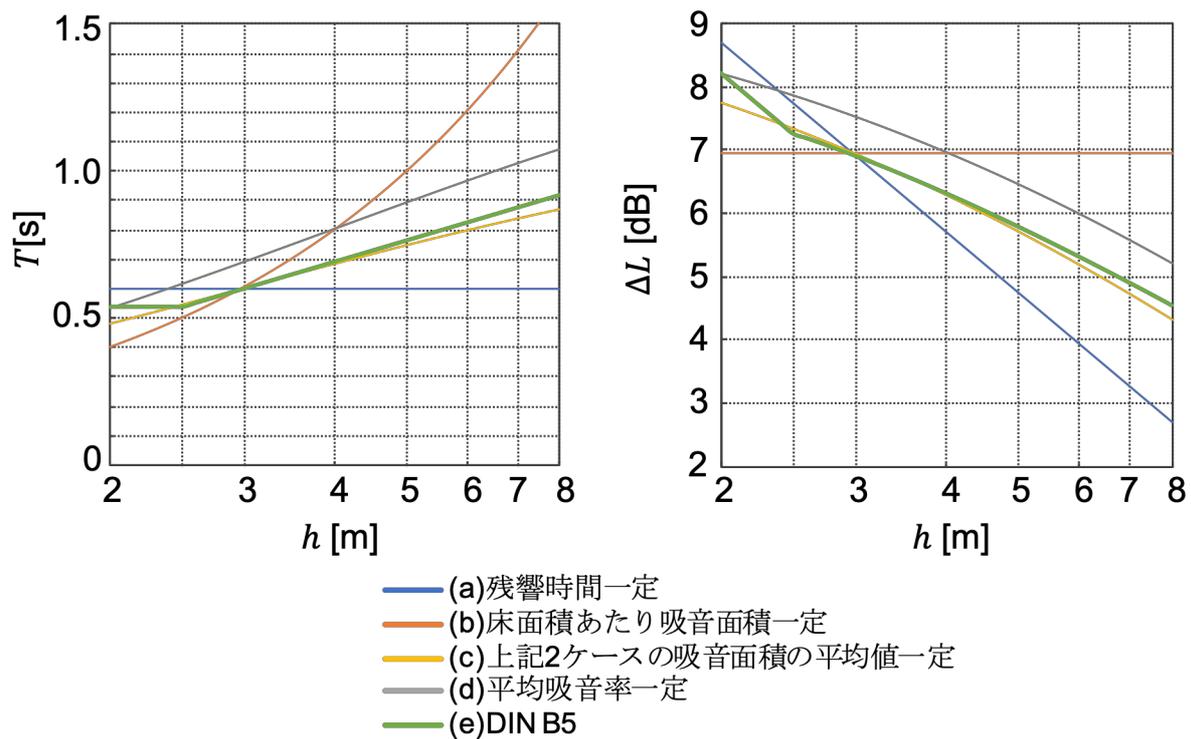


図 2.7 学校教室想定天井高に対する残響時間とレベル差の変化

2.3.2 待合室想定

DIN では待合室や休憩室等の会話・騒音のある滞在空間を B3 に区分している。ここで、 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m(H)}$ での DIN 推奨値を便宜的に基準として、多様な床面寸法が考えられる待合室空間を想定し、各目標値を比較する。但し、(d)では $\bar{\alpha}_0 = 0.15$ を目標値とする。

図 2.8 に各目標値設定における残響時間とレベル差の変化を示す。天井高 $2.5 \sim 5.0\text{ m}$ の範囲において、(a)残響時間一定では学校教室と同じくレベル差が 3 dB 変化し、(b)床面積あたりの吸音面積一定では残響時間が $0.7 \sim 1.4\text{ s}$ 、(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定では残響時間が $0.8 \sim 1.1\text{ s}$ 、レベル差が 1.8 dB の変化となっている。一方、(d)平均吸音率一定では天井高の範囲に加えて床面辺長 $4, 8, 16\text{ m}$ の範囲を想定すると、残響時間が $0.6 \sim 1.6\text{ s}$ 、レベル差が 4.2 dB の範囲で大きく変化することがわかる。また、ここでも(c)は DIN とかなり近い値となっている。

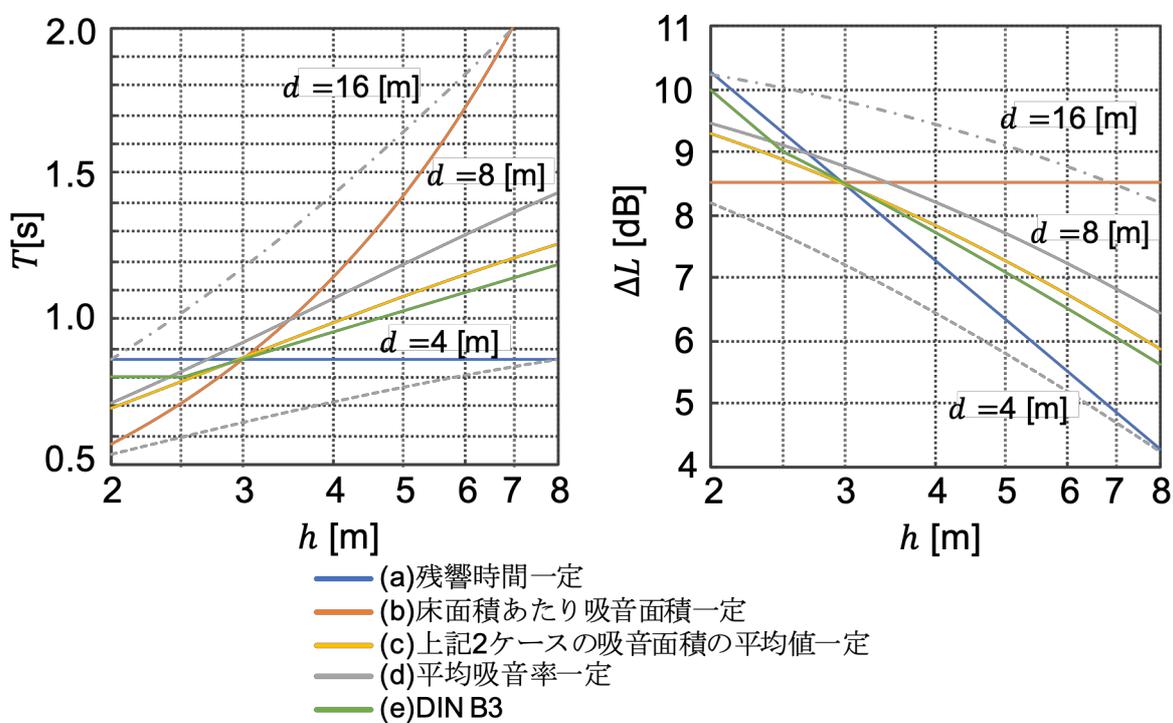


図 2.8 待合室想定天井高に対する残響時間とレベル差の変化

第3章

音声明瞭度指標による比較

3.1 はじめに

本章では、前章で考察した吸音設計目標値に関して、具体的に室用途を想定し、音源と受音点の距離の変化、室寸法の変化、騒音源の変化に対する音声伝送性能の変化について検討する。

3.1.1 物理的評価指標

日本建築学会環境工学委員会は、音声伝送性能の物理的評価指標について主に以下のような方法に分類されると述べている^[13]。

- 騒音によるマスキングの影響に着目した方法

この方法は、音声の聴取音圧レベル、背景騒音の音圧レベル、周波数特性等の物理量が異なった条件で、音声に対する騒音によるマスキングの影響をいくつかの周波数帯域に分けて分析し、これらの関係性から明瞭度評価値を算出するものである。

また、原理的に雑音や帯域制限等の歪みによる影響を説明するのには適しているが、残響やエコー等の時間領域での歪みの影響に対して適切な評価ができない場合がある。

- 室応答のエネルギー比に着目した方法

この方法は、伝送路内で測定されたインパルス応答波形の、直接音到来からある時間内までの初期応答エネルギーを貢献因子(Useful)とし、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音、つまり背景騒音を妨害因子(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ものである。

- 音声信号強度の時間変化に伴う包絡線情報保存度に着目した方法

この方法は、会話音声を経過に従って連続的に変化するスペクトルを持つ音の流れとしてとらえ、発信者(話者)から発せられた音声の特徴を表す信号強度の時間的な変化(包絡線情報)が、伝送路内での残響や騒音の影響を受けて、受信者の位置でどれだけ保存されているかによって音場内の音声伝送性能を示そうとするものである。

音場に存在する残響や騒音等によって音声の聴き取り性能が低下する影響は、包絡線の変調の深さの減少度として表され、変調周波数の関数 MTF(Modulation Transfer Function)^[14]として示される。この MTF は SN 比に換算され、音声の伝送性能を直接表す指標となる STI(Speech Transmission Index)が求められる^{[15][16]}。STI は現在、IEC60268-16(2003)として規格化されており、音声伝送性能の測定、評価において最も一般的に用いられている指標である。

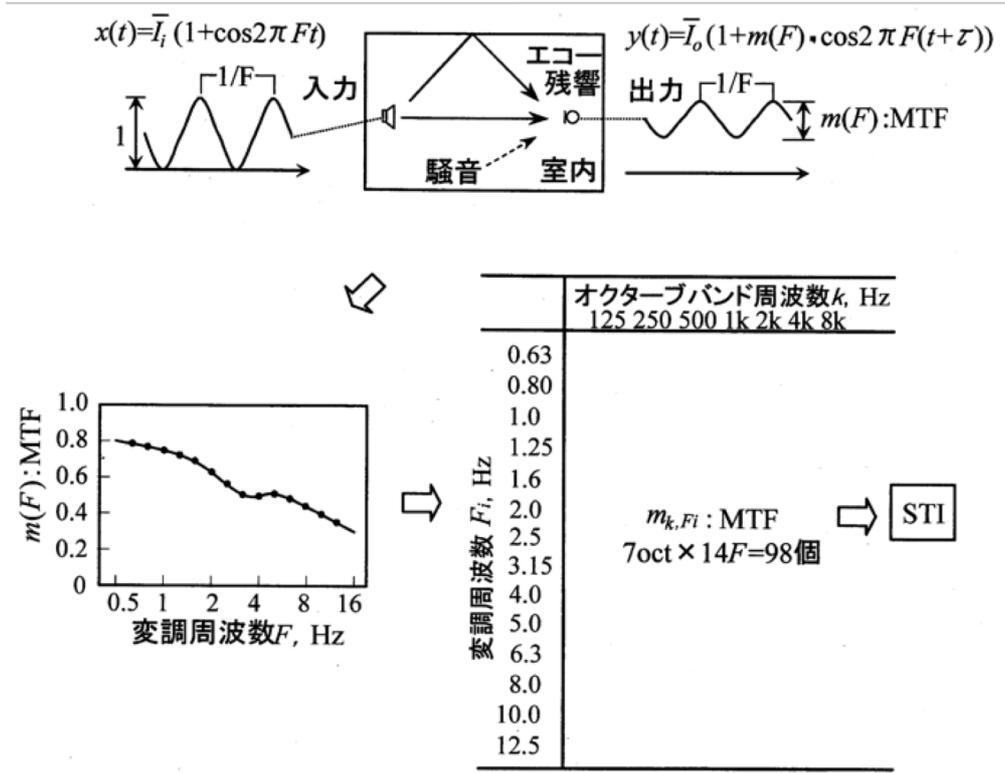
また、数々の音声伝送性能評価に関わる指標が示されているが、容易に結果が算出できることが望まれ、主観的な評価との対応が示されていることが必要であることを考慮すると、最も適応性が高いもののひとつとして、STI が挙げられている。

上記を踏まえ、本研究では音声明瞭度指標 STI により理論的にさらに検討を深めることとした。

3.1.2 STI の概要

● STI の求め方

前述した通り STI は、音声信号が受信点でどれだけ保存されているかを示す変調伝達関数 MTF により得られる。3.1.2 と 3.1.3 での STI, MTF の説明には[13]~[17]より一部引用する。MTF の概要を図 3.1 に示す。



F : 変調周波数

$x(t)$: 発声者の音声を表した 100%強度変調された音源入力信号

$y(t)$: 伝送路内を経過した出力信号

図 3.1 MTF の概念^[13]

変調度を変調周波数の関数として表した $m(F)$ が MTF である。(3.1)に示すように、空間内で測定されたインパルス応答 $h(t)$ から、125~8 kHz の 7 オクターブバンド、0.63~12.5 Hz の 14 の変調周波数について、計 7×14 の 98 の MTF を求める。

$$m(F) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) \cdot e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (3.1)$$

なお、背景騒音の影響を考慮する場合、(3.2)に示すように音声レベルと背景騒音レベルの差 SN 比に応じて補正を行う。

$$m_{k,Fi} = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) \cdot e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \cdot (1 + 10^{-(SNR_k/10)})^{-1} \quad (3.2)$$

以降に、STI を算出するまでの過程を示す。

(3.2)より得られた MTF に、聴覚マスキングを考慮して、(3.3)に示すように補正を行う。

$$m'_{k,Fi} = m_{k,Fi} \frac{I_k}{I_k + I_{k-1} \cdot amf_{k-1} + I_{rt,k}} \quad (3.3)$$

I_k : 音声周波数帯域ごとの強度(k : オクターブバンド)

I_{k-1} : 低域側に隣接する音声周波数帯域の強度

amf : 聴覚マスキング補正因子

$I_{rt,k}$: 最小可聴値による補正レベル

次に、MTF から見かけの SN 比を(3.4)により換算する。

$$SNR_{k,Fi} = 10 \lg \frac{m'_{k,Fi}}{1 - m'_{k,Fi}} \quad [\text{dB}] \quad (3.4)$$

(3.5)によって明瞭度への貢献度 $TI_{k,Fi}$ を算出する。

$$TI_{k,Fi} = \frac{SNR_{k,Fi} + S}{R} \quad (3.5)$$

S : シフト因子(=15[dB]), R : レンジ因子(=30[dB])

(3.6)より, $TI_{k,Fi}$ を音声周波数帯域ごとに算術平均して MTI_k を求める。

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} TI_{k,Fi} \quad (3.6)$$

(3.7)により, MTI_k を重み付け平均して算出する。

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \sqrt{MTI_k \cdot MTI_{k+1}} \quad (3.7)$$

α_k : 音声周波数帯域ごとの重み付け係数

β_k : 冗長性補正係数

以上のプロセスより, STIが0から1の値で求められ, 空間の音声伝送性能について評価ができる。

- STI と音声伝送性能のクラスの関係

今まで行われてきた研究により、STI と「聴き取りにくさ」との対応関係は実験的に確かめられている^[18]。図 3.2 に、騒音の影響を考慮した STI と音声伝送性能のクラスの関係を示す^[17]。縦軸は「聴き取りにくさ」または「聴き取り間違い」を示す割合で、図中に音声伝送性能のクラス境界を示す。また、音声伝送性能のクラスとそれらの位置付けを表 3.1 に示す。STI の値が大きいほど音声伝送性能のクラスが高く、クラスが高いほど聴き取りにくさ、聴き取り間違いの割合は小さい。つまり、STI の値が大きいほど聴き取りにくさ、聴き取り間違いは起こりにくい。快適な音声コミュニケーションを実現するためには、STI の値が大きくなるような設計が必要である。

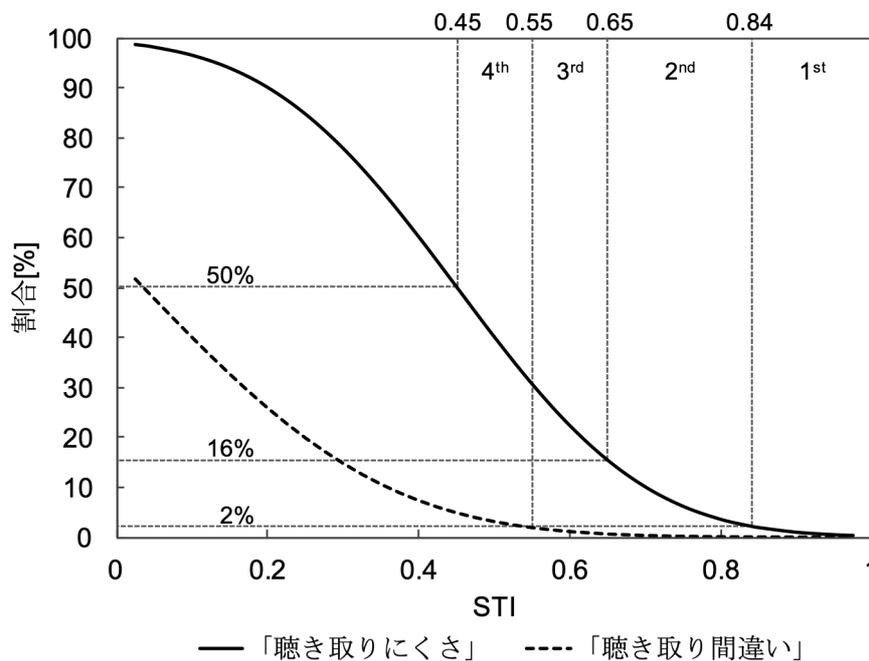


図 3.2 音声伝送性能のクラスと STI^[13]

表 3.1 音声伝送性能のクラスとそれらの位置付け^[13]

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

3.1.3 STIの予測方法

前項で示したように、インパルス応答を測定しMTFを算出することで、STIの値が得られる。暗騒音がある場合は、音声と暗騒音のレベル差も必要となる。だが、インパルス応答を測定せずとも、対象空間の情報や音声と暗騒音の情報が分かれば、STIを理論的に予測することができる。予測フローを図3.3に示す。

必要となるパラメータは残響時間や室容積、音声情報、騒音情報である。発声者と聴取者の距離については、考慮しない場合とする場合で予測方法が異なる。

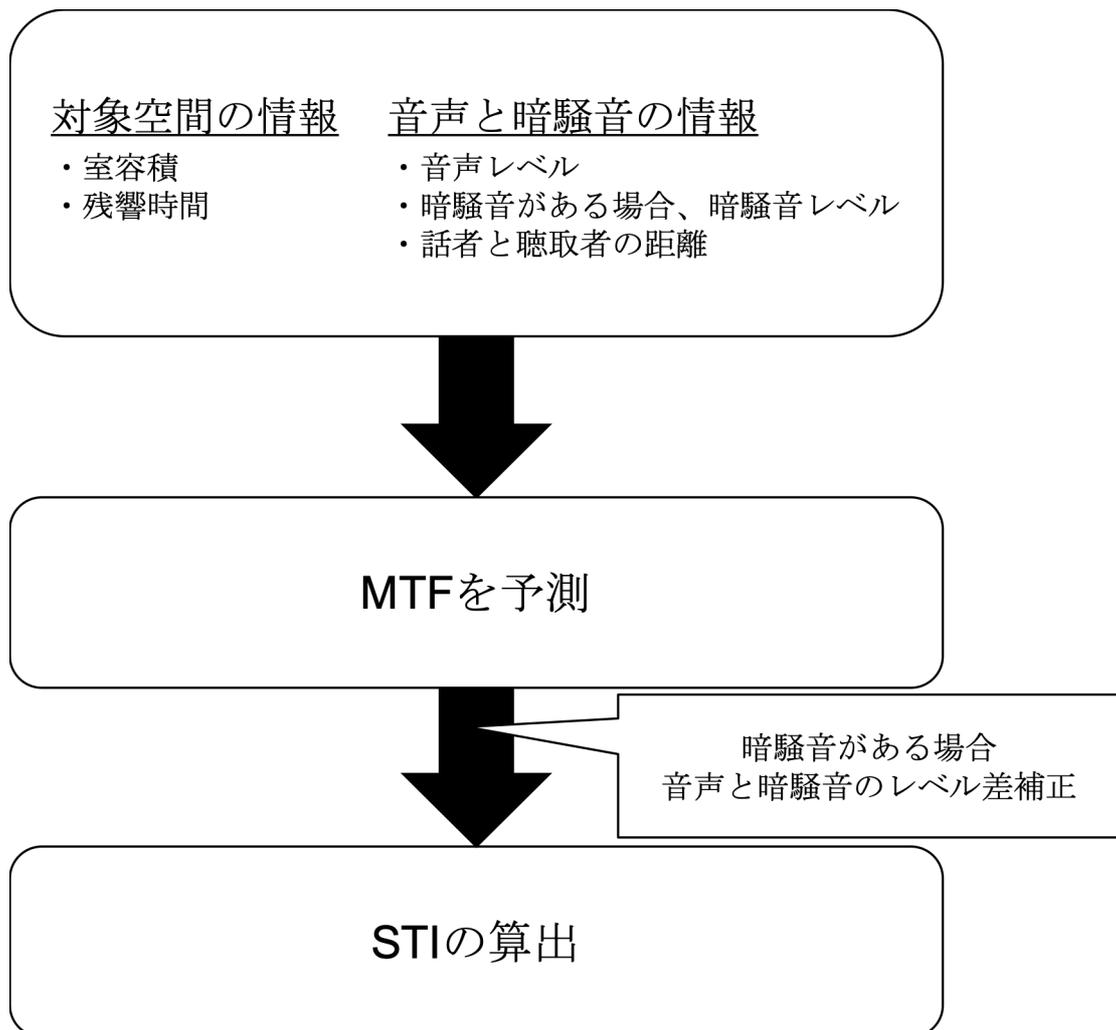


図 3.3 STI 予測の手順^[16]

残響のある空間において、インパルス応答が指数減衰すると仮定すると、MTF は以下の式で表される。

音源-受音点の距離考慮なしの場合

$$m(F) = \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3.8)$$

T : 残響時間[s], F : 変調周波数[Hz]

音源と受音点の距離を考慮しない場合、拡散音場の予測といい、残響時間が同じ室空間の条件での STI の最小値を求められるので、安全側の設計を行う際の目安になる^[13]。

音源-受音点の距離考慮ありの場合

$$m(F) = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C} \quad (3.9)$$

$$A = \frac{3}{r^2} + \frac{1}{r_c^2} \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$B = \frac{2\pi FT}{13.8} \frac{1}{r_c^2} \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$C = \frac{3}{r^2} + \frac{1}{r_c^2}$$

C : 音源-受音点距離[m], V : 室容積[m³], T : 残響時間[s]

r_c^2 : $0.0032 V/T$ [m], T : 変調周波数[Hz]

音源と受音点の距離を考慮する場合、距離考慮の予測^[13]といい、拡散音場の予測より現実的な STI 値を求めることができる。

また、3.1.2 でインパルス応答を測定して得られた MTF から STI を求める過程を示したが、本稿で示した MTF も同じようにして換算することで STI の値が予測できる。

3.2 学校教室を想定した音声伝送性能の比較

3.2.1 想定条件

本節では、2.3.1で示したような学校教室を想定し^[1]、吸音設計目標値や室寸法、騒音源の変化による音声伝送性能の変化の比較を行う。

図3.4に示すような床面が正方形で1辺 $d=8\text{ m}$ の空間を想定し、第2章で示した吸音設計目標値(e)のDINはB5の学校教室を含む推奨値とし、DINの $8\text{ m}\times 8\text{ m}\times 3\text{ m(H)}$ の時の残響時間を(a)~(c)の基準値として比較を行う。また、(d)の平均吸音率については $\bar{\alpha}_0=0.2$ とする。また、天井高 h は $2\sim 8\text{ m}$ の範囲で変化する。

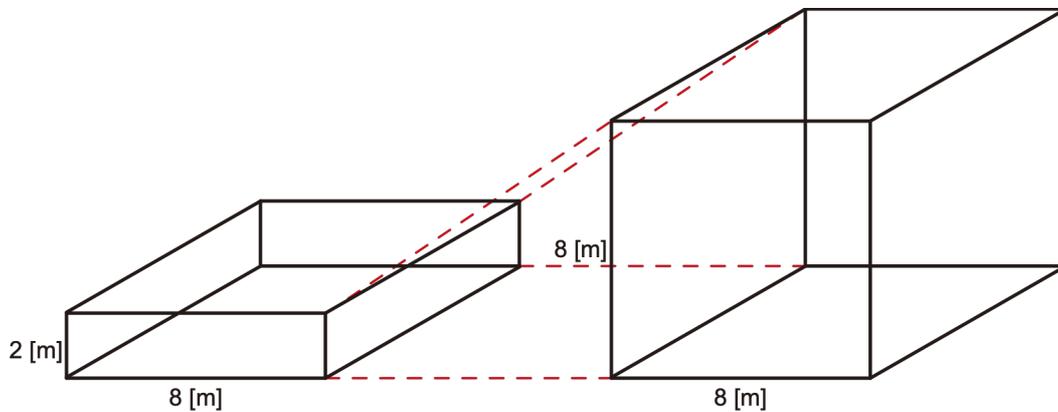


図 3.4 室寸法のイメージ

3.2.2 C_{50} による比較

前節ではSTIによる音声伝送性能の評価について説明したが、STI以外にも音声明瞭度指標なるものはある。その中から、 C_{50} について比較を行った。

C_{50} はインパルス応答の初期反射音と後期反射音を区分して扱う指標である^{[19][20][21]}。この指標では、 50 ms までの初期反射音は直接音を補強するとされ、 50 ms 以降の反射音は拡散音として扱い、以下のように表される。 C_{50} の値が大きいほど話声の明瞭度が良いとされる。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (3.10)$$

t : 時間[s], $p(t)$: 時刻 t における音圧[Pa]

C_{50} は本来インパルス応答から求める指標であるが、拡散音場を仮定すると、STIと同じくインパルス応答を測定せずとも理論的に値を得ることができる^[22]。以下に算出式を示す。

$$C_{50} = 10 \lg \frac{1 - \exp\left(-4.25 \frac{S\bar{\alpha}}{V}\right)}{\exp\left(-4.25 \frac{S\bar{\alpha}}{V}\right)} \quad [\text{dB}] \quad (3.11)$$

S : 表面積[m²], $\bar{\alpha}$: 平均吸音率, V : 室容積[m³]

(3.11)で求められた C_{50} は、インパルス応答から得られる本来の値より小さめに算出されるため、設計に際しては安全側の数値をとると考えられる^[23]。

図 3.5 に拡散音場を仮定して算出した C_{50} の天井高に対する変化を示す。(a)は残響時間が一定のため C_{50} の値が変わらない。(b)床面積あたりの吸音面積一定は天井高が高くなると残響時間が長くなるため、 C_{50} が小さく、明瞭度が悪いと考えられる。また、(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定は(a)と(b)の中間的な性質を示し、(e)と似た傾向を示す。(d)平均吸音率一定は(c)と似た傾向を示すが、室規模に関係なく $\bar{\alpha}_0 = 0.2$ で一定で、他の基準値より吸音面積が小さく明瞭度が悪い。

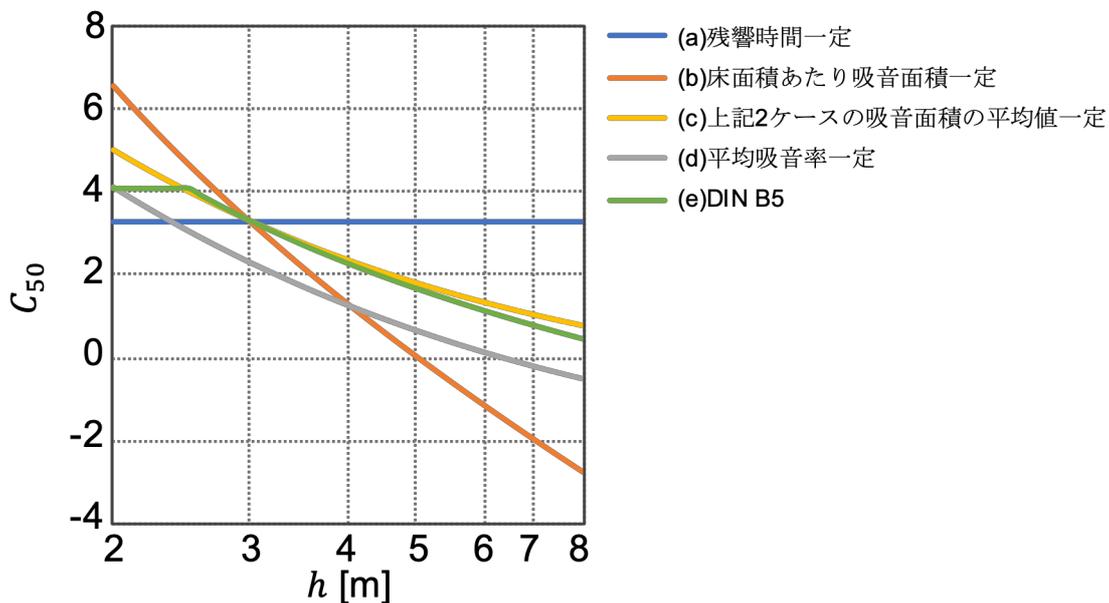


図 3.5 学校教室想定天井高に対する C_{50} の変化

3.2.3 STI による比較

次に、3.1.3 で説明した STI について、以下の 3 タイプで音声伝送性能の比較を行った。MTF を求める際の対応する数式番号をそれぞれ示している。

- 暗騒音なし，音源-受音点距離考慮なし(3.8)
- 暗騒音なし，音源-受音点距離考慮あり(3.9)
- 暗騒音あり，音源-受音点距離考慮あり(3.2)
- 暗騒音の考慮なし，音源-受音点距離考慮なし

(3.8)より求めた MTF から算出した STI を図 3.6 に示す。STI は 1 に近いほど明瞭度が良い。グラフの右に示す 1st~4th は音声伝送性能のクラスである。この場合、残響時間の変化のみ影響を受けて STI が変化する。

(a)残響時間一定 残響時間が変わらないため STI は 0.7 程度で一定である。

(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高が高くなると残響時間が長くなることで STI は小さくなり、建築空間では STI は 0.6 以上が望ましいと考えられているが、天井高 5 m 程度で 0.6 を下回る。また、天井高 2.5~5 m の範囲でランクが 2nd から 4th に変化するため、(b)を吸音設計目標値として設定した場合、室寸法によって大きく音声伝送性能が変化し、快適な音環境性能を確保できないことが示唆される。

(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定は(a)，(b)の中間的な性質を示し、(e)ととても近い値を示す。また、天井高 2.5~5 m の範囲で両者とも STI は 0.1 程度の変化幅である。

(d)平均吸音率一定の場合、天井高に対する変化幅は(c)，(e)と同程度である。

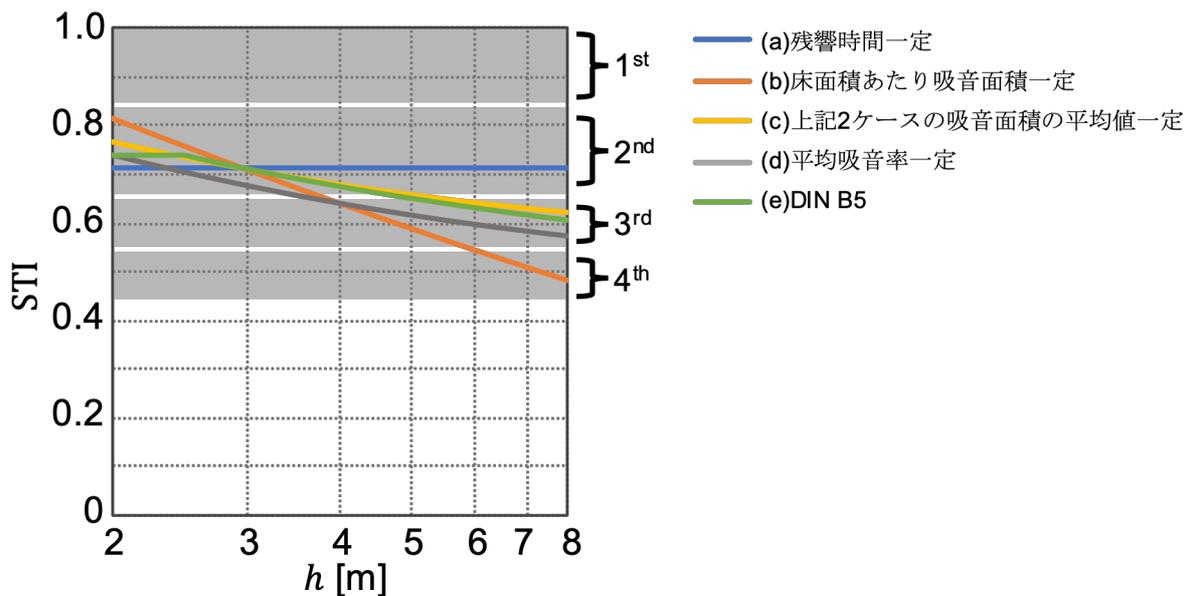


図 3.6 学校教室想定 of STI の変化

- 暗騒音の考慮なし，音源-受音点距離考慮あり

音源-受音点距離を考慮する場合，臨界距離が音声伝送性能に影響を与える。臨界距離とは，(3.12)に示すような音源との距離が離れると直接音エネルギーが小さくなる距離減衰^[24]の関係のため，直接音エネルギーと拡散音エネルギーが等しくなる距離のことである^[19]。音源からの距離が離れるほど直接音エネルギーの比率は小さくなり，拡散音エネルギーが支配的になる。

$$L_{\text{spd}} = L_{\text{wsp}} + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.12)$$

L_{spd} : 音声の直接音レベル[dB], L_{wsp} : 音声のパワーレベル[dB]

Q : 音源の指向係数, r : 音源-受音点距離[m]

臨界距離

臨界距離の算出方法を以下に示す。

$$d_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}} \quad [\text{m}] \quad (3.13)$$

R : 室定数 $S\bar{\alpha}/(1-\bar{\alpha})$

音源の指向係数は，音源-受音点距離に比べて地面近くに設置されているとみなせるので， $Q=2$ とし，室定数 R は吸音設計目標値と室寸法の設定によって求められる。

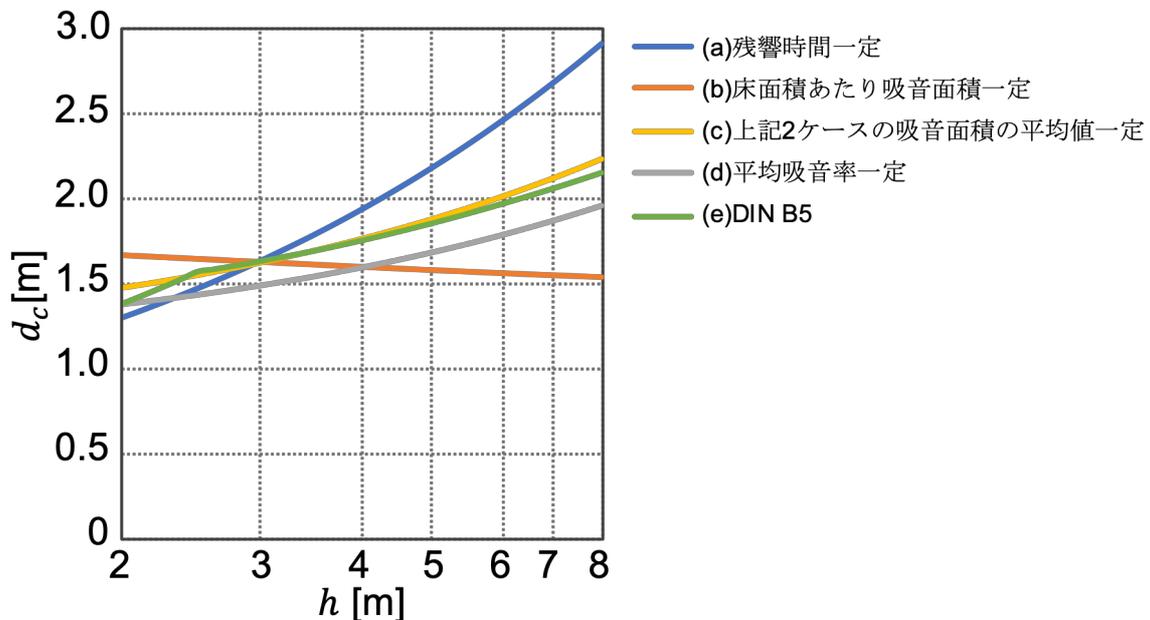


図 3.7 学校教室想定の臨界距離の変化

図 3.7 に天井高の変化に対する臨界距離の変化を示す。吸音の度合いを表す室定数の変化によって臨界距離は変化する。(a)残響時間一定の場合、天井高が高くなると臨界距離は大きくなり、距離が離れても直接音が支配的で明瞭度は良いが、天井高が低い時は会話者との距離が近くても拡散音が支配的になり明瞭度が悪くなることが示唆される。(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高の変化に対して臨界距離の変化が小さく、天井高が変化しても臨界距離は一定の大きさに保たれる。(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定の場合、(a)、(b)の中間的な性質を示し、(e)と似た傾向を示す。(d)平均吸音率一定の場合、(c)と同じような変化幅であるが、他の吸音設計目標値より吸音の程度が小さいため臨界距離が小さい。 $\bar{\alpha}_0$ がより大きな値をとると臨界距離は大きくなる。

(3.9)より求めた MTF から STI を算出し、図 3.8 に示す。

(a)残響時間一定の場合、天井高が高くなると臨界距離は大きくなる。この影響で天井高が低い時は直接音の比率が小さくなることで STI の値が小さく、天井高が高い時は直接音の比率が大きくなることで STI の値が大きい。音源との距離が変わると、天井高の変化に対する STI の変化幅が最も大きい。

(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高が変化しても臨界距離はあまり変化しないため、音源との距離が変化しても天井高に対する STI の変化幅はあまり変わらない。だが、残響時間の変化の関係で天井高に対する STI の変化幅は大きい。

(c)は天井高に対する臨界距離の変化が(a)、(b)の中間的な傾向を示しており、音源との距離の変化に対する STI の変化も(a)、(b)の中間的な性質を示している。音源との距離の変化による STI の変化幅は(a)より小さく(b)より大きい、天井高の変化に対する STI の変化幅は(a)より大きく(b)より小さいというトレードオフの関係を示している。また、ここでも(e)と似た傾向を示している。

(d)は(c)、(e)と同じようなトレードオフの関係を示している。また、全体的に他の吸音設計目標値より低い STI の値を示している。

今回検討した条件では最も大きい臨界距離でも 3 m より小さく、どの吸音設計目標値の場合でも、音源-受音点距離が 4 m より大きくなると、距離を考慮せず算出した安全側の STI の値に収束する。距離が大きくなると、拡散音エネルギーの比率が大きくなることで、直接音エネルギーの影響が小さくなり、残響時間の影響が支配的になるためである。

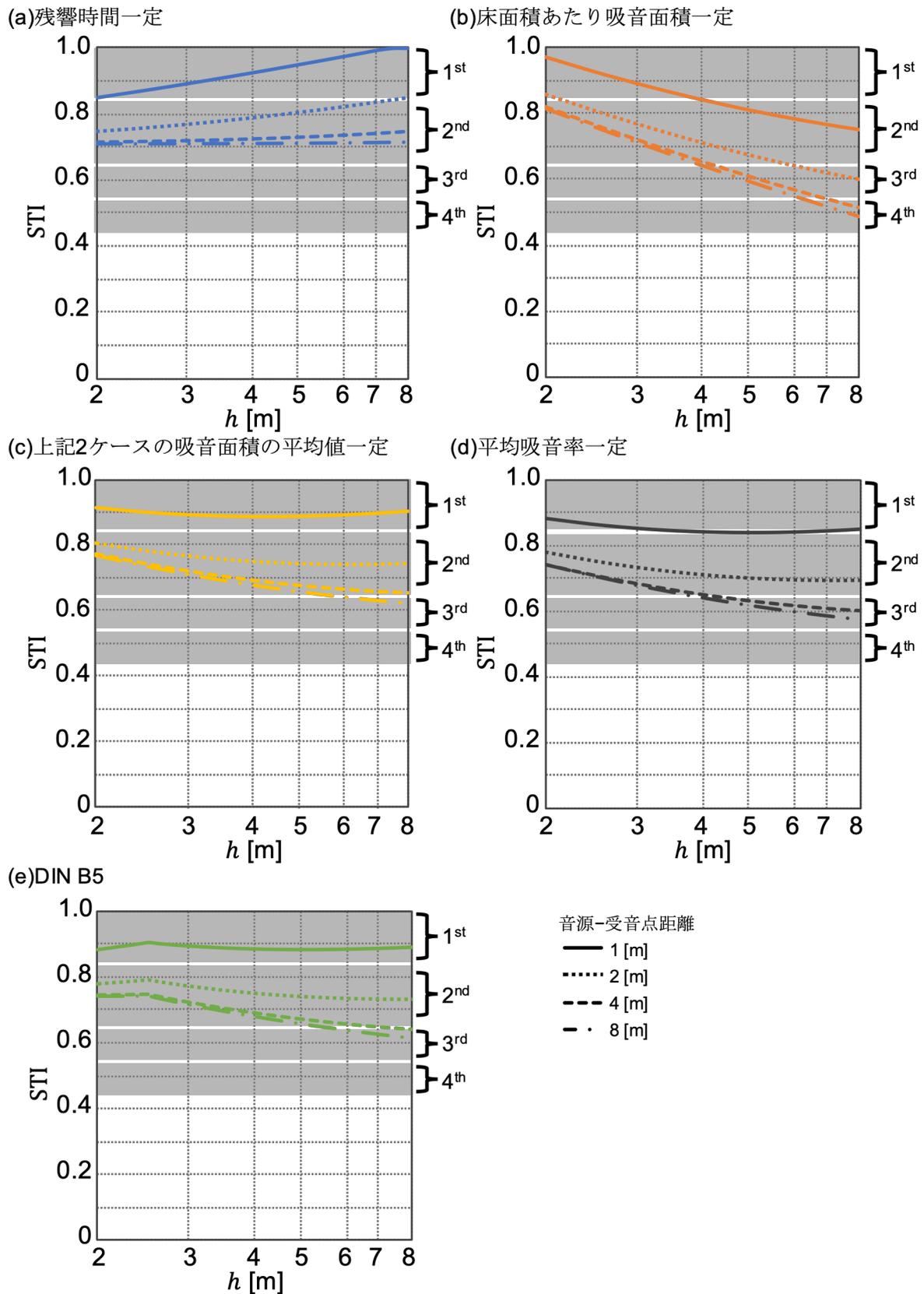


図 3.8 学校教室想定 of 音源-受音点距離を考慮した STI

- 暗騒音の考慮あり，音源-受音点距離考慮あり
 暗騒音がある空間における音声伝送性能は，(3.2)にあるように暗騒音レベル L_n と音声レベル L_{sp} の差 SN 比を算出して MTF を求める。

音声レベル

音声レベルは距離減衰と室の吸音の程度の関係で，以下の式により求められる。

$$L_{sp} = L_{wsp} + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.14)$$

L_{sp} : 音声レベル[dB], L_{wsp} : 音声のパワーレベル[dB]

表 3.2 に話し方に対応する音声レベルと音声のパワーレベルを示す^[25]。これをもとに，音声のパワーレベルについて本研究では通常会話の 68 dB とする。

また，音源-受音点距離 r については，図 3.9 に示すような近距離会話，中距離会話を想定して， $r = 1, 4 \text{ m}$ の 2 条件とした。

表 3.2 話し方に対する音声レベルと音声のパワーレベル^[25]

話し方	会話者から1 m離れた地点での音声レベル[dB]	音声のパワーレベル[dB]
リラックスした	54	62
普通の状態	60	68
高めた状態	66	74
大声をはる状態	72	80

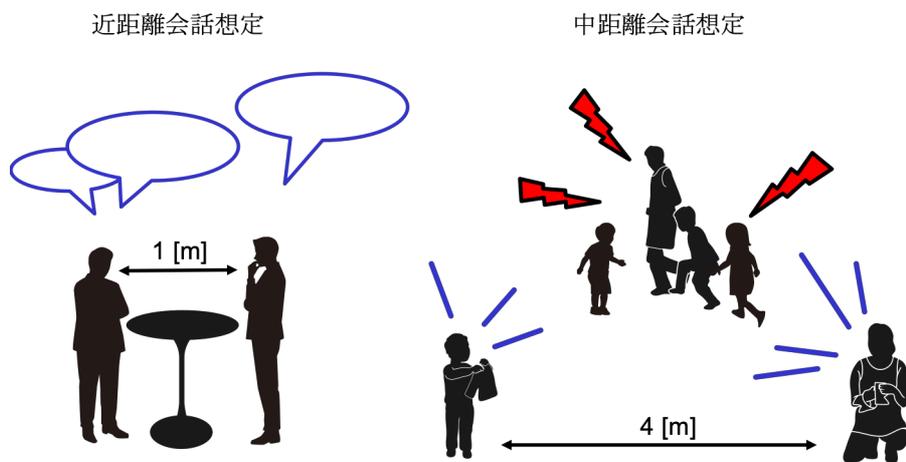


図 3.9 近距離会話，中距離会話のイメージ

暗騒音レベル

本研究において、暗騒音レベルは 2.1.1 に示すように床面積あたりの騒音源について検討する。騒音源は図 3.10 に示すような床面積に比例して増大する空調騒音や多群会話とする。それぞれの音の大きさについて、空調騒音は 40 dB 程度、多群会話は 60 dB 程度と考えられる^[26]。暗騒音レベルで 40, 60 dB 程度とすると、(2.2)より床面積あたりの騒音源のパワーレベルは 30, 50 dB 相当となるので、この 2 条件について検討する。

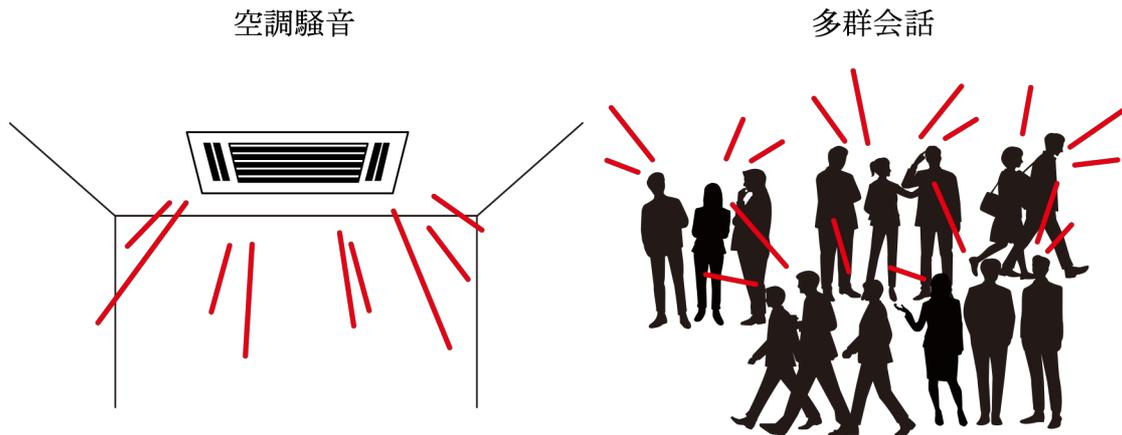


図 3.10 床面積に比例して増大する騒音源

音声レベルと暗騒音レベルを求めることで、SN 比は以下の式で算出される。

$$\begin{aligned}
 SNR &= L_{sp} - L_n & (3.15) \\
 &= \left[L_{wsp} + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \right] - \left[L_{ws} - 10 \lg \left(\frac{A}{S_f} \right) + 6 \right] \text{ [dB]}
 \end{aligned}$$

求めた SN 比を、図 3.11, 図 3.12 に示す。(e)DIN の推奨値は(c)と近い傾向を示しているので除外した。

(a)~(c)の 3 条件の SN 比について図 3.11 に示す。音源-受音点距離が臨界距離より小さい 1 m の場合、直接音が支配的であるため、各吸音設計目標値の天井高に対する変化が影響している。(a)残響時間一定の場合、天井高が高くなると吸音が大きくなる関係で SN 比が大きくなるが、天井高が低い時は SN 比が小さく、明瞭度が低くなることが示唆される。(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高によらず騒音源に対する減衰量が一定なので SN 比も変わらない。(c)2 ケースの吸音面積が一定の場合、(a), (b)の中間を示している。また、騒音源のパワーレベルが大きい方が SN 比は小さくなっているが、天井高に対する変化幅は変わらない。

音源-受音点距離が臨界距離より大きい 4 m の場合、拡散音が支配的であるため、各吸音設計目標値の天井高に対する変化の影響が小さく、3 条件で変化幅に違いはほとんどないと言える。拡散音レベルと暗騒音レベルの大きさは、両者とも吸音の程度で同程度

変化するためである。また、直接音の影響が小さいため音声レベルは小さく、騒音源が大きい方が SN 比はマイナスの値を取り、STI は低くなっていると考えられる。(d)の平均吸音率が一定の場合の SN 比について図 3.12 に示す。図 3.11 の(c)と似た傾向を示しているが、吸音の程度が小さいため、SN 比は若干小さい値である。

SN 比を算出し、MTF を得た。上記の条件で算出した STI を図 3.13、図 3.14 に示す。暗騒音がない場合とある場合の変化をみるため、暗騒音がない場合の STI も併記した。

(a)~(c)3 条件の STI を図 3.13 に示す。音源-受音点距離が臨界距離より小さい 1 m の場合についてである。この場合、直接音エネルギーが支配的である。暗騒音がない時、(a)残響時間一定の場合は天井高が低いと拡散音エネルギーの比率が大きくなることで STI は小さく、(b)床面積あたり吸音面積一定の場合は天井高が高いと残響時間が長くなることで STI が小さく、(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定の場合はその中間的な性質を示している。それに対し、暗騒音がある場合、直接音エネルギーと拡散音エネルギーを合わせて音声レベルとするので、直接音エネルギーと拡散音エネルギーが大きいほど暗騒音レベルに対する SN 比が大きく、STI も大きくなる。 $L_{ws} = 30$ dB の場合、SN 比を見ると吸音設計目標値と天井高の変化によって 23~28 dB 程度に変化するが、SN 比が +20 dB 以上確保されると SN 比の補正が STI に与える影響がほとんどなくなる^[27]。そのため、図 3.6 に示すような暗騒音と音源-受音点距離を考慮しない STI と同じ傾向を示す。 $L_{ws} = 50$ dB の場合、SN 比は吸音設計目標値と天井高の変化によって 3~8 dB 程度に変化しており、SN 比の補正の影響を受ける。(a)残響時間一定の場合、天井高が低いと暗騒音レベルが増大するため STI が低く、(b)床面積あたり吸音面積が一定の場合、SN 比は一定に保たれているものの、天井高が高いと残響時間が長くなることで STI は低い。(c)は(a)、(b)の中間的な性質を示す。

音源-受音点距離が臨界距離より大きい 4 m の場合、拡散音エネルギーが支配的であり、SN 比は吸音設計目標値ごとにほとんど違いはない。暗騒音がない時、(a)残響時間一定の場合、天井高が低いと臨界距離が小さくなる影響で STI が若干小さく、(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高による臨界距離の変化は小さいが、天井高が高い時残響時間の変化により STI は小さい。(c)は(a)、(b)の中間的な性質を示す。 $L_{ws} = 30$ dB の場合、STI の変化は $r = 1$ m での $L_{ws} = 30$ dB の場合と同じであるが、SN 比は +20 dB を若干下回るため、STI は $r = 1$ m の場合の STI に対し若干小さい値を示す。 $L_{ws} = 50$ dB の場合、SN 比は 0~-1 dB 程度で若干変化する。SN 比が確保されず SN 比の補正による影響が大きいため、暗騒音がない時に比べて天井高に対する変化幅が小さい。(a)残響時間一定の場合、天井高に対する SN 比の変化がほとんどなく、天井高が変化しても STI は 0.4 程度である。(b)床面積あたり吸音面積一定の場合、天井高が高いと残響時間が長くなることで STI が小さいのは変わらないが、SN 比の補正による影響が大きいため、天井高に対する変化幅は小さい。(c)は(a)、(b)の中間的な性質を示す。

(d)の平均吸音率が一定の場合の STI について図 3.14 に示す。図 3.13 の(c)と似た傾向を示しているが、吸音の程度が小さいため、STI は小さめの値である。だが、吸音の程度の変化より SN 比の補正の影響が大きい $r = 4$ m かつ $L_{ws} = 50$ dB の場合のみ、(c)との差が 0.02 程度でとても近い値を示している。

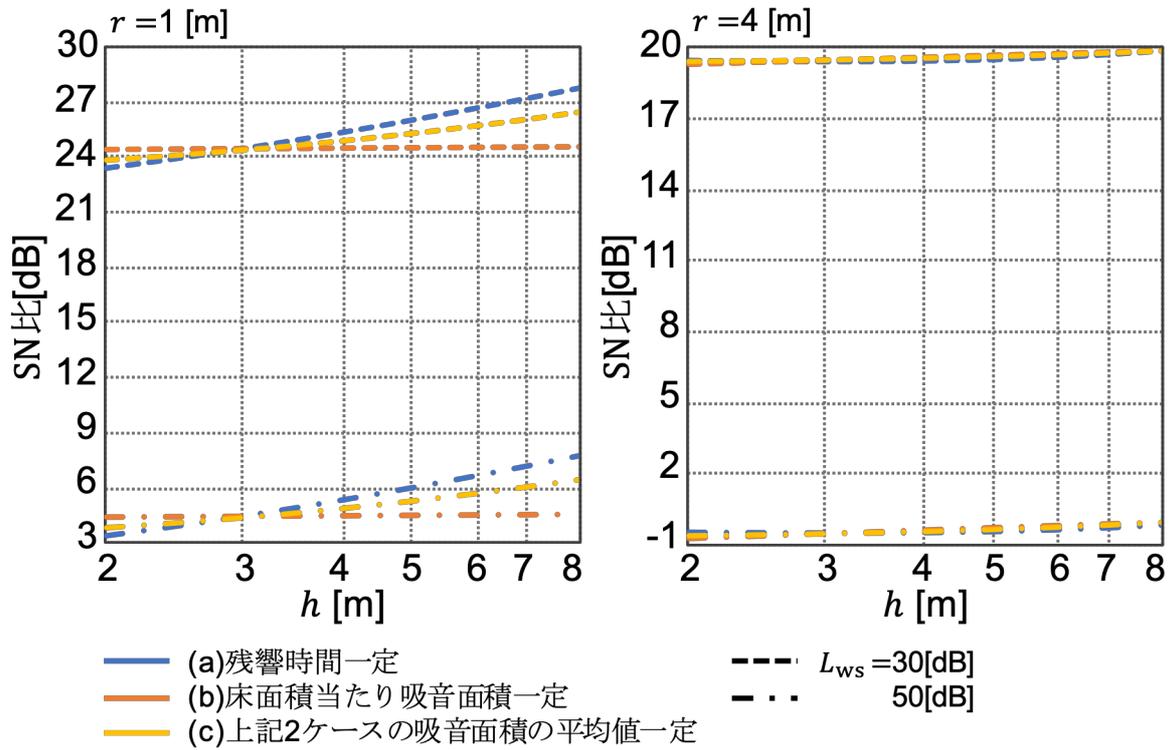


図 3.11 学校教室想定天井高に対する SN 比の変化：(a)～(c)3 条件の場合

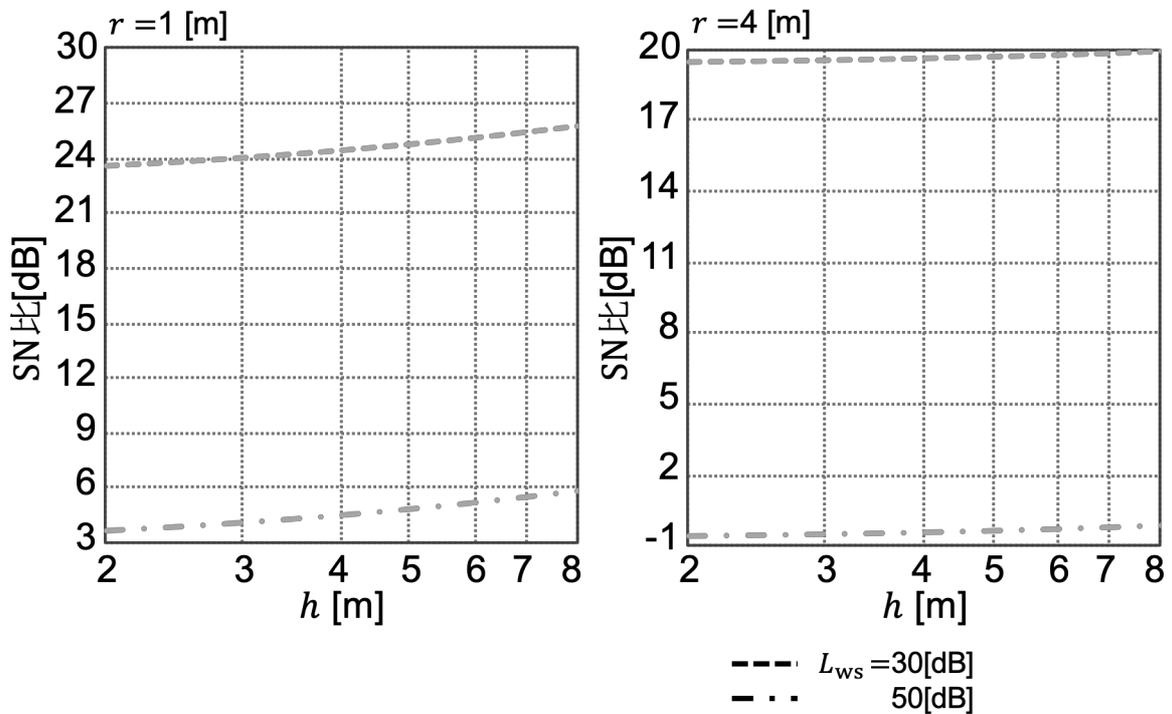


図 3.12 学校教室想定天井高に対する SN 比の変化：(d)平均吸音率一定の場合

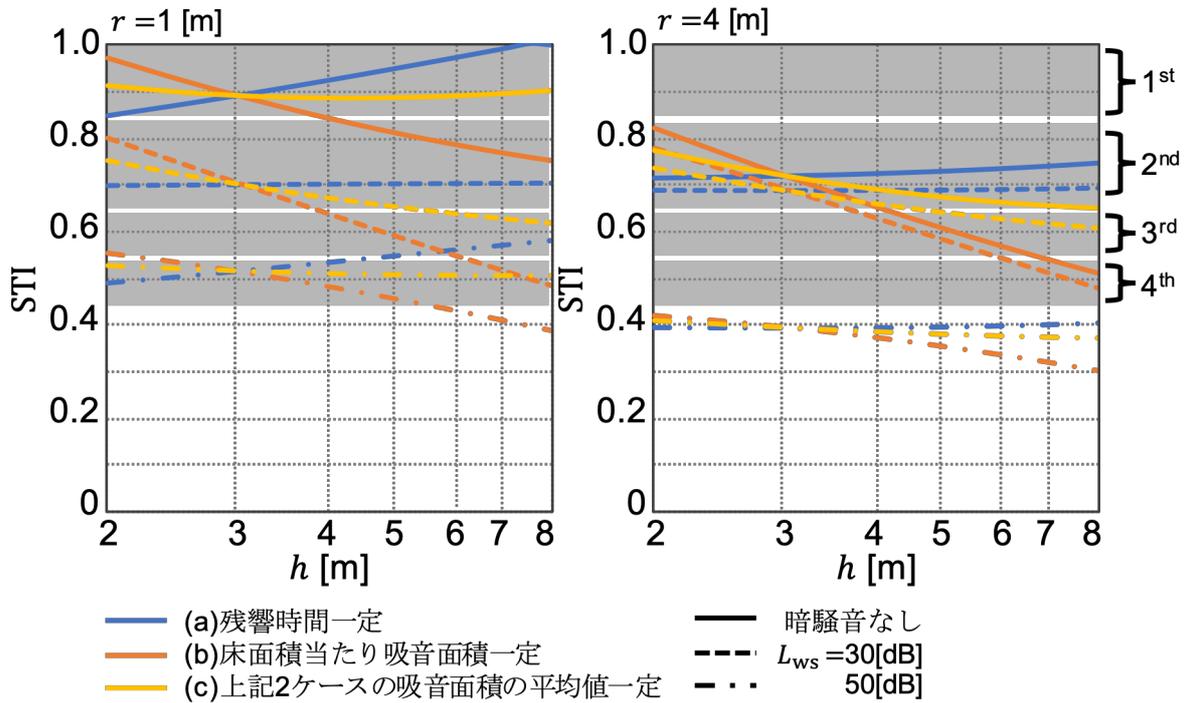


図 3.13 学校教室想定 of 暗騒音を考慮した STI の変化 : (a)~(c)3 条件の場合

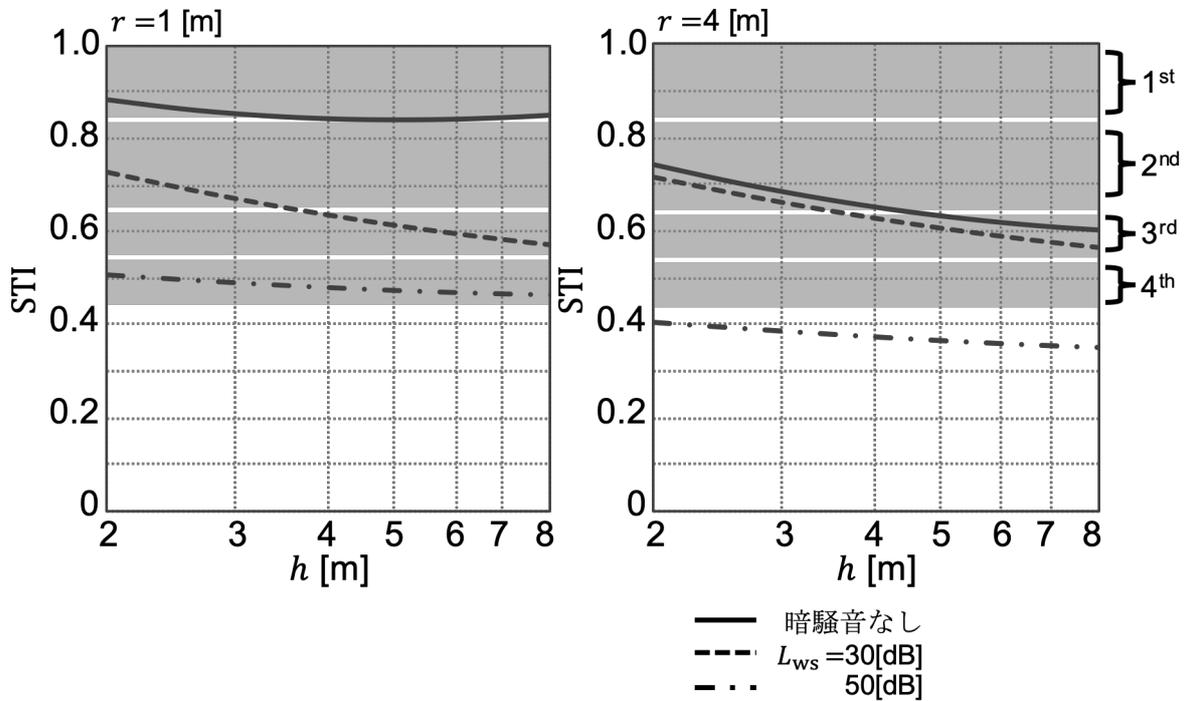


図 3.14 学校教室想定 of 暗騒音を考慮した STI の変化 : (d)平均吸音率一定の場合

3.3 待合室を想定した音声伝送性能の比較

3.3.1 想定条件

本節では、前節で示した音声伝送性能の比較について、床面寸法の変化による影響も含めて更に検討を深めるため、2.3.2で示したような様々な床面の大きさが考えられる待合室を想定して比較する。

図 3.15 に示すような床面が正方形で 1 辺 $d=4,8,16$ m の空間を想定し、第 2 章で示した吸音設計目標値(e)の DIN は B3 の待合室を含む推奨値とし、DIN の $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m(H)}$ の時の残響時間を(a)~(c)の基準値として比較を行う。また、(d)の平均吸音率については $\bar{\alpha}_0 = 0.15$ とする。天井高 h は $2 \sim 8$ m の範囲で変化する。

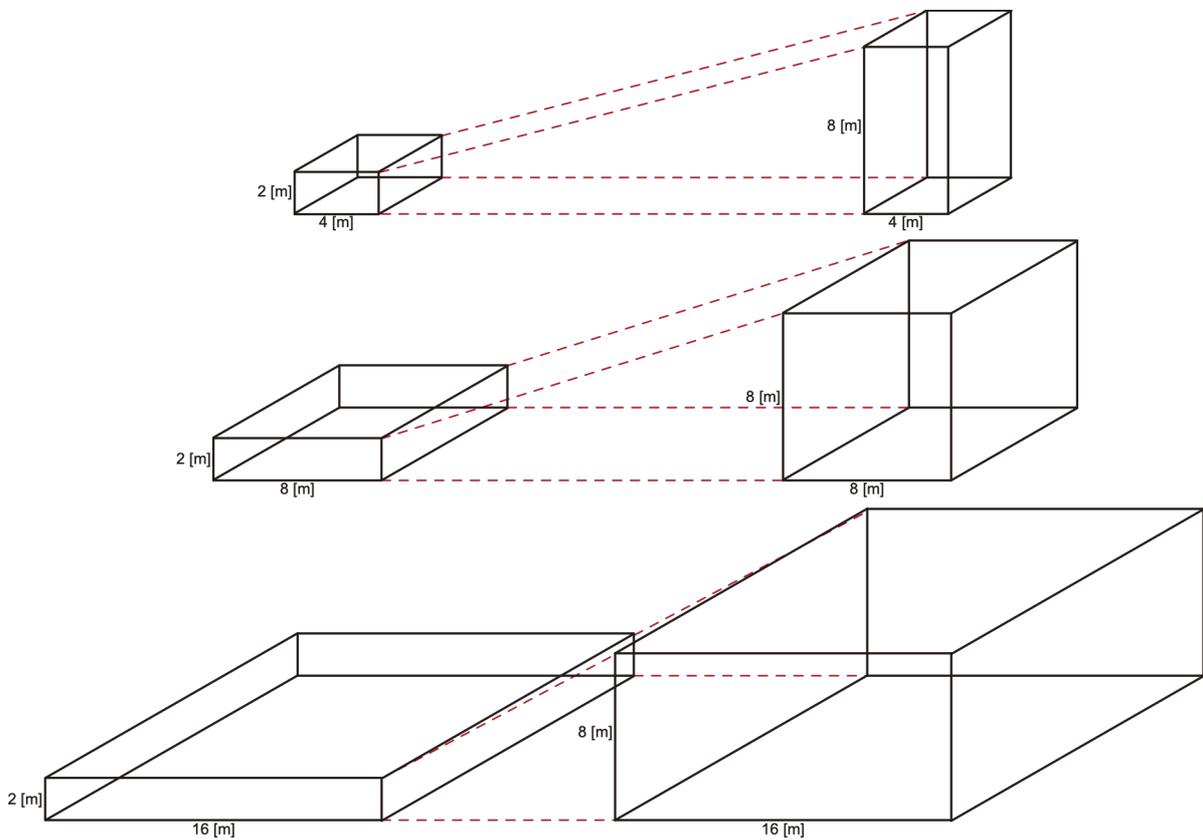


図 3.15 室寸法のイメージ

3.3.2 C_{50} による比較

学校教室想定と同じく，図 3.16 に拡散音場を仮定して算出した C_{50} の室寸法の変化に対する変化を示す。吸音設計目標値(a)~(c)，(e)の場合，床面の寸法が変化しても C_{50} の変化には影響がないが，(d)平均吸音率一定の場合のみ床面寸法の影響を受ける。したがって，学校教室想定を同じく，(a)は残響時間が一定のため C_{50} の値が変化せず，(b)床面積あたりの吸音面積一定は天井高が高いと残響時間が長くなり， C_{50} が小さく，明瞭度が悪いと考えられる。また，(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定は(a)と(b)の中間的な性質を示し，(e)と似た傾向を示す。(d)平均吸音率一定の場合，天井高に対する変化は(c)，(e)と似た傾向を示すが，床面寸法3条件で C_{50} の値が大きく変化する。天井高 2.5~5 m の範囲で C_{50} は床面寸法と天井高の変化により-3~3 程度まで変化し，他の吸音設計目標値より明瞭度の変化が大きくなること示唆される。

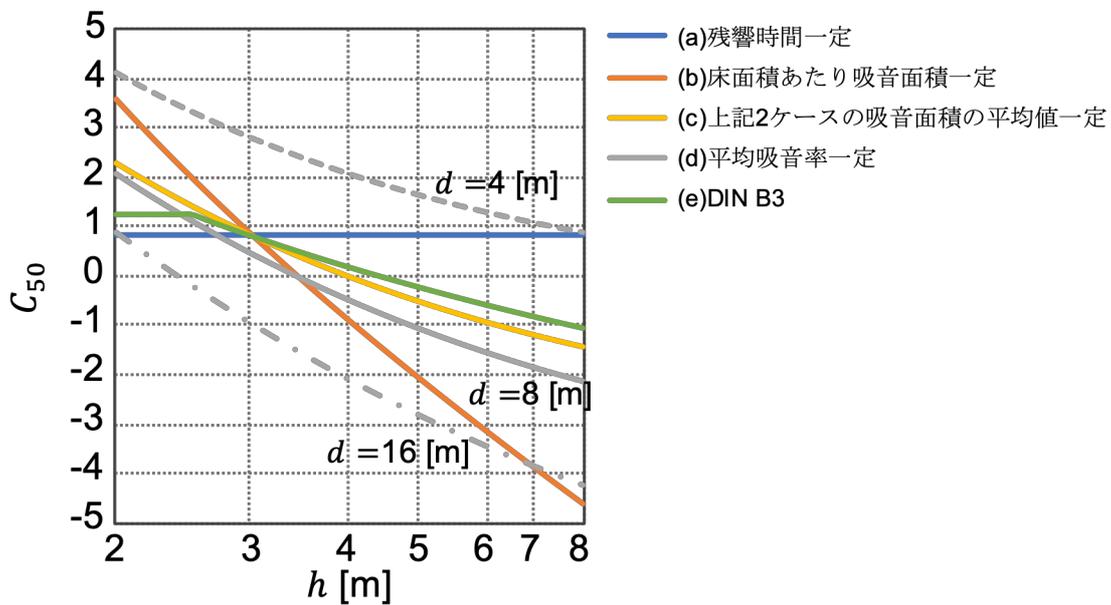


図 3.16 待合室想定 of 室寸法の変化に対する C_{50} の変化

3.3.3 STIによる比較

学校教室想定と同じく，待合室想定でも以下に示す STI について検討を行った。前述した通り，床面は正方形で1辺 $d=4,8,16$ mを想定する。

- 暗騒音なし，音源-受音点距離考慮なし
- 暗騒音なし，音源-受音点距離考慮あり
- 暗騒音あり，音源-受音点距離考慮あり
- 暗騒音の考慮なし，音源-受音点距離考慮なし

(3.8)より求めた MTF から算出した STI を図 3.17 に示す。グラフの右に示す 1st~4th は音声伝送性能のクラスである。この場合，残響時間の変化のみ影響を受けて STI が変化する。(a)残響時間一定の場合，室寸法が変化しても残響時間が一定なので，STI は 0.6 程度で一定である。学校教室想定では STI は 0.7 程度で一定であったが，待合室想定は学校教室想定より長い残響時間を基準値としているため低い値を示す。(b)床面積あたり吸音面積一定の場合，天井高が高いと残響時間が長くなることで STI は小さくなり，建築空間では STI は 0.6 以上が望ましいと考えられているが，天井高 3 m 程度で 0.6 を下回る。また，学校教室想定と同じく天井高 2.5~5 m の範囲でランクが 2nd から 4th に変化するため，室寸法によって大きく音声伝送性能が変化し，快適な音環境性能を確保できないことが示唆される。(c)2 ケースの吸音面積の平均値一定は(a)，(b) の中間的な性質を示し，(e)ととても近い値を示す。また，天井高 2.5~5 m の範囲で両者とも STI は 0.1 程度の変化幅である。

(d)平均吸音率一定の場合，天井高に対する STI の変化幅は(c)，(e)と同程度である。しかし，(d)のみ床面寸法によっても変化し，床面 1 辺 4,8,16 m かつ天井高 2.5~5 m の範囲で STI は 0.25 程度の変化幅をとる。

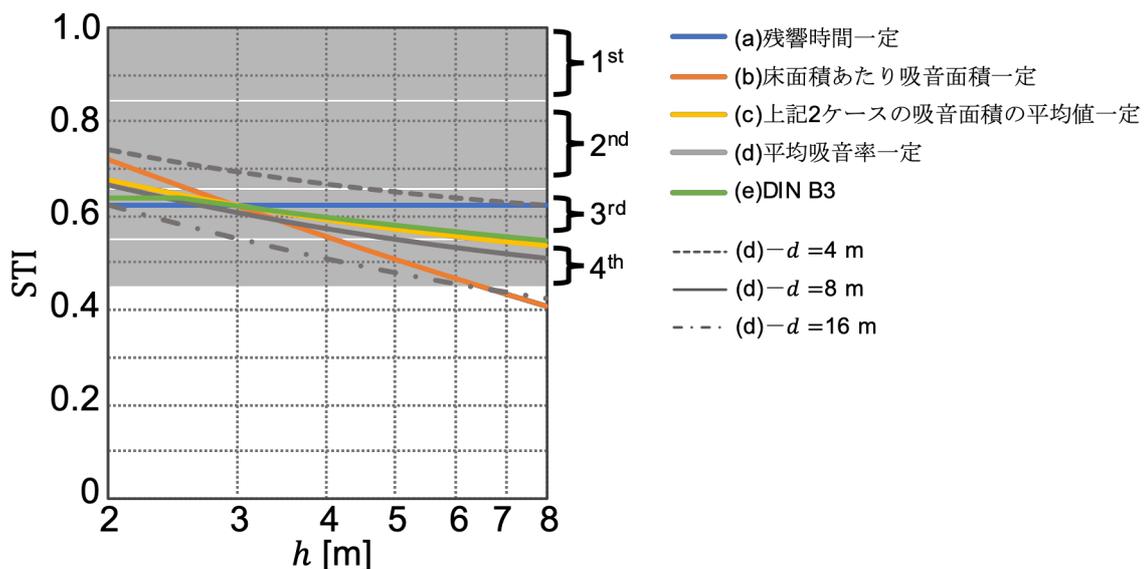


図 3.17 待合室想定での STI の変化

- 暗騒音の考慮なし，音源-受音点距離考慮あり

待合室想定でも，暗騒音がない空間における音源-受音点距離を考慮した STI について比較する。距離の変化の影響を検討するため，臨界距離を求めた。

臨界距離

臨界距離は吸音の度合いを表す室定数の値によって変化し，(3.13)に示すように室の平均吸音率と表面積が関係するので，(d)平均吸音率一定のみでなく(a)～(e)全ての吸音設計目標値の場合でも，天井高と床面寸法によって変化する。

図 3.18 に室寸法の変化に対する臨界距離の変化を示す。床面寸法でグラフを分けて示す。各吸音設計目標値の天井高に対する臨界距離の変化は，学校教室想定と同じ傾向である。(b)床面積あたり吸音面積一定を除いて，床面寸法が大きく，天井高が高いほど吸音面積が大きく，臨界距離が大きくなる傾向を示す。また，床面 1 辺 16 m の場合，天井高の変化に対する臨界距離の変化幅が最も大きい。床面寸法が大きい場合，天井高が高くなることによる表面積の増加率が大きいためである。

床面 1 辺 4 m の場合，臨界距離が 1 m より大きいのは(a)残響時間一定と(d)平均吸音率一定の天井高が 7 m 以上の時のみで，変化幅は(a)残響時間一定が最も大きく，天井高 2.5～5 m の範囲で 0.3 m 程度である。この床面寸法の場合，天井高による臨界距離の変化幅は小さいが，会話者との距離が 1 m 以内でも(a)残響時間一定と(d)平均吸音率一定の天井高が 7 m 以上の時を除いて，拡散音エネルギーが支配的である。

床面 1 辺 8 m の場合，(a)～(e)全て天井高 2 m 以上で臨界距離は 1 m 以上である。また，臨界距離の変化幅は(a)残響時間一定が最も大きく，天井高 2.5～5 m の範囲で 0.6 m 程度である。この床面寸法の場合，天井高 2 m 以上で会話者との距離が 1 m 以内だと直接音エネルギーが支配的であるが，会話者との距離が 2 m 以上だと(a)残響時間一定の天井高が 7 m 以上の時を除いて，拡散音エネルギーが支配的である。

床面 1 辺 16 m の場合，(a)～(e)全て天井高 2 m 以上で臨界距離は 2 m 以上である。臨界距離が 4 m より大きいのは，(a)残響時間一定の天井高が約 6 m 以上の時のみで，変化幅は(a)残響時間一定が最も大きく，天井高 2.5～5 m の範囲で 1.2 m 程度である。この床面寸法の場合，天井高による臨界距離の変化幅が大きく，吸音設計目標値の違いによる臨界距離の変化が顕著に現れると考えられる。

また，(d)平均吸音率一定は室規模に関わらず $\bar{\alpha}_0=0.15$ であるので，床面 1 辺 4 m の場合は他の吸音設計目標値より臨界距離大きめ，床面 1 辺 8 m の場合は同程度，床面 1 辺 16 m の場合は小さめである。

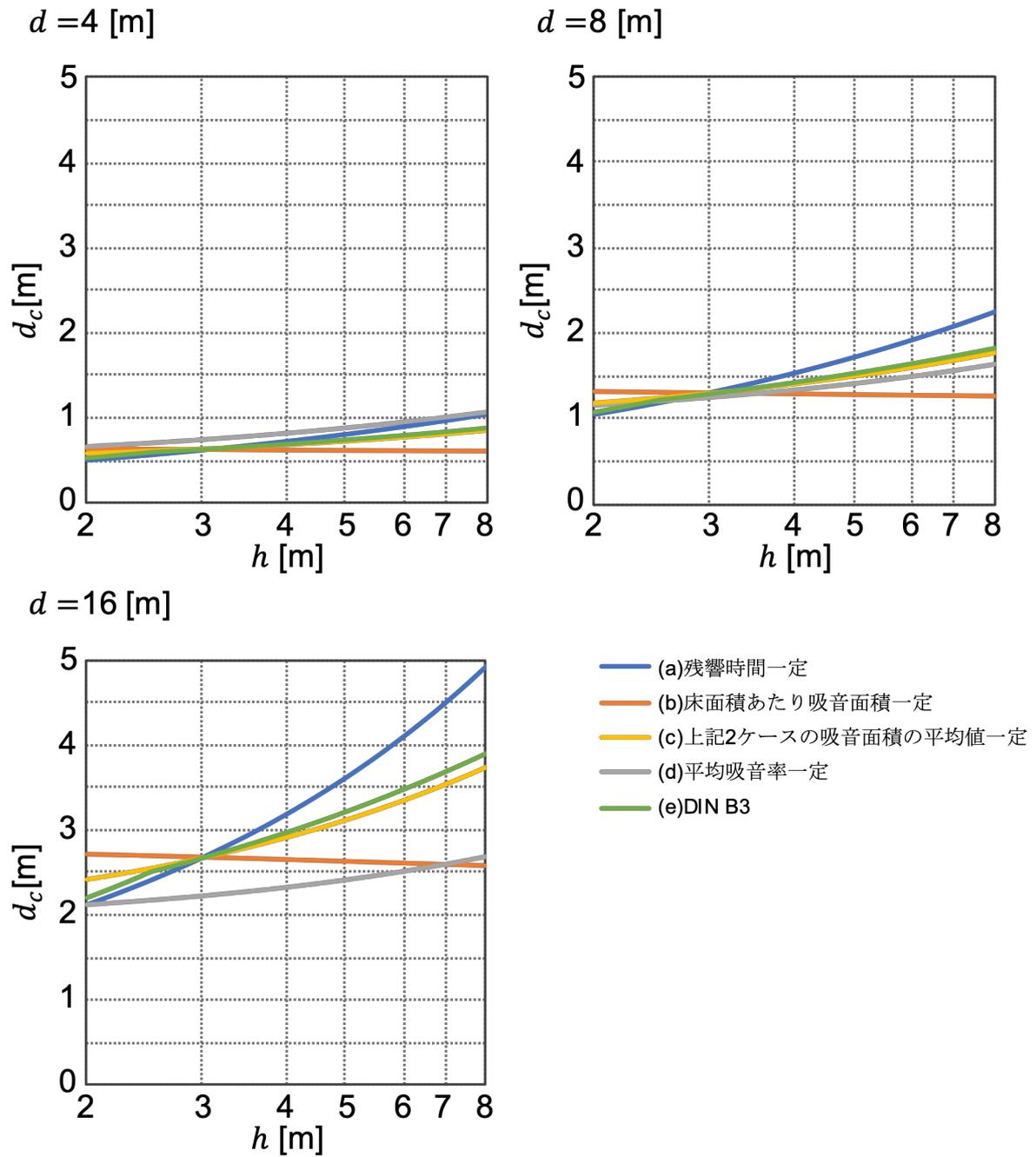


図 3.18 待合室想定 of 臨界距離の変化

待合室想定条件で(3.9)より求めた MTF から STI を算出し、図 3.19、図 3.20、図 3.21 に示す。床面寸法によってグラフを分けて示す。各吸音設計目標値の天井高の変化に対する STI の変化は、学校教室想定と同じ傾向である。

どの吸音設計目標値でも、床面寸法が大きいほど、音源-受音点距離の変化に対する STI の変化が大きい。これは、床面寸法が大きいほど吸音面積が大きく、臨界距離が大きいことが関係している。

床面 1 辺 4 m の場合、(a)残響時間一定と(d)平均吸音率一定の天井高 7 m 以上の時のみ臨界距離が 1 m を越え、直接音エネルギーの比率が大きくなる。このため、(d)平均吸音率一定の音源-受音点距離 1 m の時、STI の変化は天井高 7 m 付近で上昇傾向になる。また、音源-受音点距離が天井高 2~8 m における(a)~(e)の臨界距離より大きい 2.4 m の場合、図 3.17 に示す拡散音場予測の STI と近い値を示している。

床面 1 辺 8 m の場合、(a)残響時間一定の天井高 7 m 以上の時のみ、臨界距離が 2 m より大きくなる。このため、(a)残響時間一定の音源-受音点距離 2 m の時、天井高 7 m 付近で STI の傾きが若干急になる。また、(a)~(e)全ての条件で、天井高 2~8 m における臨界距離より大きい音源-受音点距離 4.8 m の時、拡散音場予測の STI と近い値を示している。

床面 1 辺 16 m の場合、(a)残響時間一定の天井高 6 m 以上の時のみ、臨界距離が 4 m より大きくなる。このため、(a)残響時間一定の音源-受音点距離 4 m の時、天井高 6 m 付近で STI の傾きが若干急になる。また、(a)~(e)全ての条件で、天井高 2~8 m における臨界距離より大きい音源-受音点距離 8 m の時、拡散音場予測の STI と近い値を示している。

以上より、天井高の変化に加え、床面寸法の変化が暗騒音のない空間での音声明瞭度に与える傾向がわかった。

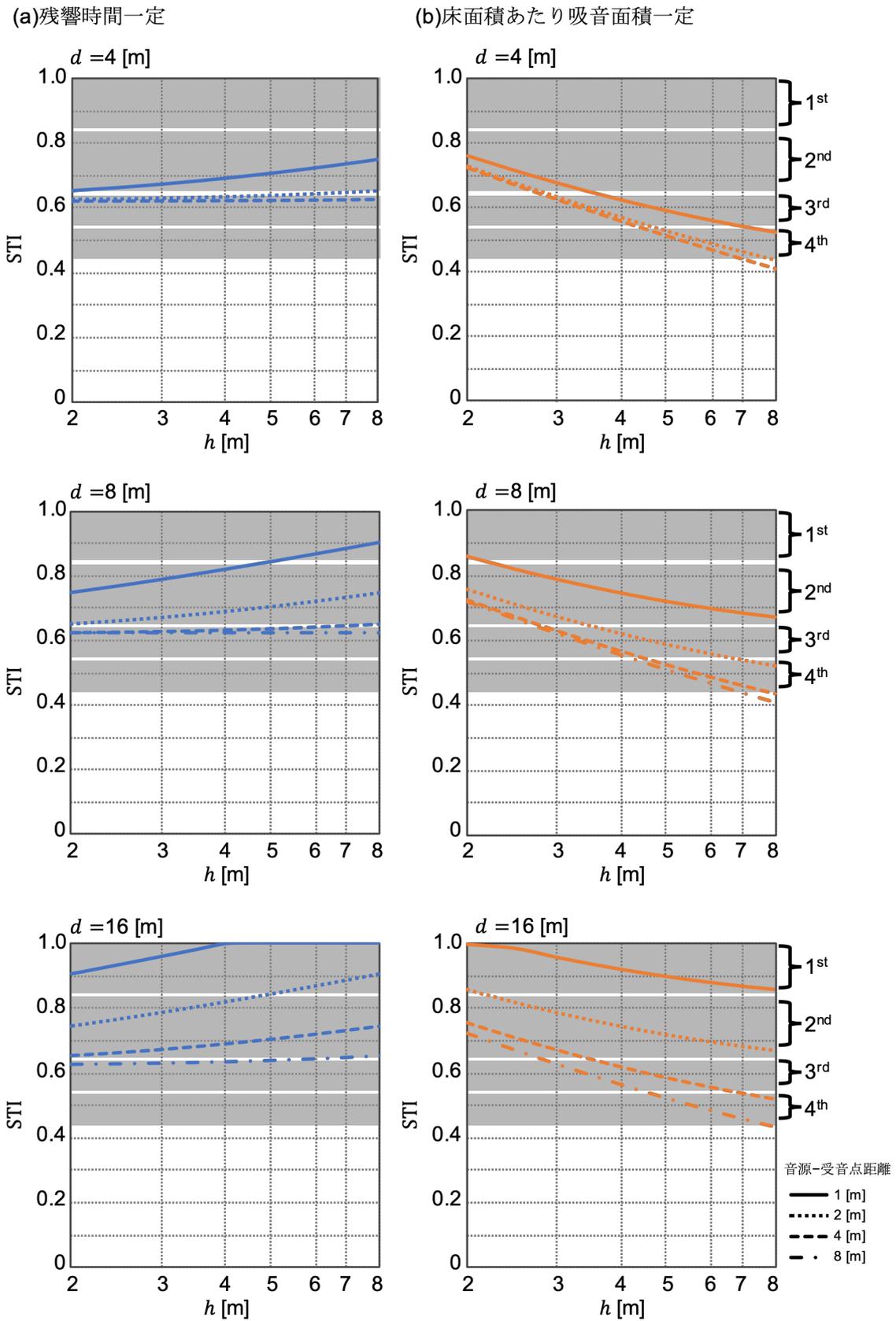


図 3.19 待合室想定 of 音源-受音点距離を考慮した STI : (a), (b) の場合

(c)(a),(b)2ケースの吸音面積の平均値一定 (d)平均吸音率一定

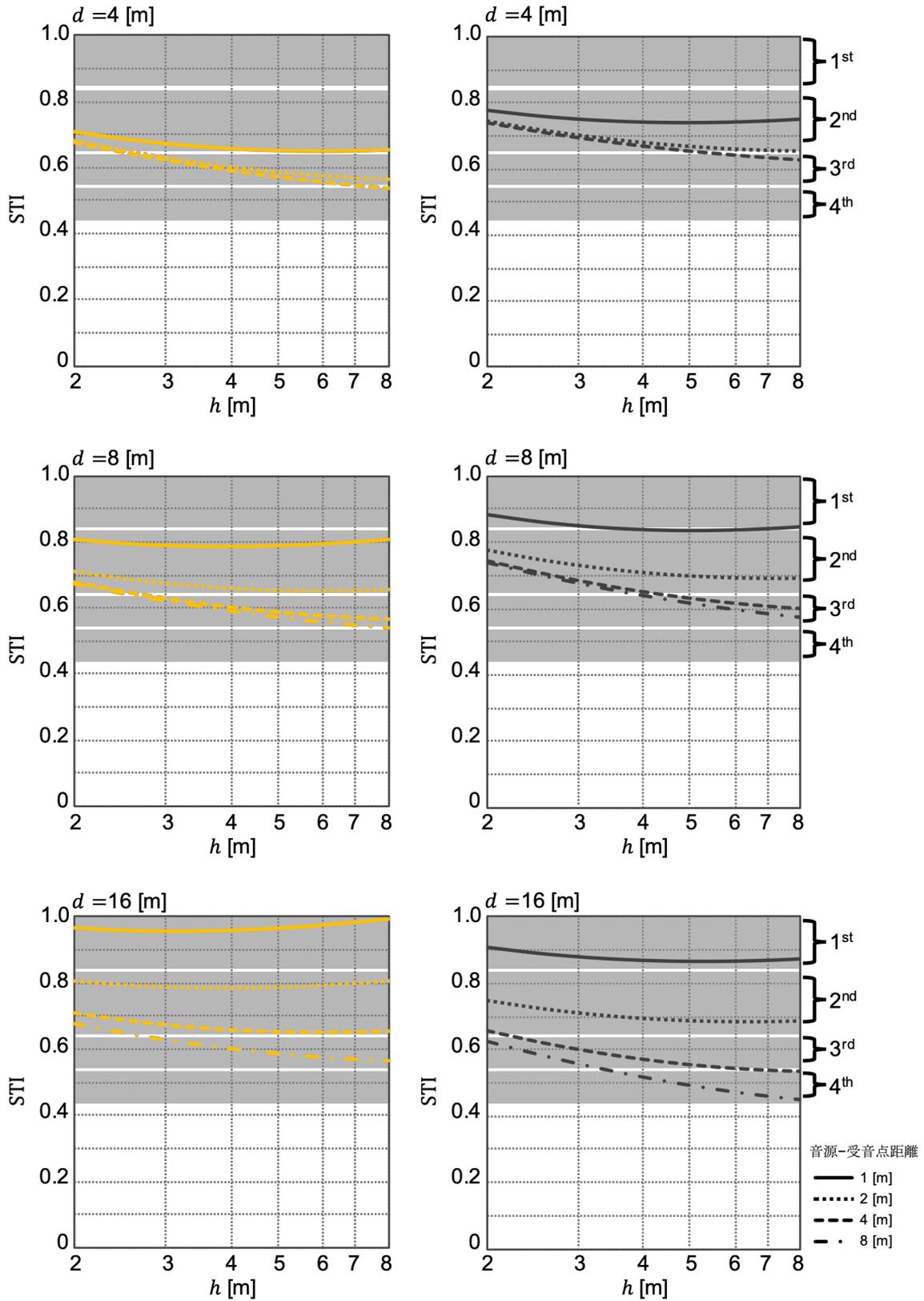


図 3.20 待合室想定 of 音源-受音点距離を考慮した STI : (c), (d) の場合

(e)DIN B3

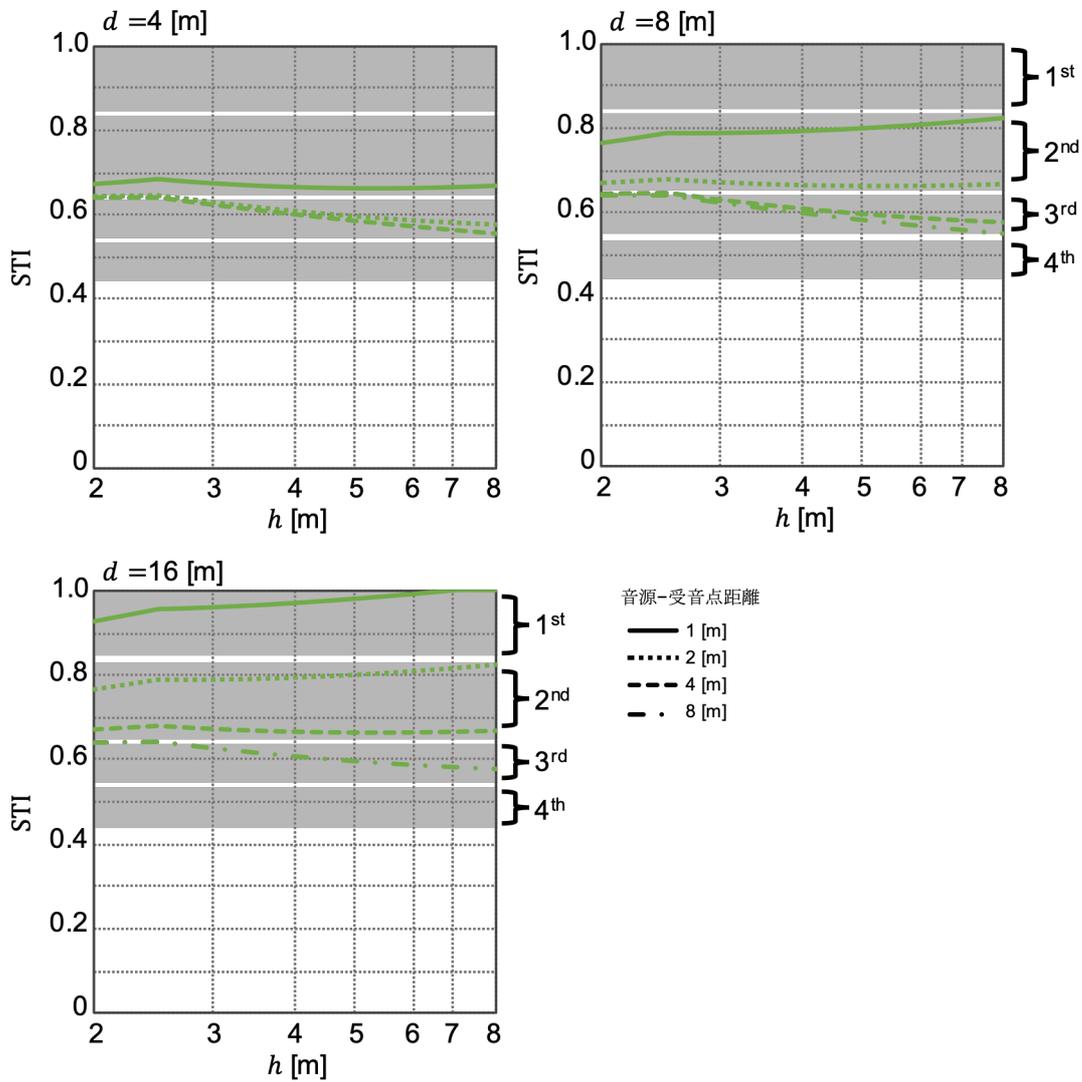


図 3.21 待合室想定 of 音源-受音点距離を考慮した STI : (e) の場合

- 暗騒音の考慮あり，音源-受音点距離考慮あり

暗騒音がある空間における音声伝送性能は，(3.2)にあるように暗騒音レベル L_n と音声レベル L_{sp} の差 SN 比を算出して MTF を求める。

音声レベル

音声のパワーレベルについて学校教室想定と同じく，通常会話の 68 dB とする。また，音源-受音点距離 r についても， $r = 1, 4 \text{ m}$ の 2 条件とした。

暗騒音レベル

床面積あたりの騒音源についても学校教室想定と同じく，30, 50 dB の 2 条件とした。

以上の条件より求めた SN 比を図 3.22，図 3.23 に示す。(e)DIN の推奨値は(c)と近い傾向を示しているので除外した。

(a)~(c)の 3 条件の SN 比について図 3.22 に示す。音源-受音点距離 1 m の場合，床面 1 辺 4 m の時，臨界距離が小さく拡散音エネルギーが支配的であるため，各吸音設計目標値の天井高に対する変化の影響が小さい。床面 1 辺 8,16 m の時，臨界距離が 1 m より大きく直接音が支配的であるため，各吸音設計目標値の天井高に対する変化が影響している。各吸音設計目標値の天井高の変化に対する SN 比の変化は学校教室想定と同じ傾向である。また，床面 1 辺 16 m の方が床面 1 辺 8 m の時より直接音エネルギーの比率が大きいいため，天井高に対する変化幅が大きい。

音源-受音点距離 4 m の場合，床面 1 辺 4,8 m の時，拡散音エネルギーが支配的であるため，各吸音設計目標値の天井高に対する変化の影響が小さく，3 条件で変化幅に違いはほとんどないと言える。床面 1 辺 16 m の場合のみ，(a)残響時間一定の天井高 7 m の時，臨界距離が 4 m より大きくなるため，SN 比は若干上昇している。

(d)の平均吸音率が一定の場合の SN 比について図 3.23 に示す。音源-受音点距離 1 m の場合，床面 1 辺 4 m の時の臨界距離は 1 m 前後であるため，天井高に対する SN 比の変化は，床面 1 辺 8,16 m の時に比べて若干緩やかな傾きを示す。

音源-受音点距離 4 m の場合，床面 1 辺 4,8 m の時，天井高に対する変化の影響が小さい。床面 1 辺 16 m の場合のみ，天井高 7 m の時，臨界距離が 4 m より大きくなるため，SN 比は若干上昇している。

上記の条件で算出した STI を図 3.24, 図 3.25 に示す。学校教室想定と同じく、暗騒音がない場合とある場合の変化をみるため、暗騒音がない場合の STI も併記した。

(a)~(c)3 条件の STI を図 3.24 に示す。音源-受音点距離 1,4 m 両者とも、暗騒音がない場合は床面寸法が大きいほど STI の値が大きいのに対し、暗騒音がある場合は床面寸法が大きいほど STI の値が小さい。これは、暗騒音がない場合は、音声の直接音エネルギーと拡散音エネルギーの見かけの SN 比により MTF を算出しているのに対し、暗騒音がある場合は、直接音エネルギーと拡散音エネルギーを合わせて音声レベルとして暗騒音レベルとの SN 比により MTF を算出しているためである。拡散音エネルギーは床面寸法が大きいほど小さく、STI は暗騒音がない場合は大きく、暗騒音がある場合は小さくなる。そのため、床面寸法が大きいほど暗騒音の有無による STI の変化幅が大きい。

音源-受音点距離 1 m の場合、 $L_{ws} = 30$ dB の時、SN 比は室寸法が変化しても +20 dB 以上確保されるため、拡散音場予測の STI と近い値を示す。 $L_{ws} = 50$ dB の場合、SN 比は天井高の変化により床面 1 辺 4 m の時最大 6.5~8.5 dB, 8 m の時最大 2.5~6.5 dB, 16 m の時最大 0.5~6 dB と変化する。床面寸法が大きいと SN 比の変化幅が大きくなり、STI の変化幅も大きくなるのがわかる。

音源-受音点距離 4 m の場合、 $L_{ws} = 30$ dB かつ床面 1 辺 4,8 m の時、SN 比は室寸法が変化しても 20 dB 程度確保されるため、拡散音場予測の STI と近い値を示す。床面 1 辺 16 m の時、SN 比は 14~16 dB 程度のため、STI は拡散音場の予測より若干小さい値を示す。また、臨界距離の関係で、(a)残響時間一定の場合、天井高 7 m 付近で STI は若干上昇する。 $L_{ws} = 50$ dB の場合、SN 比は床面 1 辺 4 m の時約 6 dB, 8 m の時約 -3 dB, 16 m の時は天井高の変化により -6~-4.5 dB 程度となっている。床面寸法が変化すると SN 比が正から負までの値を取るため、例えば天井高 3 m の時、床面 1 辺 4 m の STI 0.5, 床面 1 辺 16 m では 0.2 なので変化幅は 0.3 と大きな値になる。

(d)平均吸音率一定の場合の STI を図 3.25 に示す。天井高、騒音源の変化に対する STI の変化は図 3.24 の(c)(a)と(b)の吸音面積の平均値一定と近い傾向を示している。だが、(d)は室規模によらず $\bar{\alpha}_0 = 0.15$ であるので、STI を(c)と比較すると、暗騒音の有無、音源-受音点距離に関係なく、床面 1 辺 4 m の時は大きい値、16 m の時は小さい値をとることがわかる。2.3.2 で述べた(d)平均吸音率一定の場合のみ、残響時間、暗騒音レベルが天井高のみでなく床面寸法によっても変化する影響があると考えられる。

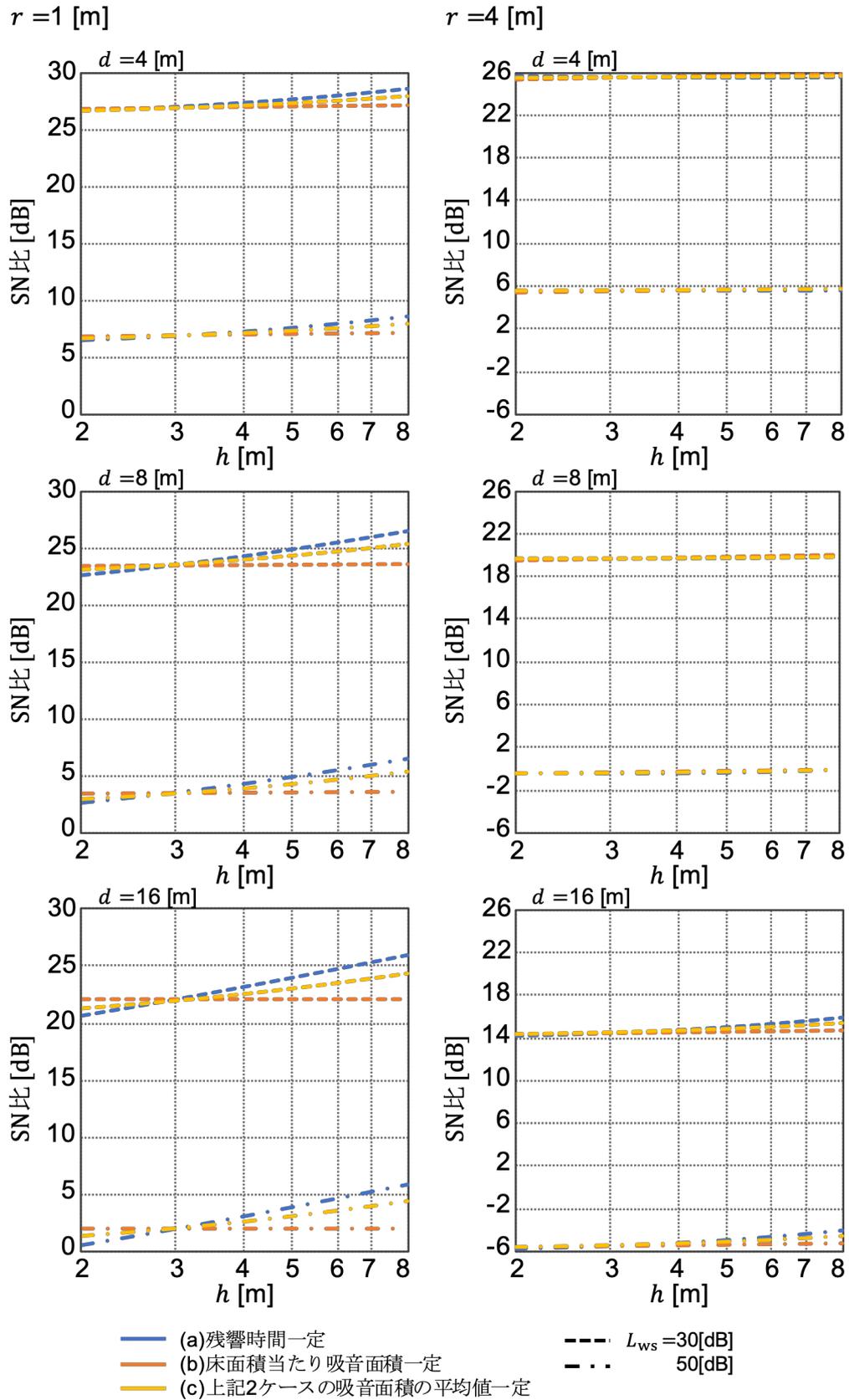


図 3.22 待合室想定 of 室寸法の変化に対する SN 比の変化 : (a)~(c)3 条件の場合

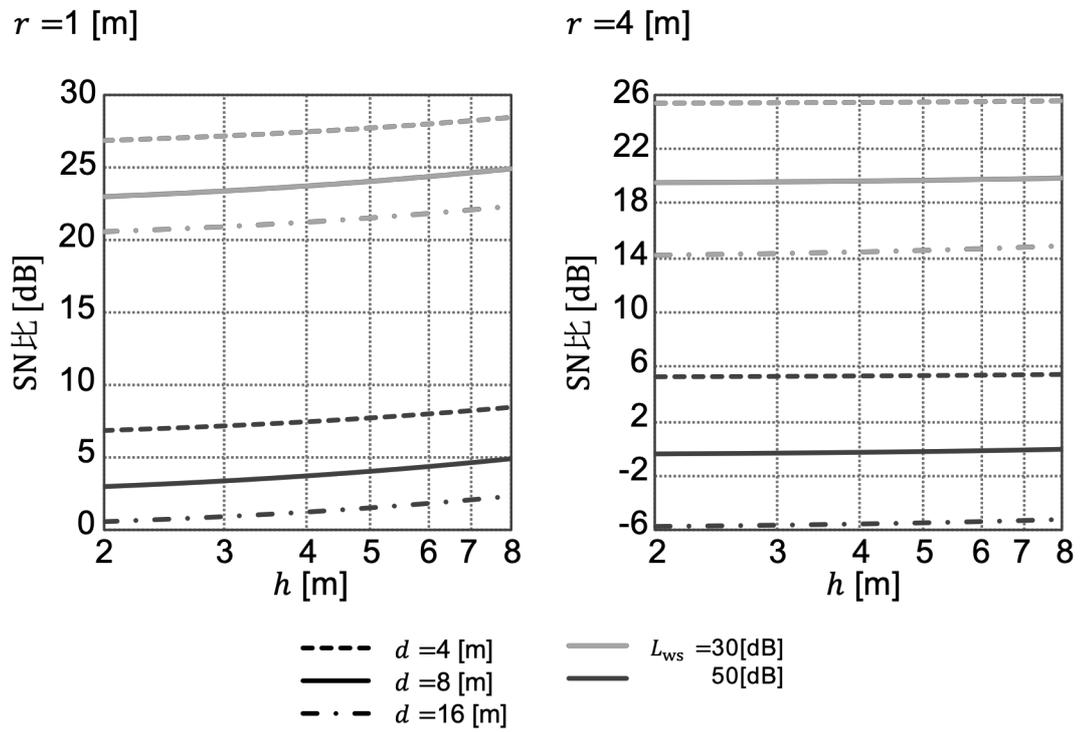


図 3.23 待合室想定の室寸法の変化に対する SN 比の変化 : (d)平均吸音率一定の場合

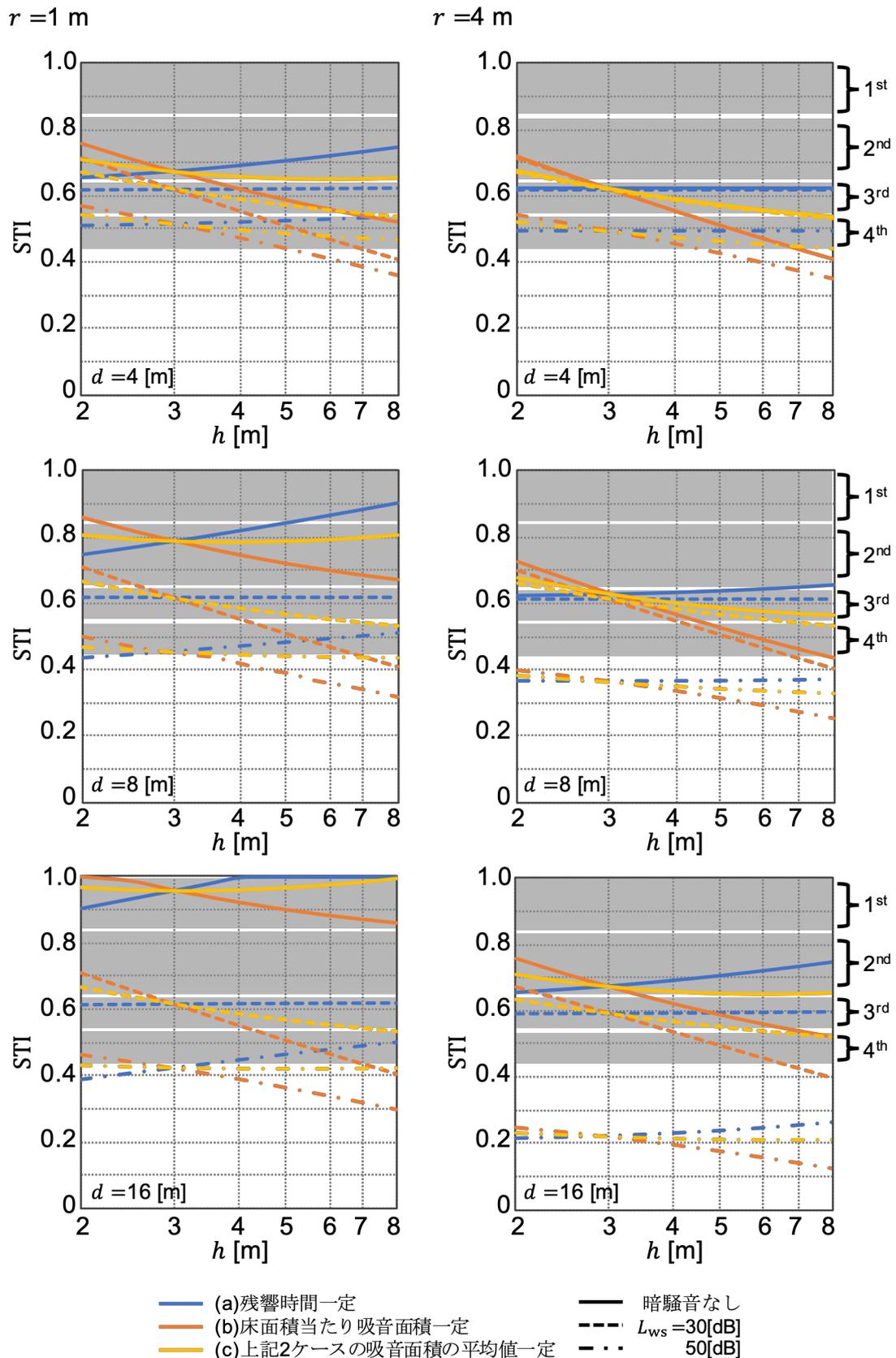


図 3.24 待合室想定の暗騒音を考慮した STI の変化 : (a)~(c)3 条件の場合

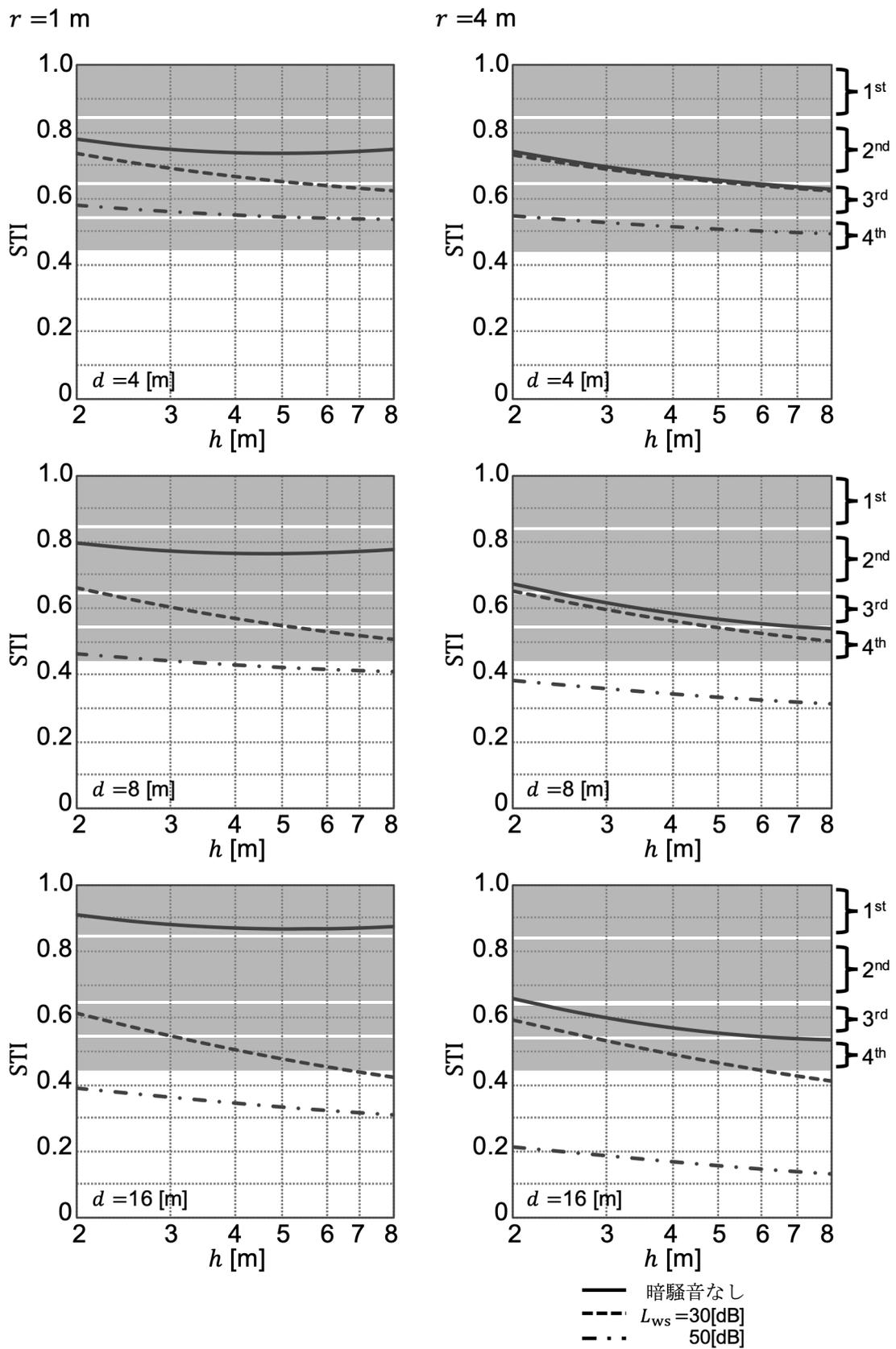


図 3.25 待合室想定の暗騒音を考慮した STI の変化 : (d)平均吸音率一定の場合

第4章

理論的検討の妥当性の検証

4.1 はじめに

4.1.1 実験目的

前章までは、吸音設計目標値の設定方法に関して理論的検討を行った。吸音設計目標値の設定方法によっては、天井高や床面寸法が変化すると残響が長くなる可能性、騒音が増大する可能性が示された。つまり、室寸法が変化することで、音声の聴きとりやすさ、うるささに優劣が生じる恐れがあるということである。

この結果に対し、残響抑制と騒音低減の関係の中で、吸音設計目標値の設定方法が音声の聴き取りと周囲の音に対するうるささについて聴感的に優劣を生じるか、検討を行うことを目的として、被験者実験を行った。

4.1.2 実験内容

居住空間における音声聴取を想定し、吸音設計目標値によって異なる残響と騒音を付加し、「聴き取りにくさ」と「うるささ」について基準条件との聴き比べを行い、音声の聴き取りにくさと周囲の音に対するうるささに変化を生じているか確認を行った。また、聴感的な変化が確認された場合、理論的検討との対応関係について検討を行った。

実験は図 4.1 に示す、東京大学柏キャンパス環境棟地下 1F 無響室内で行った。実験日時は 2018 年 11 月下旬～12 月上旬、被験者は 20～30 代の正常な聴力を持つ男女 21 名、所要時間は被験者 1 人当たり 50 分程度で、説明の時間を含めて 1 時間弱である。



図 4.1 無響室における被験者実験の様子

4.2 実験方法

4.2.1 実験条件

本項では，被験者実験で検討を行う想定条件について説明する。

- 吸音設計目標値の設定
比較する吸音設計目標値は以下の3つとする。
 - (a) 残響時間一定
 - (b) 床面積あたり吸音面積一定
 - (c) 上記2ケースの吸音面積の平均値一定

(a)～(c)の基準値は2.3.2, 3.3で示した待合室想定条件と同じく，DIN B3の8 m×8 m×3 m(H)の時の残響時間とする。また，平均吸音率一定は室規模を限定しない場合，残響時間や騒音レベルが上記の3条件よりも大きく変化することが示唆されるため，DINの推奨値は(c)と近い値を取るため実験条件からは除いた。

- 室条件
想定する空間の床面は2.3.2, 3.3の待合室想定と同じく，便宜的に正方形とし床面1辺4,8,16 mとする。天井高については，現実的な高さを想定して2.5 mと5 mの2条件と設定した。

- 音圧レベル
再生音源の音圧レベルについて以下に示す。
音声レベル
音声音源のパワーレベルは68 dBとし，4.2.3で再生方法について説明するが，直接音と拡散音で別のスピーカから再生するため，それぞれ分けて音声レベルを設定した。(3.14)の音声レベル算出式を直接音レベルと拡散音レベルに分けると，以下の式で表される。

$$L_{\text{spd}} = L_{\text{wsp}} + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.1)$$

$$L_{\text{spr}} = L_{\text{wsp}} + 10 \lg \left(\frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}]$$

L_{spd} : 音声の直接音レベル[dB], L_{spr} : 音声の拡散音レベル[dB]

L_{wsp} : 音声のパワーレベル[dB], r : 音源-受音点距離距離[m], R : 室定数

会話距離は近距離会話1 mと中距離会話4 mの2条件設定し，直接音レベルを60,48 dBと求めた。また，拡散音レベルは吸音設計目標値と室条件の設定により求められる。

暗騒音レベル

暗騒音について、条件を単純化するため床面積あたり騒音源のパワーレベルは多群会話程度の 50 dB のみとする。騒音源のパワーレベルの設定と(2.2)より、暗騒音レベルを求めた。また、暗騒音の有無の影響についても確認するため、暗騒音なしの条件も含む。だが、会話距離 1 m 想定だと音声の直接音レベルが支配的で条件間の変化が小さいと考え、暗騒音なしは含まず、距離 4 m 想定のみ暗騒音なし条件も含む。

以上の条件設定を表 4.1 に示す。実験条件数は吸音設計目標値 3 条件、床面 1 辺長 3 条件、天井高 2 条件より、距離 1 条件につき $3 \times 3 \times 2$ で 18 条件となる。距離 1 m 想定 of 暗騒音ありと距離 4 m 想定 of 暗騒音あり・なしより、 3×18 で全 54 条件となった。4.2.4 で評価方法について説明するが、基準値との一対比較による条件の比較を行うため、 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m(H)}$ を基準条件として表 4.1 に併記する。

表 4.1 被験者実験の設定条件(音声の直接音レベルは 48,60 dB の 2 条件)

条件数	吸音設計 目標値	室寸法		残響時間 [s]	音声の 拡散音レベル [dB]	暗騒音レベル [dB]
		床面 1辺長 [m]	天井高 [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 条件	(a)~(c)	8	3	0.86	57.8	58.5

注1：距離4 m想定の場合、暗騒音なし条件を含む

注2：暗騒音レベルは騒音がある場合の値

4.2.2 使用音源

実験に使用した音源について、以下に示す。

音声音源

国立情報学研究所音声資源コンソーシアム^[28]より無償配布されている「重点領域研究『音声言語』・試験研究『音声DB』連続音声データベース」のうち、1人の30代男性による5～6秒程度のナレーションやニュース文章の読み上げを収録したものをを用いた。被験者が音声を聴き続けることで慣れが生じないように、音源18条件に合わせて、無作為に18個の文章を選出した。

暗騒音音源

音響の被験者実験では、一般的な空調騒音の周波数特性を有するHothノイズ^[29]を暗騒音に用いることが多いが、本実験では騒音源を多群会話と想定する上、音声と暗騒音の周波数特性を揃えるため、音声音源を128回加算して作成したバブルノイズを用いた^[30]。音源の周波数特性について図4.2に示す。第3章で理論的に求めた暗騒音がある場合のSTIの前提条件は、音声と暗騒音の周波数特性が同じであることなので、STIの条件に揃えるため暗騒音をバブルノイズとした。

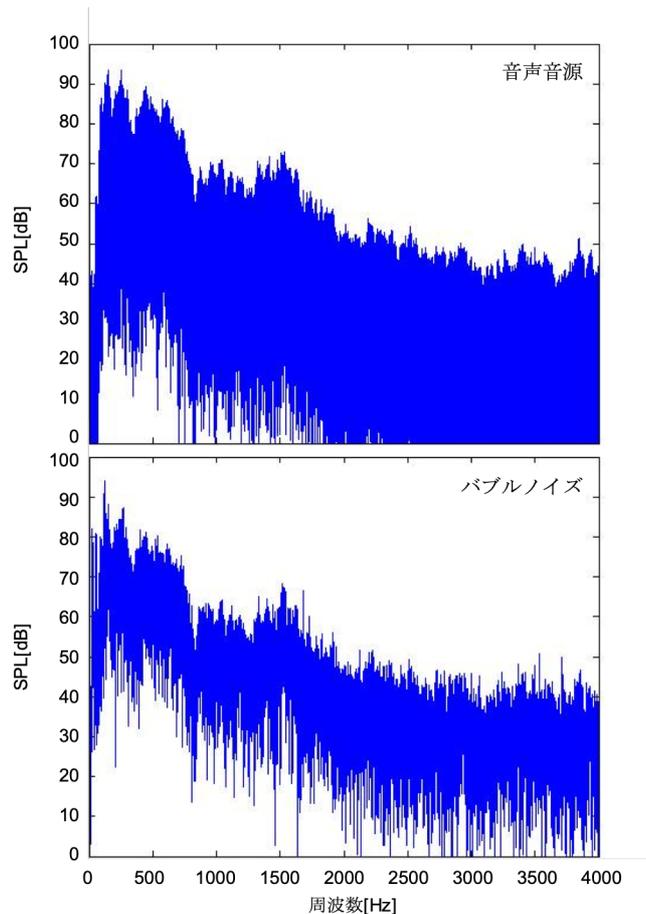


図 4.2 音声音源とバブルノイズの周波数特性

残響付加方法

表 4.1 に示す吸音設計目標値(a)～(c)と天井高の設定によって求められた残響時間のインパルス応答を作成し、MATLAB を用いて音声音源と暗騒音音源に畳み込んだ。畳み込んだインパルス応答を、図 4.3 に残響時間と共に示す。拡散音を全て妨害音として扱うことを前提とし、直接音が発せられてから 50 ms 以内の成分は除外した。また、直接音と拡散音を別のスピーカから再生することを考慮して、直接音は含まないものとした。

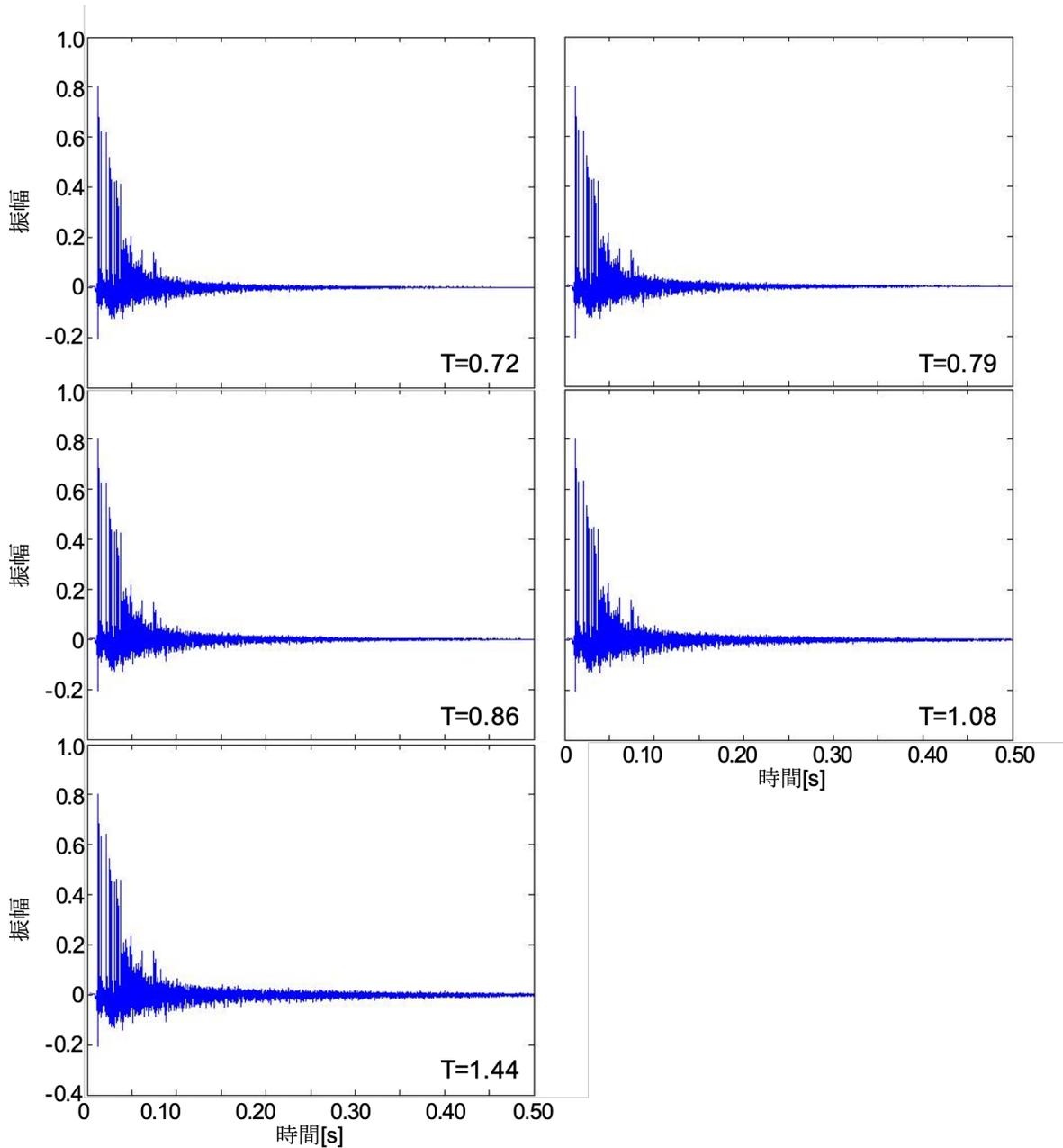


図 4.3 インパルス応答波形

4.2.3 再生方法

本実験では、音声の直接音は被験者の正面に設置した1つのスピーカから再生し、音声の拡散音と暗騒音は被験者の周囲に設置された6つのスピーカから再生した。この6つのスピーカを用いた再生システムを6ch再生システムという。本実験の再生システムの概要図を図4.4に示す。前項で示したインパルス応答を畳み込んだ音源のwaveデータを、PC(Adobe Audition)に取り込んで使用する。音声の拡散音と暗騒音の再生スピーカを1~6ch、直接音の再生スピーカを7chとする。また、再生システムの設備機器を図4.5に示す。

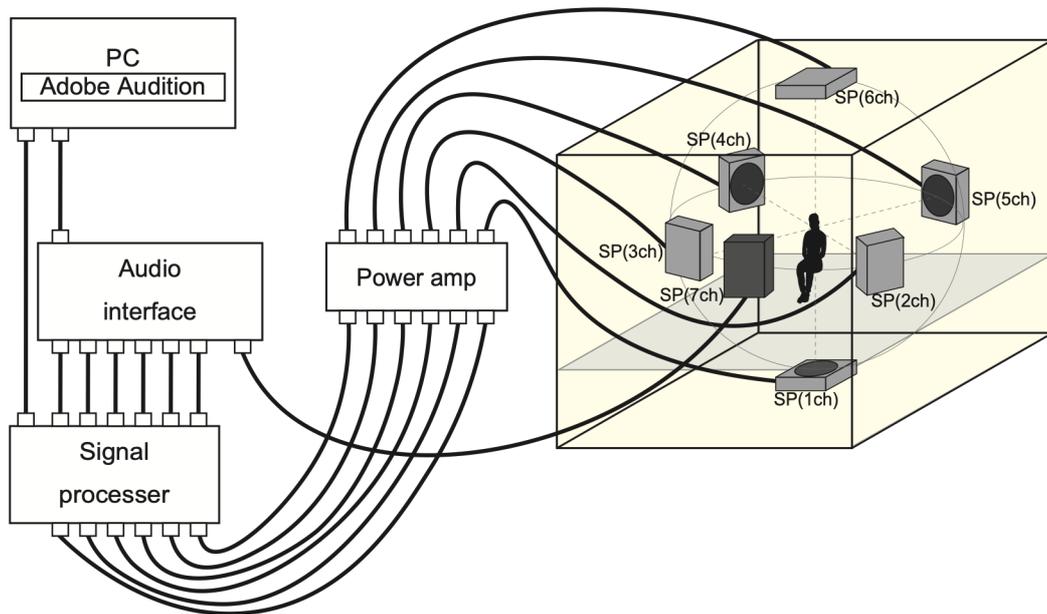


図 4.4 7ch 再生システム

音声の直接音

音声の直接音は、被験者の正面に配置した図4.6に示すスピーカ(8050A,GENELEC)より再生する。アンプは内蔵されており、AD/DA変換にはインターフェース(FireFace800, RME)を用いた。直接音用スピーカはSignal processor(DME24,YAMAHA)に接続されないため、Digital Audio Workstation : DAW(Adobe Audition)を用いて周波数特性の補正を行った。周波数特性の補正は、ホワイトノイズをスピーカから流し、図4.7のように騒音計を用いて測定しながらPC上で行った。再生時に平坦な周波数特性となるよう1/1オクターブバンド毎に調整し、全周波数で差は±1 dB以内とした。音圧レベルの調整についても、図4.7のように再生音源を測定し、被験者の耳元で48,60 dBとなるようPC上で編集した。

音声の拡散音と暗騒音

音声の拡散音と暗騒音は、図 4.8 に示すスピーカ(NS-2HX,YAMAHA)を 6つ用いて 6ch で再生する。このスピーカにアンプは内蔵されておらず、パワーアンプ(IPA8200,YAMAHA)に接続される。また、AD/DA 変換には直接音スピーカと同じインターフェースを用いた。1～6ch スピーカの周波数特性の補正は、Signal processor のグラフィックイコライザコンポーネントを用いて、PC 上で 1/3 オクターブバンドごとに行った。全周波数で差は±1 dB 以内とした。補正に用いた音源は、直接音用スピーカと同じくホワイトノイズである。音圧レベルの調整は、直接音レベルの調整と同様に、再生音源を測定し、被験者の耳元で設定条件のレベルとなるよう PC 上で編集した。

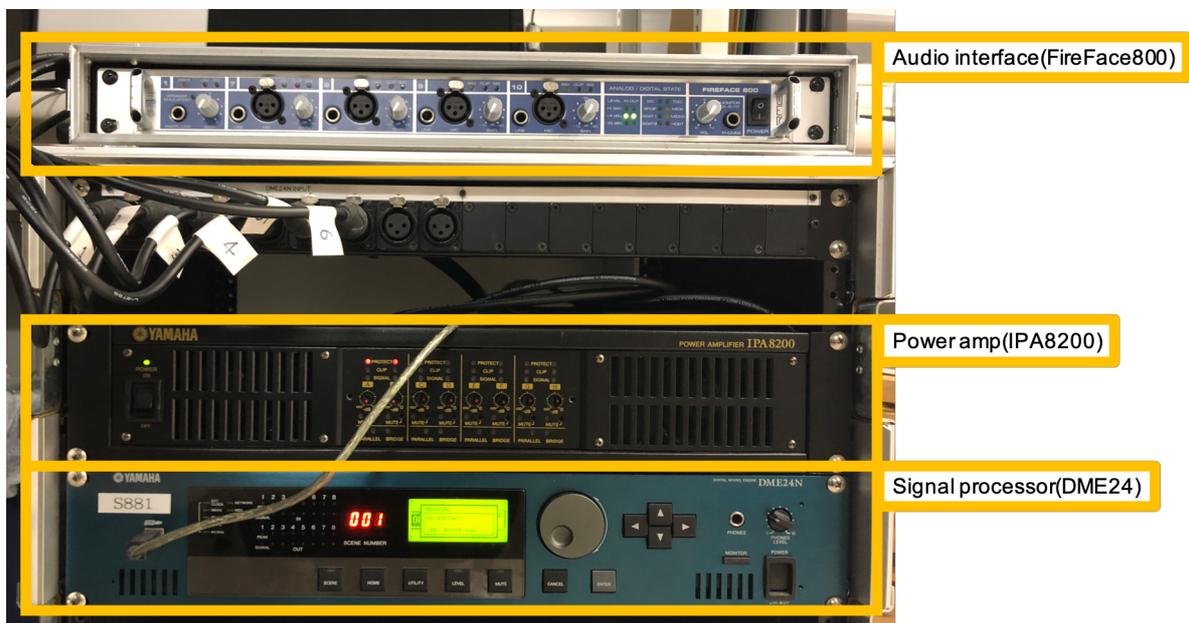


図 4.5 再生システムの設備



図 4.6 音声の直接音再生スピーカ



図 4.7 測定の様子



図 4.8 6ch 再生のスピーカ

図 4.9 に、実験室内のスピーカ、被験者の配置について示す。また、被験者正面に直接音再生用スピーカを配置した。

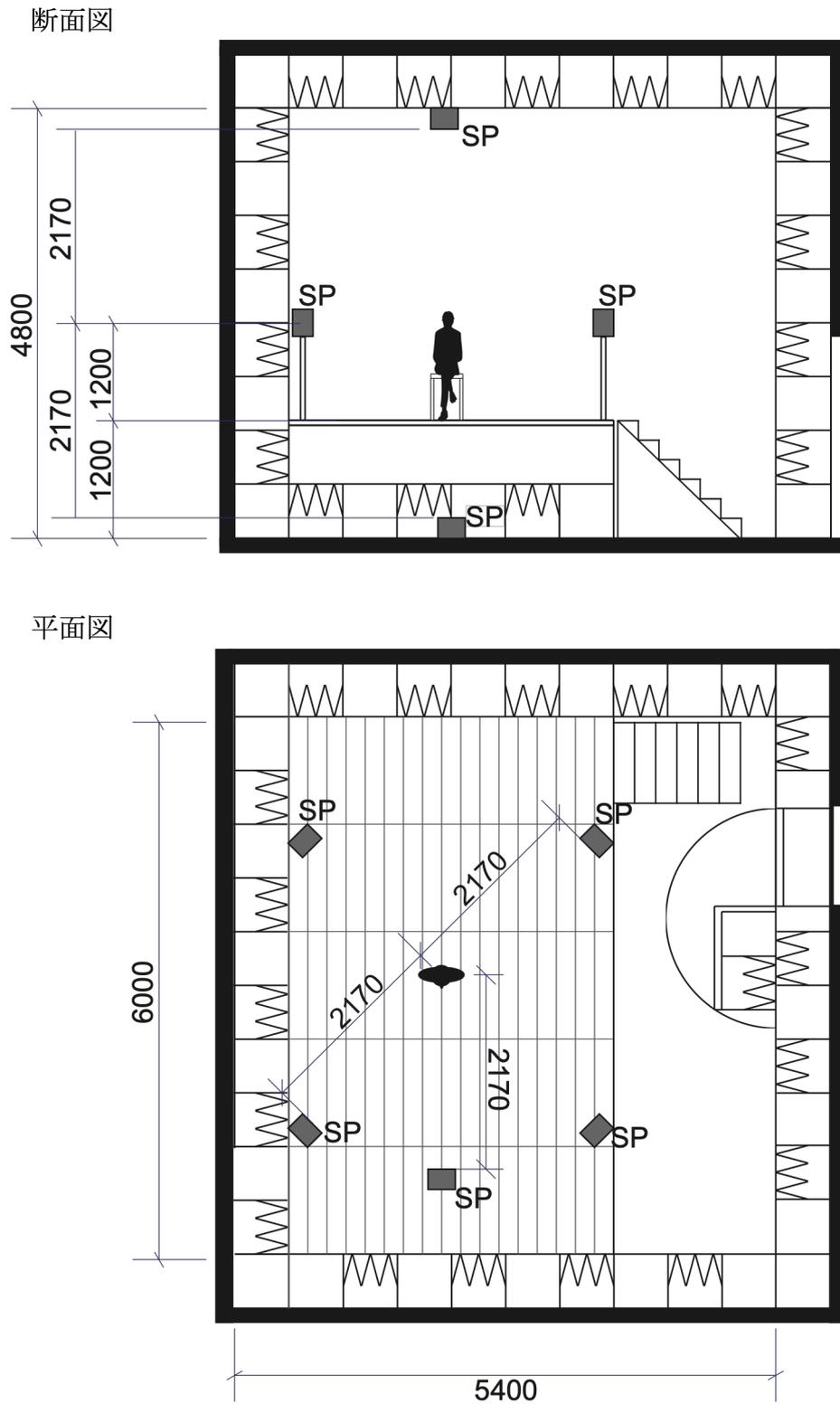


図 4.9 実験室内の仕様

4.2.4 評価方法

4.2.1にある通り，吸音設計目標値(a)～(c)の8 m×8 m×3 m(H)の条件を基準条件として，図4.10のように音源を提示し，「聴き取りにくさ」と，暗騒音がある場合は「うるささ」を含めて基準条件との一対比較を行った。評価尺度は7段階とし，図4.11に示す教示文，記入例を用いて被験者に評価方法を説明した。また，矢野ら^[31]によると「非常に」，「だいぶ」，「多少」，「わずかに」，「全く～ない」の5段階の程度副詞は程度の強さが等間隔であるという。本実験では基準条件と比較条件の音を提示するが，聴感的に大きな差はないと考えられるため，小さな聴感的な変化を確認するために，最小程度を示す副詞「わずかに」を用いた。「だいぶ」と「多少」は程度副詞として用いられているのをあまり見ないため，「かなり」，「少し」と変えて評価尺度を構成した。

比較評価は，距離1条件に対し，基準条件と比較対象18条件の18対についてである。また，順序効果を考慮して，基準条件と比較条件の順序を入れ替えた提示も行った。したがって，距離1条件に対し2×18の36対の評価を行った。36の比較対は被験者毎にランダム再生し，距離1 m想定，距離4 m想定暗騒音あり・なしで3×36で計108対の比較を行った。

暗騒音なし試験音提示



暗騒音あり試験音提示



図 4.10 再生音源の提示方法

居住空間での音声聴取における印象評価実験

本日はお忙しい中、実験にご協力いただきありがとうございます。はじめに、本実験の内容と手順について説明させていただきます。

◆実験内容

本実験は、居住空間での音声の聞き取り行為を想定し、音声に対する「聞き取りにくさ」と周りの音に対する「うるささ」について評価していただくという実験です。所要時間は休憩を含み1時間半程度の予定です。

◆実験手順

1. 無響室内に置かれた椅子に、指定された方向を向いて座ってください。
 2. 準備ができれば、5秒程度の音声を2つ流しますので目を閉じて聞いてください。1つ目の音声が流れた後、2つ目の音声が流れます。2つの音声を比較して、違いを聴き比べてください。
 3. 聞き終わったら目を開け、次ページからの評価項目に2つの音を比較した印象を7段階で答えてください。
 4. 終わったら次の組み合わせに移ります。
 5. 2～4を繰り返し、計108回行います。
- ※途中(36回目、72回目終了後)、5分間の休憩を挟みます。

◆記入例

- ・1つ目の音に対して2つ目の音の方が少し聞き取りにくいと感じた場合



- ◆黒枠の中をご記入ください。

日付： ___月___日 実験開始時刻： ___時___分
 名前： _____ (男・女) _____歳

図 4.11 被験者実験教示文

4.3 実験結果

4.3.1 実験結果と考察

被験者実験より得た回答を元に分析を行う。基準条件と比較条件の提示順を入れ替えた場合の評価も行ったので、被験者ごとの「聴き取りにくさ」と「うるささ」の評価点はその2つの平均値とした。

二元配置分散分析

基準条件に対する各条件の評価点について、条件間(18条件)で有意に差があるか、また被験者(21名)による有意な差があるか確認するため、この2条件による二元配置分散分析を行った。分析データには、前述の各評価語の個人評価点を用いた。結果を表4.2に示す。

条件間では、距離4m暗騒音ありの「聴き取りにくさ」以外、有意差が確認された。特に距離4m暗騒音なし「聴き取りにくさ」、距離1m暗騒音あり「聴き取りにくさ」「うるささ」、で条件対ごとの違いが十分にあると言える。また、距離4m暗騒音なし「聴き取りにくさ」のみ被験者間で有意差があり、被験者によって感じ方が異なる可能性がある。

基準条件と比較条件の有意差

本実験では、設定条件を総当たりで比較させるのではなく、基準条件に対して、比較条件がどのように感じるのかを、数少ない組み合わせで評価してもらった。したがって、通常の一対比較法と異なり、全組み合わせの結果を統計的に扱うことができず、その傾向を一つ一つ確認する方法で結果の考察をしていく^[32]。この方法を用いるにあたって、各比較対で十分に有意に差が認識されているかという観点が重要となる。各音源条件・評価語ごとに仮説平均値を0として両側t検定を行い、得られたp値によって印象が有意に変化しているか分析を行った。結果を表4.3に示す。

分散分析で条件間に有意差がなかった、距離4m暗騒音ありの「聴き取りにくさ」はt検定でも有意差がなく、「うるささ」については(c)の床面1辺4m、天井高5mの時のみ有意差が確認されたが、それ以外の条件では有意差がない。距離4m暗騒音なしの場合、基準条件と同じ床面1辺8mの時、(a)残響時間一定、(c)2ケースの吸音面積の平均値一定の2つは天井高が変化しても有意差がなく、聴き取りにくさに変化がないと言える。距離1m暗騒音ありの場合、「聴き取りにくさ」について、基準条件と同じ床面1辺8mの時、(a),(c)の天井高2.5m、(b)の天井高2.5m,5mの条件で有意差がない。この距離・暗騒音条件の場合、「聴き取りにくさ」に有意差がないと、「うるささ」にも有意差がないことから、両者の関係性が強いと考えられる。また、「聴き取りにくさ」で有意差がある条件でも「うるささ」に有意差が見られない条件もいくつかあり、「うるささ」の方が変化に気づきにくいということがわかった。吸音設計目標値の設定方法が同じでも、音源との距離の変化や暗騒音の有無により、「聴き取りにくさ」と「うるささ」に変化が生じていることがわかる。

表 4.2 二元配置分散分析の結果

	距離 4[m] 暗騒音なし 「聴き取りにくさ」	距離 4[m] 暗騒音あり 「聴き取りにくさ」	距離 4[m] 暗騒音あり 「うるささ」	距離 1[m] 暗騒音あり 「聴き取りにくさ」	距離 1[m] 暗騒音あり 「うるささ」
被検者間	**				
条件間	**		*	**	**

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

表 4.3 t 検定の結果

条件	床面 1辺長 [m]	天井高 [m]	距離 4[m] 暗騒音なし 「聴き取りにくさ」	距離 4[m] 暗騒音あり 「聴き取りにくさ」	距離 4[m] 暗騒音あり 「うるささ」	距離 1[m] 暗騒音あり 「聴き取りにくさ」	距離 1[m] 暗騒音あり 「うるささ」
(a)	4	2.5	**			**	*
(a)	4	5	**			**	*
(a)	8	2.5					
(a)	8	5				**	
(a)	16	2.5	**			**	
(a)	16	5	**			**	
(b)	4	2.5	**			**	
(b)	4	5	**			*	*
(b)	8	2.5	**				
(b)	8	5	**				
(b)	16	2.5	**			**	**
(b)	16	5	*			**	**
(c)	4	2.5	**			**	
(c)	4	5	**		*	**	*
(c)	8	2.5					
(c)	8	5				**	*
(c)	16	2.5	**			**	*
(c)	16	5	**			**	*

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

組み合わせごとの心理印象

一対比較による各評価語の平均評点の変化が、残響時間や音圧レベル等の音響条件における基準値に対する変化と対応しているかを条件対ごとに確認する。表 4.4 に設定条件 18 対について、基準値に対する物理条件の変化率や差分を示す。残響時間は変化率 σ [%]、音声の拡散音レベルと暗騒音レベルは差分 δ [dB] で表した。理論計算の STI についても差分で表した。また、それらの変化が弁別閾を越えている場合、ピンク ($\sigma > +5\%$, $\delta > +1$ dB) と水色 ($\sigma < -5\%$, $\delta < -1$ dB) で分けて表記している。図 4.12 に「聴き取りにくさ」の平均評価点、図 4.13 に「うるささ」の平均評価点と、それぞれの個人評点のばらつきを示している。評価値の正の値が大きいほど、基準条件に対して「聴き取りにくさ」、「うるささ」を感じていることを示す。

◆ 「聴き取りにくさ」

図 4.12 に示す「聴き取りにくさ」の平均評点について考察する。音源-受音点距離条件、暗騒音条件ごとに 18 対比較を行ったので、その条件で分けて表している。また、その中で床面 1 辺長条件に加え、天井高の条件で分け、表記している。

距離 4 m 暗騒音なしの場合、床面寸法が小さいほど基準条件に対して聴き取りにくいと感じる。これは STI の理論値と同じ傾向を示している。STI では、床面寸法が小さいほど音声の拡散音レベルが大きく、拡散音レベルが支配的になることで明瞭度が悪くなり、聴き取りにくさが大きくなる。本実験でも同様な傾向を示しており、STI との対応が見られる。天井高の変化に対する聴き取りにくさの変化について、床面寸法ごとにみると、床面 1 辺 4 m では (a) 残響時間一定が最も大きい、床面 1 辺 8,16 m では (b) 床面積あたり吸音面積一定が最も大きい。つまり、暗騒音がない場合は床面寸法が小さい時は拡散音の残響時間の変化よりも音圧レベルの変化が聴き取りにくさに影響を与え、床面寸法が大きい時は残響時間の変化が影響を与えていると考えられる。ちなみに、床面 1 辺 4 m の場合、(a) の天井高 2.5 m の時 $\delta L_{spr} = +7$ dB、天井高 5 m の時 $\delta L_{spr} = +3.9$ dB であり、(b) の天井高 2.5 m の時 $\sigma T = -16\%$ 、天井高 5 m の時 $\sigma T = +67\%$ である。また、いずれの床面寸法の場合でも、聴き取りにくさの変化は (c) 2 ケースの吸音面積の平均値一定が最も小さい。暗騒音がない場合、第 2 章の理論的考察や、第 3 章の拡散音場予測の STI では (a) 残響時間一定と吸音設計目標値を設定すると、音声の明瞭度は変わらないとしたが、音声の拡散音レベルが変化して聴き取りにくさに変化が生じることがわかった。特に床面寸法が小さい時はその影響が大きい。

距離 4 m 暗騒音ありの場合、分散や検定により、条件間や基準値と比較条件の間で違いが聴き分けられていないことがわかった。平均評点を見ても、暗騒音がない場合と比較して、評価のばらつきが大きい上、聴き取りにくさの変化幅が小さく、STI との対応は得られなかった。また、この距離条件、暗騒音条件の STI の理論値は、ランクでいうと 4th 以下である。つまり、この場合の 18 条件と基準条件の音声聴取について、絶対的評価で聴き取りにくさ、聴き取り間違いを感じる可能性が大きい。直接音が小さく、音声の拡散音レベルの影響が大きい音場であるため、床面 1 辺長の変化によって評価は大きく変わると予想したが、実際には変化はほとんどない。これは本実験で用いたインパルス応答の性質から、音声の拡散音を音声要素でなく妨害音要素として認識されたこと

が原因だと考えられる。音声の直接音のみを音声レベルとして、バブルノイズと音声の拡散音あわせて暗騒音レベルとして認識され、実験音場ではSN比が理論値より小さく、より明瞭度が悪くなっていることも考えられる。この結果より、暗騒音で音声の直接音がマスキングされる場合、残響時間や拡散音レベル、暗騒音レベルが変化しても、その変化に気づきにくいと考えられる。

距離 1 m 暗騒音ありの場合、距離 4 m 暗騒音なしの場合と同じく、床面寸法が小さいほど聴き取りにくいと感じている。これは暗騒音がある場合の STI とは逆の傾向を示している。暗騒音がある場合の STI では、音声の拡散音は音声レベルの要素となるが、本実験では妨害要素として認識されるという逆の役割になっているためである。天井高の変化に対する聴き取りにくさの変化について、床面寸法ごとにみると、床面 1 辺 4 m では(b),(c)、8,16 m では(a)が最も大きい。つまり、暗騒音がある場合、床面寸法が小さい時は残響時間の変化が聴き取りにくさに影響を与え、床面寸法が大きい時は拡散音レベルまたは暗騒音レベルの変化が影響を与えていると考えられる。また、天井高 2.5 m の時、(b) $\sigma T = -16\%$ 、(c) $\sigma T = -8\%$ で、天井高 5 m の時(b) $\sigma T = +67\%$ 、(c) $\sigma T = +26\%$ である。床面 1 辺 8 m の場合、天井高 2.5 m で(a) $\delta L_{spr} = +0.8$ dB, $\delta L_n = +0.8$ dB、天井高 5 m で(a) $\delta L_{spr} = -2.5$ dB, $\delta L_n = -2.2$ dB、また、床面 1 辺 16 m の場合、天井高 2.5 m で(a) $\delta L_{spr} = -5.4$ dB, $\delta L_n = +0.8$ dB、天井高 5 m で(a) $\delta L_{spr} = -9$ dB, $\delta L_n = -2.2$ dB である。また、暗騒音がある場合、床面寸法が変化すると、聴き取りにくさの変化が小さい吸音設計目標値が変わるので、どの目標値が望ましいとは一概に言えない。

◆ 「うるささ」

暗騒音がある場合は、「うるささ」についても比較を行った。「うるささ」の平均評点について図 4.13 に示し、「聴き取りにくさ」と同様に条件毎に表記している。全体的に平均評点の絶対値が小さく、「聴き取りにくさ」より条件間の変化は見られない。

距離 4 m の場合、「聴き取りにくさ」同様、検定によって基準値と比較条件の間でほとんど違いが聴き分けられていないことが示された。天井高の変化に対する暗騒音レベルの変化幅が最も大きい(a)が、基準条件に対し違いを感じると予想したが、(c)の床面 1 辺 4 m、天井高 5 m の条件のみ有意差が得られた。このことより、本実験では暗騒音レベルの変化が「うるささ」と対応していないと考えられる。

距離 1 m の場合、床面寸法が小さいほど基準条件に対してうるさいと感じる。これは拡散音レベルの変化が「うるささ」にも影響を与えていると言え、上記の「聴き取りにくさ」と対応している。t 検定の結果も合わせて見ると、床面 1 辺 16 m の場合、(b)の天井高 2 条件のみで十分な有意差があり、評価値は天井高 5 m の方が若干うるささを感じるという、残響時間が長くなる影響を示している。また、床面寸法の変化による拡散音レベルの変化は聴き分けられているが、(a)~(c)の条件間の違いは聴き分けられているとは言えない。本実験では直接音レベルの大きさに関係なく、暗騒音レベルとの対応は得られなかった。

表 4.4 基準条件に対する音響物理指標の差分・変化率

目標値	室寸法		σT [%]	δL_{spr} [dB]	δL [dB]	δSTI		
	床面 1辺長 [m]	天井高 [m]				距離4 [m] 暗騒音なし	距離4 [m] 暗騒音あり	距離1 [m] 暗騒音あり
(a)	4	2.5	0	7.0	0.8	-0.01	0.13	0.06
(a)	4	5	0	3.9	-2.2	-0.01	0.13	0.08
(a)	8	2.5	0	0.8	0.8	0.00	0.00	-0.01
(a)	8	5	0	-2.5	-2.2	0.01	0.01	0.03
(a)	16	2.5	0	-5.4	0.8	0.03	-0.14	-0.04
(a)	16	5	0	-9.0	-2.2	0.08	-0.12	0.01
(b)	4	2.5	-16	6.1	0.0	0.04	0.16	0.09
(b)	4	5	67	6.3	0.0	-0.12	0.06	-0.01
(b)	8	2.5	-16	-0.1	0.0	0.04	0.02	0.02
(b)	8	5	67	0.1	0.0	-0.11	-0.05	-0.06
(b)	16	2.5	-16	-6.4	0.0	0.08	-0.13	-0.01
(b)	16	5	67	-6.2	0.0	-0.05	-0.19	-0.09
(c)	4	2.5	-8	6.6	0.4	0.02	0.15	0.08
(c)	4	5	26	5.0	-1.2	-0.06	0.10	0.04
(c)	8	2.5	-8	0.3	0.4	0.02	0.01	0.01
(c)	8	5	26	-1.4	-1.2	-0.04	-0.02	-0.01
(c)	16	2.5	-8	-5.9	0.4	0.06	-0.13	-0.02
(c)	16	5	26	-7.7	-1.2	0.02	-0.15	-0.03

$\sigma T > 5$ [%], $\delta L_{spr} > 1$ [dB], $\delta L > 1$ [dB]

 $\sigma T < -5$ [%], $\delta L_{spr} < -1$ [dB], $\delta L < -1$ [dB]

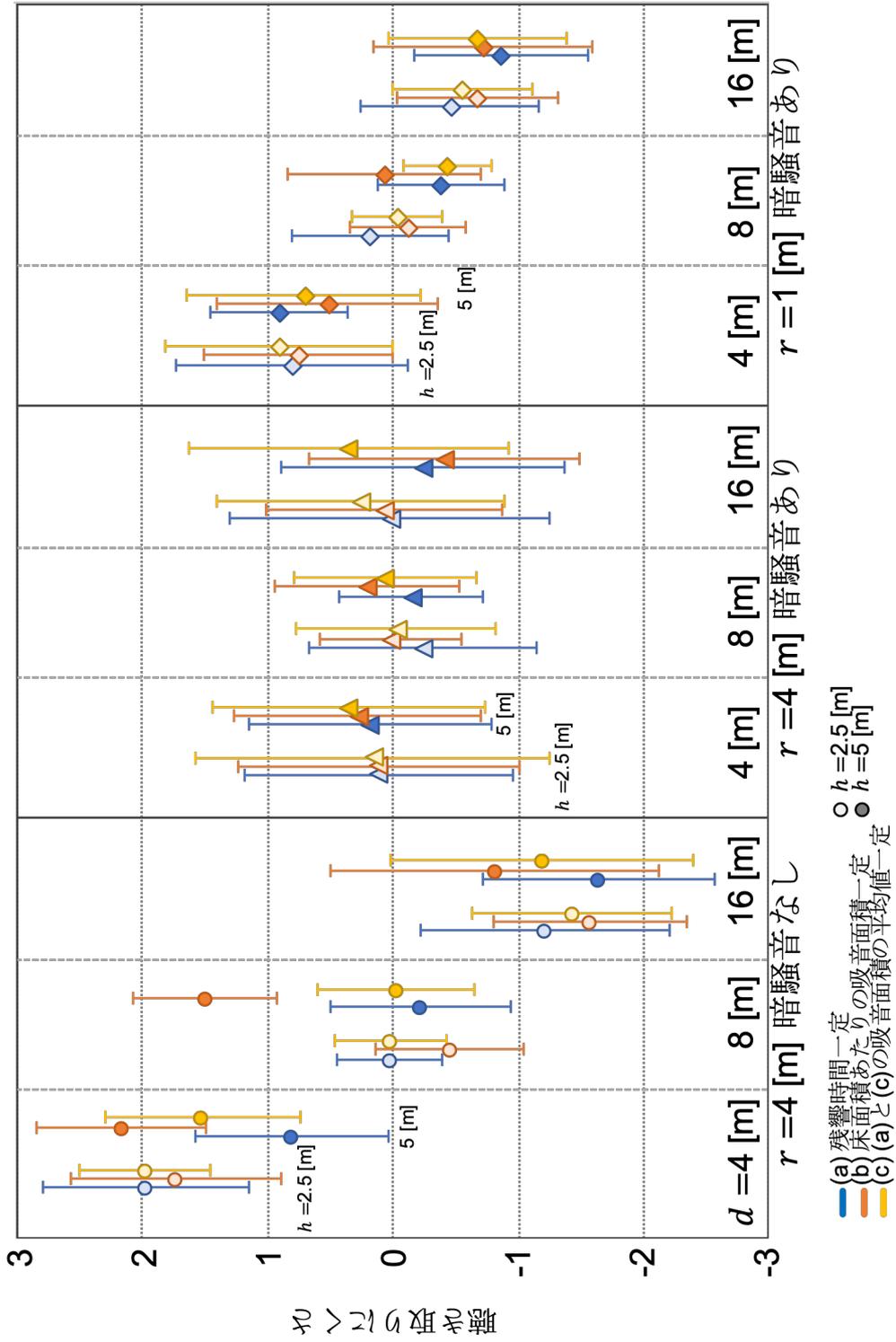


図 4.12 「聴き取りにくさ」の平均評価点

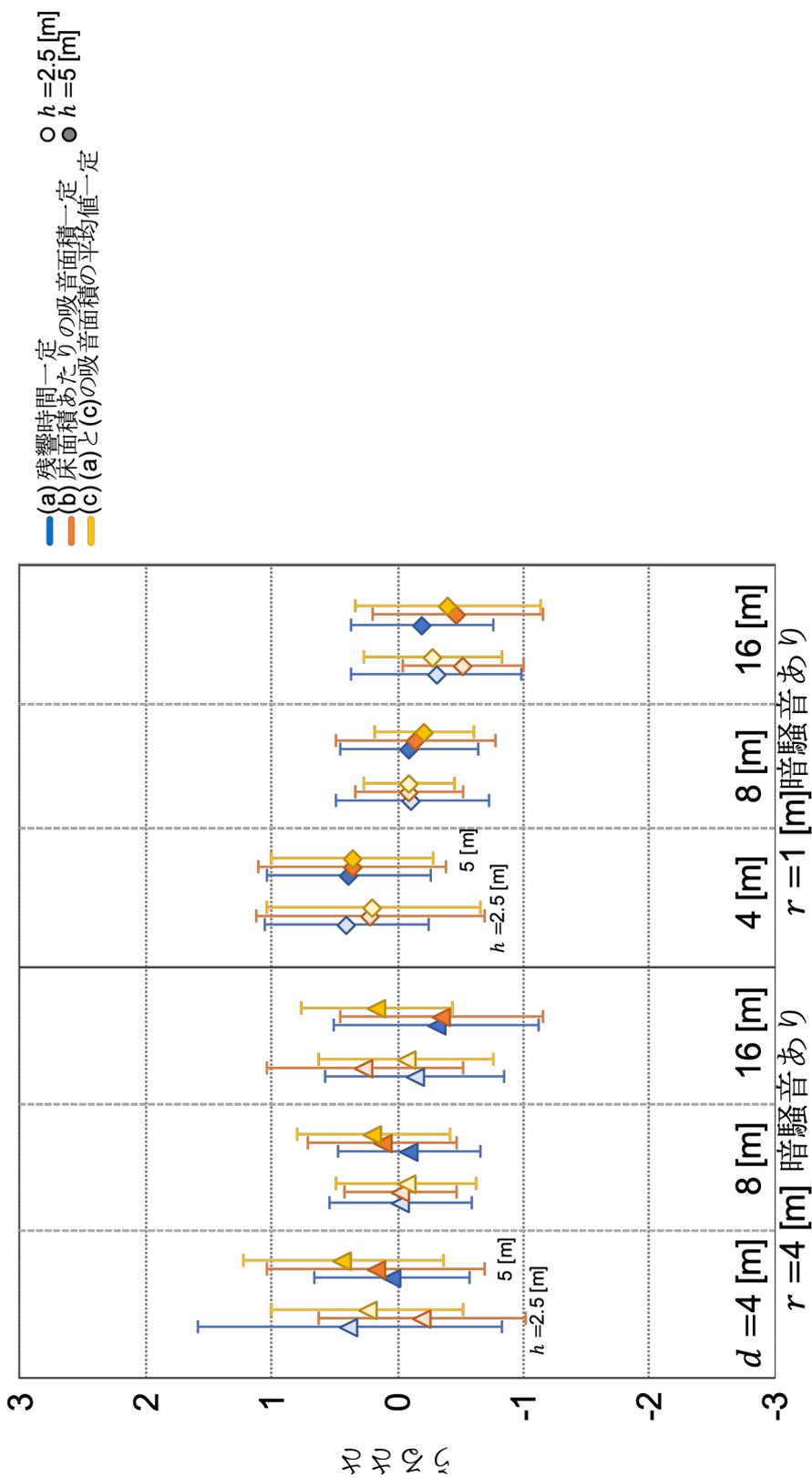


図 4.13 「うるささ」の平均評価点

4.3.2 物理量と心理量の対応

評価語と残響時間や拡散音レベルとの対応を確認するため、相関係数を算出し、表 4.5 に示す。評価語の値には条件対ごとの平均評点を、音響物理指標には表 4.4 に示す変化率や差分の値を用いた。

暗騒音がある場合、「聴き取りにくさ」と「うるささ」で相関が確認でき、特に距離 1 m の場合は非常に高い相関を示している。

距離 4 m 暗騒音なしの場合、「聴き取りにくさ」と拡散音レベルに強い正の相関が見られ、拡散音レベルの変化が「聴き取りにくさ」に大きな影響を与えていることが確認された。また、「聴き取りにくさ」と STI にやや負の相関が見られた。STI は値が大きいほど聴き取りにくさを感じず、評価値とは逆の意味を持つため、負の相関となる。聴感印象に影響を及ぼすと予想していた残響時間については、相関が得られなかった。

距離 4 m 暗騒音ありの場合、「聴き取りにくさ」と音響条件の相関は得られず、変化を聴き分けられていないことが確認された。だが、「うるささ」と拡散音レベル、STI にはやや正の相関が見られた。やはり残響時間や暗騒音レベルより、床面寸法の変化、拡散音レベルの変化の影響が支配的であることが明らかとなった。

距離 1 m 暗騒音ありの場合、「聴き取りにくさ」、「うるささ」とともに音声の拡散音レベルと STI に強い正の相関が見られた。また、STI と「聴き取りにくさ」相関は正の値を示しているため、やはり理論値とは逆の傾向を示している。

表 4.5 相関係数

距離 4 [m] 暗騒音なし

	聴き取り にくさ	残響時間	音声の拡散音 レベル	STI
聴き取りにくさ	1.00			
残響時間	0.25	1.00		
音声の拡散音レベル	0.95	0.00	1.00	
STI	-0.63	-0.86	-0.46	1.00

距離 4 [m] 暗騒音あり

	聴き取り にくさ	うるささ	残響時間	音声の拡散音 レベル	暗騒音 レベル	STI
聴き取りにくさ	1.00					
うるささ	0.70	1.00				
残響時間	0.06	0.05	1.00			
音声の拡散音レベル	0.38	0.49	0.00	1.00		
暗騒音レベル	0.00	0.08	-0.05	0.22	1.00	
STI	0.33	0.44	-0.22	0.95	0.00	1.00

距離 1 [m] 暗騒音あり

	聴き取り にくさ	うるささ	残響時間	音声の拡散音 レベル	暗騒音 レベル	STI
聴き取りにくさ	1.00					
うるささ	0.92	1.00				
残響時間	-0.07	-0.03	1.00			
音声の拡散音レベル	0.96	0.91	0.00	1.00		
暗騒音レベル	0.16	-0.07	-0.05	0.22	1.00	
STI	0.71	0.73	-0.61	0.66	-0.20	1.00

■ : -1.0~ -0.7 ■ : -0.7 ~ -0.4 □ : -0.4 ~ 0.4 ■ : 0.4 ~ 0.7 ■ : 0.7 ~ 1.0

相関係数の算出から、「聴き取りにくさ」，「うるささ」に対し，音声の拡散音レベルとSTIは相関が確認され，特に拡散音レベルとは非常に強い相関が見られた。また，聴感印象に影響を及ぼすと予想した残響時間と暗騒音レベルは，相関が非常に低いことが確認された。そこで，これらの音響物理指標に対する「聴き取りにくさ」，「うるささ」の傾向を，改めて確認するため，距離条件，暗騒音条件ごとの条件対の結果を用いて関係性を分析した。音響物理指標は表 4.4 に示す差分や変化率の値を用いた。

残響時間の変化率に対する各条件の「聴き取りにくさ」，「うるささ」の評価について図 4.14 に示す。決定係数，相関係数の値は残響時間の変化が「聴き取りにくさ」に与える影響が非常に小さいと示している。だが，距離 4 m の暗騒音がない場合，散布図を見てみると，床面 1 辺長条件毎に残響時間の変化率が正の値で大きいほど，聴き取りにくさが大きいと評価されていることが分かる。床面 1 辺 4,8,16 m で同じ傾向を示している。つまり，本実験の条件では，音声の拡散音レベルの変化が「聴き取りにくさ」の変化に及ぼす影響が最も大きく支配的であるが，床面 1 辺長毎の評価では残響時間の変化が影響を与えていると言える。距離 4 m 暗騒音ありの場合，やはり「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに残響時間の変化が与える影響は，決定係数が非常に低い値を示すことからほとんどないと言える。距離 1 m 暗騒音ありの場合も，「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに，決定係数が非常に低い値を示すことから残響時間の変化の影響がほとんどないと言えるが，暗騒音がない場合と逆の傾向で，変化率が正の値の時，変化率が大きいほど「聴き取りにくさ」が若干小さいと評価されている。暗騒音がある場合，音声の拡散音の響きが長いほど，聴き取りやすいと感じていると言える。

音声の拡散音レベルの差分に対する各条件の「聴き取りにくさ」，「うるささ」の評価について図 4.15 に示す。距離 4 m 暗騒音なしの場合，強い正の相関を示している上，決定係数が非常に大きい値を示し，評価値が直線的に分布していることから，やはり音声の拡散音レベルの変化が非常に大きな影響を与えていると言える。距離 4 m 暗騒音ありの場合，「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに，決定係数が小さい値を示し，音声の拡散音レベルの変化をあまり聴き分けられていないとは言えない。だが，拡散音レベルの差分が大きいほど，両者の評価値は若干大きな値を示し，評価の傾向としては暗騒音なしの場合と同じである。距離 1 m 暗騒音ありの場合，「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに決定係数が非常に大きい値を示し，評価値も直線的に分布しており，拡散音レベルの影響が非常に強いと言える。また，「聴き取りにくさ」に関しては，暗騒音がない場合よりも評価値が直線的に分布している。これは，暗騒音なしの場合，分散分析で示されたように，被験者ごとの評価の違いがあると考えられるためである。

暗騒音レベルの差分に対する各条件の「聴き取りにくさ」，「うるささ」の評価について図 4.16 に示す。距離 4 m の場合，「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに，決定係数が非常に小さい値を示し，暗騒音レベルの変化が評価に与える影響はほとんどないと言える。距離 1 m の場合も，「聴き取りにくさ」，「うるささ」ともに決定係数が非常に小さい値を示している。だが，「聴き取りにくさ」について，床面 1 辺 8,16 m の時は，差分が大きいほど「聴き取りにくさ」が若干大きいと評価されているように見える。「うるささ」に変化がないと感じても，「聴き取りにくさ」には若干変化を感じることもあると言える。

STIの差分に対する各条件の「聴き取りにくさ」, 「うるささ」の評価について図 4.17に示す。距離 4 m 暗騒音なしの場合, 「聴き取りにくさ」と STI の差分は負の相関があると示したが, 評価値の分布は直線的であるとは言えない。だが, 全体的な傾向としては STI の差分が正の値に大きいほど, 「聴き取りにくさ」は小さいと評価され, STI と同じ傾向を示す。また, その傾向は床面寸法が大きいほど, つまり拡散音レベルの影響が小さくなるほど顕著に表れているように見える。距離 4 m 暗騒音ありの場合, 「聴き取りにくさ」, 「うるささ」ともに相関係数は小さい値を示し, STI との対応はほとんどないと言える。距離 1 m 暗騒音ありの場合, 「聴き取りにくさ」, 「うるささ」ともに強い相関を示しており, 散布図を見てみると評価値の分布はほぼ直線的であるため, STI と対応があると言える。床面 1 辺長条件ごとにみると, 床面 1 辺 8,16 m の時, (b)天井高 5 m 条件を除いて, STI の差分が大きいほど「聴き取りにくさ」の評価値は小さい。これは, 各吸音設計目標値による音響条件の変化の影響があると考えられる。だが, 床面 1 辺長の変化, つまり拡散音レベルの変化の影響が支配的であるため, 全体的な傾向としては STI の差分が正の値に大きいほど評価値が大きいという, STI に対して逆の対応を示している。

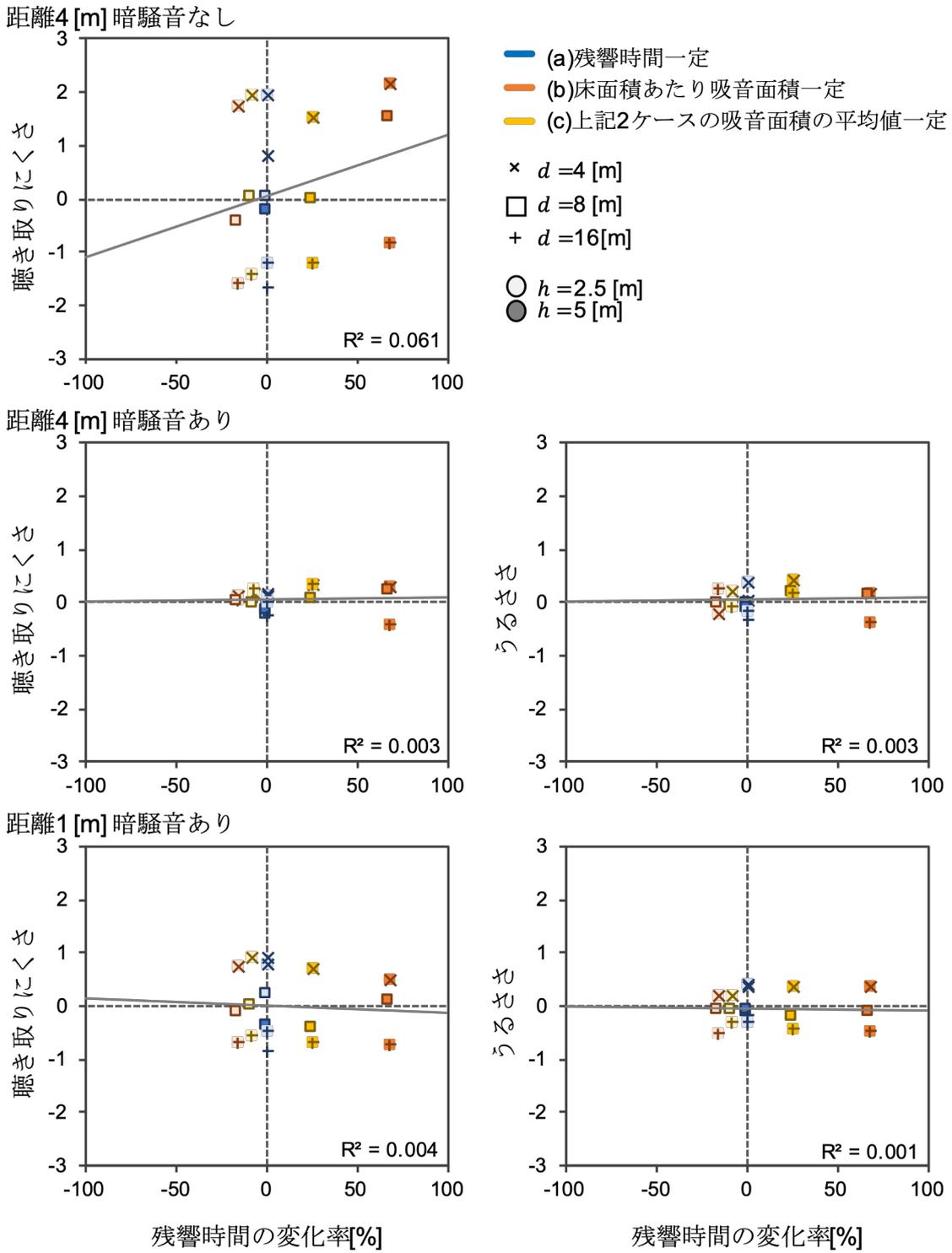
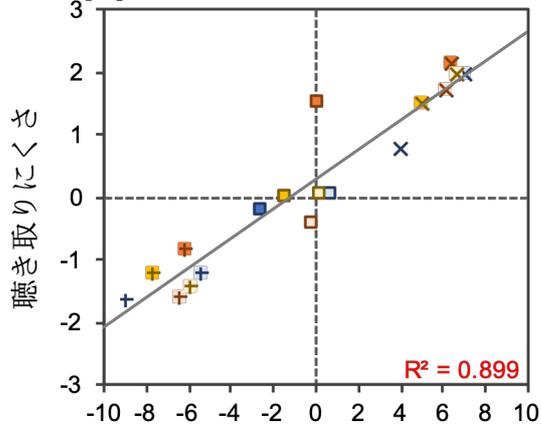


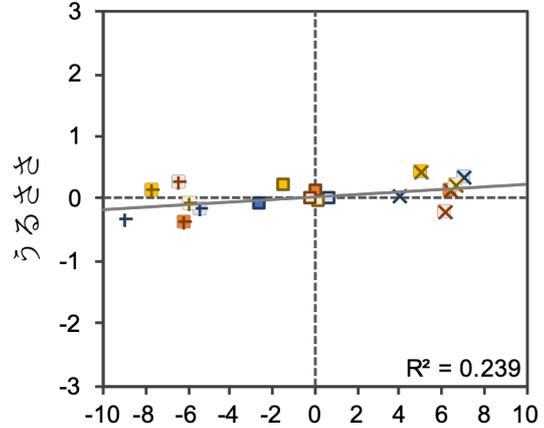
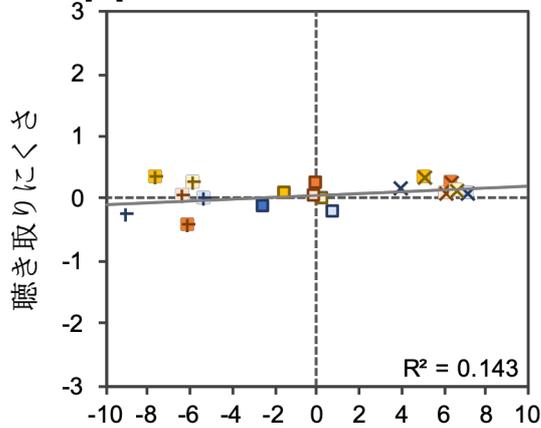
図 4.14 残響時間の変化率と評価語の対応関係

距離4 [m] 暗騒音なし

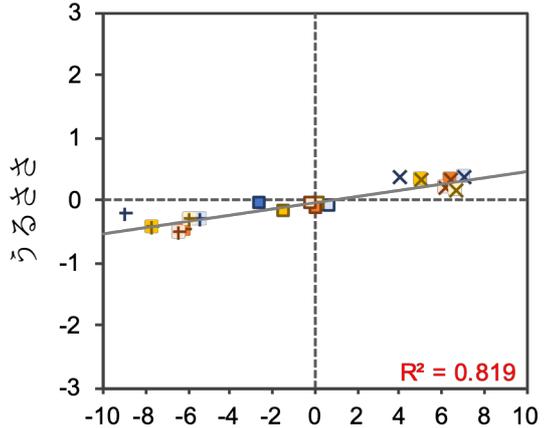
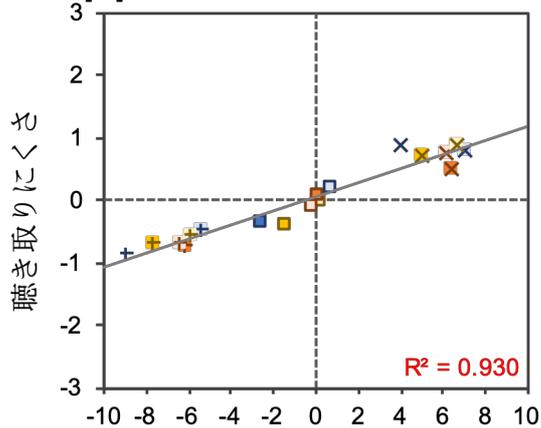


- (a)残響時間一定
- (b)床面積あたり吸音面積一定
- (c)上記2ケースの吸音面積の平均値一定
- × $d = 4$ [m]
- $d = 8$ [m]
- + $d = 16$ [m]
- $h = 2.5$ [m]
- $h = 5$ [m]

距離4 [m] 暗騒音あり



距離1 [m] 暗騒音あり



音声の拡散音レベルの差分[dB]

音声の拡散音レベルの差分[dB]

図 4.15 音声の拡散音レベルの差分と評価語の対応関係

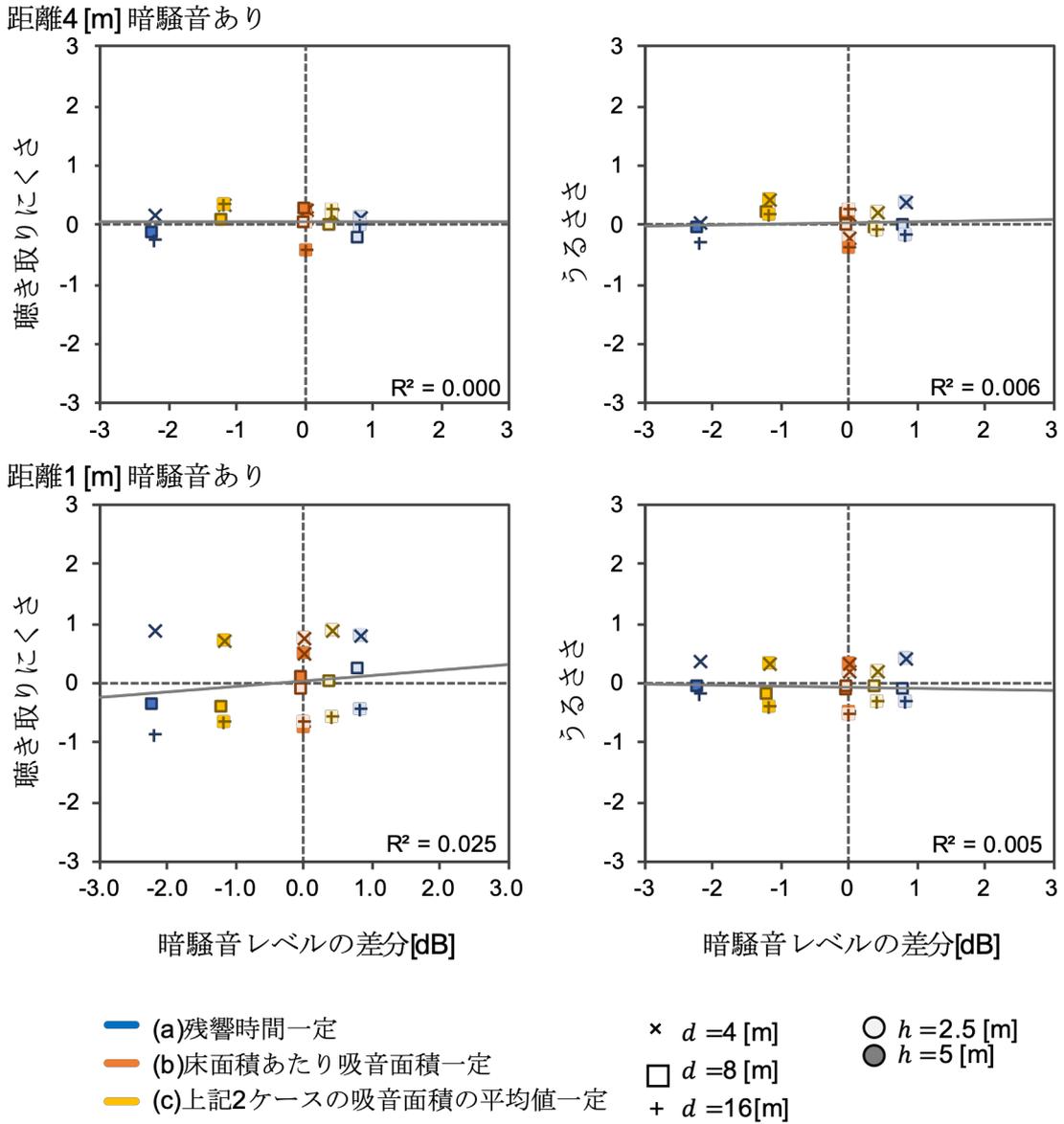


図 4.16 暗騒音レベルの差分と評価語の対応関係

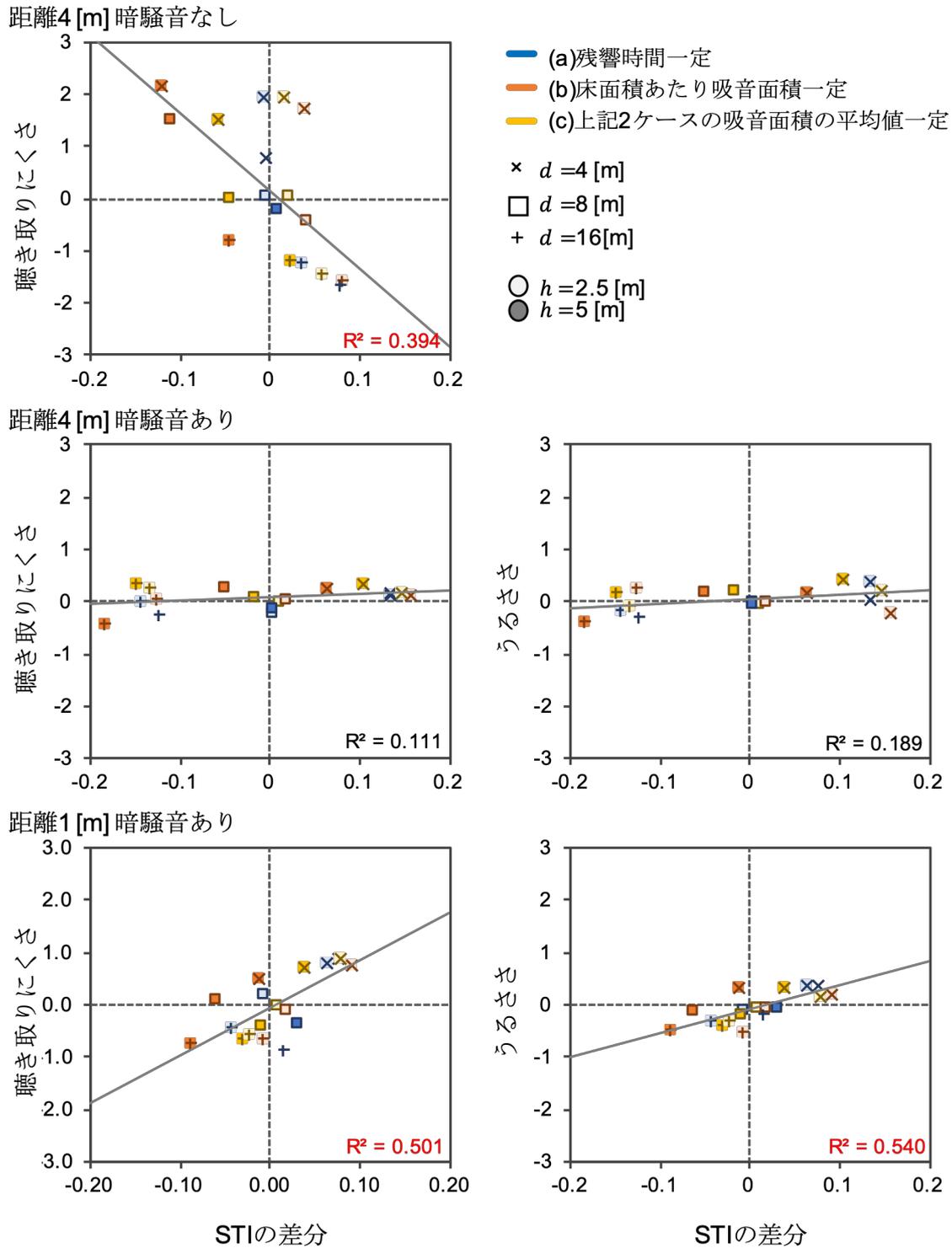


図 4.17 STI の差分と評価語の対応関係

第5章

総括

5.1 本論文のまとめ

第1章では、居住空間における吸音設計の残響抑制と騒音低減の役割について説明し、現在、設計で使用されている推奨値を示した。また、学校教室以外の室用途では、それらの推奨値の整備が不十分で、吸音不足の空間が少なくないという現状を述べた。これを研究背景とし、居住空間を対象とした推奨値を規定することを最終目標として、本研究の目的は吸音設計目標値の設定方法について知見を得ることとして述べた。

第2章では、本研究の検討内容の前提条件について説明し、各吸音設計目標値を設定した場合の、室寸法の変化に対する残響時間と暗騒音レベルの変化について理論的に検討した。第1節では、拡散音場や室の形状、騒音源等に関する検討の前提条件と、本研究で比較を行った吸音設計目標値の種類について述べた。第2節では、残響抑制と騒音低減の両者を考慮した既存の推奨値である、ドイツ工業規格の室内音響指標について説明した。第3節では、室用途を学校教室と待合室とした空間を想定し、前述のDINの推奨値を含んだ各吸音設計目標値の設定方法と、室寸法の変化による比較を行った。この比較により、残響時間一定と設定した場合、天井高が低い時に騒音増大、床面積あたり吸音面積一定と設定した場合、天井高が高い時に残響過多となる可能性が示された。また、騒音低減と残響抑制どちらも考慮した目標値を設定した場合、DINの推奨値と似た傾向、性質を示した。平均吸音率一定と設定した場合、他の吸音設計目標値と違い、床面寸法の変化の影響を受けて残響、騒音ともに大きく変化することが示唆された。

第3章では、第2章で設定した各吸音設計目標値について、音声明瞭度指標 C_{50} とSTIを用いて、更に理論的検討を深めた。室用途を想定し、室寸法や騒音源等の物理条件を変化させて比較を行った。第1節では、音声明瞭度に関する物理的評価指標について述べ、特にSTIの算出方法について説明した。第2節では、学校教室を想定し、吸音設計目標値を設定して、天井高や音源-受音点距離、騒音源の変化による音声伝送性能の比較を行った。その比較より、暗騒音がない場合、音声の拡散音の比率が小さいほど明瞭度は良いため、会話者との距離が臨界距離より小さい時のSTIの値は、天井高が高くなると、残響時間一定の場合は大

大きく、床面積あたり吸音面積一定の場合は小さくなると分かった。暗騒音がある場合、SN比が十分に確保されないと、吸音度合いの変化は、音声の拡散音レベルと暗騒音に対する低減の効果の変化に対応する。そのため、天井高の変化に対するSTIの変化は、暗騒音がない場合と同じ傾向であるが、SN比の補正により変化幅は小さくなっていることが分かった。第3節では、多様な床面寸法が考えられる待合室空間を想定し、第2節と同様に音声伝送性能の比較を行った。床面寸法の大きさが変化すると臨界距離も変化するため、吸音設計目標値と天井高が同じ条件でも、床面寸法が変化すると聴き取りやすさは異なることが示唆された。また、床面寸法の変化に対するSTIの変化は、暗騒音の有無によって逆の傾向を示すことがわかった。床面寸法が大きいほど音声の拡散音レベルが小さくなり、STIの値は、暗騒音がない場合は大きく、暗騒音があるときは小さくなる。第2節、第3節ともに、STIの変化幅が最も小さいのは、残響抑制と騒音低減の両方を考慮した目標値であり、第3章の結論としては、上記の目標値が吸音設計の目標値として望ましいと考えられた。

第4章では、理論的検討の妥当性を検証するために行った実験について述べた。第1節では、聴感実験の目的と内容について簡単に説明し、第2節では、理論的検討の条件の音場を再現する方法や、評価方法について詳細に説明した。第3節では、実験結果を述べた。基準条件との一対比較の結果から、暗騒音がない場合の室寸法の変化に対する「聴き取りにくさ」の変化は、理論的検討と同様な傾向であることが分かった。音声の拡散音レベルの変化が評価に与える影響として最も大きく、床面寸法が小さいほど聴き取りにくいと評価された。この条件の場合、室寸法に対して聴感的な差が最もなく、目標値として望ましいのは理論的検討と同じく、残響抑制と騒音低減を考慮したものであった。次に、拡散音が支配的で暗騒音がある場合、拡散音を妨害音と扱う本実験のインパルス応答の性質や、音声暗騒音によりマスキングされる影響で、「聴き取りにくさ」「うるささ」とともに変化が小さく、回答にばらつきが生じ、変化を聴き分けられていなかった。最後に、直接音が支配的で暗騒音がある場合、暗騒音がない場合に比べて、室寸法の変化に対する「聴き取りにくさ」の評価値の変化幅がSTIと同じく小さくなった。インパルス応答の性質もあり、暗騒音がある場合の床面寸法の変化に対する「聴き取りにくさ」の評価はSTIと反対の傾向を示した。また、「うるささ」については、音声の拡散音レベルの変化は聴き分けられたが、暗騒音レベルの違いは認識できていなかった。暗騒音がある場合は、床面寸法の変化による影響が支配的で、どの目標値が最適かとは一概に言えなかった。

以上より、本研究では、居住空間の吸音設計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について確認した。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。聴感実験より、暗騒音がないとき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得られなかった。

5.2 今後の課題

本研究では、前述の通り、吸音設計目標値を設定した場合の残響や騒音の変化について理論的に検討した後、聴感的に同様な変化を生じているか確認し、各吸音設計目標値の比較を行った。しかし、研究上、便宜的に設定した条件上における検討であり、より現実的な室形状、室寸法、吸音面の配置等の物理条件における変化について再度検討する必要がある。事実、暗騒音がある場合の空間を想定した理論的検討の STI の結果に対し、実験的検討の結果では反対の傾向を示し、その原因の一つとして考えられるのが、本実験のインパルス応答の性質であった。初期反射音到来の時刻を、対象空間の条件に対し、より現実的に設定したインパルス応答を用いれば、実験で影響が大きかった音声の拡散音の聴感印象に与える効果が変わると考えられる。

また、暗騒音がない場合と比べ、暗騒音がある場合は、吸音設計目標値の設定方法が、聴感印象に与える変化にあまり差がないと示した。だが、音源-受音点距離が臨界距離より遠く、拡散音レベルが支配的である時の条件について、現実的なインパルス応答を用いた条件で印象評価を行えば、異なる印象の変化を示す可能性がある。

加えて、本実験では暗騒音がある場合、床面寸法が変化すると、天井高の変化に対する「聴き取りにくさ」「うるささ」の変化の差が小さい吸音設計目標値も変化した。この点を考慮して、室用途を仮定し床面寸法を更に細かく変化させ、室規模を限定した上で設定して、検討を行う必要があると考えられる。上記の再検討により、残響抑制と騒音低減の関係の中で、室用途に合わせた最適な吸音設計目標値の設定方法が定まることを期待する。

以上、本論文をまとめ、残された課題を示した。居住空間に関する吸音設計目標値が設定されることによって、快適な音環境が確保され、吸音不足による身体的障害がなくなることが願い、本論文を締めくくる。

目次

図 1.1	吸音設計目標値を設定するメリット	4
図 2.1	床面積あたりの騒音源	7
図 2.2	(a)～(c)条件の天井高に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化	10
図 2.3	平均吸音率一定条件の室寸法に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化	11
図 2.4	DIN グループ A の目標残響時間 ^[10]	15
図 2.5	周波数帯域に対する残響時間の許容範囲 ^[10]	15
図 2.6	DIN グループ B の天井高に対する残響時間とレベル差の変化	17
図 2.7	学校教室想定天井高に対する残響時間とレベル差の変化	18
図 2.8	待合室想定天井高に対する残響時間とレベル差の変化	19
図 3.1	MTF の概念 ^[13]	23
図 3.2	音声伝送性能のクラスと STI ^[13]	26
図 3.3	STI 予測の手順 ^[16]	27
図 3.4	室寸法のイメージ	29
図 3.5	学校教室想定天井高に対する C50 の変化	30
図 3.6	学校教室想定 STI の変化	31
図 3.7	学校教室想定臨界距離の変化	32
図 3.8	学校教室想定音源—受音点距離を考慮した STI	34
図 3.9	近距離会話，中距離会話のイメージ	35
図 3.10	床面積に比例して増大する騒音源	36
図 3.11	学校教室想定天井高に対する SN 比の変化：(a)～(c)3 条件の場合	38
図 3.12	学校教室想定天井高に対する SN 比の変化：(d)平均吸音率一定の場合	38
図 3.13	学校教室想定暗騒音を考慮した STI の変化：(a)～(c)3 条件の場合	39
図 3.14	学校教室想定暗騒音を考慮した STI の変化：(d)平均吸音率一定の場合	39
図 3.15	室寸法のイメージ	40
図 3.16	待合室想定室寸法の変化に対する C50 の変化	41
図 3.17	待合室想定 STI の変化	42
図 3.18	待合室想定臨界距離の変化	44
図 3.19	待合室想定音源—受音点距離を考慮した STI：(a)，(b)の場合	46
図 3.20	待合室想定音源—受音点距離を考慮した STI：(c)，(d)の場合	47
図 3.21	待合室想定音源—受音点距離を考慮した STI：(e)の場合	48
図 3.22	待合室想定室寸法の変化に対する SN 比の変化：(a)～(c)3 条件の場合	51
図 3.23	待合室想定室寸法の変化に対する SN 比の変化：(d)平均吸音率一定の場合	52

図 3.24	待合室想定 of 暗騒音を考慮した STI の変化 : (a)~(c)3 条件の場合	53
図 3.25	待合室想定 of 暗騒音を考慮した STI の変化 : (d)平均吸音率一定の場合	54
図 4.1	無響室における被験者実験の様子	57
図 4.2	音声音源とバブルノイズの周波数特性	61
図 4.3	インパルス応答波形	62
図 4.4	7ch 再生システム	63
図 4.5	再生システムの設備	64
図 4.6	音声の直接音再生スピーカ	64
図 4.7	測定の様子	65
図 4.8	6ch 再生のスピーカ	65
図 4.9	実験室内の仕様	66
図 4.10	再生音源の提示方法	67
図 4.11	被験者実験教示文	68
図 4.12	「聴き取りにくさ」の平均評価点	74
図 4.13	「うるささ」の平均評価点	75
図 4.14	残響時間の変化率と評価語の対応関係	79
図 4.15	音声の拡散音レベルの差分と評価語の対応関係	80
図 4.16	暗騒音レベルの差分と評価語の対応関係	81
図 4.17	STI の差分と評価語の対応関係	82

表目次

表 2.1	グループ A の空間の説明と用途例	13
表 2.2	グループ A の目標残響時間	13
表 2.3	グループ B の空間の説明と用途例	16
表 2.4	グループ B の推奨事項	16
表 3.1	音声伝送性能のクラスとそれらの位置付け ^[13]	26
表 3.2	話し方に対する音声レベルと音声のパワーレベル ^[25]	35
表 4.1	被験者実験の設定条件(音声の直接音レベルは 48,60 dB の 2 条件)	60
表 4.2	二元配置分散分析の結果	70
表 4.3	t 検定の結果	70
表 4.4	基準条件に対する音響物理指標の差分・変化率	73
表 4.5	相関係数	76

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] 吾田富士子，保育の音環境と保育の質-保育者の気付きから吸音材使用に取り組んだ園の音調査から-，藤女子大学紀要第49号，pp.77-84，2012
- [3] 川井敬二，保育施設の音環境保全に向けて-海外基準と我が国における取り組み-，日本音響学会誌第72巻3号，pp.160-165，2016.
- [4] WHO : Guidelines for Community Noise, 1999.
<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>(参照 2019.1.21)
- [5] DES : Building Bulletin 93(BB93), 2003.
<https://www1.nyc.gov/site/buildings/codes/building-bulletins.page>(参照 2019.1.21)
- [6] GOV.UK : Building Regulations, 2010. http://w2l.dk/file/155699/BR10_ENGLISH.pdf(参照 2019.1.21)
- [7] ANSI/ASA : S12.60-2010, Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, 2010.
http://acousticalsociety.org/about_acoustics/acoustics_of_classrooms(参照 2019.1.21)
- [8] South Australia : DECD, 2015.
<http://www.decd.sa.gov.au/docs/documents/1/DecsFacilitiesDesignStand.pdf>(参照 2019.1.21)
- [9] South Australia : Early childhood facilities(birth to age 8) design standards and guidelines, 2015. <http://www.decd.sa.gov.au/docs/documents/1/Earlychildhoodfacilities.pdf>(参照 2019.1.21)
- [10] DIN 18041 : 2016, Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design, 2016.
- [11] W.C.Sabine, Collected Papers on Acoustics, Peninsula Publishing, Los Altos, Calif., pp.84, 1993.
- [12] Deutsches Institut für Normung, DIN, 1917, <https://www.din.de/de> (参照 2019.1.21)
- [13] 日本建築学会編，都市・建築空間における音声伝送性能評価基準・同解説，日本建築学会，pp.29-35，pp.59-60，2011.
- [14] T.Houtgast and H.J.M.Steeneken : The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility, *Acustica* 28, pp.66-73, 1973.
- [15] H.J.M.Steeneken and T.Houtgast : A physical method for measuring speech-transmission quality, *J.Acoust. Soc. Am.* 67, pp.318-326, 1980.
- [16] T.Houtgast and H.J.M.Steeneken and R.Plomredicting : Speech Intelligibility in Rooms from the

- Modulation Transfer Function. I.General Room Acoustics., *Acustica*, 46, pp.60-72, 1980.
- [17] IEC 60268-16, Sound system equipment - Part 16 : Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, International Electrotechnical Commission, 2003.
- [18] Ha.Sato, M.Morimoto, M.Wada, Hi.Sato : Objective measures for estimating listening difficulty ratings for young and elderly listeners in public spaces, CD-ROM Proceedings of WESPAC IX, Seoul, Korea, 6 pages, 2006.
- [19] 前川純一, 森本政之, 阪上公博, 建築・環境音響学 第3版, 共立出版株式会社, pp.62-63, 2015.
- [20] ISO 3382-1 : 2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1 : Performance spaces.
- [21] J.S.Bradley, R.Reich, and S.G.Norcross, A just noticeable difference in C_{50} for speech, *AI.Acoust.* 58, pp.99-108, 1999.
- [22] 羽入敏樹, 星和磨, 小山由美, 室内音響理論に基づくスピーチプライバシー対策の検討- プライバシー臨界距離の提案-, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2016-46, 2011.
- [23] 小林正明, 佐藤洋, 西川嘉雄, 室の規模と吸音率に基づいた STIr の推定, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2010-37, 2010.
- [24] 日本建築学会編, 日本建築学会設計計画パンフレット 4 建築の音環境設計 (新訂版), 株式会社彰国社, p51, 2007.
- [25] DIN 18041 : 2016, Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design - AnnexC : Speech communication, 2016.
- [26] 日本建築学会編, 建築物の遮音性能基準と設計指針, 技法堂株式会社, 1997.
- [27] 日本建築学会編, 都市・建築空間における音声伝送性能評価基準・同解説, 日本建築学会, pp.71-74, 2011.
- [28] 重点領域研究「音声言語」・試験研究「音声 DB」連続音声データベース(PASL-DSR), 筑波大学知能情報生体工学研究室, 1991.
- [29] D.F.Hoth, Room noise spectra at subscriber's telephone locations, *J.Acoust. Soc. Am.*, 12, pp.499-504, 1941.
- [30] 梶田将司, 小林大祐, 武田一哉, 板倉文忠, ヒューマンスピーチライク雑音に含まれる音声的特徴の分析, 日本音響学会誌 53 巻 5 号, pp.337-345, 1997.
- [31] 矢野隆, 五十嵐寿一, 他, 騒音の社会反応の測定方法に関する国際共同研究-日本語のうるささの尺度の構成-, 日本音響学会誌第 58 巻 2 号, pp.101-110, 2002.
- [32] 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, pp.76-80, 2015.

謝辞

本論文は筆者が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，同専攻の佐久間哲哉准教授のご指導のもとに行った研究をまとめたものです。

佐久間先生には研究の背景から，テーマ内容，本研究に取り組むにあたっての姿勢，研究的視点だけでなく音響設計者の立場からどのように本研究を捉えるべきか等の多角的な指導を頂きました。

同専攻，佐藤淳准教授には副指導を担当いただき，建築学専攻者としての観点や，本研究の最終的な目標の見解についてご指摘を賜りました。

佐久間研究室の井上尚久特任助教，博士課程の會田祐さん，劉金雨さん，榎本貴之さん，孔敬受さん，研究室の先輩である LIMESA Richard Arthur Jeremia さん，角谷純平さん，駒井彩乃さん，坂吉佑太さんには研究やそれ以外の面でも沢山のアドバイスを頂きました。ありがとうございました。

後輩の中津成博さん，山崎泰知さん，田主望さんも私の研究生活を支えてくださいました。特に兪凡さんには，被験者実験の際，実験条件の再現のため沢山の時間を割いていただきました。兪さんのご助力のお陰で，実験を行えたと言っても過言ではありません。

同期の谷野葵さん，堤遼さん，西川宏作さん，松井温子さんには他愛もない会話から，研究に対する考え方に至るまで沢山の話に付き合ってもらい，たくさん刺激をもらいました。修士学生としての2年間，多くの時間を共有し切磋琢磨して楽しい時間を過ごすことができました。本当にありがとうございました。

最後に，筆者の学生生活を暖かく見守り，支えてくれた両親，友人に多大なる感謝の意を表します。

2019年1月21日
坂本 栞

発表論文一覧

- 修士論文梗概

- 本研究に関する発表論文

坂本葉, 佐久間哲哉, 居住空間の吸音設計の目標値に関する基礎的考察.
日本音響学会研究発表会講演論文集(秋), pp. 1447-1448, 2018.

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 の下限値が 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 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m(H)}$ 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。 $h = 2.5 \sim 5.0 \text{ m}$ 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	$h \leq 2.5 \text{ [m]}$	$h > 2.5 \text{ [m]}$
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	$a = 0.30$	$b = 1.47$

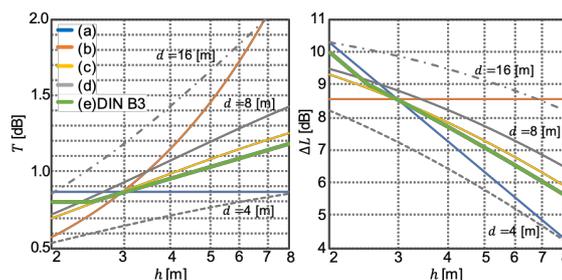


図1. 室寸法の変化に対する残響時間(左)とレベル差(右)の変化

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 $d = 4, 8, 16 \text{ m}$ 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。

$$m(F) = [1 + (2\pi FT/13.8)^2]^{-1/2} [1 + 10^{(-S/N)/10}]^{-1} \quad (12)$$

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、暗騒音無しの時の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の時は暗騒音無しの

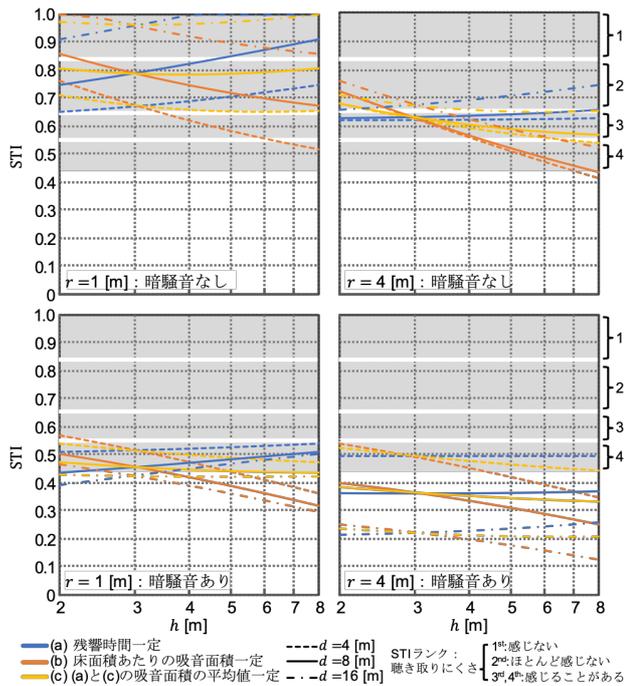


図2. 室寸法や暗騒音の変化に対するSTIの変化

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

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。 $r = 1$

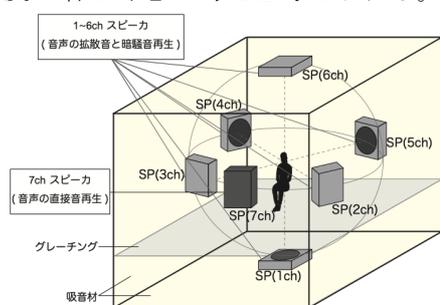


図 3. 実験の再生システム

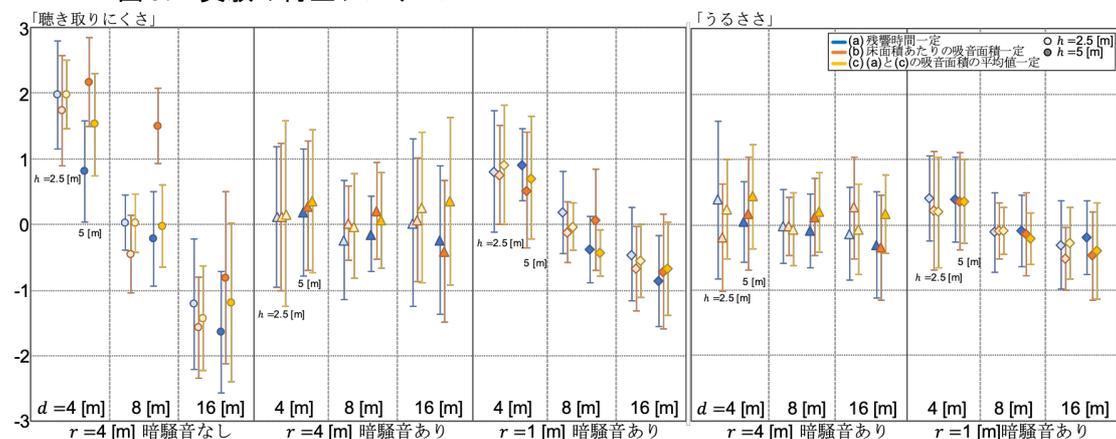


図 4. 「聞き取りにくさ」(左)と「うるささ」(右)の評価結果

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有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.

居住空間の吸音設計の目標値に関する基礎的考察*

☆坂本葉, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1 はじめに

居住空間の吸音には残響抑制と騒音低減の役割があり, 設計時の目標値としては残響時間や平均吸音率が考えられる。学校の音環境に関する AIJES^[1]では諸室の推奨値が示されているが, オフィス, 保育所, 公共空間等では寸法や騒音源が多様であり, 目標値の設定には不明な点がある。本報では残響抑制と騒音低減の両面から, 吸音目標値の設定方法について理論的に考察を行う。

2 吸音目標値に関する理論的考察

以下(a)~(d)の4種類の吸音目標値に関して, 拡散音場の仮定の下, 天井高に対する残響時間と室内平均音圧レベルの変化を理論的に考察する。ここで, 騒音源は空調騒音や人の活動音等を想定し, 床面積当たりの音響パワーレベルを一定と仮定する。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]
室内音圧レベルについては, 次式で表される床面積当たり音響パワーレベルに対する相対レベルに着目する。

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

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 は次式の通り天井高が増すと低下する。

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

(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て, T は次式の通り天井高に比例して増大する。

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

(c) 上記2ケースの吸音面積の平均値を一定:

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

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

以上3種類の設定に関して, 天井高に対する残響時間と室内音圧レベルの変化を Fig. 1 に示す。(a)では低い天井高で ΔL が増大, (b)では高い天井高で T が増大し, 天井高によって明確な優劣が生じる可能性がある。一方, (c)では(a),(b)の中間的な性質を示し, 天井高が増すと T は若干増大するものの, ΔL は若干

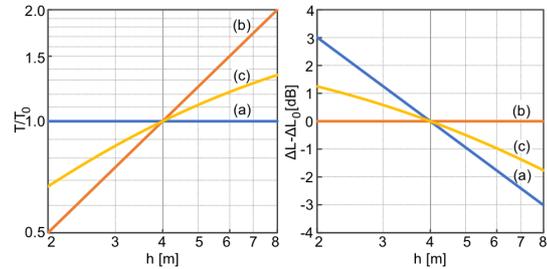


Fig. 1 Relative reverberation time (left) and SPL (right) versus ceiling height for Cases (a)~(c).

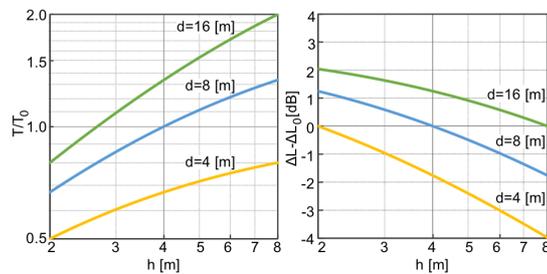


Fig. 2 Relative reverberation time (left) and SPL (right) for Case (d) with different floor widths.

低下し, トレードオフが生じる。

(d) 平均吸音率を一定: $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_0$

床面の形状によっても変化するため, 床面が辺長 d [m]の正方形の場合を想定すると, 次式が導出される。

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

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

Fig. 2 に $d = 8$ [m]を基準条件とした場合の天井高に対する変化を示す。この場合, (c)と同様に T と ΔL の変化にトレードオフが生じているが, 床面積が広くなると両者とも増大し, 明確な劣化が生じる可能性が示唆される。

3 ドイツ工業規格に関する考察

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基準値が設定されている。Table 1 に示す5つの室用途類型に対して, 次式の通り A/V の下限値が天井高の関数として設定されており, 間接的に残響時間の上限値を定めている。

* Basic consideration on target values for sound absorption design of living spaces. by SAKAMOTO, Shiori and SAKUMA, Tetsuya (Univ. of Tokyo).

Table 1 Room usages and parameters.

Usage	$h \leq 2.5$ [m]	$h > 2.5$ [m]
B1: no stay	N/A	N/A
B2: short stay	$a = 0.15$	$b = 4.80$
B3: long stay	$a = 0.20$	$b = 3.13$
B4: need for noise reduction & room comfort	$a = 0.25$	$b = 2.13$
B5: special need for noise reduction & room comfort	$a = 0.30$	$b = 1.47$

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

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

上記基準値に関して、天井高に対する T と ΔL の変化を Fig. 3 に示す。前節の(c),(d)と同様に、天井高の上昇に対して T の増大を許容しつつも、 ΔL は低下することがわかる。但し、各室用途では、天井高の対数に対して T の傾きは一定であるが、 ΔL の傾きは B2 から B5 の順で緩やかになっている。

4 諸室の各目標値の比較

(1) 学校教室

学校の普通教室を想定し、AIJES 推奨値に基づき、(a)~(c)の目標値を $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m(H)}$ で $T_0 = 0.6$ [s]、(d)では $\bar{\alpha}_0 = 0.2$ とする。DIN では学校教室を含む B5 の基準値と比較する。

Fig. 4 に各目標値設定における天井高に対する T と ΔL の変化を示す。天井高 2.5~5.0 m の範囲において、(a)では ΔL が 3 dB 変化し、(b)では T が 0.5~1.0 s となっている。一方、(c)では T が 0.5~0.8 s、 ΔL が 1.5 dB の変化に留まり、変化幅は(d)と同程度である。特に(c)は DIN の値とほぼ一致している。

(2) 待合室・休憩室

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

Fig. 5 に各目標値設定における T と ΔL を示す。天井高 2.5~5.0 m の範囲において、(a)では学校教室と同じく ΔL が 3 dB 変化し、(b)では T が 0.7~1.4 s、(c)では T が 0.8~1.1 s、 ΔL が 1.8 dB の変化となっている。一方、(d)では天井高の範囲に加えて床面辺長 4~16 m の範囲を想定すると、 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。また、ここでも(c)は DIN とかなり近い値となっている。

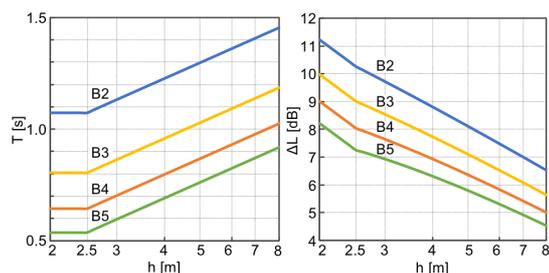


Fig. 3 Reverberation time (left) and SPL (right) for the room usages B2 to B5 of DIN 18041.

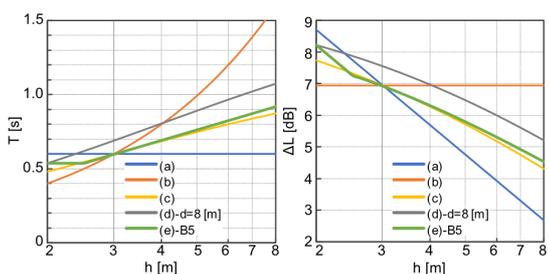


Fig. 4 Reverberation time (left) and SPL (right) versus ceiling height for classroom (B5).

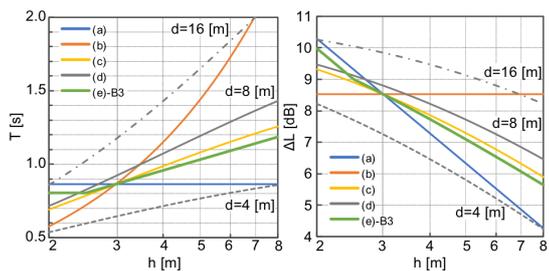


Fig. 5 Reverberation time (left) and SPL (right) versus ceiling height for waiting/resting room (B3).

5 おわりに

本報では居住空間の吸音目標値に関して、一般的な残響時間や平均吸音率に加え、他の設定方法も含めて理論的考察を行った。目標値の設定方法によっては、天井高に応じて残響時間あるいは室内音圧レベルが変化し、残響過多や騒音増幅の恐れもあることがわかった。特に平均吸音率一定では、床面積によっても両者は変化するため、室規模を限定しない場合には目標値に不向きと考えられる。

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.

