

吸音面が偏在する狭小空間での携帯電話通話による
聴き取りにくさの評価

関西大学 環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 I 研究室
建 12-110 山田祐馬
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

第1章	はじめに	2
1.1	研究背景	2
1.2	既往研究	3
1.3	研究目的	5
第2章	携帯電話音声処理	6
第3章	実験方法	8
3.1	発話空間条件	8
3.2	実験用音声データ作成手順	10
3.3	実験手順	11
第4章	実験結果	14
4.1	確率分布	14
4.2	距離尺度構成	16
4.3	吸音率が聴き取りにくさに与える影響	18
4.4	減衰除去インパルス応答から算出した STI	25
第5章	設計指針	26
第6章	考察	28
第7章	おわりに	29
7.1	まとめ	29
7.2	今後の課題	30
	参考文献	31

第1章 はじめに

1.1 研究背景

建築空間が良好な音声伝送性能を有することは、建物の用途を問わず、重要な要件である。その中で医療施設やオフィスなどでは、携帯電話利用による外部との情報交流が盛んである。しかし、携帯電話ブースのような狭小空間（約 5 m³ ほど）から通話すると、相手の電話口から再生される受聴音声が非常に聴き取りにくくなるという現象が報告されている[1]。従って、十分な会話了解性を確保するための携帯電話ブースの寸法や内装に関する設計用チャートが必要とされている。

1.2 既往研究

矢入ら[1]は、携帯電話ブースとして設けられた狭小空間で携帯電話を使用する際に、通話相手の電話口から再生される音声の聴き取りにくさが著しく増大する問題について研究を行った。携帯電話ブースは、一般的に、床面積が $1\sim 2\text{m}^2$ 、室容積が $2\sim 5\text{m}^3$ の狭小空間で、扉がついている密閉型（写真1）と扉がついていない半開放型（写真2）がある。



写真1

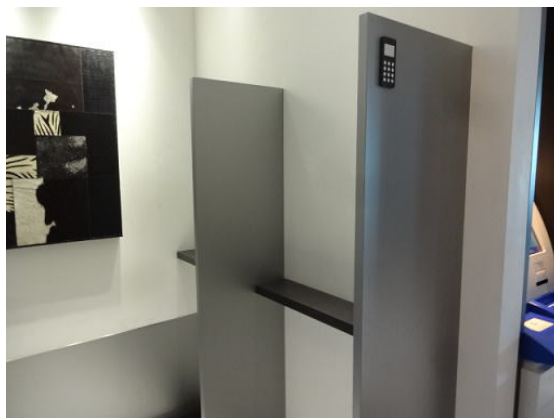


写真2

既報[1]によれば、狭小空間において携帯電話ブースで通話する際の聴き取りにくさの増大は、残響成分によるものではなく、残響感への寄与が比較的少ない部分、インパルス応答の極めて初期部分に、狭小空間特有の遅れ時間が短く、パワーの大きい反射成分が携帯電話の情報処理過程になんらかの影響をもたらした結果であると考察されている。「STI (音声伝達指標のことで、0~1 をとりその数値が大きいほど聴き取りやすいと判断する)」、「男声／女声」、「大空間／狭小空間」、「実音場／携帯電話伝送系経由」で場合分けされた音声刺激のうちの2つを無作為に並べ、十分暗騒音の小さい条件のもと、聴き取りにくさを評価させる聴感実験を行った。

その結果、携帯電話伝送系を経由しない刺激を提示した場合は、残響感が大きいほど、聴き取りにくくなるという対応が見られるが、携帯電話伝送系を経由すると、残響感は大空間のほうが大きいにもかかわらず、聴き取りにくさは狭小空間のほうが大きくなる傾向がみられた。さらに、狭小空間で発話されて携帯電話伝送系を経由した刺激を提示した場合、その狭小空間の STI が高いにもかかわらず、聴き取りにくさが著しく増大することが報告されている。

このことを踏まえ、片桐ら[2]は、どのような空間で発話を行った際にどの程度受話音声の聴き取りにくくなるかを明らかにするため、十分に暗騒音の小さい条件のもとで聴感実験を行った。「室容積」、「吸音率」、「音声信号」で場合分けされた試験刺激と、発話空間の影響を受けていない基準刺激の聴き取りにくさを一対比較で評価させた。その結果、暫定的な指針として「吸音率・室容積・%聴き取りにくさによる設計チャート」を提案している。

その後、矢入ら[3]は、片桐の実験データに対し、発話空間のインパルス応答から減衰を除去した応答を用いて STI を算出することで、受話音声の聴き取りにくさをより高い精度で予測できる可能性を示した。

1.3 研究目的

本研究では、「室容積」、「吸音面」、「音源場所」で場合分けされた試験刺激と発話空間の影響を受けていない基準刺激を連続して提示し、聴き取りにくさを評価させる聴感実験を行い、「吸音面」を偏在させることによる既往研究との評価の違いを検討し、新たに設計用チャートを作成し、より実用性の高い設計用チャートを作成することを目的とする。また、建築音響設計者の立場から、受話音声の聴き取りにくさに配慮した狭小空間における携帯電話音声伝送性能の評価を行うことで、精度の高い設計指針の構築を試みる。

第2章 携帯電話音声処理

既報[1]によって、狭小空間で発話された携帯電話音声の受話側での聴き取りにくさが著しく増大する現象に、携帯電話の情報処理が大きく影響していることが分かっている。

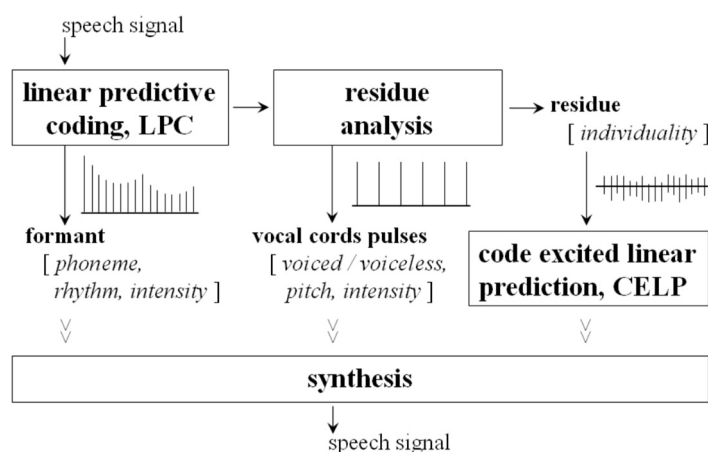


図1 携帯電話音声処理概略図

携帯電話の音声情報処理は、音声生成機構の構造的なモデルの知識を利用する高度に音声特有のものである。一方、音波形の生成機構は本来生理的な器官の運動であるが、物理的な音響現象としても理解可能である。その生成過程は、音源の生成と調音に分けられる。有声音源は声帯振動に対応するパルス列で近似され、そのピッチ周期が声の高さに、周期の時間的変化がアクセントやイントネーションに対応する。無声音源は空気の乱流に対応する白色雑音（ホワイトノイズ）で近似され、その平均エネルギーが強さに対応する。音源で発生した音波は、舌、唇、顎などの調音器官で形成される音響的な管の共鳴作用によってフォルマントが形成される。これが調音である。携帯電話の音声情報処理の概略を図1に示す。送信側の携帯電話のマイクロホンに入力された音声は、線形予測分析によってその標本値間に内在する相関が除去される。ここで同定されるシステム関数は全極型であり、その極がフォルマンに対応する。したがって、これらが除去された後の残差には、有声音部では声帯パルスが、無声音部ではランダムノイズが含まれており、それを自己相関処理して得られるピーク処理から有声か無声の判断、声帯パルス音源のピッチ周期やパワーの推定が行われている。

線形予測過程の逆、すなわち残差を入力として、標本値間に相関関係を付与していく過程が音声合成であり、合成された信号が受信側の携帯電話から音声となって出力される。予測と合成は完全な逆操作であるから、分解して得られた残差をそのまま入力として与えれば原波形を忠実に再生できる。しかし、それでは情報圧縮にならないため、様々な簡略が行われるが、最も情報圧縮に貢献するのは、残差の処理過程にある。声帯パルスが除去された残差には、しゃべり手の個性が含まれており、これを使わないと本人の声には戻らない。携帯

電話通信では、様々なパターンが事前に番号登録されたコードブックからそのしゃべり手の残差に最も近いものを選択する手法がとられている。そのようにして合成された音声は非常に高品位である。以上の携帯電話音声処理中の線形予測分析は、入力に単一のパルスを仮定しているため、前のパルスによるシステムの応答が十分減衰する前に次のパルスが入力されるような状況が発生すると、フォルマントの推定精度や声帯パルス列に同調した残差の予測精度に影響を及ぼす[4]。

第3章 実験方法

どのような空間で発話を行うと聴き取りにくくなるのかを明らかにするため、様々な空間で発話を行った際の受話音声をシミュレートしたものと、空間の影響を受けていない基準受話音声との比較から聴き取りにくさを評価させる聴感実験を行う。

3.1 発話空間条件

音声条件の種類について説明する。本研究で考察の対象とする携帯電話ブースの空間条件は以下に示す①～③である。

- ① 室容積（高さはすべて 2.3 m で、3.726 m³（平面寸法 1 m × 1.62 m）の部屋、14.904 m³（平面寸法 2 m × 3.24 m）の部屋、59.616 m³（平面寸法 4 m × 6.48 m）の部屋、238.464 m³（平面寸法 8 m × 12.96 m）の部屋、953.856 m³（平面寸法 16 m × 25.92 m）の部屋）
- ② 吸音面（天井の 1/4 を吸音、天井の 1/2 を吸音、天井の 1/4 + 短辺側壁の 1/4 を吸音、天井の 1/2 + 短辺側壁の 1/2 を吸音、天井の 1/4 + 短辺側壁の 1/4 + 長辺側壁の 1/4 を吸音、天井の 1/2 + 短辺側壁の 1/2 + 長辺側壁の 1/2 を吸音）
- ③ 音源位置（床から 145 cm で、短辺から 60 cm、長辺から 60 cm、吸音面に近い側に音源を置いた場合を near、遠い側に置いた場合を far とする）

以下からは各空間条件を、室容積（1=3.726 m³、2=14.904 m³、3=59.616 m³、4=238.464 m³、5=953.856 m³）、吸音面（c1=天井の 1/4 を吸音、c2=天井の 1/2 を吸音、cs1=天井の 1/4 + 短辺側壁の 1/4 を吸音、cs2=天井の 1/2 + 短辺側壁の 1/2 を吸音、csl1=天井の 1/4 + 短辺側壁の 1/4 + 長辺側壁の 1/4 を吸音、csl2=天井の 1/2 + 短辺側壁の 1/2 + 長辺側壁の 1/2 を吸音、ref=吸音面なし）、音源（near=短辺から 60 cm、far=長辺から 60 cm）という記号で示す。また、吸音面を簡略化し図示したものを図 2 に示す。天井面、短辺面、長辺面を展開し、寸法は室容積 1 の寸法、灰色で示す部分を吸音面とする。

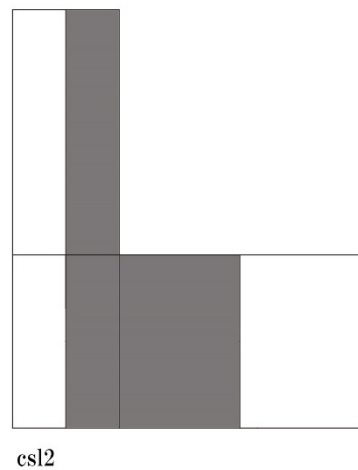
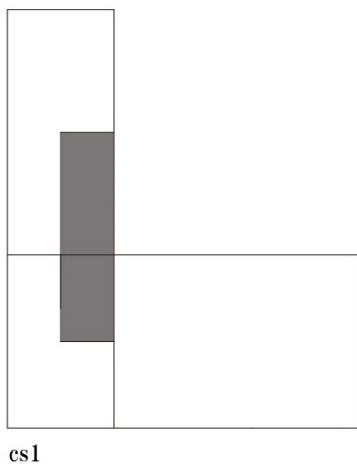
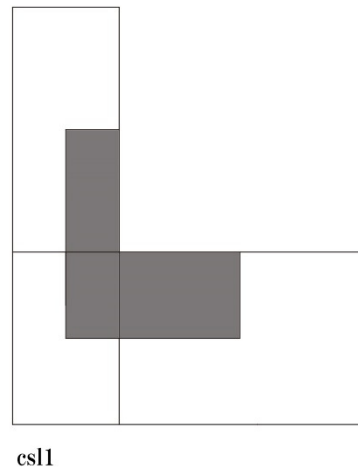
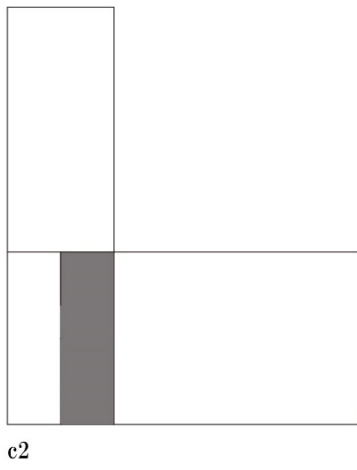
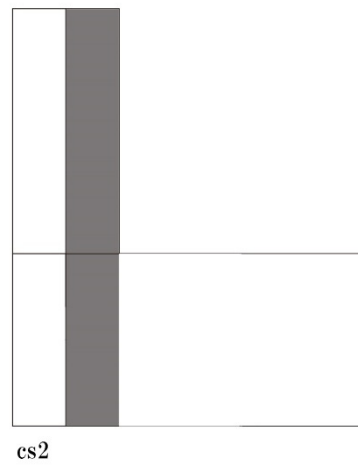
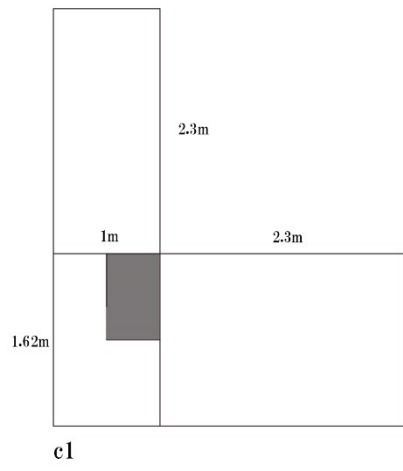


图2 吸音面简略图

3.2 実験用音声データ作成手順

聴感実験において使用した音声データについて説明する。幾何音響ソフトウェア（CATT CATT-Acoustic+TUCT）を用い 3.1 節の①～③の各空間条件のインパルス応答を算出し、それをドライソースに畳み込む事で、仮想音声を作成する。作成した音声を Apple iPhone へ入力し softbank 社の携帯電話回線を通して、別の Apple iPhone へ伝送する。信号を受け取った携帯電話から再生される音声は携帯電話ブースの空間条件、携帯電話音声処理の両方の影響を受けた音であり、以下からは「比較音」とする。一方、ドライソースをそのまま Apple iPhone へ入力し、同様に softbank 社の携帯電話回線を通して、別の Apple iPhone へ伝送する。信号を受け取った携帯電話から再生される音は携帯電話ブースの影響を全く受けておらず、携帯電話音声処理のみの影響を受けた音で、以下からは「基準音」とする。

3.3 実験手順

被験者は正常な聴力を有する男女 20 名とする。十分に暗騒音の低い空間（無響室）において、被験者にはヘッドホン（SONY MDR-CD900ST）を用い、普段携帯電話を使用している耳のみから刺激を提示し、聴き取りにくさを評価させた。刺激のサンプル数は 3.1 節の①～③を場合分けした 60 サンプル、及び、各室容積で吸音を全く行わない空間の 5 サンプルの計 65 サンプルである。

実験で提示する刺激は基準音と、比較音の刺激対であり、一対比較で評価させる。一方の刺激の提示後、0.5 秒の無音時間を設け、その後、もう一方の刺激を提示し、最後に、回答のための 5 秒間の無音時間を設けた。被験者に提示する刺激は 65 サンプルに、順序効果を相殺する為の前後の提示順序を入れ替えたサンプルを加え、計 130 サンプルとなる。さらに、データの信頼性を確保する為に、比較音を基準音とした刺激対を 2 サンプル加える。また、各試行の最初には文脈効果統制用に 4 サンプルの刺激対を加えるので、計 136 サンプルとなる。これらをランダムに並べ、被験者に提示し、評価させる。1 セットにかかる時間は約 60 分である。評価基準を図 3 に示す。また、教示文を図 4、回答用紙の一部を図 5 に示す。

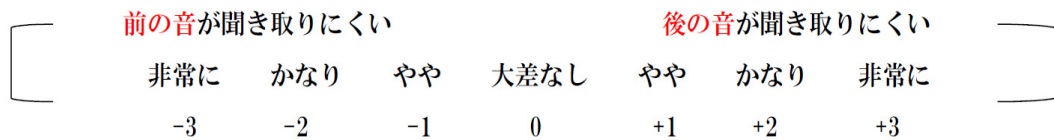


図 3 評価基準

音声評価の聴き取りにくさについての評価実験

概要

この実験は携帯電話ブースでの携帯電話の聴き取りにくさについての評価実験です。

設問数は計 136 問

実験時間は約 60 分 (30 分 休憩 5 分 30 分)

*設問 68 番が終わったところで 5 分ほどの休憩を行います。

評価方法

普段携帯電話で聴く時に使っている耳で聞いてもらいます。

一つの設問につき音声加工がされた坊ちゃんの目頭部分が 2 回流れます。2 つの音が流れた後にどちらが聴き取りにくかったかを評価表に記入してもらいます。

記入方法は 2 つの音を比べ、「前の音の方が聴き取りにくい」ほどマイナス側に、「後の音の方が聴き取りにくい」ほどプラス側に丸印を記入して下さい。聴き取りにくさに「大差がない」場合は 0 に丸を記入して下さい。

評価基準は -3 ~ +3 の 7 段階です。

	前の音が聞き取りにくい				後の音が聞き取りにくい			
	非常に	かなり	やや	大差なし	やや	かなり	非常に	
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	

(例)

一番の二つの音を聴き前の音のほうがかなり聴き取りにくいと感じた。

NO. 1 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3

というように[-2]に○を記入します。

*注意事項

- ・実験の回答は統計的に処理されるため、個人の情報が表に出ることはありません。
- ・途中で何らかの理由で実験を止めたいと思った場合には、中断したとしても何ら不利益をこうむることはありませんので、遠慮なくお伝えください。
- ・実験中にお聞き頂く音に関しては、一切質問にお答えできませんのでご了承ください。

評価用紙 1

年齢() 名前() 日付(/)

前の音が聞き取りにくい

後の音が聞き取りにくい

非常に かなり やや 大差なし やや かなり 非常に
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3

NO. 1	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 2	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 5	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 6	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 7	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 8	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 9	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 10	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 11	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 12	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 13	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 14	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 15	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 16	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 17	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 18	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 19	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 20	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 21	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 22	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 23	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 24	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 25	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 26	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 27	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 28	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 29	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 30	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 31	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 32	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 33	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 34	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 35	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 36	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 37	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 38	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 39	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 40	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 41	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 42	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 43	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 44	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 45	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 46	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 47	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 48	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 49	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
NO. 50	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

図 5 評価用紙

第4章 実験結果

4.1 確率分布

表1～表2に評価の確率分布を示す。例えば1行目の室容積1、吸音c1、音源farの場合1と回答した被験者が0.05（5%）である事が分かる。

室容積	吸音	音源	確率分布 カテゴリ						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	c1	far	0	0	0	0	0.05	0.525	0.425
1	c1	near	0	0	0	0	0.05	0.425	0.525
1	c2	far	0	0	0	0.075	0.075	0.65	0.2
1	c2	near	0	0	0	0	0.15	0.65	0.2
1	cs1	far	0	0	0	0	0.3	0.575	0.125
1	cs1	near	0	0	0	0	0.325	0.575	0.1
1	cs2	far	0	0	0	0.125	0.65	0.15	0.075
1	cs2	near	0	0	0.025	0.075	0.65	0.25	0
1	csl1	far	0	0.025	0	0.05	0.6	0.3	0.025
1	csl1	near	0	0	0.025	0.025	0.25	0.6	0.1
1	csl2	far	0	0	0.025	0.325	0.6	0.05	0
1	csl2	near	0	0	0.125	0.325	0.475	0.075	0
1	ref	ref	0	0	0	0.025	0	0	0.975
2	c1	far	0	0	0.05	0	0.25	0.5	0.2
2	c1	near	0	0	0	0	0.375	0.475	0.15
2	c2	far	0	0	0	0.05	0.65	0.25	0.05
2	c2	near	0	0	0.025	0.075	0.6	0.275	0.025
2	cs1	far	0	0	0	0.075	0.35	0.475	0.1
2	cs1	near	0	0	0.05	0.05	0.5	0.4	0
2	cs2	far	0	0	0	0.225	0.775	0	0
2	cs2	near	0	0	0.025	0.225	0.65	0.1	0
2	csl1	far	0	0	0	0.05	0.625	0.25	0.075
2	csl1	near	0.025	0	0	0.125	0.65	0.175	0.025
2	csl2	far	0	0	0.05	0.45	0.45	0.05	0
2	csl2	near	0	0	0.05	0.575	0.325	0.05	0
2	ref	ref	0	0	0	0	0.025	0.1	0.875
3	c1	far	0	0	0	0.075	0.675	0.225	0.025
3	c1	near	0	0	0.075	0.225	0.575	0.125	0
3	c2	far	0	0	0.025	0.125	0.75	0.1	0
3	c2	near	0	0	0	0.3	0.55	0.15	0

表1 確率分布

室容積	吸音	音源	確率分布 カテゴリ						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
3	cs1	far	0	0	0	0.225	0.5	0.275	0
3	cs1	near	0	0	0	0.275	0.625	0.1	0
3	cs2	far	0	0	0.075	0.25	0.625	0.05	0
3	cs2	near	0	0	0.05	0.425	0.5	0.025	0
3	csl1	far	0	0	0.025	0.125	0.725	0.125	0
3	csl1	near	0	0.025	0	0.475	0.45	0.05	0
3	csl2	far	0	0	0	0.4	0.55	0.05	0
3	csl2	near	0	0.025	0.1	0.55	0.225	0.1	0
3	ref	ref	0	0	0	0	0	0.275	0.725
4	c1	far	0	0	0.05	0.225	0.625	0.075	0.025
4	c1	near	0	0	0.1	0.45	0.425	0.025	0
4	c2	far	0	0	0.025	0.375	0.55	0.05	0
4	c2	near	0	0	0	0.6	0.4	0	0
4	cs1	far	0	0	0.05	0.225	0.675	0.025	0.025
4	cs1	near	0	0	0.025	0.4	0.55	0.025	0
4	cs2	far	0	0	0.025	0.525	0.45	0	0
4	cs2	near	0	0	0.075	0.6	0.325	0	0
4	csl1	far	0	0	0.075	0.275	0.575	0.05	0.025
4	csl1	near	0	0	0.1	0.55	0.275	0.075	0
4	csl2	far	0	0	0.05	0.65	0.275	0.025	0
4	csl2	near	0	0	0.075	0.725	0.2	0	0
4	ref	ref	0	0	0	0	0.175	0.75	0.075
5	c1	far	0	0	0	0.6	0.35	0.05	0
5	c1	near	0	0	0.1	0.7	0.15	0.05	0
5	c2	far	0	0	0.1	0.65	0.225	0.025	0
5	c2	near	0	0	0.1	0.775	0.125	0	0
5	cs1	far	0	0	0.1	0.65	0.25	0	0
5	cs1	near	0	0	0.1	0.55	0.3	0.05	0
5	cs2	far	0	0	0.1	0.625	0.275	0	0
5	cs2	near	0	0	0.2	0.55	0.25	0	0
5	csl1	far	0	0	0.05	0.625	0.325	0	0
5	csl1	near	0	0	0.2	0.7	0.075	0.025	0
5	csl2	far	0	0	0.1	0.725	0.175	0	0
5	csl2	near	0	0	0.05	0.7	0.225	0.025	0
5	ref	ref	0	0	0	0.3	0.6	0.1	0

表2 確率分布

4.2 距離尺度構成

実験において評価に用いた指標（-3：非常に、-2：かなり、-1：やや、0：大差なし、+1：やや、+2：かなり、+3：非常に）の数値そのものには意味がなく、各評価間に意味づけがなされていないので、統計的な処理が行うことができない。そのため、系列カテゴリ法を用いて-3～+3の評価を距離尺度Z値に変換する。文献[5]に従い、カテゴリの平均尺度値を求める方法を示す。各カテゴリの平均値 Z_c は次式で求められる。

$$Z_c = (y_1 - y_2) / (p_1 - p_2) \quad (1)$$

ただし、

y_1 = カテゴリ下限の縦座標

y_2 = カテゴリ上限の縦座標

p_1 = カテゴリ下限より下と判断された比率

p_2 = カテゴリ上限より下と判断された比率

である。式(1)を図示すると図6のようになる。

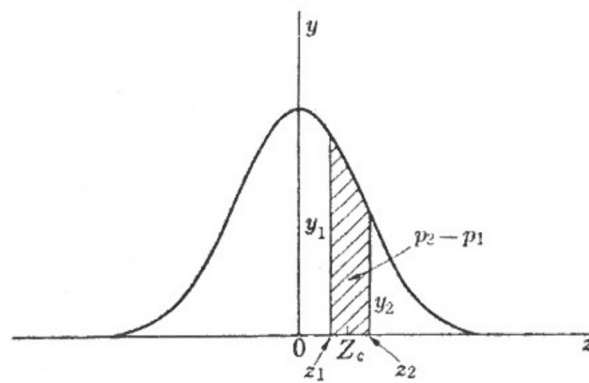


図6 標準正規分布とカテゴリの対応

ここで示す Z_c はZ値を意味する。式(1)を用いて、それぞれの評価のZ値の代表値、境界値を求めた結果を表3に示す。

	-3	-2	-1	0	1	2	3
代表値	0	0	0.090656	0.356415	0.636211	0.91218	1
境界値	0.095155	0.095155	0.191683	0.507878	0.779582	0.986633	

表3 Z値

図7は縦軸をZ値、横軸を評価として表3の関係を図示したものである。

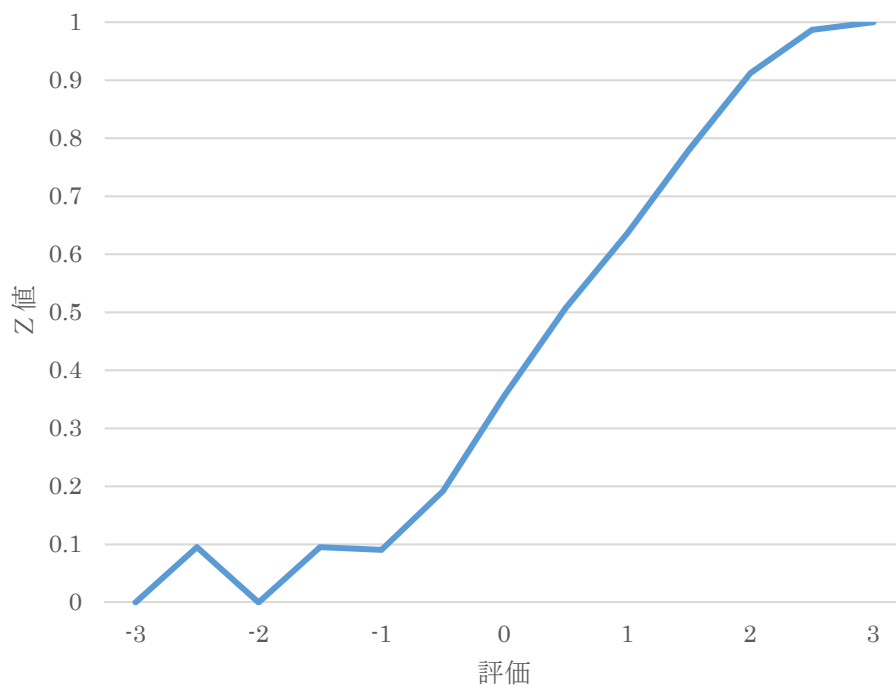


図7 Z値と評価の関係

各音場について、表1、2の確率分布に各カテゴリの代表値をかけ、それを足す、すなわち、加重平均をとることで聴き取りにくさを数値化し、その値を「scale of listening difficulty」と呼ぶこととする。

4.3 吸音率が聴き取りにくさに与える影響

4.2 節で求めた scale of listening difficulty を縦軸に、平均吸音率を横軸に各音源 (near、far、near × far (near と、far の結果を平均したもの)) ごとに示す。ただし、吸音面 (c1、c2、cs1、cs2、cs11、cs12) が同じでも、室容積 (1、2、3、4、5) によって平均吸音率が異なる。想定した吸音材の吸音率周波数特性 (125、250、500、1k、2k、4k (Hz)) を表 4 に示すとともに、室容積ごとの平均吸音率を表 5～表 10 に示す。また、表 5～表 10 の 500 Hz のみの平均吸音率を表 11 にまとめる。図 8 には矢入らの研究[3]で示された結果を、図 9～11 には本論文で得た結果を示し、比較する。

周波数	125	250	500	1k	2k	4k
吸音率	0.03	0.17	0.44	0.62	0.65	0.79

表 4 吸音材の特性

c1	1	2	3	4	5
125	0.01053	0.010874	0.011307	0.011707	0.012028
250	0.014238	0.016993	0.020453	0.023652	0.026227
500	0.021388	0.028795	0.038094	0.04669	0.053611
1000	0.026156	0.036662	0.049854	0.062049	0.071867
2000	0.02695	0.037973	0.051814	0.064609	0.07491
4000	0.030658	0.044092	0.060961	0.076554	0.089108

表 5 c1 平均吸音率

c2	1	2	3	4	5
125	0.011059	0.011748	0.01249	0.013413	0.014057
250	0.018475	0.023987	0.029923	0.037304	0.042455
500	0.032777	0.047589	0.063543	0.08338	0.097222
1000	0.042311	0.063324	0.085957	0.114098	0.133734
2000	0.0439	0.065946	0.089693	0.119217	0.139819
4000	0.051316	0.078185	0.107125	0.143109	0.168217

表 6 c2 平均吸音率

cs1	1	2	3	4	5
125	0.011282	0.011495	0.011687	0.012009	0.012208
250	0.020254	0.021958	0.023497	0.026075	0.027667
500	0.037557	0.042136	0.046274	0.053202	0.057481
1000	0.049092	0.055589	0.061458	0.071286	0.077357
2000	0.051015	0.057831	0.063989	0.0743	0.080669
4000	0.059987	0.068294	0.075799	0.088366	0.096128

表 7 cs1 平均吸音率

cs2	1	2	3	4	5
125	0.012563	0.012989	0.013374	0.014019	0.014417
250	0.030507	0.033915	0.036995	0.04215	0.045335
500	0.065114	0.074273	0.082548	0.096403	0.104962
1000	0.088185	0.101177	0.112917	0.132572	0.144713
2000	0.09203	0.105662	0.117978	0.1386	0.151339
4000	0.109974	0.126588	0.141599	0.166731	0.182256

表 8 cs2 平均吸音率

cs1	1	2	3	4	5
125	0.0125	0.04625	0.012403	0.0125	0.0125
250	0.03	0.03	0.029225	0.03	0.03
500	0.06375	0.06375	0.061668	0.06375	0.06375
1000	0.08625	0.08625	0.083296	0.08625	0.08625
2000	0.09	0.09	0.086901	0.09	0.09
4000	0.1075	0.1075	0.103723	0.1075	0.1075

表 9 cs1 平均吸音率

cs2	1	2	3	4	5
125	0.015	0.0825	0.014806	0.015	0.015
250	0.05	0.05	0.04845	0.05	0.05
500	0.1175	0.1175	0.113336	0.1175	0.1175
1000	0.1625	0.1625	0.156592	0.1625	0.1625
2000	0.17	0.17	0.163802	0.17	0.17
4000	0.205	0.205	0.197446	0.205	0.205

表 10 cs2 平均吸音率

	1	2	3	4	5
c1	0.021388	0.028795	0.038094	0.04669	0.053611
c2	0.032777	0.047589	0.063543	0.08338	0.097222
cs1	0.037557	0.042136	0.046274	0.053202	0.057481
cs2	0.065114	0.074273	0.082548	0.096403	0.104962
csl1	0.06375	0.06375	0.061668	0.06375	0.06375
csl2	0.1175	0.1175	0.113336	0.1175	0.1175
ref	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 11 500Hz での平均吸音率

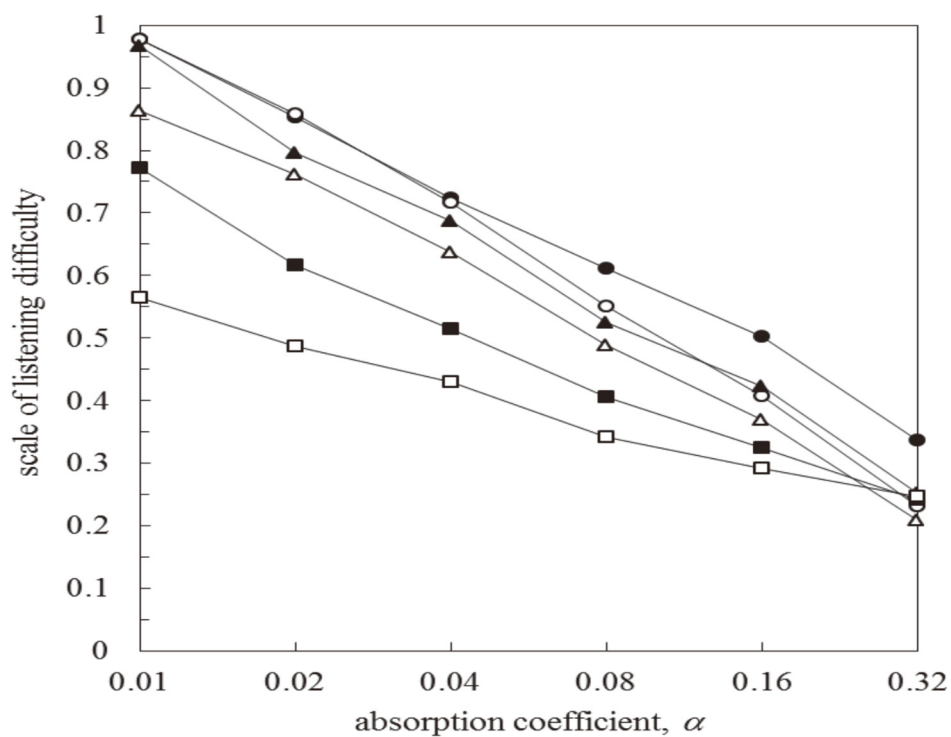


図 8 平均吸音率と聴き取りにくさの関係[3]

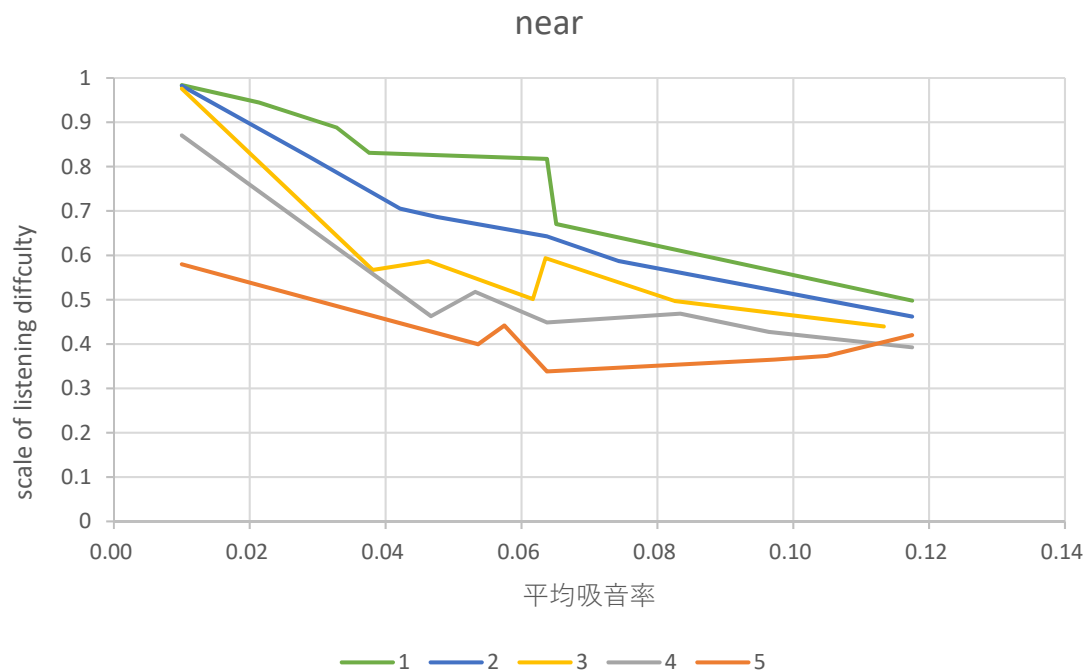


図9 平均吸音率と聴き取りにくさの関係 (near)

音源 near の場合、矢入らの研究と同様、平均吸音率に対する聴き取りにくさの変化は室容積に依存していることが分かる。室容積が小さいほど、また、平均吸音率が小さいほど聴き取りにくさが増大する傾向がある。

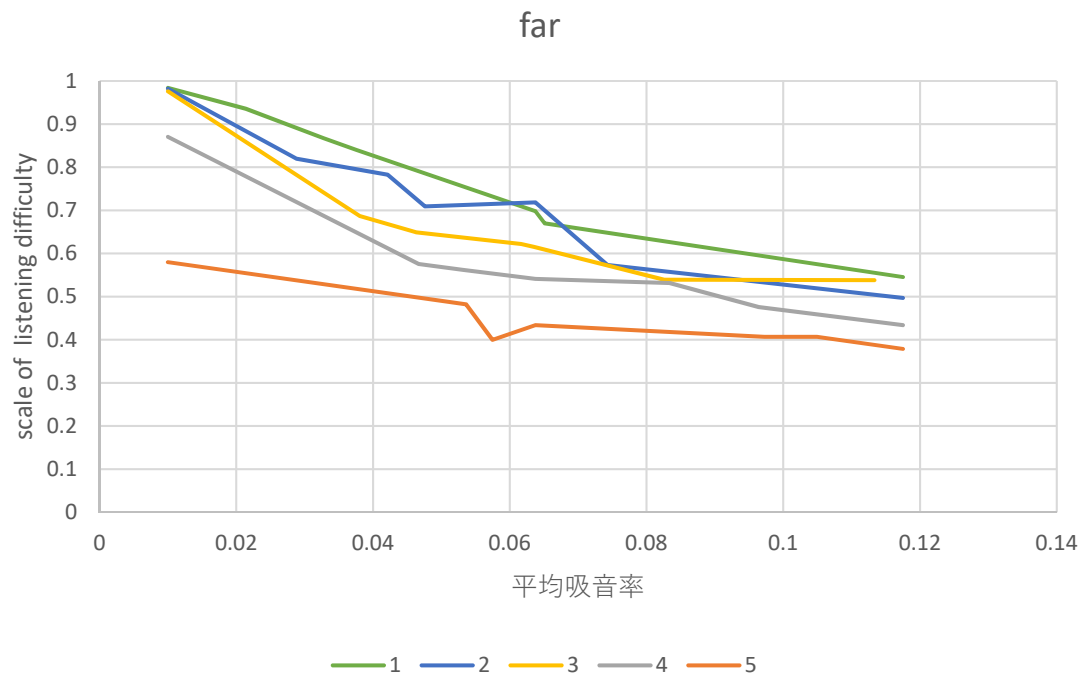


図 10 平均吸音率と聴き取りにくさの関係 (far)

音源 **far** の場合も音源 **near** の場合と同様に、平均吸音率が低下すると、聴き取りにくさが増大する傾向みられる。しかし、室容積 2~4 では室容積が小さくなると聴き取りにくさが増大する傾向に当てはまらない場合がある。特に、吸音面が **cs11**、室容積 2 の時に聴き取りにくさが増大している。

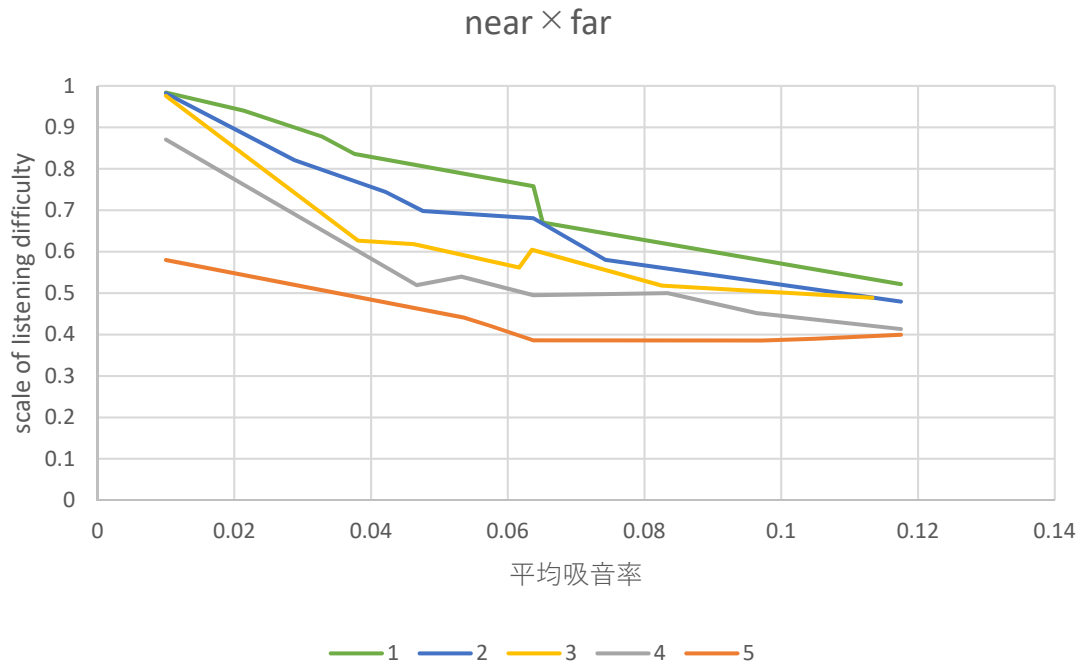


図 11 平均吸音率と聴き取りにくさの関係 (near × far)

音源 near、far の結果を平均したものを図 11 に示す。scale of listening difficulty の値は平均吸音率、室容積に大きく依存していることがわかる。室容積が小さいほど、また、平均吸音率が低下するほど聴き取りにくさが増大している。以上から、吸音面を偏在させた場合も、既報[3]での考察と同様に、聴き取りにくさは、「室容積」、「平均吸音率」に依存しているといえる。吸音面の配置場所の違いにより聴き取りにくさへの若干の影響はみられたが、明確な規則性は確認されなかった。

4.4 減衰除去インパルス応答から算出した STI

音声の伝送性能を表す物理指標である STI (Speech Transmission Index) は現在 IEC60268-16(2013)として規格化されており、音声伝送性能の測定、評価においてもっとも一般的に用いられる指標である。減衰除去インパルス応答から算出した STI の算出にあたっては、携帯電話のダイナミックレンジが 48 dB (8bit) であることから、余裕をみて Schroeder の減衰曲線が直接音のレベルから 30 dB 減衰するまでの時間で応答を打ち切る。また、音源特性は、携帯電話の伝送帯域が 3.4 kHz で高域遮断されるので、4 kHz と 8 kHz の 2 帯域の音声レベルを 0 dB に設定する。暗騒音の影響は考慮しない。また、減衰除去インパルス応答から算出した STI と聴き取りにくさの関係を図 12 に示す (決定係数 $R^2 = 0.749$)。STI の最大値は 0.75 とする。

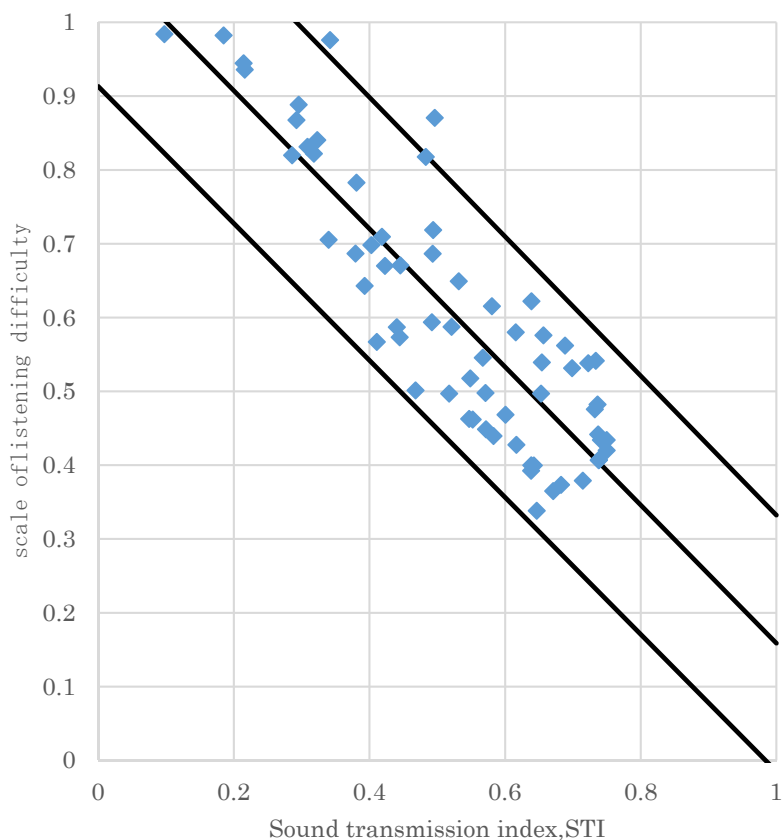


図 12 減衰除去インパルス応答から算出した STI と聴き取りにくさの関係

図 12 から、95%予測区間の中にほとんどのプロットが収まっており、また、尺度性も十分であることから、携帯電話聴き取りにくさを高い精度で予測できる可能性が示唆される。

第5章 設計指針

本実験で用いた距離尺度構成は、そのカテゴリが持つ意味によって、絶対的評価が可能であるが、カテゴリ自体が幅を持つために目標値を定めることが難しい。そこで、以下に示す表記方法を考える。図12に示した回帰直線は、減衰除去インパルス応答から求めたSTIを説明変数とした、心理尺度値 Z_j （被験者の反応分布の平均値）の推定値 μ_j である。ここで、図13に示す聞き取りにくさに対応する心理的連続体 R 上の反応分布を考える。系列カテゴリ法の仮定から、本実験で設定したカテゴリの境界は、 R 上の不変の位置にあると仮定し、被験者の感度や反応の揺らぎが等分散の正規分布に従うと仮定すると、各カテゴリの境界値 C_b （表3）から、 Z_j は次式で仮定される。

$$Z_j = \frac{\mu_j - C_b}{\sigma_0} \quad (2)$$

ただし、 σ_0 は、被験者の回答からの反応分布の誤差の標準偏差（=0.295952389）である。式(2)の値を各カテゴリ（「聞き取りにくくはない」と「やや聞き取りにくい」の境界、「やや聞き取りにくい」と「とても聞き取りにくい」との境界、「とても聞き取りにくい」と「非常に聞き取りにくい」との境界）の境界値ごとに算出した聞き取りにくさの確率曲線を、減衰除去インパルス応答から求めたSTIの関数として図14に示す。

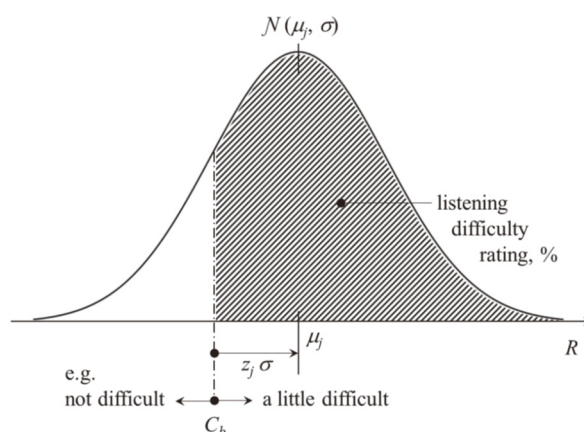


図13 聞き取りにくさに対応する心理的連続体 R 上の反応分布

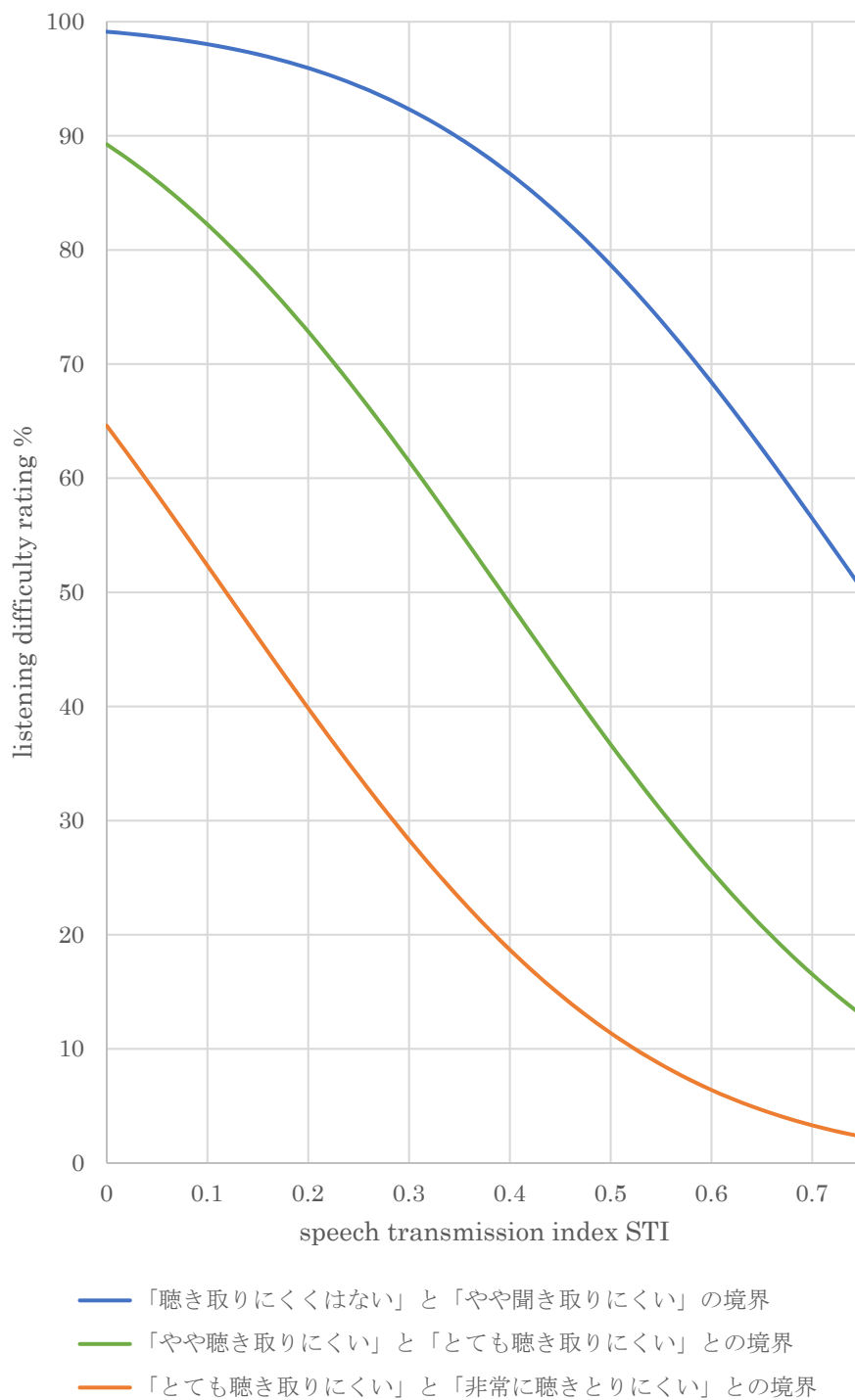


図 14 設計用チャート

この設計用チャートを使用すると、STI の設計目標値から何%の人が聞き取りにくいと感じるかということを知ることができる。

第6章 考察

矢入ら[3]が提案した、設計用チャートと本研究で提案する設計用チャートを図15に示し、比較する。

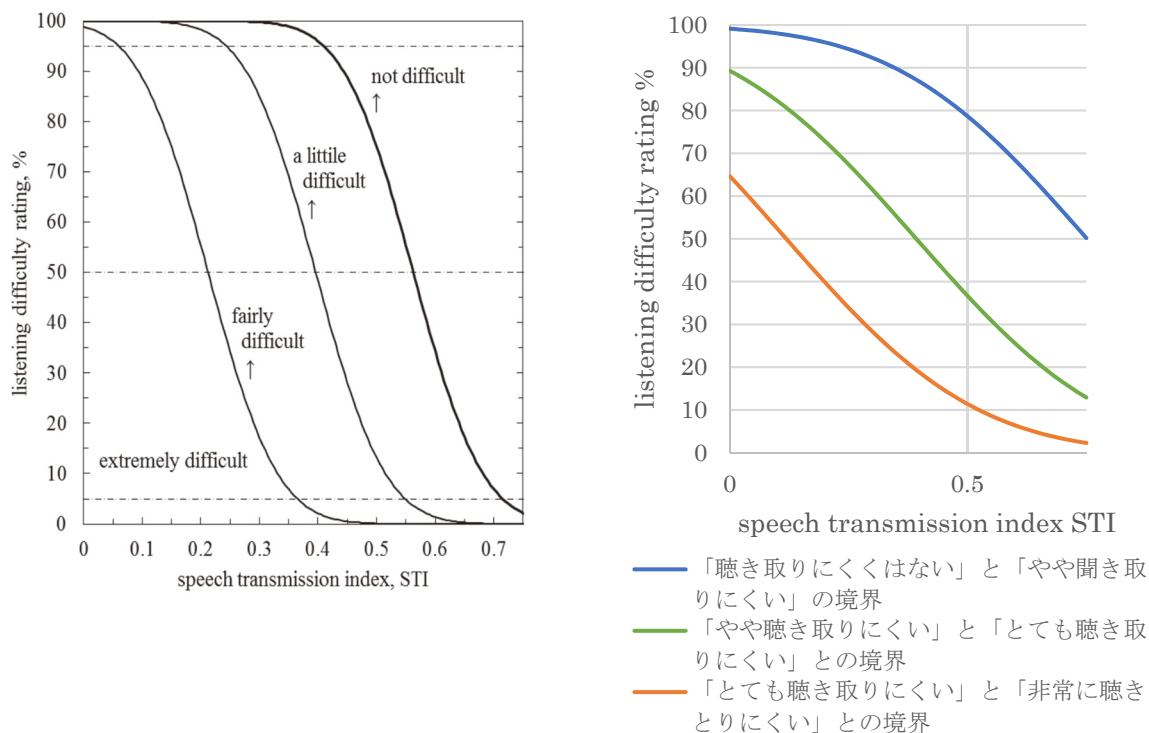


図15 既往研究と本研究の設計用チャートの比較

本研究で得られた吸音面を偏在させた携帯電話ブースに対する設計用チャートは、矢入らが提案した設計用チャートとそれほど大きな乖離が見られないことから、吸音面を偏在させることによる聞き取りにくさへの重大な影響はないと考えられる。よって、吸音面の設置場所に関わらず、既往研究での平均吸音率を用いた設計チャートが利用可能であるといえる。

第7章 おわりに

7.1 まとめ

本研究では、「室容積」、「吸音面」、「音源位置」を場合分けした携帯電話ブースで発話された音声による受話音声の聴き取りにくさを評価する聴感実験を行った。吸音面を偏在させることによって聴き取りにくさに影響があるのかを検討するため、本研究で得た聴き取りにくさと平均吸音率の関係、及び、設計用チャートを既往研究の結果と比較した。その結果、吸音面を偏在させることによる聴き取りにくさへの大きな影響はないということが示された。よって、吸音面の設置場所に関わらず、平均吸音率を用いることで十分な精度で聴き取りにくさを予測できるものと思われる。

7.2 今後の課題

吸音面を偏在させた場合について平均的にみれば、既往研究と同様の聴き取りにくさと「室容積」、「平均吸音率」の対応関係が見られた。しかし、いくつかの条件では対応関係からはずれるものもあった。今後、対応関係からはずれる吸音面配置について、詳細な検討を行い、より実用性の高い設計用チャートを構築することが望ましい。

参考文献

- [1] 矢入幹記、「狭小空間の音響設計に向けて～携帯電話ブースによる聴き取りにくさ～」、日本音響学会建築音響研究委員会、建築音響研究会資料資料番号 AA2013-19、2013/5/30
- [2] 片桐領汰、「狭小空間での携帯電話による音声伝送の評価」、卒業論文（関西大学）、2013
- [3] 矢入幹記、豊田政弘、「携帯電話音声の聴き取りにくさにおよぼす建築空間の影響：音声伝送性能評価指標による予測」、日本音響学会建築音響研究委員会、建築音響研究会資料；AA2014-36、東京、2014
- [4] 斎藤、田中、音声情報処理の基礎、オーム社、1981
- [5] 西村武、「テレビジョン」31 巻 5 号、1977 年、p 369～ p 377、「主観評価の理論と実際」

謝辞

本研究に際して様々なご指導を頂きました豊田政弘先生、矢入幹記様に深く感謝致します。また実験の際に快く引き受けて頂いた方々に心より御礼申し上げます。