透過音の主観評価に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON SUBJECTIVE EVALUATION OF SPEECH SOUND THROUGH WALLS

宮尾 健一^{*1}, 大川 平一郎^{*2}, 山崎 芳男^{*3}
Ken-ichi MIYAO, Heiichiro OHKAWA and Yoshio YAMASAKI

This study investigates evaluation of speech sound through walls. In this case, it is necessary to consider the effects of background noise. This paper describes the results of subjective evaluation in different background noise level.

The results of this paper are as follows;

1. Transmitted speech sound level is better for index of this purpose than sound pressure level difference.
2. Level difference between transmitted speech sound level and background noise level is related to the results of subjective evaluation.

Keywords: sound insulation, sound pressure level difference, transmitted speech sound level, background noise level, word detection, word intelligibility

遮音、室間平均音圧レベル差、透過音レベル、背景音レベル、単語検知、単語理解度

1. はじめに

集合住宅、ホテルなどの居室では、隣室（戸）から話し声が聞こえるといった事象による音響的障害の発生は決して少なくないことを経験している。このような事象へは、いままで、両室間の遮音性能を表す室間平均音圧レベル差の値で対応してきた。この室間平均音圧レベル差は、物理的な尺度として遮音設計性能評価には使用実績があるが、入居者・利用者からの主観的な判断である苦情との対応については十分なものであるとはいえない。この主観的な判断は、透過音が検知できる、内容が認識できる、また、その音量感、音質感、不快感なども関係し、生活実感としての透過音に対する評価には、物理的な尺度である室間平均音圧レベル差ではない別の尺度が必要である。物理的尺度としての室間平均音圧レベル差は、壁構造の透過損失、透過面積、受音室の等価吸音面積（吸音力）、対象壁構造以外からの側路伝搬音が寄与し決定されるものであり、背景音の要素は入らない。

今回の検討は、この透過音を単に物理的な値として評価するのではなく、背景音の影響も含め、音声の検知、認知、すなわち「聞こえ方」、「理解度」という視点から室間の遮音性能を評価することを試み、最終的には、隣接室からの透過音を生活実感に近い形での単一数値による評価する方法を提案することを目的

としている。

2. 実験方法

2.1 音声伝送場の物理的条件

音源室から受音室への音声の伝送には、図1に示したような伝送系が考えられる。したがって、音源である音声は、まず音源室の物理的条件としての吸音、反射、残響、また背景音の影響を受け、壁・床を透過する段階で大きく減衰する。受音室に透過した音は、音源室と同様に、物理的条件の影響を受けた後に受聴者に検知あるいは認知される。この検知・認知されるまでの過程に生じる物理的条件のうち、壁構造、室内の吸音条件を可変設定することの出来る実験室（コンクリート造）を用いて、表1に示した遮音特性を有する5種類の壁構造について、主観評価実験用音源作成のための基礎資料として、2室間の室間平均音圧レベル差及びインパルスレスポンスを求めた。

2.2 主観評価実験

1) 主観評価実験システム

主観評価実験システム^{※1)}を図2に示した。この実験システムと図1に示した音声の伝送模式図との関連などについて次に述べ

*1 戸田建設㈱技術研究所

*2 ㈱音環境研究所 所長・工博

*3 早稲田大学理工総研音響情報研究室 教授・工博

Technical Research Institute, Toda Corp.

Sound Environment Research Inc., Dr. Eng.

Prof., Acoustic Laboratory, Advanced Research Center for Science and Engineering, Waseda University, Dr. Eng.

る。

ここでは、図1の音源側・受信側での背景音と、窓・扉等からの側路伝搬音は含まれないインパルスレスポンスを考える。

まず、インパルスレスポンス測定用信号(M系列ノイズ)が2.1で述べた音源側実験室内で放射され、表1に示した試験壁を透過し、受信側実験室内の受信点に到達するまでの上記を除く全ての音響的な情報は、「音源→受信点」のインパルスレスポンスに含まれているとの前提条件に立っている。このインパルスレスポンスとドライソースを畳込み実音化し、無響室の受聴点で被験者に呈示することにより、試験壁を透過した音声を受聴点で擬似的に聴取しているとの考え方をしている。

ただし、インパルスレスポンスは、実験室内の背景音の影響を出来るだけ受けないようにスピーカの出力を調整し、かつスピーカ1カ所・受信点1カ所で測定したものである。したがって、室間平均音圧レベル差・室内平均吸音率から、受信室における音声の平均的なオクターブバンドレベルを別に計算により求めておく必要がある。主観評価実験にあたっては、各条件毎の受信室におけるオクターブバンドレベル計算値と被験者位置の受聴点オク

図1 音声の伝送模式図

図2 主観評価実験システム

表1 壁構造と遮音特性パターン、透過音特性パターン

試験壁	D数	dB(A)	遮音特性パターン	透過音特性パターン
A 石こうボード厚12 中空層厚65(共通間柱) 石こうボード厚12	D-30 ~D-33 (125)	41~44		
B 石こうボード厚12×2 中空層厚65(共通間柱) 石こうボード厚12×2	D-36 ~D-37 (125)	31~33		
C 石こうボード厚21×2 中空層厚85(独立間柱、 グラスウール) 石こうボード厚21×2	D-49 ~D-54 (125)	20~25		
D 普通コンクリート 厚180	D-46 ~D-50 (125, 1 k)	27~33		
E Dの両面に石こう ボード厚12直張 中空層23(ボンド付け)	D-38 ~D-40 (500)	38~41		

注1) 音源側実験室、受信側実験室の吸音条件を、それぞれ、反射性: R (500Hzの吸音率 $\bar{\alpha}_{500} = 0.08$)、吸音性: A (同; $\bar{\alpha}_{500} = 0.15$) の2通りとし、壁構造毎に、音源室→受信室の条件を4通り (R→R, R→A, A→R, A→A) に設定した。

注2) D数は、室間平均音圧レベル差に関する遮音等級の基準周波数特性をもとにして、1 dB ステップで求めた遮音等級である。() 内はD数を決定する周波数帯域 (Hz) である。

注3) 透過音レベル dB(A) は、壁構造を透過し受信室に到達した音声のピークレベル (動特性: FAST) の計算値である。

注4) 透過音特性パターン中に、呈示する背景音 (BGN) のうち、例として25、35dB(A)の特性パターンを示した。

ターブバンドレベルを一致させるように、コンピュータで制御している。

また、インパルスレスポンスは、信号を対象壁に垂直入射させた条件でのものであり、音声の入射条件がこの条件に限られた実験となる。

今回の実験の主な目的である被験者への背景音の呈示は、一般的な場合は図1における音源側の背景音の影響を考えなくてもよいものとして、受音側のみを対象とし、図2に示したように、音声呈示用のシステムとは別に、背景音呈示用のシステムから直接被験者に呈示する方法とし、定常的な環境騒音を模擬した特性とした。

2) 主観評価実験用音声の作成

主観評価実験に使用する音源用の文章は、まず「形容詞＋名詞＋動詞」より成る文章で、被験者に類推、記憶されることの少ないことを念頭に、表2に示したような脈絡のない実験用文章^{1)～4)}の音表を作成した。このとき、辞書からピックアップした形容詞、名詞、動詞を無作為に組合わせて文章を作成し、適切なものだけを選択し、音表間に特徴の出ないように調整を行った。なお、1音表は50文で構成されている。

これらの音表を、無響室内で女性ナレーターによって読みあげてもらい収録し、実験用音声（ドライソース）を作成した。さらに、表1で示した物理的条件下で測定したインパルスレスポンスに実験用音声を畳込み、主観評価実験用音源としての音声とした。なお、ドライソースは文頭から文頭までを10Sとした。したがって、1音表の呈示時間は500Sとなる。

3) 主観評価実験

主観評価実験は無響室で行い、「聞こえ方のグレード」、「単語了解度」を尺度とした測定を、1)で述べた実験システムを用いて行った。

音源のレベルとしては、図3に示した音声のパワーレベルを用い、ピークレベル79dB(A) [動特性: FAST] に設定した。受音室における透過音のレベルは、このパワーレベルを用い、1)で述べたように、表1に示した壁構造の遮音特性と吸音条件毎に計算によって求めた。被験者への透過音の呈示は、設定実験条件にしたがって、被験者の前面3mの位置に設置した試験用音声呈示用スピーカより、1条件について1音表を呈示し、「聞こえ方」のグレードとして、「聞こえる(A)」、「かすかに聞こえる(B)」、「聞こえない(C)」の三者択一で被験者に回答させた。また、その結果にA:1.0、B:0.5、C:0のポイントを与え点数化した。「単語了解度」の場合には、脈絡のない試験用文章の「名詞」のみを筆記回答させて、その正答率を算出した。なお、透過音のレベルは、表1に示したように20dB(A)～44dB(A)の範囲にある。

また、背景音レベルは、25、30、35、40、45dB(A)とし、その周波数特性は、表1に例を示したように、実測値からほぼオクターブ5dB下がりの特性に設定した。背景音は、スピーカを2個用いて、無相関ノイズを試験用音声呈示用スピーカの両サイドから被験者に呈示した。

表2 音表の例

音表その5

1 黒い	電気が	すべる
2 しとやかな	時計が	ひらめく
3 若い	煙が	吠える
4 あざやかな	酸素が	倒れる
5 強い	皿が	たくらむ
6 柔らかい	眼鏡が	煮える
・	・	・
・	・	・
44 重い	景色が	はがす
45 まぶしい	くじらが	すわる
46 もろい	小川が	乗る
47 のどかな	刀が	つまる
48 利口な	ふとんが	浴びる
49 あたたかい	橋が	怒る
50 くやしい	畑が	溶ける

図3 人声のパワーレベル設定値

被験者は、正常な聴力を有する20代～50代の男性5名、女性3名計8名である。

3. 主観評価実験結果の検討 I

3.1 D数と聞こえ方、単語了解度

背景音レベルをパラメーターとし、空間平均音圧レベル差より求めたD数と、聞こえ方のグレードとの関係を図4に、単語了解度との関係を図5に示した。図4から次のことがわかった。

① 背景音レベルが25dB(A)～40dB(A)の範囲では、相関係数が

0.75~0.82を示し、45dB(A)のときはさらに相関係数が小さくなる。

② グレードが 0.5(かすかに聞こえる)以下となるD数の値は、背景音レベルが25dB(A)のときでD-53以上、40dB(A)のときでD-41以上である。この範囲では、背景音レベルが5dB大きくなると、D数の値は3~5小さい値となる。ただし、背景音レベルが45dB(A)のときは傾向が異なる。

また、図5から次のことがわかった。

① 背景音レベルが25dB(A)のときは、相関係数は0.90を示したが、30dB(A)~40dB(A)では0.64~0.75を示し、45dB(A)のときはさらに相関係数が小さくなる。

② 意味がわからなくなる領域は、D数の値が、背景音レベルが25dB(A)のときでD-52以上、40dB(A)のときでD-50以上であり、この範囲でのD数の値の差は小さい。また、背景音レベルが45dB(A)のときは、D-40以下でも意味のわからなくなるケースがある。

D数と主観評価量が強い相関を示さなかった理由としては、次のようなことが考えられる。

D数を決定する周波数帯域は、表1に示したように、試験壁A、B、Cのボード壁では125Hz、試験壁Dのコンクリート壁では125Hz、1kHz、コンクリートにボード直張壁では500Hzとなっているのに対し、透過音特性パターンに示したように、透過音の周波数特性は、全ての試験壁で、250Hz帯域が卓越している。このため、D数の場合には、被験者が判断している周波数帯域と「ズレ」を生じていることが強い相関を示さない原因であると推察される。

3.2 透過音レベルと聞こえ方、単語理解度

ここでは、背景音レベルをパラメーターとし、透過音レベルを指標として検討する。

透過音レベルと、聞こえ方のグレードとの関係を図6に、単語理解度との関係を図7に示した。図6から次のことがわかった。

① 背景音レベルが25dB(A)~45dB(A)で、相関係数は0.90以上を示した。ただし、透過音レベルが20dB(A)と小さいときは、回帰直線から「聞こえない」側に外れる。

② 聞こえ方のグレードが0.5以下となる透過音レベルの値は、背景音レベルが25dB(A)のときで23dB(A)以下、35dB(A)のときで28dB(A)以下であり、この範囲では、背景音レベルが5dB大きくなると、この透過音レベルは2~3dB大きく

図4 D数と聞こえ方のグレード

図5 D数と単語理解度

図6 透過音レベルと聞こえ方のグレード

なる。また、背景音レベルがこれ以上になると、この透過音レベルの変化量は大きくなり、傾向が異なってくる。

また、図7から次のことがわかった。

- ① 背景音レベルが25dB(A)～40dB(A)では、相関係数は0.85以上を示したが、45dB(A)のときは相関係数は小さくなる。
- ② 意味がわからなくなる領域は、透過音レベルの値が、背景音レベルが25dB(A)のときで23dB(A)以下、35dB(A)のときで29dB(A)以下であり、この範囲では、背景音レベルが5dB大きくなると、この透過音レベルの値は3dB大きくなる。

透過音レベルの方が、D数よりも主観評価量と強い相関を示す理由としては、次のようなことが考えられる。

表1の透過音特性パターンで示したように、透過音の卓越周波数は250Hz帯域であるが、このオクターブバンドレベルはdB(A)値に大きく寄与している（試験室によっては、500Hz帯域も寄与）。さらに、図3で示したように人声のパワレベルは250Hz、500Hz帯域が卓越している。このため、透過音レベルの場合には、3.1で述べたような被験者が判断している周波数帯域との「ズレ」を生じにくいことが強い相関を示す原因であると推察される。

4. 主観評価実験結果の検討Ⅱ

検討Ⅰの結果から、透過音レベルは、聞こえ方、単語理解度の両者に対して、背景音レベルの大きい場合を除き強い相関を示すことが明らかになった。また、透過音レベルが同じでも、背景音レベルにより主観評価量が異なり、背景音レベルをパラメータとした実験式をみると、単語理解度で背景音レベルが特に大きい場合を除けば、回帰直線は平行に近い傾向を示した。このことは、透過音レベルと背景音レベルとの差と主観評価量とが何らかの関係を示すことを示唆している。したがって、検討Ⅱでは、透過音レベルと背景音レベルとの差を指標として実験結果を整理し考察する。また、室内の吸音条件の影響についても検討する。

4.1 透過音レベルと背景音レベルとの差と聞こえ方

透過音レベルと背景音レベルとの差の値を指標として、その値と聞こえ方のグレードとの関係を図8に示した。この図から次のことがわ

図7 透過音レベルと単語理解度

図8 透過音レベルと背景音レベルとの差と聞こえ方のグレード

図9 透過音レベルと背景音レベルとの差と単語理解度

かった。

① 透過音レベルと背景音レベルとの差が -17dB から $+6\text{dB}$ の範囲では相関係数は 0.95 を示した。

② 差が $+6\text{dB}$ 以上では「聞こえる」という回答がほとんどを占め、 -6dB 付近では「かすかに聞こえる」という回答が多く、 -17dB 以下では「聞こえない」という回答がほとんどを占めた。

③ 回答が回帰直線よりも「聞こえない」側に大きく外れている値は、透過音のレベルが 20dB(A) の場合であり、このようにレベルの小さいときには、背景音レベルとの差の値のみでは説明できなく、別途検討する必要がある。

④ 音源室、受音室の吸音条件による違いはみられなかった。

図10 聞こえ方のグレードと単語了解度

4.2 透過音レベルと背景音レベルとの差と単語了解度

透過音レベルと背景音レベルとの差の値と単語了解度との関係を図9に示した。この図から次のことがわかった。

① 透過音レベルと背景音レベルとの差が -7dB から $+19\text{dB}$ の範囲では相関係数は 0.92 を示した。

② 受音室が反射性の場合と吸音性の場合とでは、後者の方が単語了解度が大きい値を示した。ただし、音源室の吸音条件による違いはみられなかった。

③ 意味がわからなくなる領域は、レベル差が受音室が吸音性の場合で -7dB 以下、反射性の場合で -5dB 以下であった。

透過音レベルと背景音レベルの差と主観評価量が強い相関を示した理由としては次のようなことが考えられる。

表1の透過音特性パターンに透過音と背景音の周波数特性パターンを示したように、背景音レベルを上下させることにより、帯域毎の透過音のオクターブバンドレベルと背景音のオクターブバンドレベルとのレベル差は変化する。このとき、前者が後者を上回る帯域数が、 250Hz 帯域を卓越周波数帯域として増減することがわかる（背景音レベルを上げると、全ての帯域で透過音レベルが背景音レベルを下回る場合もある）。

今回、透過音のレベルの絶対値だけでなく、このようなレベル差についても調べたわけであるが、実験結果は、透過音のレベルと背景音のレベルとの相対的な関係が主観評価に影響を与えることを示したといえる。すなわち、被験者は、主として、透過音のレベルと背景音のレベルの「差」を重要な判断項目の1つとしているものと推察される。

4.3 聞こえ方と単語了解度

聞こえ方のグレードと単語了解度との関係を図10に示した。この図から次のことがわかった。

① 聞こえ方のグレードが、 0.4 以上 1.0 未満の範囲では相関係数が 0.82 を示した。

② 聞こえ方のグレードが 1.0 で、単語了解度の中が 50% にも及んでいるのは、グレードの尺度化に問題があり、実際には「聞こえる」のグレードをさらに細分化するなどの必要があったことを示唆している。

③ 聞こえ方のグレードが 0.8 以上になると、単語了解度は 10% 以上を示した。

④ 聞こえ方のグレードが 0.4 以下では、意味がわからない領域となった。

⑤ 受音室が反射性の場合と吸音性の場合では、わずかではあるが後者の方が単語了解度が大きい値を示した。ただし、音源室の吸音条件による違いはみられなかった。

聞こえ方のグレードと単語了解度との関係については、前述のように、聞こえ方のグレードの尺度化の問題があるが、聞こえ方のグレードが 0.5 （かすかに聞こえる）付近を境として、それより上のグレードでは意味がわかる場合が多くなるなどのおおよその傾向を把握することはできたと考えている。

5. まとめ

本報では、背景音レベル別に、室間平均音圧レベル差・透過音レベルと主観評価量との関係を調べた結果、次のことがわかった。

① 室間平均音圧レベル差から求めた D 数よりも、透過音レベルの方が主観評価量と強い相関を示した。

② 透過音レベルと背景音レベルとの差の値と主観評価量は、一定の範囲内で、強い相関を示した。

③ 聞こえ方のグレードと単語了解度との関係については、グレードの尺度化の問題はあるが、おおよその傾向を示した。

今回の結果は、基礎的な検討段階でのものであり、今後検討すべき課題が多く残されている。検討課題としては、透過音レベルが特に小さいときと背景音レベルが特に大きくなったときに、主観評価量との対応がよくなかったが、この理由の解明などが挙げ

られる。また、特に、今回のような実験室での実験結果と実際の生活実感との関連を検討することが重要事項であろう。さらに、音量感、音質感、不快感との関係の検討、情報理論の適用の検討、室内音響の分野で、話し声の了解度を表す指標の一つとして使われているMTI・STIを適用する方法^{7),8)}の検討なども大切であると考えている。

謝辞

本実験に貴重なご助言を戴いた千葉工業大学 子安 勝教授に謝意を表します。

<注>

注1) 主観評価実験システム：遮音設計では、対象騒音から界壁・サッシなどの遮音構造を透過し、受音点に到達した騒音のレベルを予測する。本システムは、この結果を実音化し、無響室において主観的評価を行なうことにより、各種遮音構造の選定に役立てることを目的として作成されたものである。今回、このシステムを音声の透過音の主観評価実験に適用した。なお、このシステムでは、無響室の受聴点のオクターブバンドレベルを管理すれば、任意のドライソースと、任意の「音源→遮音構造→受音点」のインパルスレスポンスを組合わせて試聴することが可能である。

注2) 本論文は、参考文献7)、8)に新たな研究結果を加え、加筆修正したものである。

<参考文献>

- 1) 加藤雅裕、杉野潔：被験者の経験が明瞭度試験におよぼす影響に関する検討、日本音響学会講演論文集、PP.933～934,1994.10～11
- 2) 橋本修、木村翔：会話音声の発生レートの頻度を考慮した三連音節明瞭度試験用音源の検討、日本音響学会建築音響研究会資料AA93-47、PP.1～7、1993.10
- 3) 戸井田義徳：これまでに製作された明瞭度測定用音源の調査と分析、日本建築学会環境工学委員会音環境運営委員会室内音響小委員会資料、日本音響学会建築音響研究会資料、資料番号AA-94-13、PP.1～8、1994.3
- 4) 佐藤洋、長坂宗重、吉野博、佐藤隆：文章音表を用いた残響・騒音の音声聴取に及ぼす影響の評価に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.495、PP.15～20、1997.5
- 5) 宮尾健一：テレビ、人声の発生音、音響技術No.94、PP.33～36、1996.6
- 6) (社)日本音響材料協会編：騒音・振動対策ハンドブック（測定：NHK技術研究所）、P.560,1982.
- 7) 宮尾健一、大川平一郎、山崎芳男：透過音の評価に関する実験的研究—第1報 透過音の単語了解度による評価—、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.257～258,1995.8
- 8) 宮尾健一、大川平一郎、山崎芳男：透過音の評価に関する実験的研究—第2報 透過音の単語了解度による評価（2）—、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.35～36,1996.9

（1997年9月10日原稿受理、1998年4月7日採用決定）