

公共空間の音声伝達性能に関する研究

Study on speech transmission performance in public spaces

小林 正明

Masaaki KOBAYASHI

公共空間の音声伝達性能に関する研究



小林 正明^{*1}

概 要

公共空間では音声による情報伝達が不可欠であり、適切な音声伝達性能が必要とされる。従来の研究により、音声伝達性能に影響を及ぼす主な要因（音声レベル、騒音、残響や発話速度など）は明らかにされているが、音声伝達性能に最適な条件は明らかにされていない。この理由として、これまでに提案された音声伝達性能の評価方法が実際に即していないことが挙げられる。従来用いられている了解度試験は単語や文章を正確に聞き取れる割合をあらわしており、日常生活における音声伝達性能を実感として理解しやすい主観的評価指標である。しかし、試験音声によって結果が異なることや音場から受ける聴感上の印象と必ずしも合致せず、音声伝達性能が比較的高い音場間の違いをあらわすことができない点が問題とされてきた。良好な音声伝達を実現するためには、主観量である音声伝達性能を適切な主観的評価指標を用いて尺度化し、さまざまな要因が及ぼす影響を的確に把握することが必要である。

本研究では、親密度で統制された単語を用いた聴取実験を行い、音声伝達性能の評価指標としての「聞き取りにくさ」の有効性を検討するとともに、この新しい主観的評価指標を用いて、音声伝達に影響を及ぼす要因のうち、発声系に関する要因、すなわち、音声レベルと発話速度の最適値を明らかにする。

Study on speech transmission performance in public spaces

Masaaki KOBAYASHI^{*1}

The acoustical design of rooms often involves optimizing speech transmission performance since communication is a basic function of most public spaces. Many previous studies have demonstrated that speech transmission performance in public spaces is influenced by several factors such as speech level, background noise level, sound reflections, speaking rate and so on. Although many studies have tried to evaluate the performance of these spaces using both physical and subjective measures in the past, no previous study has determined the optimum situation for high speech transmission performance. The reason why no previous study has demonstrated the ideal speech communication is that there was no appropriate subjective measure for evaluating speech communication quality in public spaces. Speech intelligibility scores using words or sentences are the conventional subjective measures for evaluating speech transmission performance. In these tests, it is easy to imagine the actual speech transmission performance. However, the intelligibility score depends on the choice of words and sentences used in the listening tests. Furthermore, even if the intelligibility is perfect, the speech transmission performance is not always satisfactory. That is, intelligibility tests cannot evaluate speech communication quality in public spaces with higher speech transmission performance where intelligibility scores are all close to 100%.

To solve the problems mentioned above, the present authors propose “listening difficulty ratings” using words with high word familiarity as a new subjective measure for the evaluation of speech transmission performance in public spaces and demonstrated that it can evaluate the performance more accurately and sensitively than word intelligibility tests for sound fields with higher speech transmission performance. Furthermore, several listening tests were carried out in order to determine the optimum speech level and speaking rate for high speech communication quality by using listening difficulty.

^{*1} 技術研究所

^{*1} Technical Research Institute

公共空間の音声伝達性能に関する研究

小林 正明^{*1}

1. はじめに

我々の日常生活には音声を「聴く」機会が溢れている。会話はもちろん、駅や空港、病院、商業施設といった公共空間において案内・誘導・呼出などに用いられるアナウンス、講習会や講演会のスピーチの他、演劇や芝居、緊急時の非常放送のように音声を「聴く」状況はさまざまである。このようなさまざまな状況にかかわらず、音声を「聴く」ことは音声から情報を「得る」ことを目的としている。したがって、音声は受聴者が正確、かつ、容易に聴き取れなければならない。しかし、現実には音声を容易に聴き取ることができない場合が多い。これは音声が発声から受聴に至る過程で、さまざまな要因によって劣化するためである。音声を聴取したときに受聴者が評価する音声伝達の良好さ、言い換えれば、発声から受聴に至る過程において音声情報がどれだけ劣化せずに相手に伝わるかをあらかず性能を音声伝達性能と呼ぶ¹⁾。

音声伝達性能に影響を及ぼす主な要因を表-1に示す¹⁾。音声伝達の過程は発声系、伝送系および受聴系の3段階に分類できる。発声系は発話者が声に出すところまでをいい、伝送系は音声の出口である発声者の口から受聴者の耳に届くまで、受聴系は受聴者の外耳から認識までの系をいう。受聴者に音声を正しく伝えるためには、各要因によって生じる音声劣化を抑制し、高い音声伝達性能を実現することが必要である。しかし、音声の劣化をどの程度まで抑制すれば良いかは明らかにされていない。この理由として、これまでに提案された音声伝達性能の評価方法が実際に即していないことが挙げられる。良好な音声伝達を実現するためには、主観量である音声伝達性能を適切な主観的評価指標を用いて尺度化し、さまざまな要因が及ぼす影響を的確に把握することが必要である。

そこで、本研究では、1) 聴感印象に着目した新しい主観的評価指標を提案し、その有効性を検討するとともに、2) この新しい主観的評価指標を用いて、音声伝達に影響を及ぼす要因のうち、発声系に関する要

因、すなわち、音声レベルと発話速度の最適値を明らかにすることを目的とする。

なお、本論文は本章を含め全6章で構成される。第1章では、音声伝達に関する問題点を明らかにし、本研究の目的を示した。

第2章では、音声伝達性能が比較的高い音場間の違いをあらわすことができ、かつ、絶対評価のできる新しい主観的評価指標を提案し、その有効性を検討した。

第3章では、第2章で提案した主観的評価指標を用い、騒音レベルに応じた音声伝達性能に最適な音声レベルを明らかにした。

第4章では、新しい主観的評価指標の実験方法が抱える問題点とその解決方法について検討した。

第5章では、公共空間で用いられているアナウンスの発話速度の実状を明らかにした。また、若年者と高齢者のそれぞれについて、第2章で提案した主観的評価指標を用いた聴取実験を行い、両者にとって最適な音声レベルと発話速度を明らかにした。

第6章では、本研究で得られた成果を総括した。

以下、概要を述べる。

2. 「聴き取りにくさ」の提案

音声伝達性能の主観的評価指標は実感として理解しやすいものでなければならない。従来用いられている単語理解度は単語を正確に聴き取れる割合をあらわしており、日常生活における音声伝達性能を実感として理解しやすい主観的評価指標である。しかし、試験音声によって結果が異なることや音場から受ける聴感上の印象と必ずしも合致せず、音声伝達性能が比較的高い音場間の違いをあらわすことができない点が問題とされてきた。

単語の「聴き取りやすさ」は単語を聴き取りやすいと感じた人の割合をあらわしており、単語理解度同様、音声伝達性能を実感として理解しやすい主観的評価指標と考えられる。しかし、日常生活において音声伝達性能について意識することがあるとすれば、それは音声を聴き取りやすいと感じた場合よりも、むしろ聴き取りにくいと感じた場合であることが多いことから、本研究では、音声伝達性能の評価方法として単語の「聴き取りにくさ」に注目した。

一方、音声伝達性能を絶対評価するためには試験に用いる単語を何らかの方法によって統制しなければならない。なお、単語知覚の統制方法の指標は、我々が単語知覚の際に音韻列情報だけでなく意味情報も含めた心的辞書を利用していることを考慮して、心的辞書

表-1 音声伝達の過程と影響を及ぼす要因

音声伝達の過程	音声伝達に影響を及ぼす要因
発声系	言語、発話速度、発声レベル、周波数特性など
伝送系	騒音、反射音、拡声設備（拡声レベル、音源数、歪特性）など
受聴系	聴覚特性、受容力（言語能力・集中性・状況把握）など

*1 技術研究所

を反映したものであることが望ましい。

そこで、本研究では、単語に対する「なじみの程度」を表す主観的評価値であり、単語知覚における心的辞書の影響を反映した指標の一つである親密度²⁾によって単語を統制し、さらに語頭の音韻バランスだけでなく語中の音韻バランスも考慮した単語理解度試験用単語リスト³⁾を用いた聴取実験を行うこととする。

親密度で統制された単語を用いた聴取実験を行い、音声伝達性能の評価指標としての「聞き取りにくさ」の有効性を検討するとともに、「聞き取りにくさ」が音声伝達性能の主観的評価指標有効であるかを明らかにする。

2.1 実験1：残響付加音場における「聞き取りにくさ」

2.1.1 単語

我々が日常で用いる単語は、同一音場であっても、親密度が高いほど正答率が高くなるということが明らかにされている⁴⁾。そこで、単語親密度が「聞き取りにくさ」に及ぼす影響を明らかにするため、最も高い親密度群 7.0~5.5 で構成された1音表(50単語)とその次に高い親密度群 5.5~4.0 で構成された1音表の計2音表を用いた。

2.1.2 音場

インパルス応答の模式図を図-1に示す。音場は直接音とひとつの残響音で構成されている。残響音のすべてを直接音の妨害成分として扱うため、直接音到来から残響音到来までの時間間隔(遅れ時間)をHaas効果⁵⁾を考慮して50msとした。残響時間は0.5s、0.9s、2.0s、6.0sの4種類である。

直接音の音圧Pdと残響音の出だし部分の音圧Prとの比をここでは直接音と残響音との音圧比と呼び、Pr/Pdとしてあらわす。設定した音圧比は1/2、1/4、1/10の3種類である。

刺激の提示レベルは直接音のみを提示した時のピー

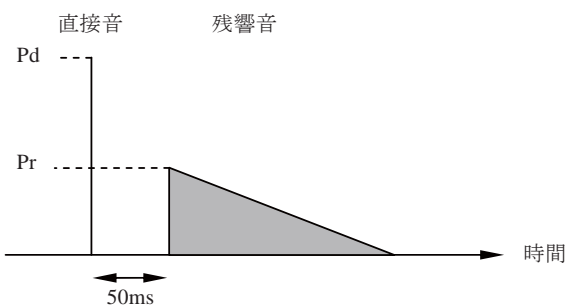


図-1 インパルス応答の模式図

表-2 実験1で用いた音場

パラメータ	音場							
	A	B	C	D	E	F	G	H
残響時間 (s)	0.5	0.9	0.9	0.9	2	2	2	6
音圧比	1/2	1/2	1/4	1/10	1/2	1/4	1/10	1/2
音声レベル (dBA)	65							
騒音レベル (dBA)	-							

ク値が65.0dBA(時定数:Fast)であり、発話速度は5.6音節/秒(以下syl/s)である。

実験1で用いた音場の条件を表-2に示す。

2.1.3 提示方法と回答方法

実験は無響室で行い、直接音と残響音はともに被験者の正面に位置したひとつのスピーカから提示した。被験者には回答用紙に聴こえたとおりに書かせると同時に、その単語の聞き取りにくさを表-3に示す4段階で記入させた。

2.1.4 被験者

被験者として学生123名(男性89名、女性34名)と社会人2名(両名ともに男性、29歳と30歳)の計125名を用いた。

2.1.5 結果と考察

A. 「聞き取りにくさ」の提案

親密度7.0~5.5と親密度5.5~4.0のそれぞれについて、各音場の単語理解度と聞き取りにくさの関係を図-2に示す。

図-2より、親密度にかかわらず、単語理解度(○)は「聞き取りにくさ1」と回答した割合(△)を上回り、「聞き取りにくさ1」と「聞き取りにくさ2」の合計(●)にはほぼ等しい。これは、単語を正確に聞き取れたとしても、やや聞き取りにくいと感じる場合があることを意味している。言い換えれば、たとえ単語理解度が100%であったとしても、聞き取りにくいと感じている可能性があり、その空間の音声伝達性能が最高であるとはいえない。最高の音声伝達性能とは、100%聞き取りにくい状態のことをいうべきである。すなわち、本実験で用いた聞き取りにくさの評価尺度において、「聞き取りにくさ1」を除いた「聞き取りにくさ2」、「聞き取りにくさ3」および「聞き取りにくさ4」と回答した割合の合計が0%になる場合である。

以上より、「聞き取りにくさ2」、「聞き取りにくさ3」および「聞き取りにくさ4」と回答した割合の合計によって公共空間の音声伝達性能を評価すべきと考える。ここで、その「聞き取りにくさ2」、「聞き取りにくさ3」

表-3 聞き取りにくさのスケール

1	聞き取りにくくはない
2	やや聞き取りにくい
3	かなり聞き取りにくい
4	非常に聞き取りにくい

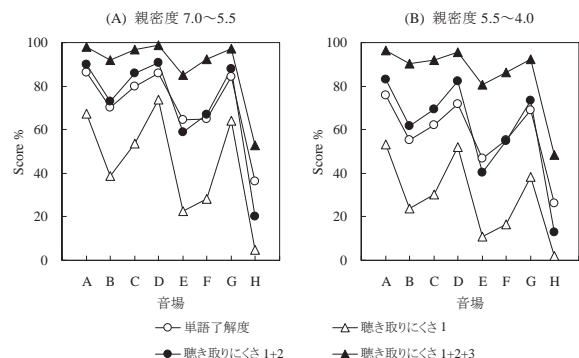


図-2 単語理解度と聞き取りにくさの関係

および「聞き取りにくさ 4」と回答した割合の合計を「聞き取りにくさ」と定義する。

B. 「聞き取りにくさ」と単語理解度の関係

図-3と図-4に親密度7.0~5.5と親密度5.5~4.0における単語理解度と「聞き取りにくさ」の関係をそれぞれ示す。(A)図は単語理解度と「聞き取りにくさ」のスコアを示している。(B)図では縦軸に単語理解度、横軸に「聞き取りにくさ」をとり、両者の相関関係を示している。図中に回帰直線式を示す。また、 r は両者の相関係数である。

まず、親密度7.0~5.5について検討する。図-3(A)より、「聞き取りにくさ」と単語理解度には負の相関関係がみられる。このことは図-3(B)で示した相関係数 r が-0.951と高いことから明らかであり、「聞き取りにくさ」と単語理解度には高い負の相関関係がある。また、図-3(B)に示した回帰直線の傾きは-0.653であり、単語理解度は「聞き取りにくさ」のほぼ半分しか変化しないことがわかる。以上より、「聞き取りにくさ」の方が単語理解度よりも音場の違いに対する感度が良いとみなせる。

次に親密度5.5~4.0について検討する。図-4(B)より「聞き取りにくさ」と単語理解度の相関係数 r は-0.94と高く、親密度7.0~5.5と同じく高い負の相関関係を持つ。また図-4(B)における回帰直線の傾きは-0.807であることから、親密度7.0~5.5に比べるとやや劣るが、親密度5.5~4.0においてもやはり「聞き取りにくさ」は単語理解度よりも音場の違いに対する感度が良いといえる。

以上より、「聞き取りにくさ」は単語理解度と高い負の相関を有し、かつ、単語理解度よりも音声伝達性能を厳しく評価できると言える。なお、この傾向は親

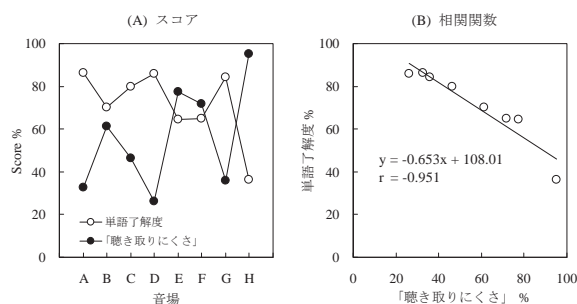


図-3 親密度7.0~5.5における単語理解度と「聞き取りにくさ」の関係

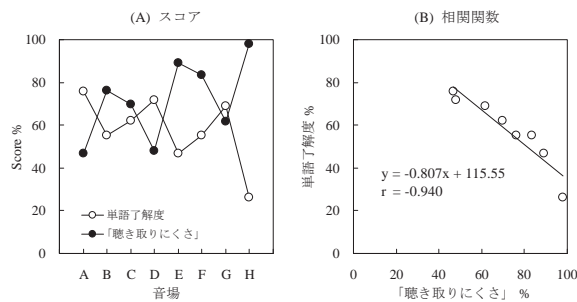


図-4 親密度5.5~4.0における単語理解度と「聞き取りにくさ」の関係

密度の高い方が顕著であるため、音声伝達性能の評価には親密度の高い単語を用いることが適切と考えられる。

2.2 実験2：残響および騒音付加音場における「聞き取りにくさ」

実験1より、騒音のない音場では「聞き取りにくさ」が単語理解度よりも音声伝達性能を厳しく、かつ、感度良く評価できることを示した。しかし、騒音がある音場では、騒音レベルの大小にかかわらず「聞き取りにくさ」が常に高い値をとり、音場の違いを明確にあらわすことができないことも考えられる。

実験2では、残響および騒音付加音場における「聞き取りにくさ」の聴取実験を行い、「聞き取りにくさ」が音声伝達性能の主観的評価指標として有効であるかを検討する。

2.2.1 単語

最も高い親密度7.0~5.5の単語で構成される6音表(1音表は50単語)を用いた。

2.2.2 音場

インパルス応答の模式図は実験1と同様である。残響時間は0.5sと2.0sの2種類とし、音圧比は1/10とした。

刺激の提示レベルは各単語の直接音のみを提示した場合に、被験者の頭部中心に相当する位置におけるピーク値が55.0dBA(時定数:Slow)であり、発話速度は5.6 syl/sである。

騒音は定常騒音であるHothスペクトル型ノイズ⁽⁶⁾を用いた。騒音レベルは0dBA、10dBA、25dBA、40dBA、55dBA、60dBAの6種類である。

2.2.3 提示方法と回答方法

実験は無響室で行い、直接音、残響音および騒音はいずれも被験者の正面に位置したひとつのスピーカから提示した。図-5は刺激提示の模式図である。騒音の出だしと音声提示の出だしの時間間隔は135msである。試験に用いた単語はすべて4モーラで統一されているが、各単語の音声提示時間 Δt_1 はわずかに異なる。音声提示終了後の騒音提示時間の違いが「聞き取りにくさ」に影響を及ぼすことが考えられるので、単語ごとに騒音提示時間を変化させ、等しい残響時間においてはすべての単語に対して音声提示終了後の騒音提示時間 Δt_2 を一定とした。なお、騒音提示時間にはそれぞれ50msの立ち上がりおよび立ち下りを含む。刺激と刺激の間隔は6sである。

回答方法は実験1と同様である。

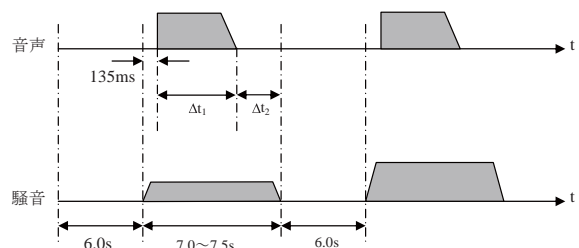


図-5 刺激の提示方法

2.2.4 被験者

正常な聴力を有する学生 13 名(男性 9 名、女性 4 名)を用いた。

2.2.5 結果と考察

回答結果より、単語を正しく聴取できた割合である単語理解度と、表-3 に示した聴き取りにくさのスケールの 2~4 と回答した割合である「聴き取りにくさ」を算出した。

図-6 に実験 2 の結果を示す。騒音レベルが 40dBA 以下、すなわち SN+15dB 以上の範囲では単語理解度は残響時間によらずほぼ 100%となる。一方、「聴き取りにくさ」は SN +15dB 以上の範囲においても残響時間の違いが明らかである。また、単語理解度は SN 比が高くなるとともに上昇し、やがて 100%に達するのに対し、「聴き取りにくさ」は SN 比が高くなっても一定値以下とはならず、0%に達しない。これは残響音の影響を反映しているものと考えられる。

これに対し、騒音レベルが 55dBA および 60dBA、すなわち SN ± 0dB および -5dB の場合、「聴き取りにくさ」は残響時間によらずほぼ 100%となる。単語理解度も残響時間による違いはみられないが、いずれの残響時間においても、騒音レベル 55dBA (SN±0dB) と 60dBA (SN-5dB) の差は明らかである。

以上の結果は、騒音付加音場においても「聴き取りにくさ」は常に高い値を取ることはなく、音声伝達性能が良い場合、すなわち、本実験における騒音レベルが 40dBA 以下の場合「聴き取りにくさ」の方が「単語理解度」よりも感度良く、かつ、厳しく音声伝達性能を評価できることを示している。一方、音声伝達性能が悪い場合、すなわち、本実験における騒音レベルが 40dBA より大きい場合は単語理解度の方が「聴き取りにくさ」よりも感度良く音声伝達性能を評価できることを示している。

なお、従来の研究⁷⁻¹⁰⁾によれば、音声伝達に理想的な音響条件は SN+15dB 以上かつ残響時間 0.5 秒以下であることが報告されている。本実験結果においても、その範囲の単語理解度はほぼ 100%であることが示された。しかし、「聴き取りにくさ」では、残響時間 0.5s における SN+15dB と +30dB に約 20%もの差が生じている。したがって、「聴き取りにくさ」に基づけば、音声伝達に最適な音響条件は SN+30dB 以上かつ残響時間 0.5 秒以下となる。

なお、残響時間 2.0s の場合、SN+15dB と +30dB の「聴き取りにくさ」にほとんど差がみられないが、これは「聴き取りにくさ」に及ばず残響時間 (2.0s) の影響が SN 比の影響 (SN+15dB と +30dB) よりも大きいことが理由と考えられる。

2.3 音声伝達性能と主観的評価指標の関係

実験 1 および実験 2 で得られた結果をもとに、音声伝達性能と主観的評価指標の関係について考察する。

図-7 (A) は音声伝達性能と理想的な主観的評価指標の関係をあらわした模式図である。音声伝達性能が増加すれば主観的評価値は単調増加する。すなわち、音声伝達性能が最小の場合に主観的評価値は最小となり、音声伝達性能が最大の場合に主観的評価値は最大

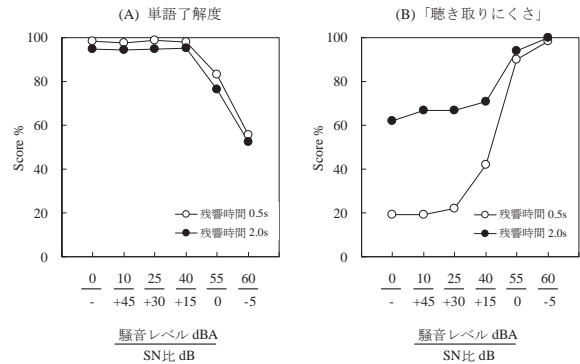


図-6 音声レベル 55dBA における騒音レベルと単語理解度及び「聴き取りにくさ」の関係

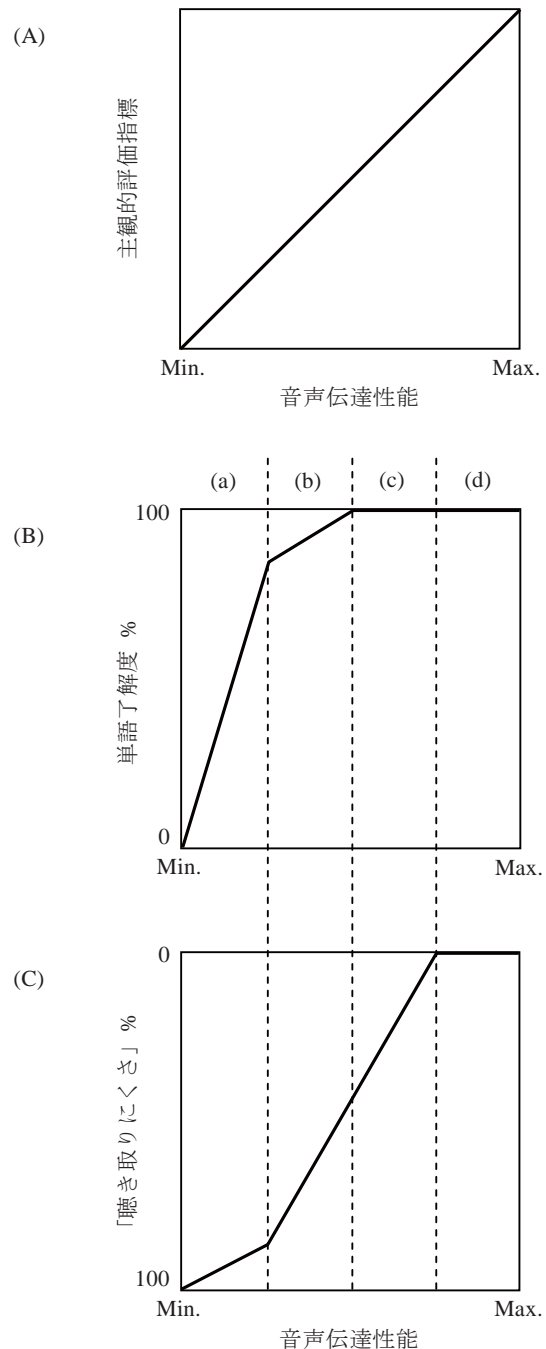


図-7 音声伝達性能と主観的評価指標の関係の模式図

となる。しかし、過去の研究では、さまざまな主観的評価指標が提案されているが(A)図で示すような主観的評価指標は存在しない。

現在、広く用いられている主観的評価指標は単語了解度(押韻試験を含む)であるが、従来の研究より以下のことが示されている。すなわち、図-7(B)に示すように、単語了解度は音声伝達性能が低い場合(領域(a))において、音場の違いを感度良く評価できる。しかし、音声伝達性能が少し高くなると(領域(b))、いずれの音場においても非常に高い値となり、音場の違いに対する感度が低くなる。さらに音声伝達性能が高くなると(領域(c)、(d))、単語了解度は100%となり、音場の違いをまったくあらわすことができない。

一方、実験1および実験2の結果を考慮すれば、音声伝達性能と「聞き取りにくさ」の関係は図-7(C)のように表すことができる。まず、単語了解度によって音声伝達性能を感度よく求めることができる領域(領域(a))では、「聞き取りにくさ」はほぼ100%となるため、音場の違いを明確にあらわすことはできない。次に、音声伝達性能が少し高い領域(領域(b))では、「聞き取りにくさ」は単語了解度よりも感度良く、かつ、厳しく音声伝達性能を評価できる。音声伝達性能がさらに高い領域(領域(c))では、単語了解度がほぼ100%となり、音場の違いを明確にあらわすことはできないのに対し、「聞き取りにくさ」は感度良く音声伝達性能を評価できる。現実には、単語を正確に聞き取れない建築空間はほとんど存在せず、我々が日常生活で使用する空間のほとんどは領域(b)または領域(c)に相当すると考えられる。この点を考慮すれば、「聞き取りにくさ」は単語了解度よりも音声伝達性能の主観的評価指標として適していると言える。

なお、音声伝達性能が最も良い領域(領域(d))においては、単語了解度は100%となり、「聞き取りにくさ」は0%となるため、いずれの指標を用いても音場の違いを評価することはできない。この領域に関する研究は現時点では見あたらないが、領域(d)の音声伝達性能を評価するために「聞き取りにくさ」より感度の良い主観的評価指標、例えば「音声の質(Quality)」が必要となるかもしれない。

3. 音声レベルが「聞き取りにくさ」に及ぼす影響

従来の研究では、音声伝達に最適な残響時間やSN比は提案されているものの、最適な音声レベルについての提案は見あたらない。この理由として、現在、音声伝達性能の主観的評価指標として広く用いられている単語了解度が音声伝達性能のあまり高くない音場において最大値に達してしまうため、それよりも音声伝達性能が高い音場間の違いを明らかにできない点が挙げられる。これに対し、第2章で提案した「聞き取りにくさ」は音声伝達性能が高い音場において、単語了解度よりも感度良く、かつ、厳しく音声伝達性能を評価できることが示された。

第3章では、「聞き取りにくさ」を用いて音声レベルが音声伝達性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、

音声伝達に最適とされる残響時間0.5sにおいて⁷⁻¹⁰⁾、騒音レベルと最適音声レベルの関係を明らかにする。

実験3では、まず、騒音を付加しない場合について、音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係を明らかにする。

3.1 実験3：騒音を付加せず音声レベルを変化させた場合

3.1.1 単語

親密度7.0~5.5の4音表(1音表は50単語)を用いた。

3.1.2 音場

インパルス応答の模式図は実験1と同様である。残響時間は0.5sとし、直接音の音圧と残響音の出だし部分の音圧との音圧比は1/10とした。

音声レベルは25dBA~70dBAの10種類である。発話速度は5.6 syl/sである。

3.1.3 提示方法と回答方法

実験は無響室で行い、直接音と残響音はいずれも被験者の正面に位置したひとつのスピーカから提示した。

回答方法は実験1と同様である。

3.1.4 被験者

正常な聴力を有する学生9名(男性5名、女性4名)および社会人1名(男性、31歳)の計10名を用いた。

3.1.5 結果と考察

図-8に実験3の結果を示す。単語了解度は音声レベル25dBAの場合を除き、すべての音場でほぼ100%となり、音声レベルによる明らかな違いはみられない。

一方、「聞き取りにくさ」は音声レベル25dBAでほぼ100%であるが、音声レベルが高くなるにつれて減少し、55dBAにおいて約30%となる。音声レベル55dBA以上では、「聞き取りにくさ」は音声レベルとともに増加し、音声レベル70dBAにおいて約80%に達する。「聞き取りにくさ」が最小となる音声レベル55dBAの場合と最大となる25dBA場合では約70%の差が生じている。

以上より、音声伝達性能が比較的高い実験3の音場では、「聞き取りにくさ」が単語了解度よりも感度良く、かつ、厳しく音声伝達性能を評価できることが示された。また、残響時間0.5sで音声レベルのみを変化させた場合の「聞き取りにくさ」は音声レベル55dBAで最小となることが示された。

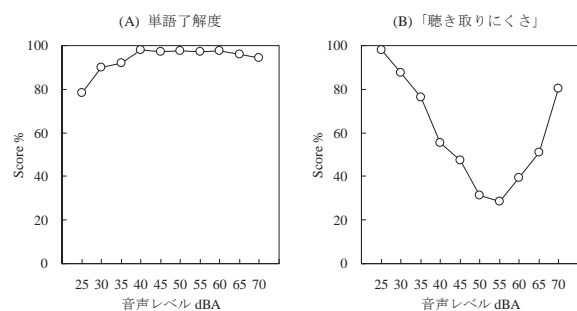


図-8 音声レベルと単語了解度および「聞き取りにくさ」の関係

3.2 実験4：SN比を一定に保ち音声レベルを変化させた場合

実験4では、音声伝達に最適とされる SN+15dB と +30dB の場合について、音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係性を明らかにする。

3.2.1 単語

親密度 7.0~5.5 の4音表（1音表は50単語）を用いた。

3.2.2 音場

インパルス応答の模式図は実験1と同様である。残響時間は0.5sとし、直接音の音圧と残響音の出だし部分の音圧との音圧比は1/10とした。

音声レベルは50dBA~70dBAの5種類とし、発話速度は5.6 syl/sである。

騒音は定常騒音である Hoth スペクトル型ノイズ⁶⁾を用い、騒音レベルは各音声レベルに対し SN+15dB および +30dB となるよう設定した。

3.2.3 提示方法と回答方法

提示方法は実験2と同様である。回答方法は実験1と同様である。

3.2.4 被験者

正常な聴力を有する学生10名(男性6名、女性4名)を用いた。

3.2.5 結果と考察

図-9に実験4の結果を示す。SN+30dBの場合、単語理解度は音声レベルの違いによらずほぼ100%となる。一方、「聞き取りにくさ」は音声レベルによって大きく変化し、音声レベルが大きいほど増加する。「聞き取りにくさ」が最小となる音声レベル50dBAの場合と最大となる70dBAの場合では約55%の差が生じている。

SN+15dBの場合もSN+30dBの場合と同様の傾向を示す。ただし、SN+30dBの場合とは異なり、「聞き取りにくさ」は音声レベル55dBAにおいて最小となる。「聞き取りにくさ」が最小となる音声レベル55dBAの場合と最大となる70dBAの場合では約40%の差が生じている。

また、同一の音声レベルにおいて、単語理解度はSN比の違いがみられないが、「聞き取りにくさ」は音声レベル70dBAの場合を除いてSN比の違いが明らかである。

以上のように、単語理解度が音声レベルとSN比の違いによらずすべての音場でほぼ100%であるのに対

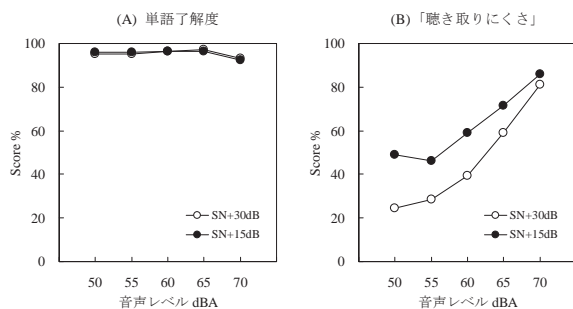


図-9 音声レベルと単語理解度および「聞き取りにくさ」の関係

し、「聞き取りにくさ」はSN比と音声レベルによって明らかな差が生じており、音声伝達性能が比較的高い実験4の音場においても、「聞き取りにくさ」の方が単語理解度よりも音声伝達性能を感度良く、かつ、厳しく評価できることが示された。

なお、SN+15dB および +30dB のいずれの場合も、音声レベルが高くなるにつれて「聞き取りにくさ」が増加する。このことは音声レベルが高過ぎると聴取者は音声を聞き取りにくいと感じることを示している。一方、実験3では、音声レベルが低過ぎると、音声が聞き取れないために「聞き取りにくさ」が増加することが示されている。したがって、「聞き取りにくさ」に基づけば、残響時間0.5秒、かつ、SN+15dB および +30dB の場合、音声伝達に最適な音声レベルは50~55dBA程度と考えられる。

3.3 音声伝達に最適な音声レベルについて

実験2~4で得られた結果に基づき、騒音レベルに応じた音声伝達に最適な音声レベルについて考察する。なお、本検討では、既往の研究において音声伝達に理想的とされている残響時間0.5sの場合⁷⁻¹⁰⁾を取り上げる。

図-10は実験2~4で得られた残響時間0.5sの単語理解度と「聞き取りにくさ」を集約したものである。凡例の右下に示した斜体の数字はその音場で得られた単語理解度と「聞き取りにくさ」であり、同一音場を異なる実験で用いた場合、すなわち、音声レベルが55dBAで騒音レベルが0dBA、25dBA および 40dBAの場合については両実験で得られた単語理解度および「聞き取りにくさ」を示している。

図-10より、単語理解度が96%以上となるのはSN+15dB以上、かつ、音声レベル40~65dBの場合である。Knudsen¹¹⁾は残響時間や騒音レベルなどが音声伝達に最良の条件であっても、言葉自体の不明瞭さによって音節明瞭度が100%に達せず、96%となることを示している。したがって、上述の条件では、単語理解度は最高値に達していると考えられ、音声伝達に最適な音声レベルを単語理解度によって判断することはできない。これに対し、同条件において「聞き取りにく

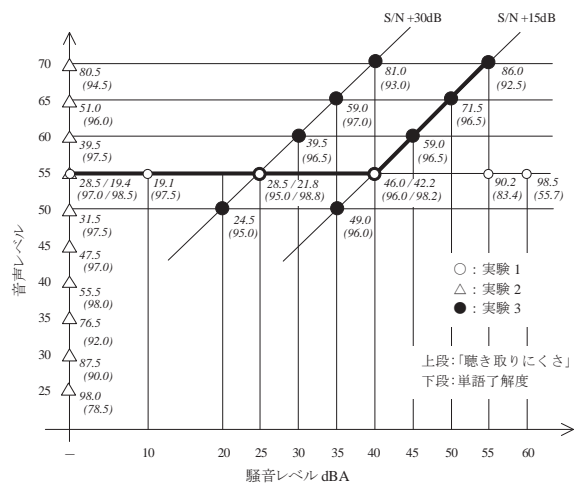


図-10 騒音レベルに応じた音声伝達に最適な音声レベル (残響時間0.5sの場合)

くさ」は明らかな差が生じているため、「聴き取りにくさ」に基づいて音声伝達に最適な音声レベルを考察する。

まず、騒音レベル 25dBA 以下の場合について検討する。騒音を付加しない場合、「聴き取りにくさ」は音声レベル 55dBA で最小となる。音声レベル 55dBA に着目すると、騒音レベル 10dBA および 25dBA の「聴き取りにくさ」がそれぞれ 19.1%、25.4%であり、騒音を付加しない場合の「聴き取りにくさ」24.0%と明らかな差はみられない。したがって、騒音レベルが 25dBA 以下の場合に最適な音声レベルは 55dBA と考えられる。

次に、騒音レベル 25dBA~40dBA の場合について検討する。騒音レベル 35dBA に着目すると、音声レベル 50dBA および 65dBA の「聴き取りにくさ」はそれぞれ 49.0%と 59.0%である。一方、音声レベル 55dBA の「聴き取りにくさ」が騒音レベル 25dBA および 40dBA においてそれぞれ約 25%、45%であることから、音声レベル 55dBA、かつ、騒音レベル 35dBA の「聴き取りにくさ」は 25~45%の範囲内と推定される。よって、騒音レベル 35dBA では、音声レベル 55dBA の方が音声レベル 50dBA および 65dBA よりも「聴き取りにくさ」が小さくなると考えられる。騒音レベルがさらに大きい 40dBA の場合も音声伝達に最適な音声レベルは 55dBA 以上と考えられるが、音声レベル 55dBA (SN+15dB) の「聴き取りにくさ」は音声レベル 70dBA (SN+30dB) よりも小さい。以上より、騒音レベル 25dBA から 40dBA の場合に最適な音声レベルは 55dBA と考えられる。

最後に、騒音レベル 40dBA 以上の場合について検討する。この範囲の騒音レベルにおいて SN+15dBA 以上を満たすには、音声レベル 55dBA 以上が必要となるため、音声伝達に最適な音声レベルは SN 比で決定されると考えられる。ここで、同一の騒音レベルでは SN+30dB の方が SN+15dB よりも「聴き取りにくさ」が大きく、過剰な音声レベルが「聴き取りにくさ」を増加させることを考慮すれば、騒音レベル 40dBA 以上の場合に最適な音声レベルは SN+15dB となる音声レベルと考えられる。

以上をまとめると、残響時間 0.5s において、音声伝達に最適な音声レベルは騒音レベル 40dBA 以下の場合には 55dBA であり、騒音レベル 40dBA 以上の場合には SN+15dB となる音声レベルである。

なお、音声レベルが最適値であっても、「聴き取りにくさ」は騒音レベルが高くなるにつれて増加し、騒音レベル 55dBA (音声レベル 70dBA) では 86.0%に達している。すなわち、「聴き取りにくさ」を小さくするためには最適な音声レベルを確保するだけでなく、騒音レベルを小さくすることが重要である。

4. 「聴き取りにくさ」の実験方法について

音声伝達性能の評価指標には、同一の音場に対して一定の値が得られることが求められる。しかしながら、第3章では、異なる実験で用いた同一音場の「聴き取りにくさ」が一定の値とはならないことが示された。

この原因として、「聴き取りにくさ」の実験方法自体が抱える問題が考えられる。音声伝達性能の主観的評価指標として「聴き取りにくさ」を用いるためには、それらの問題を解決しておく必要がある。

同一音場の「聴き取りにくさ」が変動する原因の一つとして、同一被験者に同一音表を繰り返し提示した際の学習効果が考えられる。親密度で統制された単語リストの数には限りがあるため、被験者の数が限定されている場合、同一被験者に同一音表が繰り返し提示される可能性がある。実際、単語理解度については、同一音表を繰り返し提示することによって学習効果があらわれることが一般に知られており、「聴き取りにくさ」についても学習効果が生じることが考えられる。

また、評定尺度法を用いて得られる「聴き取りにくさ」は実験に用いる音場の数や性質、すなわち、刺激文脈が異なれば文脈効果^{12,13)}によって値が変動すると考えられる。

第4章では、「聴き取りにくさ」の実験方法に関する上記の問題点に着目し、同一音場の「聴き取りにくさ」の変動を抑制するための方法を検討する。

実験5では、まず、同一被験者に対して同一音表を繰り返し提示し、単語理解度と「聴き取りにくさ」の学習効果の有無について検証する。

4.1 実験5：学習効果の検証

4.1.1 単語

親密度 7.0~5.5 の 2 音表 (1 音表は 50 単語) を用いた。

4.1.2 音場

インパルス応答の模式図は実験1と同様である。残響時間は 0.5、2.0、6.0s の 3 種類とし、直接音の音圧と残響音の出だし部分の音圧との音圧比は 1/2 とした。

音声レベルは 55dBA とし、発話速度は 5.6 syl/s である。

実験5で用いた音場の条件を表-4に示す。

4.1.3 提示方法と回答方法

実験5では、音声伝達性能の異なる音場 M および L における学習効果を検討するため、以下に示す聴取実験 5-1、5-2 を行った。

聴取実験 5-1: M→H→M→H→M→H→M→H→M

聴取実験 5-2: L→H→L→H→L→H→L→H→L

いずれの聴取実験も 1 音表のみを使用し、また、音声伝達性能が高い音場 H と対象音場 (M または L) の 2 音場で構成されている。

聴取実験は 5-1 と 5-2 の順で異なる日に行い、両実験の間隔は最大で 2 日とした。ただし、それぞれの聴取実験は 1 日で行った。

表-4 実験5で用いた音場

パラメータ	音場		
	H	M	L
残響時間 (s)	0.5	2	6
音圧比	1/2		
音声レベル (dBA)	55		
騒音レベル (dBA)	-		

実験は無響室内で行い、直接音と残響音はいずれも被験者の正面に位置したひとつのスピーカから提示した。回答方法は実験1と同様である。

4.1.4 被験者

聴力検査の結果より、正常な聴力を有する学生11名(男性8名、女性3名)と社会人1名(男性)の計12名を用いた。

4.1.5 結果と考察

まず、聴取実験5-1の結果について考察する。全被験者のうち、「聴き取りにくさ」が他の被験者とは異なる傾向を示した2名を省いた10名の結果を図-11に示す。また、異なる回答傾向を示した2名の結果を図-12に示す。なお、図-11および図-12とも横軸は音場を表し、左から右へ提示順に並べている。

図-11に示した10名の結果では、音場Mと音場Hの「聴き取りにくさ」の差が明らかである。これに対し、図-12で示した2名の結果は音場Mと音場Hの「聴き取りにくさ」に明らかな差がみられない。ここでは、この2名の被験者が評定尺度法を用いた実験に慣れておらず、適切な評価がなされていない可能性があると判断し、10名の結果(図-11)について考察する。

音場Hの単語理解度は1回目の提示でほぼ100%に達しており、2回目以降の結果と明らかな差がみられない。一方、音場Mの単語理解度は1回目の提示よりも2回目の方が高く、さらに提示回数が増すにつれて上昇する。5回目の提示ではほぼ100%に達しており、音場Hとの差はほとんどみられない。

これに対し、音場Hの「聴き取りにくさ」も同様であり、提示回数によらず、両者の差は明らかである。

表-5は音場HおよびMの単語理解度と「聴き取

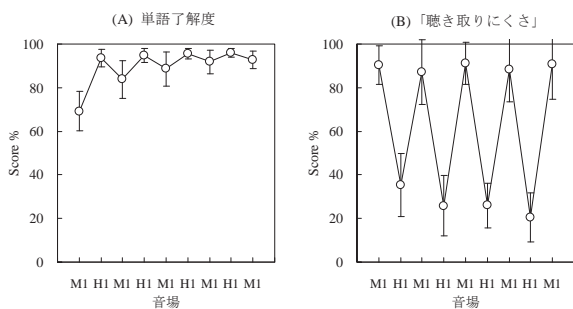


図-11 同一音表を繰り返し提示した場合の単語理解度と「聴き取りにくさ」の変動(聴取実験5-1)

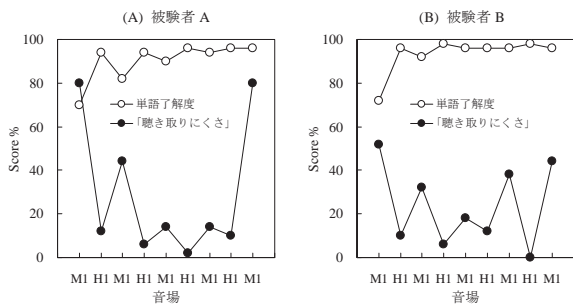


図-12 異なる傾向を示した被験者2名の単語理解度と「聴き取りにくさ」(聴取実験5-1)

りにくさ」を提示回数ごとにt検定した結果である。表中の左下側は単語理解度について、右上側は「聴き取りにくさ」についての結果である。

音場Hの単語理解度はすべての組み合わせに有意差はみられない。一方、「聴き取りにくさ」は1回目と4回目の組み合わせのみに有意水準5%の有意差が認められる。

これに対し、音場Mの単語理解度は1回目と2~5回目のそれぞれの組み合わせに有意水準1%の有意差が認められ、さらに、2回目と4、5回目の組み合わせについても有意水準5%の有意差が認められる。一方、「聴き取りにくさ」にはすべての組み合わせに有意差は認められない。

次に、聴取実験5-2について考察する。聴取実験5-1とは異なり、すべての被験者が同様の回答傾向を示したため、12名の結果を用いて単語理解度および「聴き取りにくさ」を算出した。図-13に聴取実験5-2の結果を示す。なお、横軸は音場を表し、左から右へ提示順に並べている。

音場Hの単語理解度は1回目の提示でほぼ100%に達しており、2回目以降の結果と明らかな差がみられない。一方、音場Lの単語理解度は1回目の提示よりも2回目の方が高く、さらに提示回数が増すにつれて上昇する。5回目の提示ではほぼ100%に達しており、音場Hとの差はほとんどみられない。

これに対し、音場Hの「聴き取りにくさ」は提示回数が増してもほぼ一定である。音場Lの「聴き取りにくさ」も提示回数によらずほぼ一定であり、音場HとLの差は明らかである。

表-5 単語理解度および「聴き取りにくさ」のt検定結果(聴取実験1)

H1	1回目	2回目	3回目	4回目
1回目	-			
2回目		-		
3回目			-	
4回目	*			-

M1	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
1回目	-	**	**	**	**
2回目		-		*	*
3回目			-		
4回目				-	
5回目					-

** p < 0.01, * p < 0.05

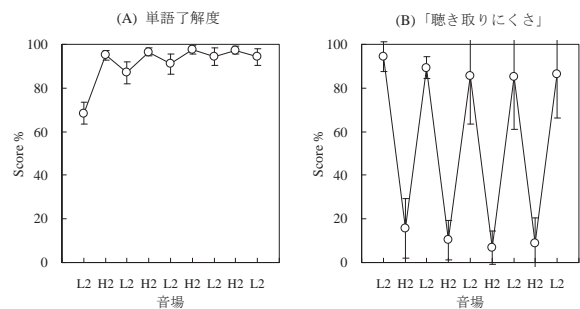


図-13 同一音表を繰り返し提示した場合の単語理解度と「聴き取りにくさ」の変動(聴取実験5-2)

表-6は音場HおよびLの単語理解度と「聴き取りにくさ」を提示回数ごとにt検定した結果である。表中の左下側は単語理解度について、右上側は「聴き取りにくさ」についての結果である。

音場Hの単語理解度は1回目と3回目の組み合わせに有意水準1%の有意差が認められ、1回目と4回目の組み合わせに有意水準5%の有意差が認められる。一方、「聴き取りにくさ」にはすべての組み合わせに有意差は認められない。

音場Mの単語理解度は1回目と2~5回目のそれぞれの組み合わせに有意水準1%の有意差が認められ、さらに、2回目と4、5回目の組み合わせについても有意水準5%の有意差が認められる。一方、「聴き取りにくさ」にはすべての組み合わせに有意差は認められない。

以上より、単語理解度は繰り返し提示による学習効果があらわれるが、「聴き取りにくさ」は繰り返し提示による学習効果の影響を無視できることが示された。すなわち、単語理解度の聴取実験では、同一被験者に対して同一音表を繰り返し提示することを避ける必要があるが、「聴き取りにくさ」の聴取実験では、同一被験者に対して同一音表を繰り返し提示することができる。

なお、聴取実験5-1で用いた音場Hと聴取実験5-2で用いた音場Hは同一音場であるにもかかわらず、「聴き取りにくさ」に明らかな差がみられる。これは、それぞれの聴取実験において音場Hと組み合わせた音場（音場MまたはL）の影響によって生じたものと考えられる。

4.2 実験6：残響付加音場における文脈効果

「聴き取りにくさ」は異なる実験で用いた同一音場の値が必ずしも一致しないことが第3章や実験5において示されている。このような差は文脈効果^{12,13)}によって生じると考えられる。文脈効果とは、前後の刺激の影響によって対象とする刺激の評価が変化する現象をいう。「聴き取りにくさ」の聴取実験では、ひとつの実験において複数の音場を被験者に提示しており、提示する音場の数や音声伝達性能の程度は実験ごとに異なる。そのため、評定尺度法を用いる「聴き取りにくさ」には文脈効果が生じやすく、刺激文脈が異なる実験間で用いた音場の評価が一致しにくいことが考え

表-6 単語理解度および「聴き取りにくさ」のt検定結果（聴取実験2）

H2	1回目	2回目	3回目	4回目
1回目	-		**	*
2回目		-		
3回目			-	
4回目				-

L2	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
1回目	-	**	**	**	**
2回目		-		*	*
3回目			-		
4回目				-	
5回目					

** p < 0.01, * p < 0.05

られる。「聴き取りにくさ」を用いて音声伝達性能を絶対評価するためには、何らかの方法によって文脈効果を抑制しなければならない。

本研究では、刺激文脈の両端に位置する基準刺激、すなわち、「聴き取りにくさ」が0%および100%の音場を用いて刺激文脈を統制する方法が文脈効果の抑制に有効であるかを検討する。

実験6では、まず、残響付加音場において基準刺激の有効性を検討する。

4.2.1 単語

親密度7.0~5.5の4音表（1音表は50単語）を用いた。

4.2.2 音場

インパルス応答の模式図は実験1と同様である。残響時間は0.5s、1.0s、1.5s、2.0s、3.0s、6.0sであり、いずれも音圧比は1/10である。音声レベルは55dBAとし、発話速度は5.6 syl/sである。

実験6で用いた音場の条件を表-7に示す。

4.2.3 提示方法と回答方法

実験6では、5種類の聴取実験のそれぞれで生じた文脈効果を比較・検討する。各聴取実験で用いた音場を表-8に示す。すべての聴取実験は音場C（残響時間1.0s）と音場D（同1.5s）を含む3~5音場で構成されている。

提示方法および回答方法は実験1と同様である。

4.2.4 被験者

聴力検査の結果から、正常な聴力を有する学生8名（男性5名、女性3名）を用いた。

表-7 実験6で用いた音場

パラメータ	音場						
	A	B	C	D	E	F	G
残響時間 (s)	0	0.5	1	1.5	2	3	6
音圧比	1/10						
音声レベル (dBA)	55						
騒音レベル (dBA)	-						

表-8 聴取実験6-1~6-5で用いた音場

聴取実験	音場						
	A	B	C	D	E	F	G
6-1	a	○	○	○			
	b			○	○	○	
6-2	a	○	○	○	○		
	b	○		○	○	○	
6-3-1	a		○	○	○		○
	b			○	○	○	○
6-3-2	a		○	○	○		○
	b			○	○	○	○
6-4	a	○	○	○	○		○
	b	○		○	○	○	○
6-5-1	a		○	○	○		
	b			○	○	○	
6-5-2	a	○	○	○	○		○
	b	○		○	○	○	○

4.2.5 結果と考察

A. 刺激文脈を統制しない場合

図-14 に結果を示す。両実験で用いた残響時間 1.0s および 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」を比較すると、それぞれ 13.3%と 13.0%の差がみられる。この差は両実験を構成する音場の違い、すなわち、刺激文脈の違いによって生じたものと考えられる。

刺激文脈を統制しない場合、文脈効果によって異なる実験で用いた同一音場の「聴き取りにくさ」に明らかな差が生じた。

B. 刺激文脈に「聴き取りにくさ」が 0%の音場を加えた場合

図-15 に結果を示す。直接音のみの音場の「聴き取りにくさ」は聴取実験 6-2a で 1.5%、聴取実験 6-2b で 1.8%とほぼ 0%になり、両者の差はほとんどみられない。また、両実験で用いた残響時間 1.0s と 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」の差はそれぞれ 3.5%と 0.3%となり、刺激文脈を統制しない場合よりも明らかに小さくなった。

以上より、刺激文脈に直接音のみの音場を加えることで、文脈効果が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響を低減できる。

C. 刺激文脈に「聴き取りにくさ」が 100%の音場を加えた場合

刺激文脈として残響時間 6.0s の音場を加えた場合の結果を図-16 に示す。残響時間 6.0s の音場の「聴き取りにくさ」は聴取実験 6-3-2a で 95.5%、聴取実験 6-3-2b で 95.3%とほぼ 100%になり、両者の差はほとんどみられない。また、両実験で用いた残響時間 1.0s と 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」の差がいずれも 3.0%となり、刺激文脈を統制しない場合よりも明らかに小さくなった。

以上より、刺激文脈に残響時間 6.0s の音場を加えることで、文脈効果が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響を低減できる。

D. 刺激文脈に「聴き取りにくさ」が 0%および 100%の音場を加えた場合

図-17 に結果を示す。直接音のみの音場の「聴き取りにくさ」は聴取実験 6-4a、6-4b ともほぼ 0%である。また、残響時間 6.0s の音場は聴取実験 6-4a、6-4b ともほぼ 100%である。さらに、両実験で用いた残響時間 1.0s と 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」の差はそれぞれ 1.3%と 1.0%となり、ほぼ一致する。

以上より、刺激文脈に「聴き取りにくさ」が常に 0%および 100%の基準刺激を加えることで、文脈効果が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響を抑制できる。

E. 実験に対する慣れの検証

刺激文脈を統制しない聴取実験 6-5-1 の結果を図-18 に示す。両実験で用いた残響時間 1.0s および 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」を比較すると、それぞれ 7.2%と 11.5%の差が生じている。よって、聴取実験を繰り返した後でも、文脈効果によって異なる実験で用いた同一音場の「聴き取りにくさ」に明らかな差が生じた。

刺激文脈に直接音のみの音場と残響時間 6.0s の音

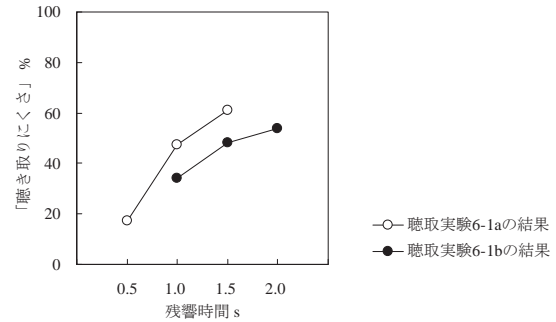


図-14 聴取実験 6-1 の結果

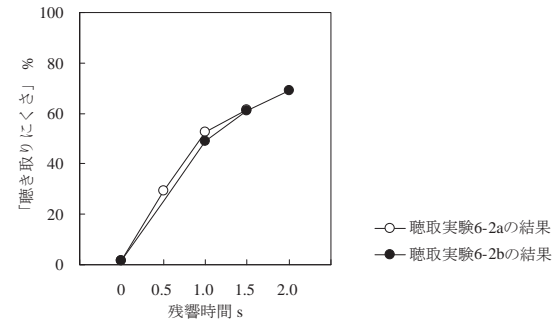


図-15 聴取実験 6-2 の結果

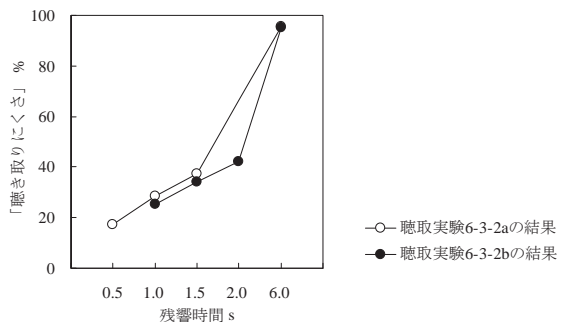


図-16 聴取実験 6-3-1 の結果

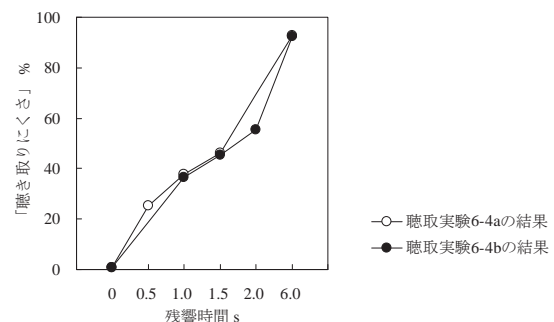


図-17 聴取実験 6-4 の結果

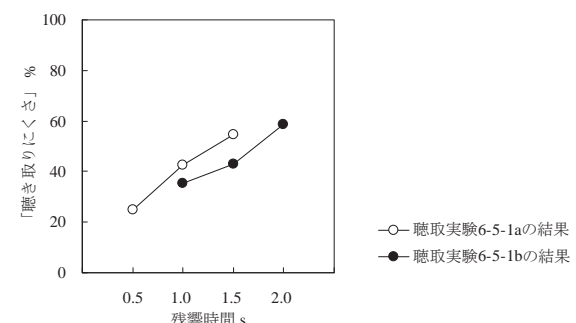


図-18 聴取実験 6-5-1 の結果

場を加えた聴取実験 6-5-2 の結果を図-19 に示す。両実験で用いた残響時間 1.0s と 1.5s の音場に対する「聴き取りにくさ」の差はそれぞれ 0.5% と 2.5% となり、刺激文脈に基準刺激を加えることで文脈効果を抑制できることが改めて示された。

4.3 実験 7：騒音付加音場における文脈効果

実験 7 では、騒音付加音場において基準刺激の有効性を検討する。

4.3.1 単語

実験 6 と同じ単語を用いた。

4.3.2 音場

直接音のみを用いた。音声レベルは 55dBA とし、発話速度は 5.6 syl/s である。

騒音は定常騒音である Hoth スペクトル型ノイズ⁶⁾を用い、騒音レベルは 25dBA、35dBA、40dBA、45dBA、60dBA の 6 種類である。

実験 7 で用いた音場の条件を表-9 に示す。

4.3.3 提示方法と回答方法

実験 7 では、2 種類の聴取実験のそれぞれで生じた文脈効果を比較・検討する。各聴取実験で用いた音場を表-10 に示す。すべての聴取実験は音場 C (SN+20dB) と音場 D (同+15dB) を含む 3~5 音場で構成されている。

提示方法は実験 2、回答方法は実験 1 と同様である。

4.3.4 被験者

実験 6 と同一の被験者を用いた。

4.3.5 結果と考察

A. 刺激文脈を統制しない場合

図-20 に結果を示す。聴取実験 7-1a、7-1b のいずれにも用いた SN 比+20dB および+15dB の音場に対する「聴き取りにくさ」を比較すると、それぞれ 19.0% と 20.5% の差がみられる。この差は両実験を構成する音場の違い、すなわち、刺激文脈の違いによって生じたものと考えられる。

残響付加音場と同様、騒音付加音場においても刺激文脈を統制しない場合、文脈効果によって異なる実験で用いた同一音場の「聴き取りにくさ」に明らかな差が生じた。

B. 刺激文脈に「聴き取りにくさ」が 0% および 100% の音場を加えた場合

図-21 に結果を示す。直接音のみの音場の「聴き取りにくさ」は聴取実験 7-2a、7-2b とともにほぼ 0% である。また、SN-5dB の音場は聴取実験 7-1a、7-2b とともにほぼ 100% である。さらに、両実験で用いた SN 比+20dB および+15dB の音場に対する「聴き取りにくさ」の差はそれぞれ 2.0% と 3.0% となり、ほぼ一致する。

以上より、残響付加音場と同様、騒音付加音場においても刺激文脈に「聴き取りにくさ」が常に 0% および 100% の基準刺激を加えることで、文脈効果が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響を抑制できる。

5. 音声伝達に最適な発話速度と音声レベル

駅、空港、病院、商業施設などの公共空間における音声情報の提供を考えた場合、発声系の要因が音声伝

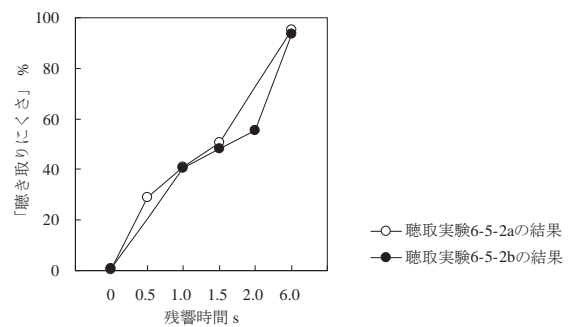


図-19 聴取実験 6-5-2 の結果

表-9 実験 7 で用いた音場

パラメータ	音場					
	A	B	C	D	E	F
残響時間	-					
音圧比	1/10					
音声レベル (dBA)	55					
騒音レベル (dBA)	-	25	35	40	45	60
SN 比	∞	+30	+20	+15	+10	-5

表-10 聴取実験 7-1 ~ 7-2 で用いた音場

聴取実験	音場					
	A	B	C	D	E	F
7-1	a	○	○	○		
	b			○	○	○
7-2	a	○	○	○	○	○
	b	○		○	○	○

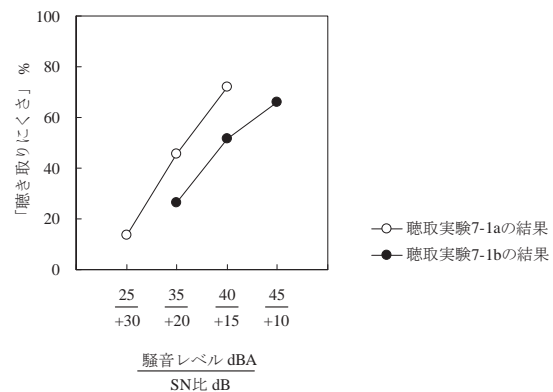


図-20 聴取実験 7-1 の結果

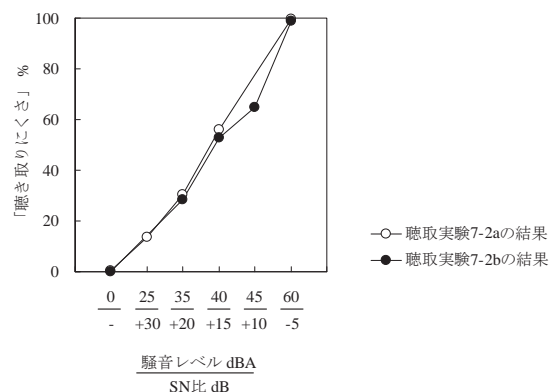


図-21 聴取実験 7-2 の結果

達に及ぼす影響を把握することは特に重要である。これは公共空間の伝送系、すなわち、音場（騒音や反射音等）が一定でなく、また、不特定多数が利用するため利用者（＝受聴者）を特定できないためである。

音声伝達性能に影響を及ぼす発声系の主要因として、音声レベルと発話速度が挙げられる。公共空間において良好な音声伝達を実現するためには、音場の状況に応じた最適な発話速度と音声レベルで情報を発信することが必要である。第5章では、発話速度が音声伝達性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、公共空間における音声伝達に最適な発話速度と音声レベルについて検討する。

5.1 公共空間におけるアナウンスの発話速度の現状

5.1.1 調査方法

調査対象は国内の鉄道の駅や車内のアナウンスとした。アナウンスは提供方法および内容により「1. 生声・発着」、「2. 生声・発着以外」、「3. 自動・発着」、「4. 自動・発着以外」の4種類に分類した。なお、提供方法における「生声」は駅員による拡声器を用いたアナウンスをあらわし、「自動」はあらかじめ録音された音声の自動再生によるアナウンスをあらわす。

5.1.2 調査結果

鉄道アナウンスの発話速度の調査結果を図-22に示す。ただし、車内4のアナウンスはサンプル数が少ないため除外した。

図-22より、1) アナウンスの発話速度は4.3~9.5 syl/sで分布すること、2) 生声アナウンスは自動アナウンスより発話速度が速いこと、3) 生声アナウンスの発話速度は6.6 syl/s以上であることが示された。

5.2 実験9：若年者に最適な発話速度と音声レベル

公共空間における音声伝達に最適な発話速度と音声レベルを明らかにするため、実験9では、まず、若年者に最適な発話速度と音声レベルを明らかにする。

5.2.1 単語

若年者と高齢者では同じ単語であっても親密度が異なることが佐藤ら¹⁴⁾によって報告されている。実験8では、坂本らによる単語リスト³⁾、および佐藤らによる親密度調査結果¹⁴⁾に基づいて新たに作成した若年者と高齢者のいずれにとっても親密度が最も高い100単語を用いた。

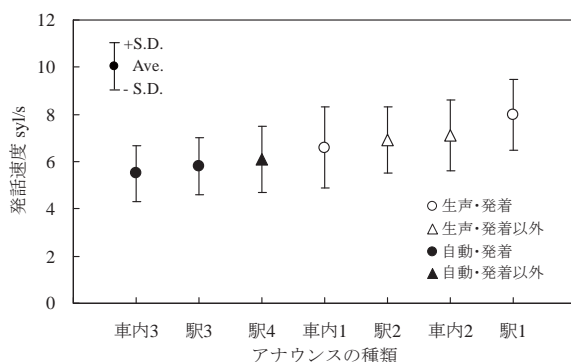


図-22 鉄道アナウンスの発話速度調査結果

5.2.2 音場

音声刺激は、無響室録音された単語の発話速度を統制した後、これに実音場で測定したインパルス応答¹⁵⁾を畳み込むことによって作成した。なお、音声伝送性能の物理的評価指標の一つであるSTI¹⁶⁾を幅広く分布させるため、インパルス応答には残響音を有する場合 (STI=0.80, 0.71, 0.51) と残響音のない場合 (STI=1.00) を用いた。

音声の提示レベルは65、70、75、および、80dBA（時定数slow）の4種類とした。騒音は、高橋らの報告¹⁷⁾に基づき、地下鉄駅プラットフォームの騒音の周波数特性を用い、提示レベルを60dBA（時定数slow）とした。なお、音声提示レベル、および、騒音レベルは、それぞれ被験者の頭部中心に相当する位置でのピーク値、および、中央値である。

発話速度は鉄道アナウンスの調査結果に基づき、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5 syl/sの6種類とした。発話速度の統制にはSugi Speech Analyzerを用いた。

5.2.3 提示方法と回答方法

実験は無響室で行い、直接音、残響音および騒音はいずれも被験者の正面に位置したひとつのスピーカから提示した。刺激提示の模式図を図-23に示す。

回答方法は実験1と同様である。

5.2.4 被験者

正常な聴力を有する学生20名を用いた。

5.2.5 結果と考察

回答結果より、それぞれの音場ごとに発話速度と音声レベルを要因とした2要因分散分析を行った ($p < .05$)。分散分析の結果、単語理解度における発話速度の主効果は、(STI=1.00)の場合を除き有意であった。音声レベルの主効果は (STI=0.71)、(STI=0.51)において有意であった。これに対し、「聴き取りにくさ」では、すべての音場において発話速度と音声レベルの主効果が有意であった。また、単語理解度、「聴き取りにくさ」のいずれにおいても発話速度と音声レベルの交互作用が有意でないことから、発話速度と音声レベルは独立に影響するといえる。

次に、TukeyのHSD検定による多重比較を用い ($p < .05$)、最適発話速度を検討する。図-24に多重比較に基づいた単語理解度の高いグループ、および、低いグループと発話速度の関係を示す。また、図-25に「聴き取りにくさ」の高いグループ、低いグループと発話速度の関係を示す。図-24、25によれば、1) 各音場において単語理解度が高く、かつ、「聴き取りにくさ」が小さくなる発話速度は異なること、2) STIが小さいほど発話速度の遅い方が「聴き取りにくさ」

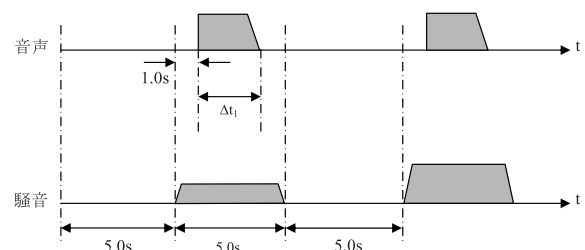


図-23 刺激の提示方法

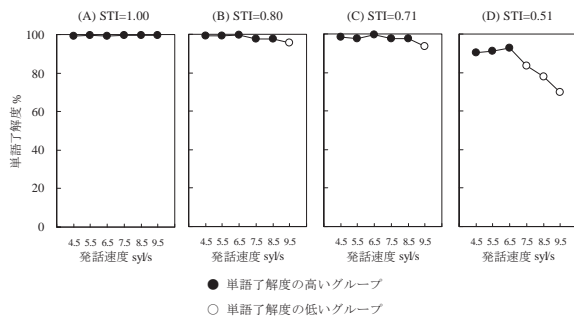


図-24 若年者における発話速度と単語理解度の関係

を低減できることが示された。これらを考慮すれば、若年者に最適な発話速度はそれぞれ (STI=1.00) 5.5~8.5 syl/s, (STI=0.80) 5.5~7.5 syl/s, (STI=0.71) 4.5~7.5 syl/s, (STI=0.51) 4.5~6.5 syl/s である。

同様に、最適音声レベルを検討するため、Tukey の HSD 検定による多重比較に基づいて ($p<.05$)、単語理解度、「聞き取りにくさ」のそれぞれを高いグループと低いグループに分類した。図-26 および図-27 にそれぞれ音声レベルと単語理解度の関係、音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係を示す。図-26、27 より、各音場において単語理解度が高く、かつ、「聞き取りにくさ」が小さくなる音声レベルは音場によらず 75、80dBa となり、この範囲が若年者に最適な音声レベルである。

5.3 実験 10：高齢者に最適な発話速度と音声レベル

近年の高齢社会では公共空間の利用者として高齢者を無視することはできない。高齢者と若年者では同一音場における「聞き取りにくさ」が異なるため¹⁸⁾、実験 9 で得られた結果が高齢者にも適用できるとは限らない。

実験 10 では、高齢者の最適発話速度と最適音声レベルを明らかにする。

5.3.1 単語

実験 9 と同様である。

5.3.2 音場

実験 9 と同様である。

5.3.3 提示方法と回答方法

実験 9 と同様である。

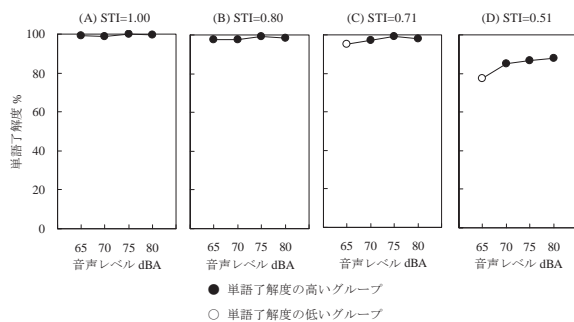


図-26 若年者における音声レベルと単語理解度の関係

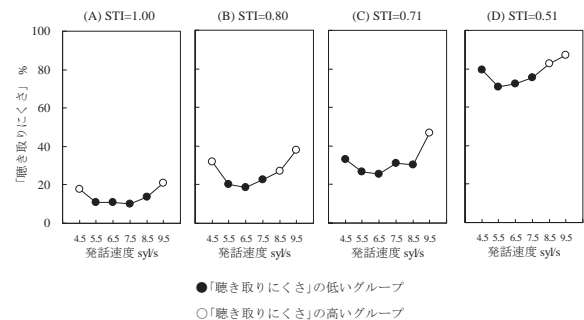


図-25 若年者における発話速度と「聞き取りにくさ」の関係

5.3.4 被験者

社会活動を日常的に営んでいる 65 歳~80 代前半の男女 34 名を用いた。なお、聴力検査の結果、各被験者の聴力は典型的な老人性難聴の傾向を示した。

5.3.5 結果と考察

若年者の場合と同様、それぞれの音場ごとに発話速度と音声レベルを要因とした 2 要因分散分析を行った ($p<.05$)。分散分析の結果、単語理解度における発話速度の主効果は (STI=1.00) を除くすべての音場で有意であり、音声レベルの主効果はすべての音場で有意であった。両者の交互作用はみられなかった。これに対し、「聞き取りにくさ」では、すべての音場において発話速度と音声レベルの主効果が有意であり、(STI=0.51) の場合にのみ交互作用がみられた。よって、高齢者の最適発話速度および音声レベルは、両者に交互作用がみられなかった (STI=0.71) 以上と交互作用が生じた (STI=0.51) の場合に分けて検討する。

まず、(STI=0.71) 以上の最適発話速度について検討する。若年者の場合と同様、多重比較に基づいた発話速度と単語理解度、「聞き取りにくさ」の関係をそれぞれ図-28、29 に示す。図-28、29 によれば、単語理解度が高く、かつ、「聞き取りにくさ」が小さくなる発話速度は音場によらず 4.5~7.5 syl/s であり、この範囲が高齢者に最適な発話速度である。

次に、(STI=0.71) 以上の最適音声レベルについて検討する。図-30、31 にそれぞれ多重比較に基づいた音声レベルと単語理解度、「聞き取りにくさ」の関係を示す。図-30、31 によれば、単語理解度が高く、かつ、「聞き取りにくさ」が小さくなる発話速度は (STI=1.00) と (STI=0.80) が 70~80dBa、(STI=0.71) が 75~80dBa であり、この範囲が高齢者に最適な音

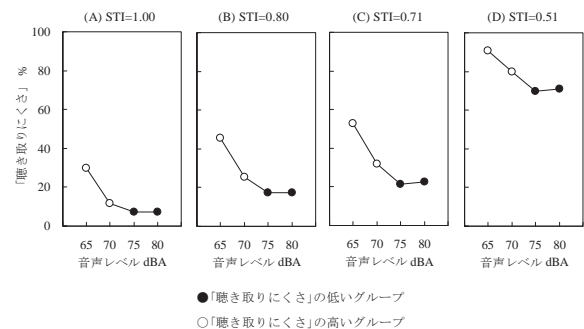


図-27 若年者における音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係

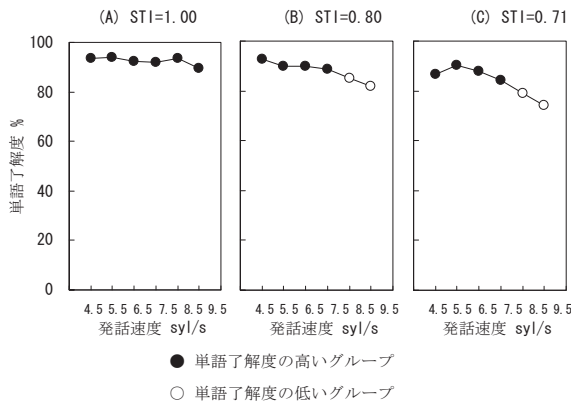


図-28 高齢者における発話速度と単語理解度の関係

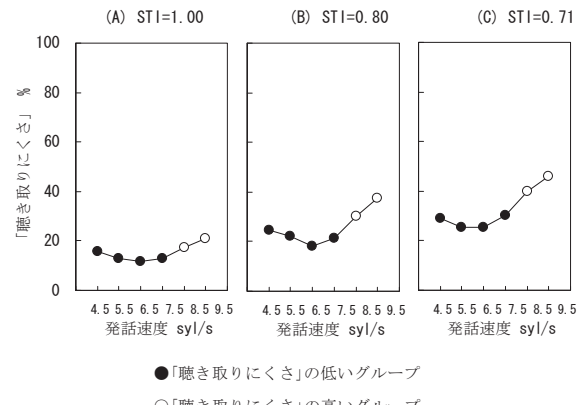


図-29 高齢者における発話速度と「聞き取りにくさ」の関係

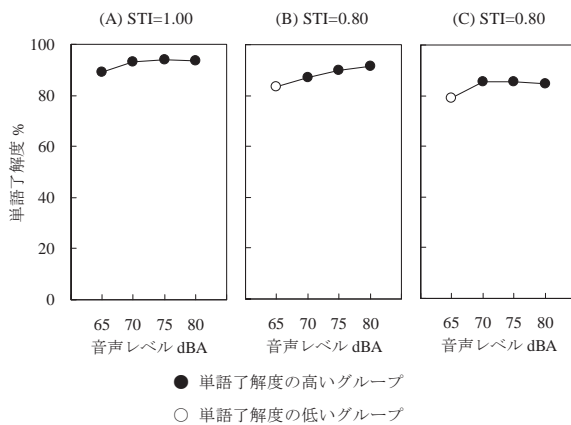


図-30 高齢者における音声レベルと単語理解度の関係

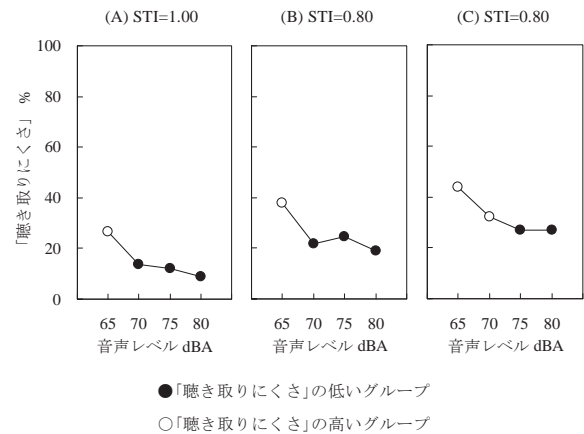


図-31 高齢者における音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係

声レベルである。

最後に、(STI=0.51)における最適な発話速度と音声レベルを検討する。2要因分散分析の結果、単語理解度については発話速度と音声レベルが独立に作用することが示されたため、発話速度と音声レベルのそれぞれについて、多重比較を用いて単語理解度の高いグループ、および、低いグループに分類した。図-32に単語理解度が高い発話速度における「聞き取りにくさ」と音声レベルの関係を示す。また、図-33に単語理解度が高い音声レベルにおける「聞き取りにくさ」と発話速度の関係を示す。図-32より、単語理解度

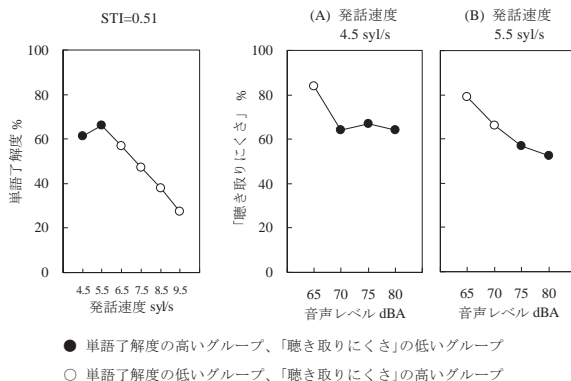


図-32 高齢者の単語理解度が高い発話速度における「聞き取りにくさ」と音声レベルの関係

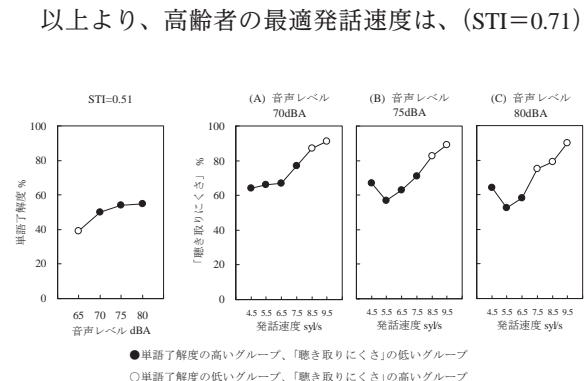


図-33 高齢者の単語理解度が高い音声レベルにおける「聞き取りにくさ」と発話速度の関係

が高いグループ、すなわち、単語理解度の観点から音声聴取に望ましい発話速度は4.5~5.5 syl/sである。ここで、発話速度4.5、5.5 syl/sのそれぞれについて示した音声レベルと「聞き取りにくさ」の関係より、発話速度4.5 syl/sでは音声レベル70~80dBA、発話速度5.5 syl/sでは音声レベル75~80dBAが「聞き取りにくさ」の低いグループである。

同様に図-33より、単語理解度の観点からは音声レベル70~80dBAが音声聴取に望ましいと言え、音声レベル70と75dBAでは4.5~7.5 syl/s、音声レベル80dBAでは4.5~6.5 syl/sがそれぞれ「聞き取りにくさ」の低いグループである。

以上より、高齢者の最適発話速度は、(STI=0.71)

以上では音声レベルによらず 4.5~7.5 syl/s であり、(STI=0.51) では、音声レベル 70dBA の場合が 4.5 syl/s、音声レベル 75~80dBA の場合が 4.5~5.5 syl/s である。一方、最適音声レベルは、(STI=0.71) 以上では発話速度によらず 70~80dBA であり、(STI=0.51) では、発話速度 4.5 syl/s の場合が 70~80dBA、発話速度 5.5 syl/s の場合が 75~80dBA である。

5.4 公共空間における音声伝達に最適な発話速度と音声レベル

実験 9 および実験 10 の結果に基づき、公共空間における音声伝達に最適な発話速度と音声レベルを検討する。

公共空間は不特定多数が活動する場であるため、受聴者を特定することは難しい。そこで若年者と高齢者のいずれにとっても最適な発話速度と音声レベルを公共空間における音声伝達に最適な発話速度および音声レベルと考える。表-11 に各音場における若年者と高齢者の最適発話速度、および、両者に共通する発話速度を示す。また、表-12 に各音場における若年者、高齢者、および、両者に共通する最適音声レベルを示す。これらより、公共空間において最適な発話速度は (STI=1.00)、(STI=0.80) が 5.5~7.5 syl/s、(STI=0.71) が 4.5~7.5 syl/s、(STI=0.51) が 4.5~5.5 syl/s であり、最適な音声レベルはインパルス応答によらず 75dBA~80dBA である。

なお、実験 9 および実験 10 で用いた騒音レベルが 60dBA であることから、上記の最適音声レベルは SN +15~+20dB に相当する。これは、第 3 章で明らかにした騒音レベルが 40dBA 以上の場合の最適音声レベルと一致する。すなわち、音声伝達に最適な発話速度は騒音を除いた空間の音響特性によって決定し、音声伝達に最適な音声レベルは騒音レベルによって決定すると考えられる。

表-11 音声伝達に最適な発話速度

聴取者	syl/s			
	STI=1.00	STI=0.80	STI=0.71	STI=0.51
若年者	5.5-8.5	5.5-7.5	4.5-7.5	4.5-6.5
高齢者	4.5-7.5	4.5-7.5	4.5-7.5	4.5 (70dBA)
				4.5-5.5 (75dBA)
				4.5-5.5 (80dBA)
共通	5.5-7.5	5.5-7.5	4.5-7.5	4.5 (70dBA)
				4.5-5.5 (75dBA)
				4.5-5.5 (80dBA)

表-12 音声伝達に最適な音声レベル

聴取者	dBA			
	STI=1.00	STI=0.80	STI=0.71	STI=0.51
若年者	75-80	75-80	75-80	75-80
高齢者	70-80	70-80	75-80	70-80 (4.5syl/s)
				75-80 (5.5syl/s)
共通	75-80	75-80	75-80	75-80 (4.5syl/s)
				75-80 (5.5syl/s)

6. 総括

第 1 章では、音声伝達性能の主観的評価指標、および、音声伝達に影響を及ぼす物理的要因に関する既往の研究を紹介し、以下の問題点を明らかにした。

- 1) 音声伝達性能が比較的高い音場間の違いをあらわし、かつ、絶対評価のできる主観的評価指標がないこと。
- 2) 音声伝達に影響を及ぼす要因のうち、発声系に関する要因、すなわち、音声レベルや発話速度の最適値が明らかにされていないこと。

第 2 章から第 5 章では、これらの問題点について検討した。

第 2 章では、音声伝達性能の主観的評価指標として、単語に対する「なじみの程度」、すなわち、親密度が最も高い単語を聞き取りにくいと感じた人の割合である「聞き取りにくさ」を提案し、残響および騒音付加音場における「聞き取りにくさ」と単語理解度を比較・検討した。その結果、単語理解度が 100% であっても聞き取りにくいと感じている人がいることを明らかにした。この結果は音声伝達を必要とする空間において目指すべき状況が単語理解度 100% ではなく、「聞き取りにくさ」が 0% の状態であることを示している。さらに、音声伝達性能が良い場合は「聞き取りにくさ」の方が単語理解度よりも感度良く、かつ、厳しく音声伝達性能を評価できることを明らかにした。

第 3 章では、音声レベルが「聞き取りにくさ」に及ぼす影響を検討し、音声伝達に最適とされる残響時間 0.5s において、騒音レベルと最適音声レベルの関係を明らかにした。「聞き取りにくさ」に基づけば、音声伝達に最適な音声レベルは騒音レベル 40dBA 以下の場合が 55dBA で一定であり、騒音レベル 40dBA 以上の場合には SN 比 +15dB となる音声レベルである。また、良好な音声伝達を行うために、最適な音声レベルを確保するだけでなく、騒音レベルを小さくする必要があることを明らかにした。

第 4 章では、「聞き取りにくさ」の実験方法について検証した。その結果、同一被験者に同一音表を繰り返し提示しても「聞き取りにくさ」に学習効果はあらわれないこと、および、刺激文脈に基準刺激を加えることで、「聞き取りにくさ」の文脈効果を抑制できることを明らかにした。これらの結果は、聴取実験で用いる刺激群に基準刺激を加えることによって、「聞き取りにくさ」が音声伝達性能を絶対評価できることを示している。

第 5 章では、発話速度が「聞き取りにくさ」に及ぼす影響を検討するとともに、公共空間における音声伝達に最適な発話速度と音声レベルを検討した。その結果、音声伝達性能の低い空間ほど発話速度を遅くすることが望ましいこと、および、音声レベルは騒音レベルに応じて最適な値が決定することを明らかにした。また、騒音レベル 60dBA の場合、STI が 0.5 以上の音場では、発話速度 5.5 syl/s と音声レベル 75~80dBA が音声伝達に最適な発話速度と音声レベルであることを示した。実際の公共空間および公共放送で用いられているアナウンスの発話速度がおおむね 4.0~10.0 syl/s

の範囲に分布しているという調査結果に基づけば、一部の公共空間および公共放送では、アナウンスの発話速度を現状よりも遅くすることでより良い音声伝達が実現できると考えられる。

以上、本研究で得られた成果は良好な音声伝達性能を有する空間の実現に有用であると考えられる。ただし、音声の周波数特性や受聴者の態度のように、音声伝達に影響を及ぼすと考えられながら本論文では扱っていない要因が多数存在する。良好な音声伝達を実現するためにはこれらの要因が及ぼす影響について明らかにするとともに、得られた知見を実現するための設計方法を確立することが必要である。

今後、より良い音環境の実現を目指して研究を続ける所存である。

本論文に関する発表論文

- 1) M. Morimoto, Hi. Sato and M. Kobayashi, "Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 1607-1613 (2004)
- 2) M. Kobayashi, M. Morimoto, Hi. Sato and Ha. Sato, "Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 251-256 (2007)
- 3) 佐藤逸人、森本政之、袴田篤史、小林正明、佐藤 洋、"単語の聴き取りにくさの聴感試験法について—学習効果の検証および文脈効果の低減—," 神戸大学大学院自然科学研究科紀要 22-B、47-57 (2004)

主な参考文献

- 1) 佐藤 洋、"室内公共空間における音声伝達性能の評価法に関する研究," 東北大学博士学位論文、(1997)
- 2) 天野成昭、近藤公久、日本語の語彙特性 (三省堂、東京、1999)
- 3) 坂本修一、鈴木陽一、天野成昭、小澤賢司、近藤公久、曾根敏夫、"親密度と音韻バランスを考慮した単語理解度試験用リストの構築," 日本音響学会誌 **54**、842-849 (1998)
- 4) 鈴木陽一、近藤公久、坂本修一、天野成昭、小澤賢司、

- 曾根敏夫、"親密度を統制した単語理解度試験における反応傾向," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-98-47 (1998)
- 5) H. Haas, "The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech," *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, 146-159 (1972)
- 6) D. F. Hoth, "Room noise spectra at subscribers' telephone locations," *J. Acoust. Soc. Am.* **12**, 499-504 (1982)
- 7) J. S. Bradley, "Speech intelligibility studies in classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 846-854 (1986)
- 8) J. S. Bradley, "On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 1820-1828 (1999)
- 9) J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 837-845 (1986)
- 10) S. R. Bistafa and J. S. Bradley, "Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics," *J. Acoust. Soc. Am.* **107**(2), 861-875 (2000)
- 11) V. O. Knudsen, *Architectural Acoustics* (Wiley, New York, 1932)
- 12) 難波精一郎、音色の測定・評価法とその適用例 (産業科学システムズ、東京、1992)
- 13) 難波精一郎、桑野園子、音の評価のための心理学的測定法 (コロナ社、東京、1998)
- 14) 佐藤逸人、佐藤 洋、鈴木陽一、天野成昭、近藤公久、"若年者と高齢者の単語親密度の差について," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集、281-282 (2000)
- 15) 西川嘉雄、佐藤 洋、井上 諭、小林好人、"建築空間におけるインパルス応答を用いた音声伝送性能評価各種物理指標の関係," 日本建築学会計画系論文集 **605**、9-14 (2006)
- 16) T. Houtgasut and H. J. M. Steeneken, "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility," *Acustica*. **28**, 66-73 (1973)
- 17) 高橋杏子、大西 豊、佐藤逸人、森本政之、"公共空間の音環境の類型化に関する研究—地下鉄および空港の音環境," 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N2007-03 (2007)
- 18) 佐藤逸人、佐藤 洋、吉野 博、森本政之、"加齢による聴力損失が単語理解度及び「聴き取りにくさ」に与える影響," 日本建築学会東北支部研究報告集、9-12 (2001)

