



ユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能に関する研究

佐藤, 逸人

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-03-05

(Date of Publication)

2009-06-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2977

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002977>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

ユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能に関する研究

平成20年 1月

佐藤 逸人

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	2
1.2.1	音声伝送性能の評価方法について	2
1.2.2	最適な音声伝送性能を実現する音響条件について	7
1.2.3	高齢者の受聴特性について	9
1.3	研究の目的及び論文の構成	11
1.3.1	研究の目的	11
1.3.2	論文の構成	11
第2章	単語了解度による高齢者の受聴特性の評価	13
2.1	実験A：親密度で統制した単語リストを用いた検討	13
2.1.1	実験方法	13
2.1.2	結果と考察	18
2.2	総合的考察	22
2.2.1	親密度の影響	22
2.2.2	聴力レベルの影響	23
2.3	結論	25
第3章	聴き取りにくさによる高齢者の受聴特性の評価	27
3.1	実験B1：残響音付加音場における検討	27
3.1.1	実験方法	27
3.1.2	結果と考察	32
3.1.3	まとめ	45
3.2	実験B2：騒音付加音場における検討	46
3.2.1	実験方法	46
3.2.2	結果と考察	51
3.2.3	まとめ	57
3.3	結論	57

第4章 聴き取りにくさと音響物理指標の関係	59
4.1 実験C1：残響音付加音場における検討	59
4.1.1 実験方法	59
4.1.2 物理指標の算出と物理指標間の相関分析	63
4.1.3 結果と考察	65
4.1.4 まとめ	69
4.2 実験C2：残響音及び騒音付加音場における検討	70
4.2.1 実験方法	70
4.2.2 物理指標の算出	73
4.2.3 結果と考察	74
4.2.4 まとめ	82
4.3 実験C3：加齢による聴力損失の影響	83
4.3.1 実験方法	83
4.3.2 結果と考察	84
4.3.3 まとめ	89
4.4 総合的考察	90
4.4.1 聴き取りにくさによる音場の相対評価と絶対評価	90
4.4.2 主観評価に基づいた音声伝送性能の絶対評価のランクの提案	90
4.4.3 音声伝送性能のランクと既存の評価指標の比較	93
4.4.4 高齢者を対象とした音声伝送性能のランク	95
4.5 結論	96
第5章 聴き取りにくさによる許容音声レベルの検討	97
5.1 最適音声レベルと許容音声レベル	98
5.2 実験D1：妨害音がない音場における許容音声レベル	99
5.2.1 実験方法	99
5.2.2 結果と考察	103
5.2.3 まとめ	106
5.3 実験D2：残響音付加音場における許容音声レベル	107
5.3.1 実験方法	107
5.3.2 結果と考察	112
5.3.3 まとめ	120

5.4 実験D3：騒音付加音場における許容音声レベル	121
5.4.1 実験方法	121
5.4.2 結果と考察	125
5.4.3 まとめ	139
5.5 結論	140
第6章 総括	141
謝辞	143
文献	145
付録	
A：実験Cで用いたインパルス応答の詳細	
B：実験Cで用いた物理指標の算出方法	

第1章 序論

1.1 はじめに

音声によるコミュニケーションは、建築空間のいたるところで行われている。良好な音声コミュニケーションを実現するためには、音声を正しく聴き取ることができるだけではなく、音声の聴き取りを苦勞無く快適に行えることが必要である。音声は、発信されてから聴取者に伝えられる過程において、様々な要因で劣化する。例えば、鉄道駅における列車発着のアナウンスの場合、駅員によるアナウンスは利用客に伝えられるまでに、拡声設備による歪み、プラットホームにおける残響音や騒音による妨害を受けて劣化する。建築空間及びそこに設置された拡声設備が、どの程度音声を劣化させずに、正確かつ快適に伝えられるかを示す性能を、音声伝送性能と呼ぶ[1]。

長友ら[2]による、建築空間における音声コミュニケーションの形態の分類を一部抜粋・編集したものをTable 1.1に示す。音声コミュニケーションの形態は、音声情報の発信者と聴取者の関係や、音声情報を伝える目的とその重要性といった観点から、「非常放送」、「会話」、「案内・誘導・呼出・交信」、「スピーチ・講義」、「演劇・芝居」、「宣伝」の6つに分類される。必要な音声伝送性能は、音声コミュニケーション形態により異なる。また、「会話」を除いた音声コミュニケーション形態では、拡声設備を用いて、多数の聴取者に対し同時に音声を伝送する場合が多い。この場合、聴取者の聴力の違いを考慮する必要がある。

聴力は、先天的な障害、あるいは事故や病気、長時間の騒音暴露、加齢による有毛細胞の減少などの後天的な要因により低下する。特に、加齢によって聴力が低下している聴取者は、「高齢社会白書」[3]によれば、2006年現在における日本の高齢者人口比率（65歳以上の人口比率）は、20.8%を超えており、建築空間において無視できない存在である。加齢による聴力の低下は、年齢と必ずしも相関があるわけではなく個人差が大きい[4]が、補聴器が必要とはされないが聴力障害があると認められる軽度難聴程度の聴力の高齢者は、相当数いると考えられる。

近年、建築デザインにおいて重要視されるようになった考えのひとつとして、バリアフリーデザインがある。具体的には、スロープやエレベータの設置のような移動時に障害となる段差の解消や、視覚障害者を対象とした誘導ブロックの設置のような例が挙げられる。法制としても、1994年のハートビル法、2000年の交通バリアフリー法、これらを統合・拡充した2006年のバリアフリー新法など整備が進

Table 1.1 The classification of speech communication in architectural spaces[2].

音声情報の内容	情報の階層	音響設計の目標
非常放送	非常時：必須の情報	100%情報伝達ができる環境
会話	対面コミュニケーション主体	会話を阻害しない音環境
案内・誘導・呼出・交信	サービス：行動基準	良好な情報伝達
スピーチ・講義	サービス：音声聴取を目的	良好な情報伝達と不快でない聴取環境
演劇・芝居	パフォーマンスとしての音声聴取	不快でない聴取環境と表現の自由
宣伝	一方的な音声供給	不快でない音環境（騒音制御）

み、あらゆる建築空間でバリアフリー化の需要が高まると考えられる。このなかで、音によるバリアフリー化の取り組みとして、2002年の「旅客施設における音による移動支援方策ガイドライン」[5]があるが、これは視覚障害者の移動支援を目的とするものである。高齢者を含む軽度難聴者を対象とした音に関するバリアフリーデザインについて明文化された例は、現在のところみられない。

難聴者に対し、音声を正しく伝えるためには、残響音や騒音を低減し、より高い拡声レベルで音声を伝送することによって高い音声伝送性能を実現することが必要である。しかし、どの程度音声伝送性能を高めればよいのかは定量的に明らかにされていない。これは、音声伝送性能を評価する様々な方法が提案されているものの、実際に即した評価が得られる方法がなかったことが一因である。また、バリアフリーデザインではなく、それをさらに発展させたユニバーサルデザイン、つまり、万人にとって利用しやすいデザインを音声伝送性能のデザインに取り入れることを考えると、聴力障害者のみを対象とするのではなく、健常者と聴力障害者の両者を対象として、最適な条件を検討する必要がある。

1.2 既往の研究

1.2.1 音声伝送性能の評価方法について

音声伝送性能を評価する方法は、被験者を用いて直接的に評価する方法（主観評価法）と、音場や音声等の物理量から客観的に算定する方法（物理評価法）の2つに大きく分けられる[7]。

A. 主観評価法

被験者に音声を提示し、その回答から音声伝送性能を評価する方法である。主観評価法は、音声を正しく同定あるいは内容を理解できた割合で評価する明瞭度・了解度試験法と、音声の聴感印象を心理学的測定法により尺度化する方法に分類される。

明瞭度試験法

明瞭度試験法は、無意味な試験用音声を被験者に提示し、被験者がその何%を正しく聴き取れたかを算出し、音声伝送性能の評価とする方法である。日本語で用いられる音節を1音節ずつ区切って発声した音源を試験用音声として用いる単音節明瞭度試験[8]と、意味を持たない三連音節を試験用音声とする無意味三連音節明瞭度試験[9]がある。

単音節明瞭度は、古くから音声伝送性能の評価方法として用いられている。飯田[10]が報告しているように、音節により正答率が異なるため、日本語に用いられる100音節をランダムに並び替えた音表を試験に用いる。1952年から1954年にかけて、教室[11]、講堂[12]、ホール[13,14]、歌舞伎座[15]など様々な建築空間において単音節明瞭度試験が行われたが、1音節の継続時間は200msから500msと短い。ため、残響音の影響の評価には不向きとされる[7]。中島[16]は、この欠点を改善するために、単音節の前にマスクを付加した音源を提案した。是永ら[17,18]は、マスクを多数付加した音源を用いて遅れ時間の長い反射音が音節の異聴に及ぼす影響を検討している。騒音の影響の評価については、植松[19]、曾根[20]らが変動騒音下における検討を行っており、変動騒音の音圧レベルの変動を正規分布でモデル化し、単音節明瞭度を予測する式を提案している。坂田ら[21-23]は、騒音下における単音節の異聴確率から算出する損失情報量を評価指標として提案した。

無意味三連音節明瞭度は、先行する音節の残響音が、後続する音節をマスクするため、単音節明瞭度では評価できなかった残響音の影響を評価できる。小川ら[24]は多目的ホールにおいて無意味三連音

節明瞭度試験を行い、単音節明瞭度よりも音声伝送性能の違いを反映できることを示した。持丸ら[25]は、体育館やドームのような大空間でも同様であることを確認した。戸井田[7]は三連音節のうち、第1音節の正答率は反射音の影響をほとんど受けないが、第2、第3音節の正答率は反射音の影響を受けて低下することを示している。その一方で、橋本ら[26]は、三連音節を試験用音声とした場合でも、残響時間が長い音場間の音声伝送性能の違いは評価できない場合があることを指摘した。橋本ら[27]はその欠点の解決方法として、発声レート（速度）を変化させた無意味三連節を試験用音声として用いる方法を提案した。

明瞭度試験に用いられる試験用音声は、意味を持たないことから、音声の内容が評価に影響を及ぼすことはない。しかし、実際に伝送される音声は意味を持つ単語や文章であり、明瞭度試験によって得られる正答率が、実際に音声の内容が伝わった程度と一致しているとは考えにくい。つまり、明瞭度による評価は、2つの音場の音声伝送性能が異なるかどうかといった相対的な評価はできるが、それぞれの音場の音声伝送性能がどの程度かという絶対的な評価はできない。中島[16]や橋本ら[27]の明瞭度試験用音声の改良は、音声伝送性能の相対的な評価を行いやすくするが、実際に即した絶対的な評価を可能とするものではない。

了解度試験法

了解度は、伝送された単語または文章が正しく聴取される割合である。明瞭度との最大の相違点は、意味を持つ試験用音声を用いる点であり、実際に即した絶対的な音声伝送性能の評価が期待できる。試験用音声に単語を用いた場合を単語了解度、文章を用いた場合を文章了解度と呼ぶが、試験用音声に文章を用いた場合でも、文章中の単語を回答させる場合は、単語了解度と分類する考え方もある[7]。了解度試験の試験用音声としては、日本音響学会による「明瞭度試験法の基準」[28]に記載された音表、田中ら[29]による補聴器適合用CDに収録された「不自然な文」、戸井田[30]による質問・命令文からなる文章了解度試験音表、佐藤ら[31]による普通文及び不自然な文中の単語を回答させる単語了解度試験用音表がある。

意味を持つ音声を聴取する場合、欠損した音響情報の類推が可能になるため、一般に、単音節明瞭度や無意味三連音節明瞭度よりも正答率が高い。類推による音響情報の補完は、実際の音声コミュニケーションにおいても行われていることであり、実際に即した評価を行うためには、この過程が評価に含まれることが望ましい。しかし、この類推のしやすさは、単語の意味や文章の文脈に依存するため、音声伝送性能そのものの評価を行うためには、それらを統制する必要がある。

文章については、この統制を「不自然な文」を用いることによって行おうとしているが、これは類推を不可能にしようとするアプローチであり、実際に即した評価ができるという了解度の長所とは相反する。通常文を用いた音表についても、類推のしやすさが統制された音源はみあたらない。

単語については、坂本ら[32]が、単語の「なじみ」の程度を示す単語親密度[33]をもとに、類推のしやすさを統制した単語了解度試験用音表を提案した。単語親密度は、数字が大きいほど「なじみ」があることを示し、1から7の範囲の値をとる。この音表は、単語親密度と音韻バランスが統制された50単語からなり、単語親密度によって4段階に分類されている。坂本らは、この音表を用いて単語了解度試験を行い、単語親密度が高いほど単語了解度が高くなることを示した。また、単音節明瞭度試験の結果と比較し、単語親密度が4.0から5.5の音表と5.5から7.0の音表に対する単語了解度が、単音節明瞭度よりも高く、類推による単語の正答率の向上がみられるとしている。坂本らによる単語了解度試験用音表は、欠損した音響情報の類推を不可能にすることなく、それが単語了解度に及ぼす影響を統制することに成功しており、現段階では、最も実際に即した音声伝送性能の評価が可能な試験用音声

だと考えられる。本研究では、第2章において、単語親密度が4.0から5.5の音表と5.5から7.0の音表を用い、単語親密度と加齢による聴力損失が、建築空間における単語理解度に及ぼす影響を検討している。

了解度は、明瞭度よりも実際に即した音声伝送性能の評価が可能であるが、比較的音声伝送性能が悪い場合でも、正答率が100%に達してしまうことが多い。正答率が100%であることは、その音場において「音声が正しく伝わる」という絶対的な評価として意味を持つが、音声伝送性能の差を相対的に評価することができないという欠点がある。

心理学的測定法による音声伝送性能の評価

音声伝送性能の評価に、心理学的測定法を用いた研究例がいくつかある。吉田ら[34]は、マグニチュード評定法を用い、広帯域騒音下においてラジオ放送（紀行文とニュース）及び単音節を聴取した際の、内容の理解を含めた「聞き取りやすさ」を被験者に評価させた。その結果、単音節とラジオ放送の「聞き取りやすさ」の差は、SN比に換算して3.3dB程度であり、ラジオ放送の方がより聞き取りにくいことを示した。中島ら[35]は、残響音付加音場と騒音付加音場における日本語音声の「聞き取りやすさ」を7段階の「非常に聞き取りにくい」から「非常に聞き取りやすい」の両極のカテゴリで評価させ、音場の物理指標であるspeech transmission index (STI)[36]と比較し、STIが0.5以下になると聞き取りにくいというカテゴリに分類されることを示した。佐藤ら[37]は、Scheffeの一对比較法[38]を用いて、残響音付加音場と残響音・騒音同時付加音場における「聞き取りやすさ」の心理的距離尺度を求めた。その結果、「聞き取りやすさ」とSTIの対応が良いことを示し、STIを用いて「聞き取りやすさ」を評価できる可能性を示した。

以上の研究の結果は、心理学的測定法を用いて音声伝送性能を尺度化することにより、音声伝送性能の相対的な評価が可能であることを示した。音声の聴感印象を直接評価する方法は、明瞭度または了解度による評価と比較して、我々が日常生活において音声伝送性能を無意識に評価する際の態度に近く、実際に即していると考えられる。しかし、マグニチュード評定法や一对比較法による距離尺度では、相対評価のみが可能であり、どの程度聞き取りやすければ十分かという絶対評価はできない。カテゴリ評価の場合、そのカテゴリが持つ意味によって絶対評価が可能であるが、両極の選択肢で評価を行った場合、「やや聞き取りやすい」、「かなり聞き取りやすい」、「非常に聞き取りやすい」といった肯定的なカテゴリのうち、どれを設計目標とするかという判断が難しい。

「聞き取りにくさ」による音声伝送性能の評価

以上の問題点を解決する音声伝送性能の評価方法として、Morimotoら[6]は「聞き取りにくさ」を提案した。「聞き取りにくさ」は、坂本ら[32]による単語親密度で統制された単語理解度試験用音表のうち、最も単語親密度の高い音表を聴取した際に感じた聞き取りにくさを、Table 1.2に示す4段階のカテゴリで評価させる。中島ら[35]の「聞き取りやすさ」とは異なり、「聞き取りにくくない」から「非常に聞き取りにくい」の単極の選択肢を用いる。回答の集計は、通常のカテゴリ評価と異なり、「聞き取りにくい」と回答した割合を算出する。具体的には、2から4のカテゴリのいずれか、すなわち程度に違いはあるが、「聞き取りにくい」という回答がなされた数の合計が、全回答数に占める割合を算出する。従って、最高の音声伝送性能は「聞き取りにくさ」が0%である状態と明確に定義され、設計目標の基準とすることができる。また、日常生活において音声伝送性能について意識することがあるとすれば、それは音声を聞き取りやすいと感じた場合よりも、むしろ聞き取りにくいと感じた場合で

Table 1.2 Categories of listening difficulty[6].

1	聴き取りにくくはない	(Not difficult)
2	やや 聴き取りにくい	(A little difficult)
3	かなり 聴き取りにくい	(Fairly difficult)
4	非常に 聴き取りにくい	(Extremely difficult)

あることが多い。従って、「聴き取りやすさ」よりも「聴き取りにくさ」のほうが、より実際の音声伝送性能に対する評価態度と一致しており、直感的にわかりやすい指標であると考えられる。

「聴き取りにくさ」では、提示された試験用音声を聴こえた通りに書き取った直後に、聴き取りにくさの評価を行うため、同時に単語理解度も求めることができる。Morimotoら[6]は、単語理解度と「聴き取りにくさ」を比較し、音声伝送性能が比較的良好な音場では「聴き取りにくさ」のほうが、音声伝送性能の違いに対して感度が高いことを示した。つまり、単語理解度では、値が最大に達してしまうため、相対的な差を評価できないような音声伝送性能の差でも、「聴き取りにくさ」を用いれば評価が可能である。Satoら[39]は、単語理解度と聴き取りにくさのそれぞれが評価できる音場の範囲について検討し、SN 比が0 dB以下の音場では単語理解度、多くの建築空間が含まれるSN 比が0 dBから15 dBの音場では聴き取りにくさによる評価が適していることを明らかにした。以上より、「聴き取りにくさ」は、建築空間の音声伝送性能の主観評価法として、相対的及び絶対的な評価の両方の観点から、既存の評価法よりも優れている。なお、本研究では、第3章から第5章において「聴き取りにくさ」を用いて音声伝送性能の評価を行った。

国外における音声伝送性能の主観評価法に関する研究

国外においては、Houtgast[40]が音韻バランスを考慮したオランダ語C-V-C単語リストを用いた了解度試験を行い、子音の誤答率をあらわす AL_{cons} [41]を算出する方法を用いている。また、Bradley[42-45]は室内の明瞭度試験にFairbankの押韻試験[46]を用いて、室内の音声明瞭度はSN比と室内音響特性に大きく影響されることを示した。Fairbankの押韻試験とは、英単語を試験用音源に用いて各単語の最初の文字を回答させるものである。また、聴取者の音声聴取能力を評価する方法として、試験音として有意味な文章を聴取させ、騒音付加音場における音声聴取能力を評価するSPIN-test[47-48]や、同じく試験音に有意味な文章を用いて、speech recognition threshold (SRT)[49-51]を求める試験法がある。聴感印象により音声伝送性能を評価する方法の研究例は少ないが、補聴器適合に関する分野では、聴き取りの際に聴力損失者にかかる負担であるlistening effortを定量化するという試みが行われている[52]。このように、音声伝送性能を評価するための研究は数多くなされているが、PicardとBradley[53]が指摘するように、国外においても、研究者によって試験法や実験条件等は様々であり、評価方法や測定方法は統一されていない。

B. 物理評価法

音声伝送性能に影響を与える音声、残響音、騒音の物理特性から算出した物理指標を用いて、客観的に音声伝送性能を評価する方法である。

騒音の評価

騒音が音声伝送性能に与える影響の物理評価法は、1947年にFrenchとSteinberg[54]が提案した明瞭度指数 (articulation index: AI) の考え方が、多少の変更はあるものの、現在でも用いられている。AIの基本的な考え方は、音声を複数の周波数帯域に分解した場合、各周波数帯域に含まれる音声の成分は、全周波数帯域を聴取した際の音声の明瞭度に対し、他の周波数帯域の成分とは独立に一定の寄与率で影響するというものである。具体的には、各周波数帯域のSN比を測定し、そのSN比を0から1の値にスケールしたうえで、その周波数帯域の明瞭度への寄与率を乗じた値について、各帯域の総和をとる。AIはKryter[55]による修正を経て、1969年にアメリカ規格協会 (America National Standards Institute: ANSI) によって規格化された[56]。現在、AIの規格は、残響音の影響の評価も取り入れたspeech intelligibility index (SII) に改訂[57]されているが、騒音の影響を評価するための基本的な考え方は変わっていない。

残響音の評価

残響音が音声伝送性能に与える影響の物理評価法は、大きく2つに分けられる。1つは、残響音を構成する反射音を、その遅れ時間をパラメータとして、音声伝送性能にとって有効な反射音と有害な反射音に分類し、そのエネルギー比を算出する方法である。音場の明瞭性を評価する物理指標として、Thiele[58]によるD値 (deutlichkeit) , Reichart[59]によるC値 (clarity) , Cremer[60]による時間重心 (center time) があるが、これらは音声伝送性能の評価にも用いられており、1つめの物理評価法に基づいた物理指標である。もう1つは、1973年にSteenekenとHoutgast[36]が提案したSTIである。STIは、光学の分野で用いられていた変調伝達関数 (modulation transfer function: MTF) を音声伝送性能の評価に応用したものである。MTFは0から1の範囲の値をとり、MTFが小さい伝送系ほど、系から出力される信号の強弱の差が、入力信号と比較して小さくなる。音声を信号とした場合、MTFが小さい伝送系を通ると、音声エネルギーの時間的な変動によって特徴付けられる手がかりが失われることになり、音声伝送性能が低下する。なお、STIは国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission: IEC) によって規格化[61]されている。

遅れ時間によって反射音を有効なものと有害なものに分類する方法は、Haas[62]による音声を対象とした聴覚の時間積分及び音像分離に関する研究や、Boltら[63]が指摘した後続の反射音による直接音のマスキングを反映しており、人間の聴覚特性に基づいた評価法である。それに対し、STIは、伝送された音声の波形の保存度を、MTFに着目して評価する方法であり、基本的な考え方が異なる。

残響音と騒音の単一指標による評価

音声伝送性能に対する残響音と騒音の両者の影響を同時に評価できる物理指標として、Peutz[41]による $\%AL_{cons}$ 、LochnerとBurger[64]の方法をBradley[42-44]が単純化したU値、そしてSteenekenとHoutgast [36] が提案したSTIの3つがある。SII[57]も残響音と騒音の両者の影響を同時に評価できるが、ほとんどSTIと同様の方法を採用している。 $\%AL_{cons}$ は、音声の直接音の音圧レベル、音声の残響音の音圧レベル、騒音レベル、残響時間の4つをパラメータとし、それらの2kHzのオクターブバンドに

おける値と、子音の明瞭度試験の結果を比較することによって得られた実験式である。U値は、C値と同様の方法で残響音の影響を評価するが、SN比を用いて騒音のエネルギーを有害な反射音エネルギーに換算することにより、残響音と騒音の影響を同時に評価する。STIでは、残響音に対するMTFと、騒音に対するMTFをそれぞれ求め、それらを乗ずることにより両者の影響を統合したMTFを求める。これらの物理指標は、それぞれ考え方が異なるが、Bradley[65]はこの3種類の物理指標を様々な音場で比較し、非常に高い決定係数（0.94から0.99）で互いに置き換えることが可能であることを示した。

音声レベルの評価

音声伝送性能に影響を及ぼす要因として、残響音と騒音の他に音声レベルがある。上述した物理指標では、SN比として相対的に音声レベルのパラメータを扱うが、例えば、Studbakerら[66]やDubnoら[67-68]が報告しているように、SN比が等しい場合でも、音声レベルが高くなると明瞭度が低下するため、音声レベルの絶対値が音声伝送性能に及ぼす影響も考慮する必要がある。SIIでは、Level distortion factorという係数を用い、音声レベルが高い場合の音声伝送性能の低下を考慮している。また、SIIでは、最小可聴値相当の騒音が常に発生しているとしてSN比を計算するため、音声レベルが低い場合の音声伝送性能の低下も考慮している。STIも規格の更新により、最小可聴値の考慮が取り入れられた。SIIあるいはSTIにおける音声レベルの考慮は、明瞭度・了解度に対する影響を評価するたものである。音声レベルが非常に低いあるいは大きい場合にのみ評価に影響する。しかし、Morimotoら[6]は、通常想定されるような音声レベルの範囲でも、「聴き取りにくさ」が変化することを示した。従って、現状の物理指標では音声レベルが音声伝送性能に及ぼす影響を適切に評価できない場合がある。本研究では、第5章で音声レベルが音声伝送性能に及ぼす影響を検討する。

国内における物理評価法の研究

国外で提案された物理指標のパラメータを最適化する研究が多くみられる。例えば、三浦と山口[69]による日本語に対するAIの寄与率の提案や、小椋と三浦[70]によるSTIのパラメータの日本語に合わせた最適化がある。また、佐藤ら[71]は、高齢者の単音節明瞭度について、AIのシフト因子を最適化することによって、予測可能となることを示した。一方、Onagaら[72]は、STIの問題点として、インパルス応答の時間軸上における音エネルギーの集中がSTIを上昇させるが、その集中の位置が時間軸上のどこであってもSTIに与える影響が同様であることから、反射音エネルギーがインパルス応答の初期部分に集中しないような音場では、STIと了解度の対応が悪くなることを指摘した。国内の研究において、新たな物理指標が提案された例は少ないが、増田ら[73]は、U値の考え方と統計室内音響理論を組み合わせ、設計段階で室の明瞭性を予測する SNR_{stat} を提案した。山口ら[74]と為末ら[75]は、定常騒音下における単音節明瞭度及び単語了解度と対応する荷重平均スペクトル距離（WSPD）を提案しているが、基本的にはAIの算出過程から、各周波数帯域のSN比を0から1の値にスケールリングする過程を省いた物理指標であり、基本的な考え方はAIと同一である。

1.2.2 最適な音声伝送性能を実現する音響条件について

A. 最適な残響時間と騒音レベルについて

最適な音声伝送性能を実現する音響条件について、残響時間、騒音レベル、SN比に関して、健全な聴力を持つ若齢者を対象として多くの提案がなされている。Beranek[76]は音声コミュニケーションを

目的とする空間として教室を取り上げ、教室における暗騒音の推奨値をNC40以下とした。他にも音声伝送性能の観点から教室を取り上げた研究は数多く、Stumpf[77]とSharland[78]は、暗騒音の推奨値をNC35以下としている。さらに、ParkinとHumphreys[79]はNC25以下を、Burns[80]はNR30以下を推奨している。また、BistafaとBradley[45]は、室内の音声明瞭度に影響を及ぼす因子が室内音響特性及びSN比であるという見解を基に、Fairbankの押韻試験を用いた過去の研究[42-44]より、音声伝達が許容範囲にある室の音響条件としてSN比が-5dB以上かつ残響時間が2.0s以下、理想的な音響条件としてSN比が+15dB以上かつ残響時間が0.5s以下としている。本研究では、第4章において「聴き取りにくさ」と単語了解度を用いて、最適な音響条件を明らかにする。

B. 最適な音声レベルについて

最適な音声レベルに関する研究は、明瞭度・了解度試験よりも、心理学的測定法を用いた検討が多く報告されている。音声に対する最適受聴レベル（the most comfortable loudness / listening level: MCL）は古くから研究が行われている。ヘッドホン受聴で妨害音の無い条件における正常聴力者に対する音声のMCLについては、Kopraら[81]、Ventryら[82]、Bergerら[83]、Hochbergら[84]が、ラジオで放送されたスピーチに対するMCLを調整法[85]を用いて求めている。それぞれ若干の違いがあるが、それらの研究によって報告されたMCLは50から70dBSPLの範囲に収まる。さらに、Ventryら[82]とHochberg[84]らは、MCLの実験において、提示される音声の了解度に着目してMCLを判断するように教示すると、教示しなかった場合と比較してMCLが上昇することを示した。また、Bergerら[83]は、MCLの個人差が他の閾値に関する実験でみられる個人差よりも大きいことから、MCLはある1つのレベルではなく、ある幅を持つ区間で定義すべきだと提案した。これらの知見は、建築空間における最適な音声レベルを考える上で重要である。

建築空間における最適な音声レベルの検討には、残響音と騒音の影響を考慮することが不可欠である。Richards[86]は、55から85dBSPLのマスキングノイズを付加した条件でMCLを測定した。その結果、MCLは騒音レベルの上昇に従って上昇し、その傾きは0.70dB/dBであることを示した。Heusdenら[87]は、MCL（論文中ではpreferred listening level）を残響時間が0.5秒の室において、騒音レベルをパラメータとして求めた。その結果、騒音レベルが35dBA以下の場合、MCLは50dBAで一定であるが、騒音レベルが35dBAを超えるとRichardsの結果と同様に、MCLは騒音レベルの上昇に従って上昇することを示した。ただし、Heusdenらの結果では、MCLの上昇の傾きは0.31dB/dBであり、Richardsによる残響音が無い場合の結果よりも傾きは小さくなった。なお、残響音をパラメータとしてMCLをあつかった研究例はほとんどみられない。

一方、Kobayashiら[88]は、残響時間が0.5秒の音場における「聴き取りにくさ」を騒音レベルと音声レベルの2つをパラメータとして求めた。Kobayashiらは、「聴き取りにくさ」が最小となる音声レベルを最適音声レベル（optimum speech level）と定義し、騒音レベルが40dBA以下の音場における最適音声レベルは50から55dBAであること、及び騒音レベルが40から55dBAの音場における最適音声レベルは最低でもSN比が+15dB以上となるレベルであることを示した。この結果は、定性的にはHeusdenらの結果とよく一致しており、最適音声レベルを「聴き取りにくさ」を用いて求めることが可能であることを示している。本研究では、第5章において「聴き取りにくさ」と単語了解度を用いて、残響音付加音場と騒音付加音場それぞれにおける最適音声レベルを明らかにする。

このように、最適な音声伝送性能を実現する音響条件で、若齢者を対象としたものは数多く提案されているが、若齢者と高齢者の両者を対象としたものは少ない。ただし、高齢者に関しては、加齢によ

る聴力損失が音声伝達に及ぼす影響についての数多くの研究例があり、それらは最適音響条件を考える上で重要であるため、次節で述べる。

1.2.3 高齢者の受聴特性について

A. 老人性難聴（感音性難聴）について

高齢者は、加齢に伴う難聴、すなわち老人性難聴を持つ場合が多い。老人性難聴は、一般に内耳の外有毛細胞の減少による感音性難聴が主な原因とされている。内耳は音を周波数成分に分解する役割を果たし、外有毛細胞は各周波数成分に対する感度を高める働きを持つ[89]。加齢により、高周波数の成分に対応する外有毛細胞から損傷していくため、結果として、老人性難聴では高い音が聴こえにくくなる。Brantら[90]は、聴力レベルの個体内の経年変化を20年間にわたって測定し、加齢により高い周波数の聴力レベルが上昇することを確かめた。また、年齢と性別をパラメータとした聴力レベルの平均値と標準偏差を求める予測式がISOによって規格化されている[4]。感音性難聴のもう1つの特徴として、リクルートメント現象（loudness recruitment）がある。Steinbergら[91]は、左右非対称な聴力、つまり片耳が正常でもう一方が難聴という聴力を持つ被験者に対し、250Hzから8kHzまでの1オクターブ毎の純音に対するラウドネスと音圧レベルの関係を、それぞれの耳について求めた。その結果、伝音性難聴の場合は、音圧レベルに関わらず正常耳と難聴耳のラウドネスの差は一定であるが、感音性難聴の場合は、音圧レベルが高くなるほど正常耳と難聴耳のラウドネスの差が小さくなることを示した。つまり、リクルートメント現象を音圧レベルの上昇に従って説明すると、感音性難聴者は、最小可聴値が高いため小さい音は聴こえにくい、音圧レベルが最小可聴値を上回ると、音圧レベルの上昇に対しラウドネスが正常聴力者よりも急激に上昇し、さらに音圧レベルが上昇すると正常聴力者と同等のラウドネスを感じるようになる。音声の音圧レベルのダイナミックレンジは、45から55dB [69]と広いことを考慮すると、老人性難聴者が音声を聴取する際は、音圧レベルが小さい箇所が聴き取れなくなることと、音声の時間的構造による手がかりが急激なラウドネスの変化によって捉えにくくなることが想定される。また、残響音や騒音によるマスキングを考えると、SN比が負の値をとる場合に、リクルートメント効果によって、感音性難聴者は正常聴力者と比較して、妨害音のラウドネスと信号のラウドネスの差が大きくなるため、マスキング効果がより大きくなると考えられる。

また、加齢によって音の周波数分解能と時間分解能が低下するという実験結果が多数報告されている。周波数分解能については、例えばGlasbergら[92]は、正常耳と感音性難聴耳の聴覚フィルタ（auditory filter）の形状を求め、後者がより広い幅を持つことを示した。周波数分解能の低下は、あるマスキに対してマスキング効果を及ぼすマスカの周波数範囲が広がることを意味しており、残響音や騒音によるマスキング効果が大きくなると考えられる。時間分解能については、Fizgibbonsら[93]がバンドノイズのギャップ検知に関する実験を、正常聴力者と感音性難聴者に対して行い、バンドノイズの音圧レベルと感覚レベル（sensation level）がそれぞれが等しい条件において、検知可能なギャップの最小時間幅を求めた。その結果、音圧レベルが等しい条件と感覚レベルが等しい条件のどちらにおいても、感音性難聴者のほうがギャップ検知により長い時間幅が必要であることを示した。その一方で、Glasbergら[94]は、順向性マスキング（forward masking）の時間減衰曲線を、Fizgibbonsらと同様に、正常聴力者と感音性難聴者に対して、音圧レベルと感覚レベルがそれぞれが等しい条件で求めた。その結果、音圧レベルが等しい条件では、正常聴力者と比較して感音性難聴者の時間減衰は明らかに緩やかであるが、感覚レベルが等しい条件では、両者の時間減衰の傾きに大きな差は無いことを示した。Fizgibbonらの実験結果においても、感覚レベルが等しい条件における正常聴力者と感音性難

聴者の差は、音圧レベルが等しい条件と比較して小さくなっていることから、時間分解能は感覚レベルと対応していると考えられる。しかし、建築空間において不特定多数に向けて音声を伝送する場合は、音圧レベルが等しい条件、つまり感覚レベルに差がある条件で、正常聴力者と高齢者が音声を聴取することが想定されるため、両者の時間分解能には差が生じると考えられる。時間分解能の低下は、順向性マスキングの効果が高くなることを意味しており、音声の時間構造による手がかりが捉えにくくなるだけでなく、特に残響音によるマスキングの影響が大きくなると考えられる。

B. 明瞭度及び了解度に加齢が及ぼす影響について

Duquesnoy[95]は、必ずしも個人の明瞭度や了解度を予測する指標として、聴力レベルが適切であるとは限らないと述べているが、例えば、Kryterら[96]が示しているように、複数の被験者の平均値をとって検討した場合、明瞭度及び了解度と2kHz以上の聴力レベルには相関がみられる。

残響音や騒音を付加した音場における明瞭度や了解度に聴力レベルが及ぼす影響を検討した研究例がいくつかある。Duquesnoyら[97]は、残響時間が0.4秒から2.3秒で騒音レベルが52.5dBAで一定の実験音場におけるSRTを、音声レベルをパラメータとして求め、聴力レベルが上昇するほどSRTも上昇することを示した。Nábělekら[98]は、10歳から72歳の被験者を年齢により6つのグループに分類し、各グループの聴力レベルの平均値が、平均年齢に従って上昇するのを確認したうえで、その被験者を用いて残響音付加音場でModified Rhyme Test[99]を行い、分散分析の結果からグループの主効果、つまり年齢あるいは聴力レベルの主効果が有意であることを示した。Irwinら[100]は、2種類の残響音付加音場におけるSRTをSN比を単位として求め、聴力障害者のSRTが正常聴力者よりも有意に高いことを示した。残響音や騒音が存在する音場における母音や子音の明瞭度についても、聴力レベルと相関があることが、Nábělek[101]とHelferら[102]によってそれぞれ示されている。以上より、明瞭度や了解度は、聴力レベルを用いて予測できると考えられる。本研究では、主に第3章において、聴力レベルによる高齢者の単語了解度と「聴き取りにくさ」の予測について取り扱う。

国内においても、加齢が明瞭度及び了解度に加齢が及ぼす影響についていくつか研究例がある。佐藤ら[71,103-104]が加齢が単音節明瞭度と無意味三連音節明瞭度に及ぼす影響について検討し、若齢者と高齢者の明瞭度の差がおおよそ25%程度であることを示し、その差は5dBの騒音レベルの上昇と同等であることを示した。落合ら[105]は、4kHzにおける聴力レベルと音節明瞭度の関係を環境音の有無により比較し、聴力レベルが上昇するにつれて環境音の影響が大きくなることを示した。翁長ら[106-107]は、不自然な文を用いた文章了解度試験を若齢者と高齢者を被験者として行い、高齢者のほうがより音場や発声レートの影響を受けやすいことを示した。

以上より、加齢により明瞭度や了解度は低下することは明らかである。しかし、音声伝送性能を高齢者に対応させるためには、どの程度残響音や騒音を減らせば良いかという問題に対しては、佐藤ら[104]が示した騒音レベルを5dB低減すべきという回答以外は得られていない。本研究では第4章において、この問題を取り扱う。

C. 最適音声レベルに聴力レベルが及ぼす影響について

最適音声レベルに聴力レベルが及ぼす影響については、補聴器の利得を最適化する観点からの研究が行われている。聴力レベルが音声のMCLまたはMCLの上限値（the upper limit of MCL: ULCL）に及ぼす影響について、いくつか研究例がある[108-111]が、どの結果も聴力レベルやSRTが上昇するにつれて、MCLあるいはULCLも上昇することを示している。ただし、聴力レベルの上昇に対するMCLあ

るいはULCLの上昇率は、実験によって0.18dB/dBHLから0.72dB/dBHLと差が大きく、定量的な結果はまだ得られていない。

1.3 研究の目的及び論文の構成

1.3.1 研究の目的

本研究の目的は、若齢者と高齢者の両者にとって最適な、すなわちユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能を実現するための音響条件を明らかにすることである。

このためには、まず、音声伝送性能の絶対評価が可能な指標が必要である。既往の研究で述べたように、主観評価法で絶対評価を行うためには、単語親密度で統制した試験用音声を用いて、「聴き取りにくさ」による評価を行うことが最も適切であると考えられる。しかし、1) 親密度による単語の統制が、高齢者にとっても有効であるか、2) 「聴き取りにくさ」を用いて、加齢による聴力損失の影響を評価できるかどうかの2点はまだ明らかではない。本研究では、第2章と第3章において、これらの問題を検討する。

次に、主観評価と実際の建築設計で利用できる物理指標の対応を明らかにする必要がある。音声伝送性能には、主に残響音、騒音、音声レベルの3つが大きな影響を及ぼす。従って、これらと「聴き取りにくさ」及び単語理解度の関係を明らかにしなければならない。また、ユニバーサルデザインを考慮するためには、若齢者と高齢者の結果を比較し、両者にとって最適となる条件を検討する必要がある。本研究では、第4章で残響音と騒音、第5章で音声レベルについて取り扱い、それぞれ主観評価との対応を明らかにする。

1.3.2 論文の構成

本論文は、本章を含め6章で構成される。第2章から第5章で行う実験の概要をTable 1.3に示す。各章で他の章における実験結果を引用する際の便宜を図るため、各実験を章ごとにAからDの記号で分類し、さらにその分類に各章における登場順で番号を付記することとする。

Table 1.3 Summaries of experiments performed in the present study.

章	実験	評価方法		被験者		実験のパラメータ			
		単語理解度	聴き取りにくさ	若齢者	高齢者	単語親密度	残響音	騒音	音声レベル
2	A	○	×	○	○	2種類	5種類	4種類	固定
3	B1	○	○	×	○	固定 (最高)	8種類	なし	固定
	B2	○	○	○	○		なし	9種類	2種類
4	C1	○	○	○	×	固定 (最高)	96種類	なし	固定
	C2	○	○	○	×		14種類	7種類	固定
	C3	○	○	×	○		14種類	7種類	固定
5	D1	○	○	○	○	固定 (最高)	なし	なし	10種類
	D2	○	○	○	○		3種類	なし	8種類
	D3	○	○	○	○		なし	7種類	9種類

第2章（実験A）では、単語親密度による試験用音声の統制が、高齢者を被験者に用いた場合でも有効であるかどうかを明らかにすることを目的とし、試験用音声として2種類の単語親密度で統制された音表を用いた実験を行う。また、同時に単語理解度による高齢者の音声受聴徳性の検討を行う。

第3章では、「聴き取りにくさ」を用いて高齢者の受聴徳性を評価できるかどうかを明らかにする。特に聴力レベルの影響に着目する。実験B1として残響音付加音場における検討、実験B2として騒音付加音場における検討を行う。

第4章では、「聴き取りにくさ」及び単語理解度と音場の物理指標の対応を明らかにし、若齢者と高齢者のそれぞれに対する音声伝送性能を音場の物理指標から予測する手法を求める。実験C1では、残響音の影響を評価する物理指標を明らかにすることを目的とし、実音場で測定したインパルス応答を基に96種類の残響音場における「聴き取りにくさ」と物理指標を比較する。特にC値やD値のような有効な反射音エネルギーと有害な反射音エネルギーの比と、STIのどちらが「聴き取りにくさ」と良く対応するかに着目する。実験C2では、残響音だけではなく騒音を付加した音場で、同様の検討を行う。実験C3では、高齢者を被験者として用い、どの程度残響音や騒音を減らせば高齢者にも対応できるのかを明らかにする。

第5章では、単語理解度を最大に保ち、かつ「聴き取りにくさ」がその音場における最小値と有意差を生じさせない音声レベルを許容音声レベルと定義し、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルを明らかにする。実験D1では、まず妨害音がない音場で両者にとって許容できる音声レベルの範囲があるかを確認する。実験D2、D3では、それぞれ残響音付加音場、騒音付加音場における許容音声レベルを明らかにする。

最後に第6章では、本研究で得られた成果を総括する。

第2章 単語了解度による高齢者の受聴特性の評価

現在、音声伝送性能の評価に用いる試験用音声として、1章で述べたように様々なものが提案されている。試験結果の「再現性」という観点からは、同じ試験用音声を用いることが重要であり、どの試験用音声にも優劣はない。しかし、実際に即した絶対的な評価を行うためには、日常生活の音声コミュニケーションで用いられる単語や文章を試験用音声に用いるべきである。坂本ら[32]は「なじみ」の程度を示す単語親密度[33]を用いて単語を統制した試験用音声を提案した。この試験用音声では、親密度により単語を4段階に分類しており、単語の親密度が高いほど正答率が高くなることが明らかにされている[32]。しかし、坂本らが単語リストの統制に用いた単語親密度は、20歳代の若齢者を対象として求められたものであり、高齢者を被験者とした場合、単語親密度による統制が有効かどうかは明らかでない。本章では、残響音及び騒音を付加した音場において、単語親密度による統制が高齢者に対しても有効であるかを確かめるとともに、加齢による聴力損失が単語了解度に及ぼす影響について明らかにする。

2.1 実験A：親密度で統制した単語リストを用いた検討

2.1.1 実験方法

A. 被験者

若齢者被験者として20歳代の学生20名を用いた。高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる55歳から75歳（平均65.0歳）の高齢者20名を用いた。被験者に対し、オーディオメータを用いて聴力検査を行った。125Hzから8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 2.1に若齢者及び高齢者被験者の平均オーディオグラムと、ISO7029[4]を用いて求めた20歳、60歳、70歳、80歳の平均的な聴力レベルの予測値を合わせて示す。

若齢者の平均オーディオグラム（○）は、全体的にISO7029による20歳の聴力レベルの予測値より若干上昇しているが、全周波数において15dBHL以下であり、聴力は正常である。高齢者の平均オーディオグラム（●）は、2kHz以上の高周波数で上昇しており、典型的な老人性難聴の傾向を示す。500Hz以下の周波数において、ISO7029による予測値よりも聴力レベルが上昇する傾向がみられるが、この傾向は、若齢者と共通していることから、聴力測定を行った室の暗騒音に代表される外的要因の影響であると考えられる。2kHz以上の高周波数における高齢者の聴力レベルは、ISO7029による60歳と70歳の聴力レベルの予測値の間にプロットされており、聴力レベルの観点からは、年齢相応の聴力を持つ代表的な高齢者のサンプルとみなすことができる。

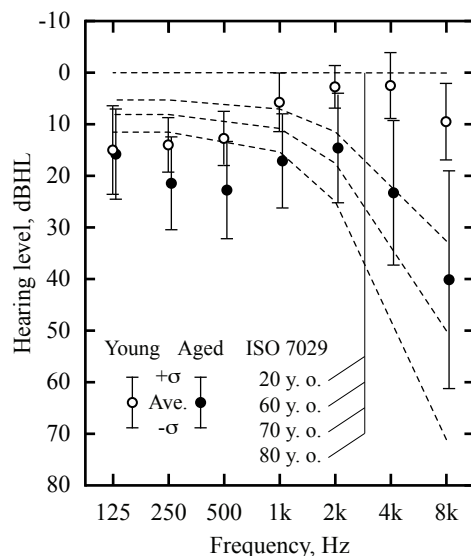


Figure 2.1 Averaged hearing levels of subjects. Open and closed circles respectively represent the results for the young and the aged. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 20, 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

B. 単語

坂本らによる単語親密度で統制された単語了解度試験用単語リスト[32]を用いた。単語親密度は単語の「なじみ」の程度を表し、20歳代の被験者32名の7段階評定値（1：低親密度，7：高親密度）の平均値である。このリストは単語親密度により4段階に分類されている。単語親密度が4.0未満の単語の了解度が単音節明瞭度より低い値をとることが坂本らによって報告されている[32]ことから、親密度7.0～5.5の単語リスト（以下HFL: High Familiarity Lists）及び親密度5.5～4.0の単語リスト（以下LFL: Low Familiarity Lists）の2段階を用いた。Table 2.1に例を示す。坂本らによる単語リストは1リストあたり50単語からなり、全てのリストが同等の音韻バランスを有している。HFLとLFLの両単語リストはそれぞれ20種類が作成されている。単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

C. 実験装置

実験は、残響音と暗騒音を付加した音場で行った。Figure 2.2に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。無響室録音した単語を計算機及び計算機に装着されたD/A変換ボードを用いて再生した。直接音は中央に位置したスピーカから提示した。残響音はリバーブレータ（YAMAHA, SPX-900）を用いて付加し、直接音用スピーカの両隣に位置する残響音用スピーカから提示した。騒音は残響音スピーカと並べて設置した騒音用スピーカから提示した。受聴点は直接音を提示するスピーカの正面3mの位置とその両隣の合計3点である。

D. 実験音場

刺激の提示レベルは一定とした。刺激の提示レベルは、図中のsw.をoffにし、直接音のみを再生して測定した。提示レベルの測定は、中央の被験者の耳元に相当する位置において、被験者がいない状態

Table 2.1 Examples of word lists developed by Sakamoto *et al.*[32], which is controlled by word familiarity. Tables (a) and (b) represent the example of word lists that include most familiar words (familiarity 5.5-7.0, HFL) and rather familiar words (familiarity 4.0-5.5, LFL). Each word list consists of 50 words with phonetical balance.

(a) Familiarity 5.5-7.0 (HFL), List 1

アマグモ	イマフウ	ウチガワ	オシダシ	オヤモト
ガニマタ	キタカゼ	キュウシヨク	グウタラ	ケイサツ
ゲンイン	コウフク	ザイガク	サイジツ	ジツブツ
シハライ	シャブシャブ	スタミナ	セツリツ	ソラミミ
タナバタ	ダンタイ	チョウハツ	チンタイ	ツナガリ
デマカセ	ドクヤク	トビバコ	ナツバシヨ	ニンニク
ネアガリ	ハダイロ	パチンコ	バランス	ヒキダシ
ブランド	フリガナ	ホウタイ	マンルイ	ヤマカジ
ユウワク	ヨクネン	ランパク	リクジョウ	リャクダツ
レンパイ	ワタクシ	カシパン	クスリヤ	ミジンコ

(b) Familiarity 4.0-5.5 (LFL), List 1

アイアイ	イチブン	ウラガネ	オハグロ	ガイユウ
カザアナ	キャクアシ	ギャクサン	キュウガク	キワマリ
ギンマク	クタビレ	グンダン	コツゼン	ザイバツ
サンバシ	ジカバキ	シタヅミ	シャクナゲ	ショウワル
スナヤマ	ソクハツ	タンバツ	ダンマリ	チマミレ
チャクフク	チョクリツ	ツユザム	ドウナガ	トリタテ
ナカワタ	ニシガワ	ヌカルミ	バイシン	ハラダチ
ヒツダン	ピンハネ	フダツキ	ブンダン	ホソウデ
マヤカシ	ミミアテ	ムササビ	モミガラ	ヤマバト
ユキハダ	ラクジツ	リンカン	ワカハゲ	ジャアクサ

で騒音計を用いて行った。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はfastとし、各刺激のピークレベルの平均が65dBAになるように調整した。

実験音場のパラメータは残響時間と暗騒音レベルの2つである。実験音場は、残響音付加音場、騒音付加音場、残響音・騒音同時付加音場の3種類とした。以下にそれぞれの詳細を示す。

残響音付加音場

残響減衰曲線の傾きのみを変化させ、残響時間を1, 2, 3, 4, 6sの5種類に設定した。以下ではそれぞれをRT1, RT2, RT3, RT4, RT6と記述する。中央の被験者の耳元に相当する位置で、被験者がいない状態で測定した各残響時間におけるインパルス応答をFigure 2.3に示す。反射音の単位時間当たりの到来回数は一定とした。直接音到来から第1初期反射音が到来するまでの時間間隔は50msで一定とした。この遅れ時間は、残響音はすべて妨害音成分として扱うことを前提とし、Haas効果[62]を考慮して決定した。直接音と残響音の音圧比については、直接音の音圧と残響音のピーク音圧を1kHzで等しく揃えた。空間的な要素については建築空間を想定し、右のスピーカ (Rev.1) から提示される残響音には9msの遅延を施し、左のスピーカ (Rev.2) から提示される残響音には3dBの振幅減衰を施して、定位感をできる限り小さくした。

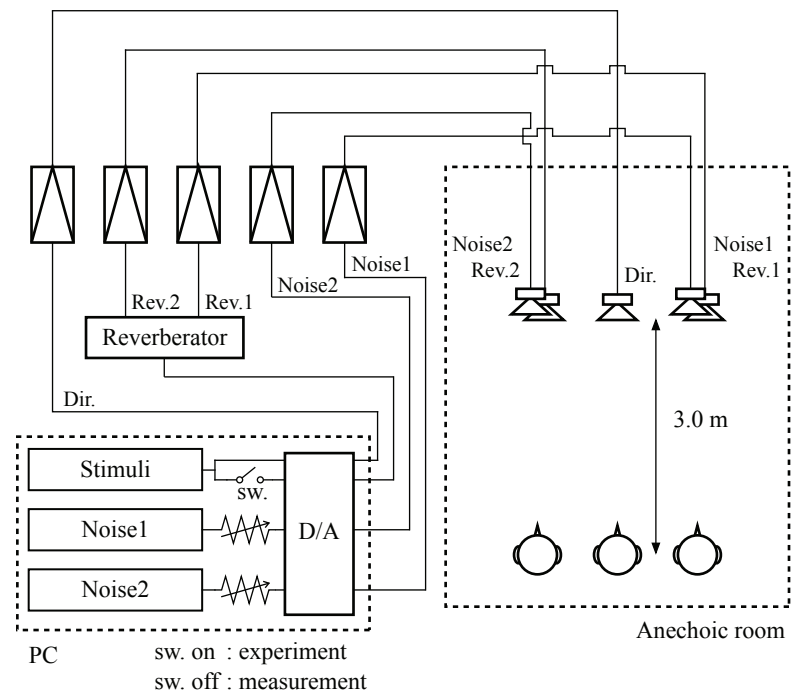


Figure 2.2 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement.

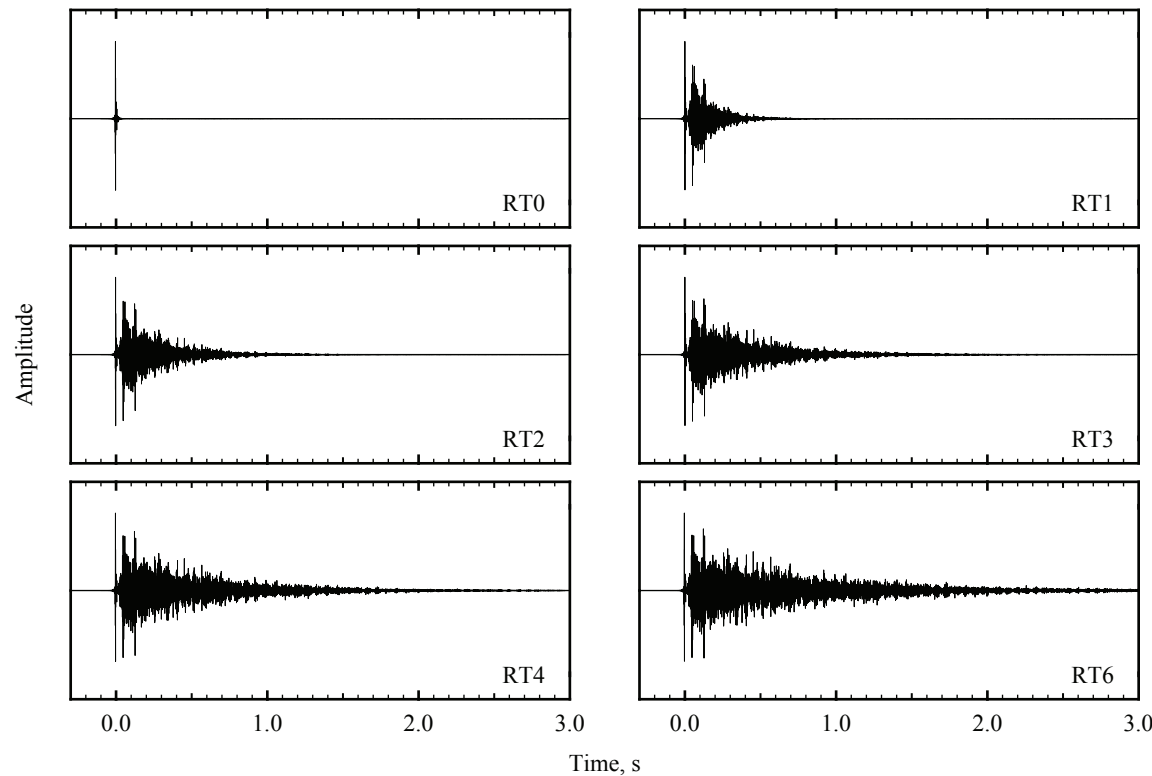


Figure 2.3 Impulse responses of test sound fields.

騒音付加音場

2方向から無相関な騒音を提示し、定位感をできる限り小さくした。騒音は定常騒音とし、その周波数特性はHothスペクトル型[112]とした。Figure 2.4に中央の受聴点における騒音の1/1オクターブバンド分析による周波数特性を示す。また、音声刺激を切れ目なく再生して測定した長時間平均スペクトルも合わせて示す。騒音の提示レベルは、中央の被験者の耳元に相当する位置で、被験者がいない状態で測定し、等価騒音レベルが55, 60, 65, 70dBAの4種類となるよう設定した。以下ではそれぞれN55, N60, N65, N70と記述する。N55の音場は高齢者のみ、N60及びN65の音場は若齢者と高齢者の両者、N70の音場は若齢者のみを被験者としてそれぞれ実験を行った。

残響音・騒音同時付加音場

残響音付加についてはRT2, RT4の2種類、騒音付加についてはN55, N60, N65の3種類を用い、これらの組み合わせで6種類について実験を行った。以下では、例えばRT2とN60の組み合わせをRT2N60と記述する。N55の音場は高齢者のみ、N60の音場は若齢者と高齢者の両者、N65の音場は若齢者のみを被験者として実験を行った。

また、残響音と騒音のどちらも付加しない音場でも実験を行った。この音場を以下では便宜上RT0と記述する。以上の実験音場についてまとめたものをTable 2.2に示す。

E. 実験手順

3名の被験者に同時に刺激を提示し、聴こえた通りにカタカナで書き取らせた。Figure 2.5に回答用紙を示す。被験者には、文面で日本語音節を提示すると教示したが、無意味な連音節に聴こえた場合でも、そのまま聴こえた通りに書き取るよう口頭で教示した。単語長については、4モーラ長であることは教示せず、回答欄の区切りもあくまで目安であると教示した。実験は音場毎に行い、被験者は1音場につき1つの単語リスト、すなわち50単語を連続して聴取した。単語の提示順序はランダムとした。Table 2.2に各音場で採取した音表数を示す。若齢者については各音場について8～13音表、高齢者については22～24音表を採取した。各音場の実験に参加した被験者数は異なり、Table 2.2に示した音表数の右隣の括弧内の数字が被験者数を示す。被験者によっては同一音表を複数回提示しており、その際は異なる提示順序で提示した。

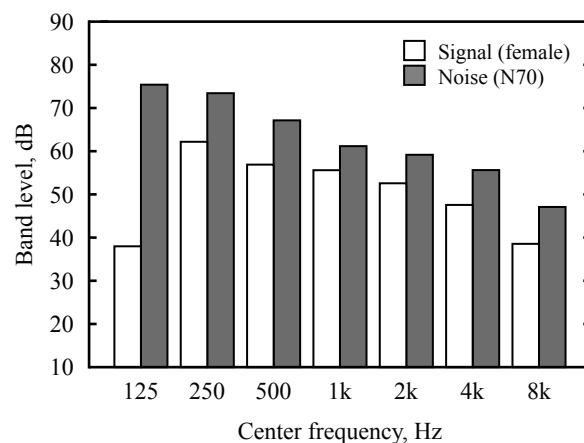


Figure 2.4 1/1 octave band levels of speech signal and additional noise (BGN) for the sound field of N70.

Table 2.2 Experimental conditions.

Sound field	Reverberation time, s	Noise level, dBA	Number of sample (subject)			
			the young		the aged	
			HFL	LFL	HFL	LFL
RT0	-	-	12 (11)	12 (11)	23 (18)	24 (17)
RT1	1	-	13 (12)	13(12)	24 (15)	23 (17)
RT2	2	-	13 (12)	13(12)	22 (13)	23 (17)
RT3	3	-	13 (12)	13(12)	24 (15)	24 (16)
RT4	4	-	12 (11)	13(12)	24 (17)	24 (16)
RT6	6	-	12 (10)	13(11)	24 (16)	24 (15)
N55	0	55	-	-	24 (17)	24 (16)
N60	0	60	9 (8)	9 (8)	24 (15)	24 (16)
N65	0	65	9 (8)	9 (8)	23 (15)	23 (17)
N70	0	70	9 (8)	9 (8)	-	-
RT2N55	2	55	-	-	23 (16)	24 (15)
RT2N60	2	60	9 (7)	8 (6)	24 (15)	23 (17)
RT2N65	2	65	9 (9)	9 (9)	-	-
RT4N55	4	55	-	-	24 (16)	24 (17)
RT4N60	4	60	9 (9)	9 (9)	24 (14)	24 (15)
RT4N65	4	65	9 (9)	9 (9)	-	-

HFL: High familiarity list, LFL: Low familiarity list

単語了解度試験回答用紙
まず、日付と名前、年齢を記入してください。

月 日 名前： 年齢： 音表番号： 条件コード：

これから音声で提示する日本語音節を次の回答欄に聞こえた通りに記入してください。
(点線は目安です)

1 行目					
2 行目					
3 行目					
4 行目					
5 行目					
6 行目					
7 行目					
8 行目					
9 行目					
10 行目					

おつかれさまでした。

Figure 2.5 The response sheet used in experiment A.

2.1.2 結果と考察

A. 残響音付加音場

Figure 2.6に残響音付加音場における結果を示す。すべての音場において、若齢者の単語理解度（○）は高齢者の単語理解度（●）よりも高く、その差は残響時間が長くなるほど大きくなる。HFLに対する単語理解度（図(a)）とLFLに対する単語理解度（図(b)）を比較すると、音場と被験者の年代にかかわらず、LFLのほうが単語理解度が低い。

単語理解度に対する親密度（2水準）、被験者の年代（2水準）、残響時間（6水準）の効果を見る目的で、それぞれを要因とする3要因分散分析[113]を行った結果をTable 2.3に示す。その結果、すべての要因の主効果が有意（ $p < 0.01$ ）であった。交互作用に関しては、被験者の年代と残響時間の組み合わせに対する交互作用のみが有意（ $p < 0.01$ ）であった。そこで、この2つの各水準における単純主効果の検定を行った結果をTable 2.4に示す。すべての条件で単純主効果が有意（RT0のみ $p < 0.05$ 、他の音場では $p < 0.01$ ）であったが、F値を比較すると、残響時間が長くなるほどF値が大きくなり、若齢者の場合よりも高齢者のほうがF値が大きくなる。つまり、残響時間が長いほど被験者の年代の影響が大きくなり、また高齢者のほうが残響時間の影響を大きく受けるということが、統計的にも示された。親密度の影響も

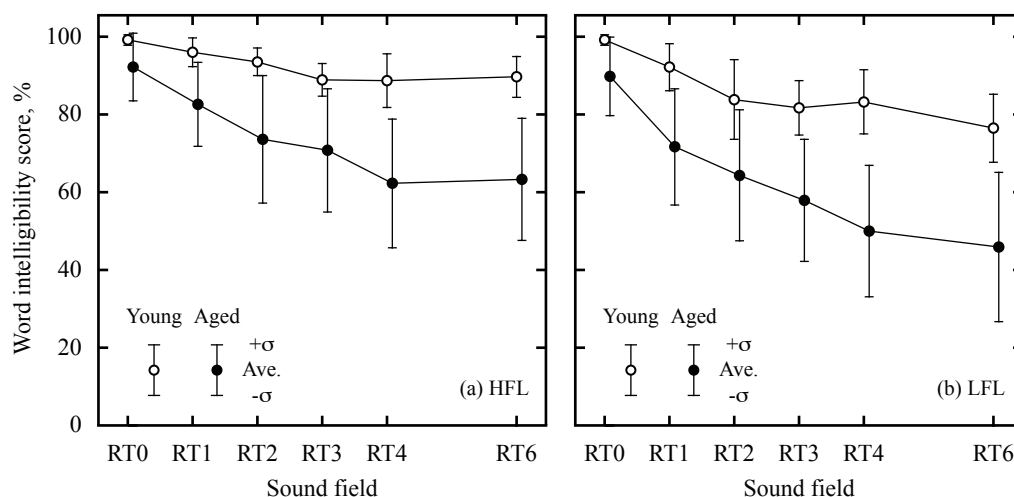


Figure 2.6 Word intelligibility scores in reverberant sound fields. Panels (a) and (b) represent the scores for HFL and LFL, respectively. Open and closed circles represent the scores for the young and the aged, respectively. Bars represent a standard deviation between subjects.

Table 2.3 The summary of three-way analysis of variance for word intelligibility scores in reverberant sound fields.

Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
A: Word familiarity	1	7485.96	7485.96	44.02	< 0.01
B: Age	1	42226.10	42226.10	248.29	< 0.01
C: Reverberation time	5	32020.13	6404.03	37.66	< 0.01
Interaction (A×B)	1	451.27	451.27	2.65	0.10
Interaction (B×C)	5	5191.60	1038.32	6.11	< 0.01
Interaction (C×A)	5	1720.88	344.18	2.02	0.07
Interaction (A×B×C)	5	171.79	34.36	0.20	0.96
Residual	411	69898.51	170.07		

Table 2.4 Simple main effects of Age for each reverberation time, and those of Reverberation time for each group of subject in reverberant sound fields.

Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Age (RT0)	1	1096.92	1096.92	6.45	0.01
Age (RT1)	1	4734.57	4734.57	27.84	<0.01
Age (RT2)	1	6388.71	6388.71	37.57	<0.01
Age (RT3)	1	7241.84	7241.84	42.58	<0.01
Age (RT4)	1	14641.82	14641.82	86.09	<0.01
Age (RT6)	1	13313.84	13313.84	78.28	<0.01
Reverberation time (Young)	5	6142.17	1228.43	7.22	<0.01
Reverberation time (Aged)	5	31069.56	6213.91	36.54	<0.01

残響時間が長くなるほど大きくなるようにみえるが、単語理解度の差が最大で17.4%程度であるため、交互作用が有意とならなかったと考えられる。

B. 騒音付加音場

Figure 2.7に騒音付加音場における結果を示す。若齢者と高齢者の両者が被験者となっているN60とN65の音場の単語理解度を比較すると、高齢者の単語理解度は大きく低下しており、騒音レベルが高く、親密度が低いほどその差は大きくなる。若齢者と高齢者のどちらにおいても、単語理解度は騒音レベルが上昇するに従って直線的に低下し、その傾きは、若齢者より高齢者のほうが、またHFLよりLFLのほうが急である。

若齢者と高齢者の両者が被験者として参加しているN60とN65の音場の単語理解度に対する親密度（2水準）、被験者の年代（2水準）、騒音レベル（2水準）の効果を見る目的で、それぞれを要因とする3要因分散分析を行った結果をTable 2.5に示す。その結果、すべての要因の主効果が有意（ $p<0.01$ ）であった。交互作用に関しては、親密度と被験者の年代（ $p<0.01$ ）、被験者の年代と騒音レベルの組み合わせ（ $p<0.05$ ）がそれぞれ有意であった。Table 2.6に交互作用が有意であった組み合わせについて、単純主効果の検定を行った結果を示す。若齢者の単語理解度に対する親密度の単純主効果を除き、単純主効果はすべて有意（ $p<0.01$ ）であった。従って、N60とN65の音場における親密度が単語理解度に及ぼす影響は、若齢者よりも高齢者のほうが大きい。被験者の年代の単純主効果に着目すると、HFLよりもLFL、N60よりN65の場合がF値が大きく、親密度が低いほど、あるいは騒音レベルが高いほど、若齢者と高齢者の差が大きいことを示している。

C. 残響音・騒音同時付加音場

Figure 2.8に残響音・騒音同時付加音場における結果を示す。若齢者と高齢者の両者が被験者として参加しているRT2N60とRT4N60の音場で比較すると、音場と親密度にかかわらず、若齢者の単語理解度（○）は高齢者の単語理解度（●）よりも高い。HFLに対する単語理解度（図(a)）とLFLに対する単語理解度（図(b)）を比較すると、音場と被験者の年代にかかわらず、LFLの単語理解度が低い。

RT2N60とRT4N60の音場における親密度と被験者の年代が単語理解度に及ぼす影響を検討するために、親密度（2水準）、被験者の年代（2水準）、音場（2水準）を要因とする3要因分散分析を行った。結果をTable 2.7に示す。親密度、被験者の年代、音場のすべての主効果は有意（ $p<0.01$ ）であっ

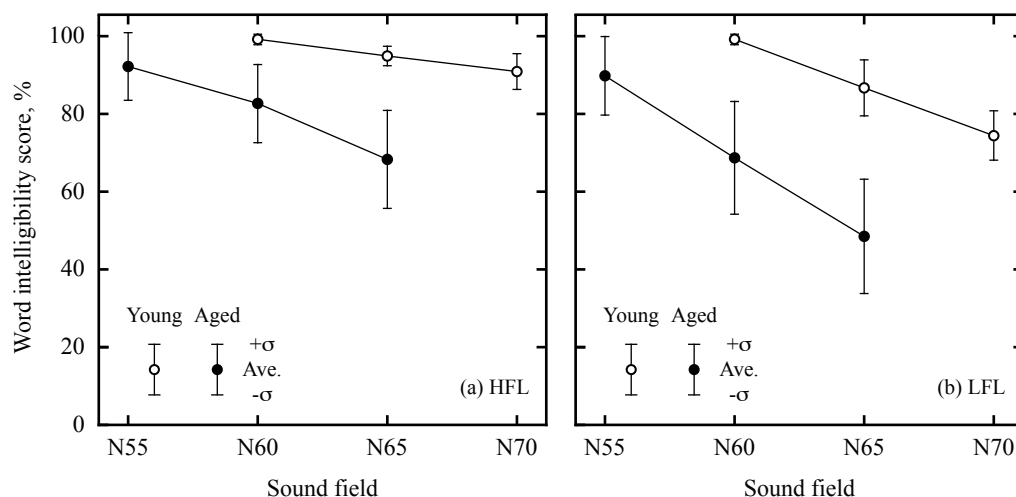


Figure 2.7 Word intelligibility scores in noisy sound fields. Panels (a) and (b) represent the scores for HFL and LFL, respectively. Open and closed circles represent the scores for the young and the aged, respectively. Bars represent a standard deviation between subjects.

Table 2.5 The summary of three-way analysis of variance for word intelligibility scores in noisy sound fields.

Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
A: Word familiarity	1	3148.82	3148.82	25.29	< 0.01
B: Age	1	22342.04	22342.04	179.46	< 0.01
C: Noise level	1	4711.58	4711.58	37.85	< 0.01
Interaction (A×B)	1	1164.41	1164.41	9.35	< 0.01
Interaction (B×C)	1	564.90	564.90	4.54	0.04
Interaction (C×A)	1	348.58	348.58	2.80	0.10
Interaction (A×B×C)	1	11.03	11.03	0.09	0.77
Residual	411	69898.51	170.07		

Table 2.6 Simple main effects in noisy sound fields.

Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Age (HFL)	1	6652.71	6652.71	53.44	< 0.01
Age (LFL)	1	16853.74	16853.74	135.38	< 0.01
Word familiarity (Young)	1	241.80	241.80	1.94	0.17
Word familiarity (Aged)	1	4071.43	4071.43	32.70	< 0.01
Noise level (Young)	1	1006.81	1006.81	8.09	< 0.01
Noise level (Aged)	1	4269.66	4269.66	34.30	< 0.01
Age (N60)	1	7900.87	7900.87	63.46	< 0.01
Age (N65)	1	15006.06	15006.06	120.54	< 0.01

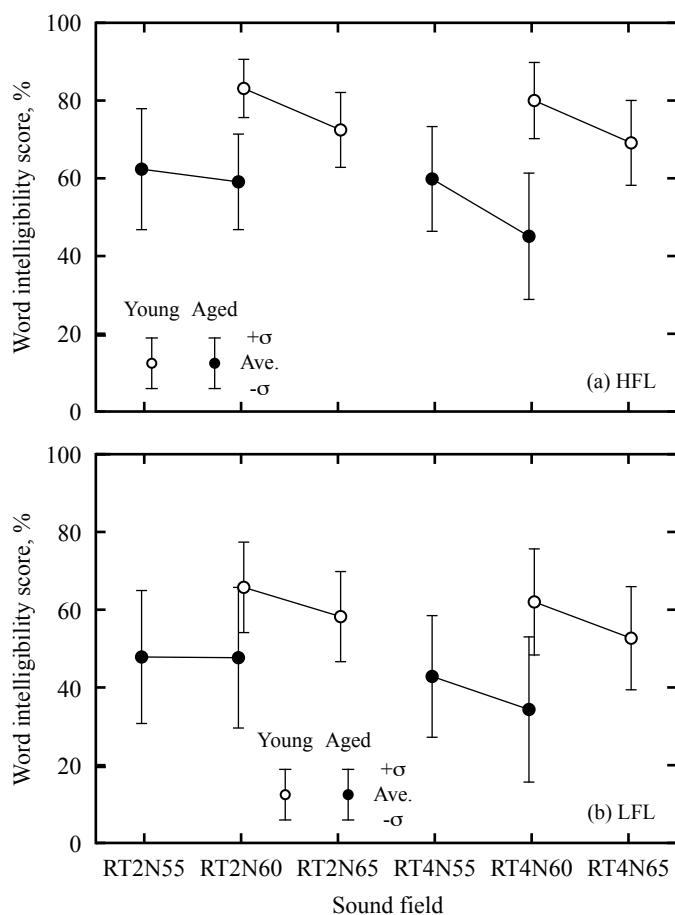


Figure 2.8 Word intelligibility scores in reverberant and noisy sound fields. Panels (a) and (b) represent the scores for HFL and LFL, respectively. Open and closed circles represent the scores for the young and the aged, respectively. Bars represent a standard deviation between subjects.

Table 2.7 The summary of three-way analysis of variance for word intelligibility scores in reverberant and noisy sound fields.

Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
A: Word familiarity	1.0	7135.1	7135.1	30.7	< 0.01
B: Age	1.0	14512.3	14512.3	62.5	< 0.01
C: Sound field	1.0	3020.7	3020.7	13.0	< 0.01
Interaction (A×B)	1.0	808.6	808.6	3.5	0.06
Interaction (B×C)	1.0	137.7	137.7	0.6	0.44
Interaction (C×A)	1.0	197.4	197.4	0.9	0.36
Interaction (A×B×C)	1.0	181.1	181.1	0.8	0.38
Residual	122.0	28334.6	232.3		

たが、交互作用はすべて有意 ($p < 0.05$) ではなかった。従って、残響音と騒音を同時に付加した音場においても、親密度と被験者の年代は単語了解度に有意な影響を及ぼす。残響付加音場と騒音付加音場では、音場と他の2つの要因の交互作用は、それぞれ有意であったが、両者を同時に付加した音場では有意ではなかった。これは、残響音・騒音同時付加音場において、分散分析の対象とした2音場の単語了解度の差、すなわち音場の違いが小さかったためだと考えられる。

2.2 総合的考察

2.2.1 親密度の影響

同じ音場に対して求めたHFLとLFLに対する単語了解度の比較をFigure 2.9に示す。なお、Figure 2.9では、本実験で用いた残響付加音場、騒音付加音場、残響音・騒音同時付加音場のすべてを用いた。若齢者の単語了解度（○）と高齢者の単語了解度（●）は、どちらも右上がりの対角線よりも上にプロットされており、すべての音場において横軸のLFLに対する単語了解度より縦軸のHFLの単語了解度が高い。また、被験者の年代と音場にかかわらず、HFLとLFLの単語了解度の関係を、ひとつの曲線で近似することが可能である。例えば、対数曲線で近似した場合（ $y = 49.9 \times \log_e x - 129.7$ ）の決定係数は0.97と非常に高い。従って、単語了解度を低下させた原因が、残響音、騒音、加齢のいずれであるかを問わず、親密度による単語了解度の差は、HFLまたはLFLの単語了解度の値のみに依存する。坂本ら[32]は、親密度が単語了解度に影響を及ぼすのは、心的辞書においてアクセスしやすい位置にある単語のほうが欠損した音響情報を補完しやすいためだと考えた。これが正しいとすれば、本実験の結果は、4モーラ程度の長さの単語を同定する場合、心的辞書にアクセスする過程における加齢による衰えはないことを示唆する。また、この示唆は若齢者と高齢者の単語了解度の差は、音声として伝送された単語を同定する処理過程のうち、脳で行われる高次的な処理過程よりも、むしろ末梢の処理過程、すなわち聴覚器官の衰えに大きく依存することを意味する。

2.2.2 聴力レベルの影響

単語了解度と高齢者の聴力レベルの関係について分析する。各高齢者被験者の聴力レベルの両耳平均を各周波数についてそれぞれ算出し、各音場における高齢者被験者それぞれの単語了解度との相関係数を算出した。結果をTable 2.8に示す。相関係数の絶対値が0.7以上の組み合わせについては白黒反転で記載し、0.5以上の組み合わせについては網かけで記載した。相関係数の絶対値が0.5以上となるのは、ほとんどが2kHz以上の聴力レベルとの組み合わせである。また、相関係数の絶対値が0.7以上となるのは、2kHzと4kHzの聴力レベルとの組み合わせのみである。従って、既往の研究結果と同様

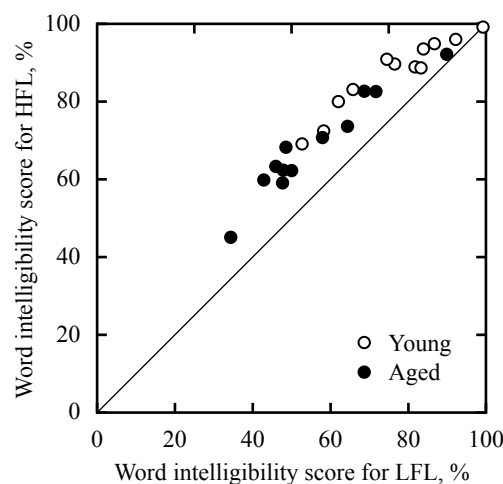


Figure 2.9 The relation between word intelligibility scores for HFL (high familiarity list) and LFL (low familiarity list). Open and closed circles represent the scores for the young and the aged, respectively.

Table 2.8 The correlation coefficients between hearing levels at each frequency and word intelligibility scores for the aged. Hearing levels and word intelligibility scores were obtained for each test sound field and each aged subjects.

Familiarity	Sound field	Hearing level						
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
High	RT0	-0.02	0.10	0.12	0.07	-0.42	-0.44	-0.20
	RT1	-0.39	-0.21	-0.11	-0.04	-0.70	-0.70	-0.32
	RT2	0.01	0.12	0.12	0.04	-0.47	-0.50	-0.37
	RT3	-0.25	-0.27	-0.16	-0.16	-0.68	-0.35	-0.40
	RT4	-0.02	0.01	0.05	0.01	-0.41	-0.25	-0.34
	RT6	0.08	0.12	0.26	0.28	-0.15	-0.17	-0.06
	N55	-0.01	-0.08	-0.02	0.03	-0.43	-0.20	-0.33
	N60	-0.16	0.07	0.14	0.03	-0.54	-0.66	-0.37
	N65	-0.02	0.05	0.19	0.20	-0.50	-0.40	-0.43
	RT2N55	-0.41	-0.25	-0.09	-0.17	-0.81	-0.76	-0.51
	RT2N60	-0.53	-0.32	-0.11	-0.07	-0.63	-0.66	-0.28
	RT4N55	-0.13	-0.05	0.07	0.07	-0.51	-0.45	-0.36
	RT4N60	-0.22	-0.22	-0.20	-0.32	-0.70	-0.44	-0.38
Low	RT0	0.15	0.10	0.14	0.01	-0.44	-0.25	-0.31
	RT1	-0.10	-0.08	-0.08	-0.05	-0.62	-0.47	-0.48
	RT2	-0.35	-0.13	-0.04	-0.06	-0.67	-0.63	-0.39
	RT3	-0.43	-0.29	-0.11	-0.12	-0.73	-0.64	-0.20
	RT4	-0.22	-0.22	-0.09	-0.15	-0.62	-0.31	-0.22
	RT6	-0.37	-0.33	-0.34	-0.33	-0.83	-0.45	-0.42
	N55	0.07	0.19	0.35	0.29	-0.24	-0.30	-0.10
	N60	0.18	0.43	0.45	0.33	-0.22	-0.54	-0.31
	N65	-0.16	-0.03	0.07	-0.12	-0.59	-0.54	-0.52
	RT2N55	0.04	0.21	0.35	0.06	-0.44	-0.48	-0.44
	RT2N60	0.15	0.21	0.37	0.34	-0.20	-0.22	-0.26
	RT4N55	-0.06	0.02	0.20	0.23	-0.41	-0.43	-0.28
	RT4N60	-0.05	0.17	0.19	0.14	-0.39	-0.61	-0.15

に、単語理解度は高周波数の聴力レベルと相関があり、特に2kHzと4kHzの聴力レベルとの相関が高い。

2kHzと4kHzの聴力レベルの平均値で10dBHLステップで被験者を分類したところ、10から19dBHLの被験者が8名、20から29dBHLの被験者が7名と、高齢者被験者19名の多くがこの2つに分類された。そこで、この2つの分類について単語理解度と聴力レベルの平均値を算出した。若齢者の単語理解度を基準として横軸にとり、縦軸に2つの分類の単語理解度をとって、同じ音場の単語理解度を比較した結果をFigure 2.10に示す。どちらの分類の単語理解度も、音場にかかわらず右上がりの対角線の下にプロットされており、若齢者と比較して単語理解度が低下する。また、それぞれの分類の単語理解度と、若齢者の単語理解度の間にはそれぞれ高い相関（10から19dBHLの分類で0.85、20から29dBHLの分類で0.87）がある。聴力レベルが10から19dBHLの被験者（○）と20から29dBHLの被験者（●）では、後者のほうが単語理解度が低く、その差は単語理解度が低いほど大きい。若齢者と高齢者の単語理解度の差を、図中に示した回帰式から算出すると、若齢者の単語理解度が100%の場合、10から19dBHLの分類では13.4%（86.6%）、20から29dBHLの分類では22.0%（78.0%）である。それ

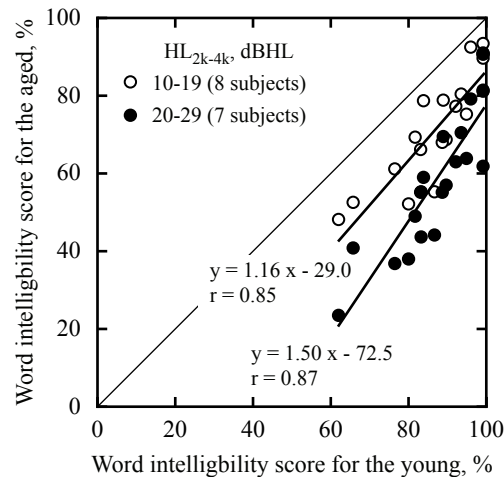


Figure 2.10 The relation between word intelligibility scores for the young and the aged those are classified according to the average of hearing levels at 2kHz and 4kHz (HL_{2k-4k}) in 10dBHL steps. Open and closed circles represent the scores for the groups with HL_{2k-4k} from 10 to 19dBHL and from 20 to 29dBHL, respectively.

ぞれの分類の高齢者被験者の2kHzと4kHzの聴力レベルの平均値は、14.7dBHLと22.1dBHLであり、若齢者では2.6dBHLであるから、どちらの分類においても、1dBHLの聴力レベルの上昇につき、単語理解度は約1.1%低下する。同様にして、若齢者の単語理解度が60%の場合の聴力レベルの上昇量に対する単語理解度の低下量を求めると、1.6から2.1%/dBHLとやや低下量が多い。

2.3 結論

坂本ら[32]による親密度で統制した単語リストを用い、残響音、騒音、残響音と騒音の両者をそれぞれ付加した音場で単語理解度試験を行い、若齢者と高齢者の単語理解度を比較することにより、高齢者の受聴特性を検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 単語親密度は、妨害音が残響音と騒音のどちらであっても単語理解度に有意な影響を及ぼす。これは若齢者と高齢者のどちらの単語理解度についても同様である。
- (2) 単語親密度が単語理解度に及ぼす影響は、単語理解度の値のみに依存し、単語理解度の低下の原因が、残響音、騒音、加齢による聴力損失のいずれの妨害であるかには依存しない。この結果は、4モーラ程度の長さの単語を同定する過程において、心的辞書の参照のような高次の過程では加齢は影響しないこと示唆しており、単語理解度は末梢の聴覚器官の衰えに大きく依存すると考えられる。
- (3) 加齢が単語理解度に及ぼす影響は、音場や親密度にかかわらず有意であった。
- (4) 高齢者の単語理解度は、音場や親密度にかかわらず2kHz以上の高周波数に対する聴力レベルと相関があり、特に2kHzと4kHzの聴力レベルとの相関が相対的に高い。

第3章 聴き取りにくさによる高齢者の受聴特性の評価

1章でも述べたように、音声伝送性能の主観評価指標として、明瞭度や了解度、そして聴き取りやすさなどが提案されており、加齢による聴力損失がそれらに及ぼす影響についても検討されている。しかし、Morimotoら[6]が提案した「聴き取りにくさ」は、公共空間のような比較的良い音場の評価に対し、上記した主観評価指標よりも有効であることが明らかにされているが、高齢者を被験者とした実験は行われていない。本章では、若齢者と高齢者の「聴き取りにくさ」の差について、単語了解度との比較を行って検討する。

3.1 実験B1：残響音付加音場における検討

3.1.1 実験方法

実験方法は、若齢者と高齢者の結果を比較する際に、実験方法の違いによる影響を除くため、Morimotoら[6]による若齢者を対象とした実験で用いられた方法を、可能な限り再現した。以下にその詳細を示す。

A. 被験者

高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる56歳から79歳の高齢者142名を用いた。全ての被験者に対し、聴力検査を行った。聴力検査をオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 3.1に高齢者被験者の平均オーディオグラムを示す。2kHz以上の高周波数で聴力レベルが上昇しており、典型的な老人難聴の傾向がみられる。一方、低い周波数では、ISO7029[4]による予測値と比較して聴力レベルが上昇しているが、この傾向はほとんどの被験者に共通してみられたため、測定室の暗騒音などの外的要因による影響と考えられる。

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、親密度7.0～5.5のリストを1つ選んで実験に用いた。Table 3.1に実験で用いた単語を示す。単語の前の番号は、試験用音源作成の際に、作業を円滑に行うために便宜上用いた番号である。単語リストは音韻バランスが統制された50語からなり、単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

C. 実験音場

音場のパラメータは、残響時間と残響音の直接音に対するレベル差である。

インパルス応答を畳み込むことにより、単語に残響音を付加した。インパルス応答の模式図をFigure 3.2に示す。インパルス応答は、直接音とそれに続く残響音から構成される。残響音はリバーブレータ

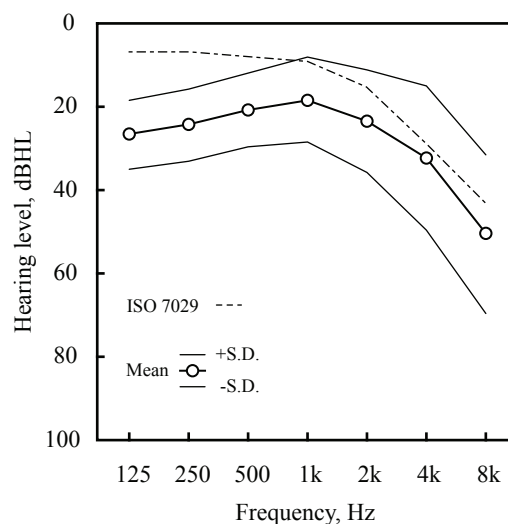


Figure 3.1 Audiogram for listeners in the listening test. Open circles and two solid lines represent the mean and ± 1 standard deviation of the hearing level of listeners, respectively. Dashed line represents the estimated mean hearing level of listeners by ISO 7029[4].

Table 3.1 Test words used in experiment B1.

1 アマグモ	11 ゲンイン	21 タナバタ	31 ネアガリ	41 ユウワク
2 イマフウ	12 コウフク	22 ダンタイ	32 ハダイロ	42 ヨクネン
3 ウチガワ	13 ザイガク	23 チョウハツ	33 パチンコ	43 ランパク
4 オシダシ	14 サイジツ	24 チンタイ	34 バランス	44 リクジョウ
5 オヤモト	15 ジツブツ	25 ツナガリ	35 ヒキダシ	45 リャクダツ
6 ガニマタ	16 シハライ	26 デマカセ	36 ブランド	46 レンパイ
7 キタカゼ	17 シャブシャブ	27 ドクヤク	37 フリガナ	47 ワタクシ
8 キュウシヨク	18 スタミナ	28 トビバコ	38 ホウタイ	48 カシパン
9 グウタラ	19 セツリツ	29 ナツバシヨ	39 マンルイ	49 クスリヤ
10 ケイサツ	20 ソラミミ	30 ニンニク	40 ヤマカジ	50 ミジンコ

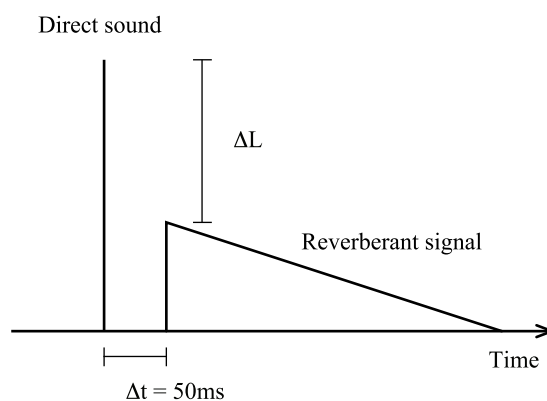


Figure 3.2 Impulse response of test sound fields used in experiment B1.

Table 3.2 The parameters of test sound fields used in experiment B1.

Sound field	Reverberation time, s	ΔL , dB
a	0.5	-6
b	0.9	-6
c	0.9	-12
d	0.9	-20
e	2.0	-6
f	2.0	-12
g	2.0	-20
h	6.0	-6

YAMAHA, SPX-900) を用いて作成した。残響音の直接音に対する遅れ時間 (Fig. 3.2の Δt) は、Hass効果[62]を考慮し、残響音がすべて妨害音として働くよう50msで一定とした。残響音の直接音に対するレベル差は、-6dB, -12dB, -20dBの3種類に設定した。残響音の音圧の時間減衰の傾きを変えることにより、残響時間を0.5s, 0.9s, 2.0s, 6.0sの4種類に設定した。残響時間の周波数特性は平坦である。3種類のレベル差と4種類の残響時間を組み合わせて、Table 3.2に示す8音場を作成し、実験に用いた。

刺激の提示レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計を用いて測定した。提示レベルの測定は、直接音のみを再生して行った。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はfastとし、各刺激のピークレベルを測定した。全刺激のピークレベルの平均が65dBAとなるように提示レベルを調整した。

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 使用する単語を番号の若い順から5個ずつまとめ、計10個の単語群をつくる。
2. 各単語群と実験音場を1音場ずつ割り当てることにより、40刺激からなる1組の試験用音源を完成させる。
3. 同じ単語群と実験音場の組み合わせが生じないように手順2を繰り返し、Figure 3.3に示すような10種類の試験用音源を作成する。

10種類の試験用音源が1回ずつ提示されると、各単語が1回ずつ各実験音場で提示されることになり、実験音場間の音韻バランスが保たれる。被験者には1組ずつ試験用音源を提示した。各試験用音源の使用回数は13から19とややばらついているが大きな差はなく、実験音場間の音韻バランスが異なってもその影響は無視できる程度だと考えられる。なお、試験用音源は刺激の順序をランダムに並び替えて提示した。

	Sound field							
	a	b	c	d	e	f	g	h
	Test word							
Series of stimuli #1	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40
Series of stimuli #2	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45
Series of stimuli #3	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50
Series of stimuli #4	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	1-5
Series of stimuli #5	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	1-5	6-10
Series of stimuli #6	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	1-5	6-10	11-15
Series of stimuli #7	31-35	36-40	41-45	46-50	1-5	6-10	11-15	16-20
Series of stimuli #8	36-40	41-45	46-50	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25
Series of stimuli #9	41-45	46-50	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30
Series of stimuli #10	46-50	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35

Figure 3.3 Series of stimuli used in experiment B1. Each series of stimuli consists of 40 combinations of test words and sound fields, and includes different 40 test words.

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 3.4に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。刺激は2chのwave形式でデジタル化されており、Lchに直接音のみの刺激、Rchに残響音のみを畳み込んだ刺激が収録されている。提示レベルの測定は、図中のsw.をoffにし、直接音のみを再生して行った。実験では、計算機上でLchとRchをミックスしてからD/A変換し、1つのスピーカから刺激を提示した。受聴点は、スピーカ正面に対し左右30°の2点であり、スピーカとの距離はそれぞれ2mである。実験に用いたスピーカのそれぞれの受聴点における周波数特性をFigure 3.5に示す。左右の受聴点における周波数特性はほぼ等しく、100-10kHzにおいて±5dB以内で平坦である。

F. 実験手順

刺激の終了から次の刺激が開始されるまでの間隔を約10秒として被験者に提示した。1回の試行、つまり40刺激を聴取するのにかかる時間は、9分弱である。

被験者には回答用紙をはさんだ野帳を持たせ、無響室に頭を固定させずに座らせた。無響室の照明はつけたままにし、回答の記入に必要な十分な明るさを与えた。「聴き取りにくさ」の回答法は、Morimotoら[6]の方法に従った。被験者には提示された刺激をカタカナで聴こえた通りに書かせると同時に、その刺激の聴き取りにくさをTable 3.3の4段階で評価させ、数字で記入させた。事前に実験では用いない10刺激による練習を行った。練習は、実験が可能と判断されるまで繰り返し行った。

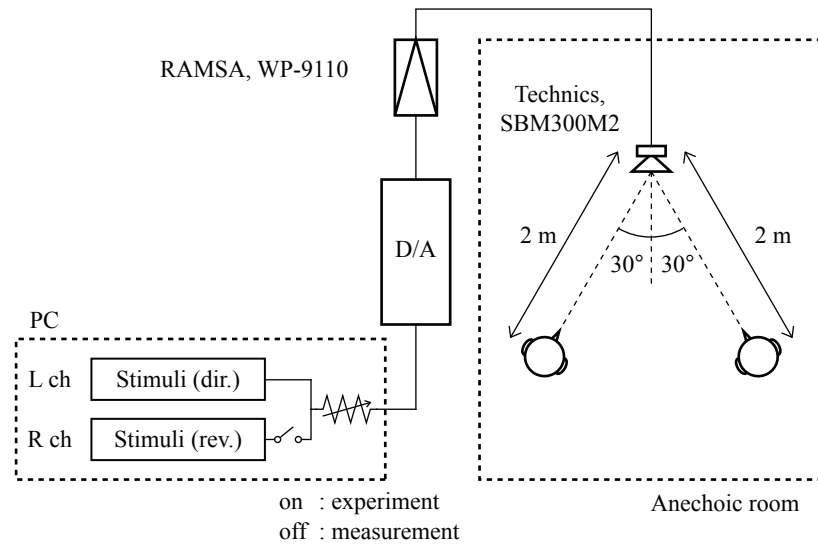


Figure 3.4 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment B1.

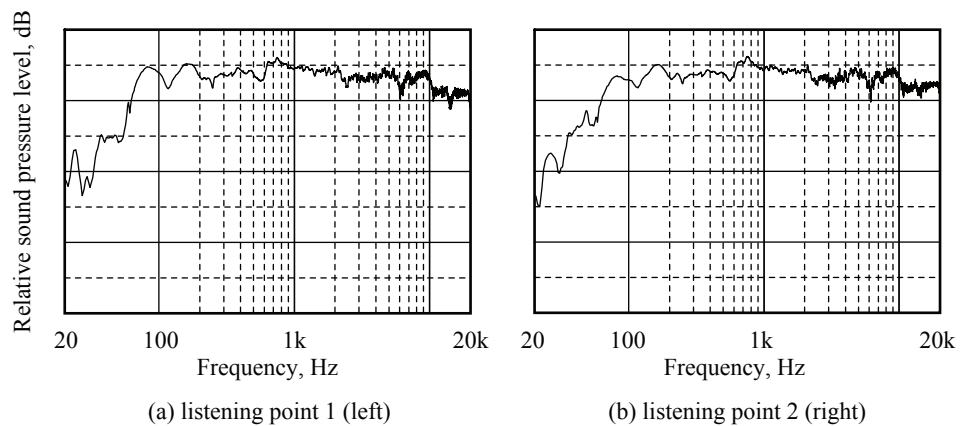


Figure 3.5 Frequency characteristics of loud speaker used in experiments B1. Panels (a) and (b) respectively represent the characteristics at left and right listening points.

Table 3.3 Categories of listening difficulty[6].

1	聴き取りにくくはない	(Not difficult)
2	やや 聴き取りにくい	(A little difficult)
3	かなり 聴き取りにくい	(Fairly difficult)
4	非常に 聴き取りにくい	(Extremely difficult)

3.1.2 結果と考察

A. 被験者の分類

被験者を聴力レベルをもとに分類した。以下にその手順を示す。

1. 各被験者の各周波数（250Hzから4kHz）における左右の耳の聴力レベルを平均する。
2. 手順1により、被験者1人あたり5個の（250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz）の聴力レベルが得られる。これらの聴力レベルをそれぞれ、HL₂₅₀, HL₅₀₀, HL_{1k}, HL_{2k}, HL_{4k}と記述する。さらに、HL_{2k}とHL_{4k}の平均値を求め、これをHL_{2k-4k}と記述する。
3. 被験者を、6個の聴力レベルそれぞれをもとに、10dBHL刻みで分類する。従って、分類は6種類あり、分類のもとになった聴力レベルによって、各分類に含まれる被験者は異なる。Table 3.4に各分類に含まれる被験者数と、その分類のもとになった聴力レベルの平均値を示す。

B. 単語理解度

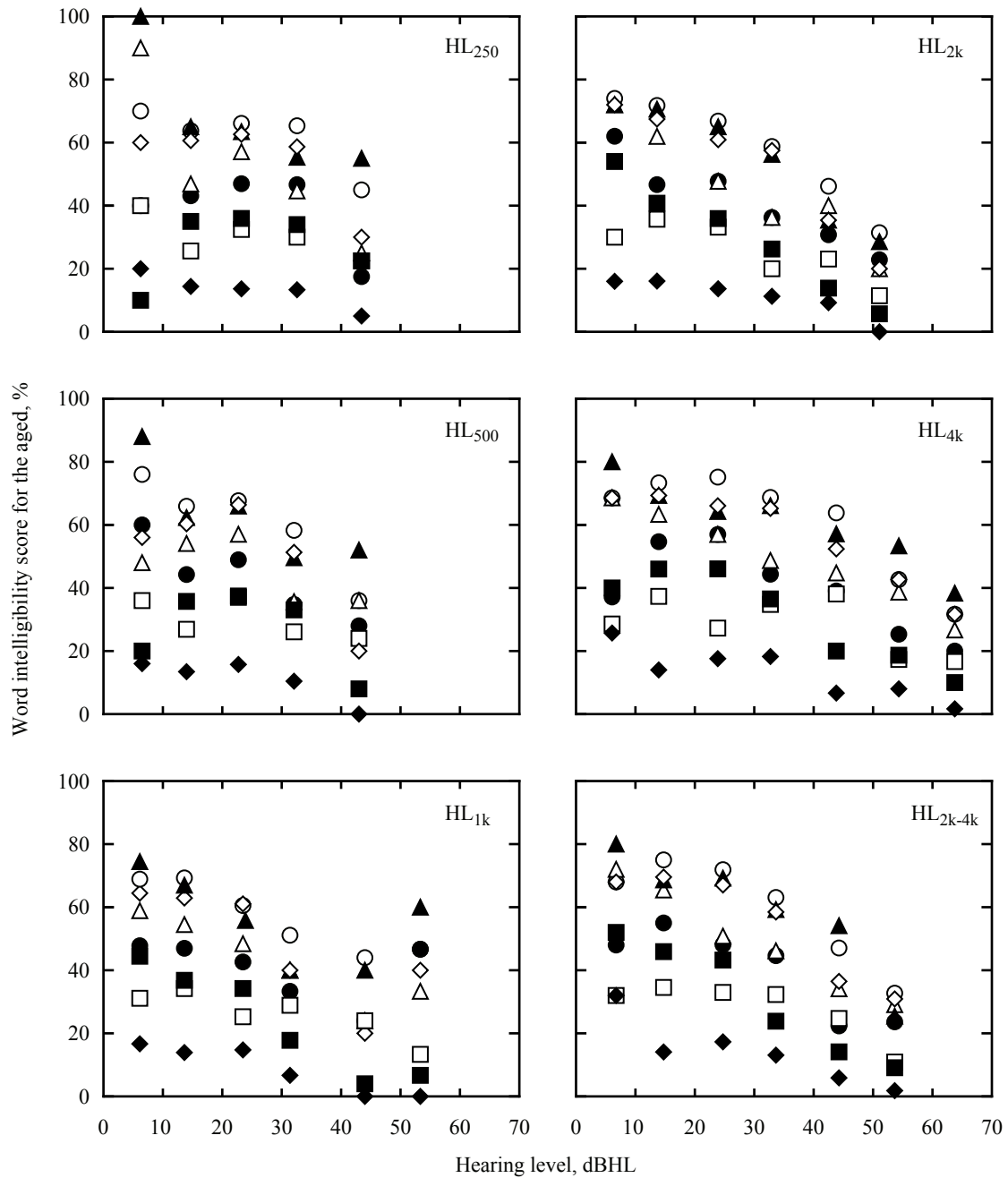
被験者の分類毎に回答をまとめて単語理解度を算出した。単語理解度は単語を正しく書き取れた割合である。Figure 3.6に6個の聴力レベルと単語理解度の関係をそれぞれ示す。記号の違いは音場の違いを示す。音場の影響については、全体的にみると、残響時間が長く、音圧レベル差（Fig. 3.2の ΔL ）が小さいほど単語理解度は低下する。この傾向は、Morimotoら[6]による若齢者に対して同じ音場を用いた結果と一致する。聴力レベルの影響については、聴力レベルの種類や音場の種類によらず、全体的に聴力レベルが上昇すると単語理解度が低下する傾向がみられる。

どの周波数の聴力レベルが、単語理解度に大きく影響するかを分析するために、各聴力レベルにおいて、聴力レベルと音場を要因とする繰り返しのある2要因分散分析を行った。Table 3.5に結果を示す。聴力レベルの主効果は、どの聴力レベルにおいても有意であった（ $p < 0.05$ ）が、F値を比較すると、HL_{2k}, HL_{4k}, HL_{2k-4k}のF値は、他の聴力レベルのF値の5倍以上であり、明らかに大きい。従って、単語理解度は2kHzまた4kHzの聴力レベルにより大きな影響を受ける。この結果は、Kryterら[96]や落合ら[105]の報告と一致する。

また、音場の主効果もどの聴力レベルにおいても有意であった（ $p < 0.01$ ）が、高周波数の聴力レベルになるほど、音場の主効果のF値は高くなる。これは、低周波数の聴力レベルで分類した場合、同じ

Table 3.4 The number of listeners and the averaged hearing levels for each group that are classified by hearing level in 10 dBHL steps.

Hearing level, dBHL	Number of listeners (Averaged hearing level, dBHL)					
	HL ₂₅₀	HL ₅₀₀	HL _{1k}	HL _{2k}	HL _{4k}	HL _{2k-4k}
0-9	2 (6.3)	5 (6.5)	18 (6.1)	10 (6.5)	7 (6.1)	5 (6.8)
10-19	32 (14.7)	61 (14.0)	69 (13.6)	51 (13.6)	30 (13.9)	44 (14.7)
20-29	69 (23.2)	47 (22.7)	38 (23.7)	44 (23.9)	33 (23.9)	37 (24.7)
30-39	30 (32.6)	23 (32.1)	9 (31.4)	16 (33.0)	23 (32.7)	26 (33.7)
40-49	8 (43.4)	5 (43.0)	5 (44.0)	13 (42.5)	21 (43.8)	17 (44.3)
50-59	1 (50.0)	1 (50.0)	3 (53.3)	7 (51.1)	15 (54.3)	11 (53.6)
60-69	0 -	0 -	0 -	1 (60.0)	12 (63.8)	1 (60.0)
70-79	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	1 (72.5)
80-89	0 -	0 -	0 -	0 -	1 (85.0)	0 -



Symbol	○	●	△	▲	□	■	◇	◆
Sound field	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Reverberation time, s	0.5	0.9	0.9	0.9	2.0	2.0	2.0	6.0
ΔL , dB	-6	-6	-12	-20	-6	-12	-20	-6

Figure 3.6 Word intelligibility scores as a function of hearing levels at each frequency and a parameter of the sound fields. The word intelligibility scores and hearing level are the average of them for the group of listeners classified according to hearing level in 10 dBHL steps. Different symbols represent different sound fields.

分類の中に単語理解度に大きな影響を及ぼす2kHzと4kHzの聴力レベルが高い被験者と低い被験者が混在することにより、単語理解度が相殺されるため、音場の影響によって値が上昇も低下もしにくくなるのが原因だと考えられる。

Table 3.5 The summary of two-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the aged in experiment B1.

HL ₂₅₀						HL _{2k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	4	207.58	51.90	2.86	0.03	5	1208.26	241.65	19.50	< 0.01	
Subject	137	2490.06	18.18			136	1685.23	12.39			
B: Sound field	7	888.04	126.86	29.22	< 0.01	7	1604.88	229.27	52.31	< 0.01	
Interaction (A×B)	28	232.63	8.31	1.91	< 0.01	35	210.17	6.00	1.37	0.08	
Residual	959	4163.86	4.34			952	4172.46	4.38			

HL ₅₀₀						HL _{4k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	4	352.84	88.21	5.11	< 0.01	6	1095.76	182.63	17.48	< 0.01	
Subject	137	2365.35	17.27			135	1410.74	10.45			
B: Sound field	7	1163.20	166.17	37.81	< 0.01	7	2322.22	331.75	77.50	< 0.01	
Interaction (A×B)	28	181.13	6.47	1.47	0.06	42	249.91	5.95	1.39	0.05	
Residual	959	4214.68	4.39			945	4045.32	4.28			

HL _{1k}						HL _{2k-4k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	5	399.62	79.92	4.85	< 0.01	5	1118.00	223.60	22.90	< 0.01	
Subject	136	2241.83	16.48			136	1328.17	9.77			
B: Sound field	7	978.48	139.78	31.24	< 0.01	7	1594.89	227.84	52.71	< 0.01	
Interaction (A×B)	35	125.99	3.60	0.80	0.78	35	192.02	5.49	1.27	0.14	
Residual	952	4259.34	4.47			952	4114.93	4.32			

聴力レベルと音場の交互作用は、HL₂₅₀においてのみ有意 ($p < 0.01$) であったが、ここでは各音場における聴力レベルの影響を分析するため、聴力レベルの単純主効果の検定 ($p < 0.05$) を、それぞれの聴力レベルにおいて行った。Table 3.6に各音場、各聴力レベルにおける、聴力レベルの単純主効果のF値をまとめて示す。F値の右に*があれば、その条件における聴力レベルの単純主効果が有意 ($p < 0.05$) であることを示す。

HL₂₅₀では、音場cとdにおける聴力レベルの単純主効果が有意であった。Figure 3.6をみると、音場c (△) と音場d (▲) とともに、聴力レベルが最も低い分類の単語理解度が90%以上と高い値を示している。この分類に含まれる被験者数は2名であり、偶然この2名の音場cとdにおける単語理解度が高かったため、単純主効果が有意となったと考えられる。高周波数の聴力レベルになるにつれて、単純主効果が有意となる音場の数は増えるが、音場h (◆) における聴力レベルの単純主効果は、HL_{2k-4k}を除き有意ではない。これは、音場hにおける単語理解度が非常に低く、最も聴力レベルが低い分類でもHL_{4k}とHL_{2k-4k}以外では20%を下回ることが原因である。また、音場e (□) における聴力レベルの単純主効果もHL_{4k}を除き有意ではないが、同様に単語理解度が低いことが原因であると考えられる。音場eとh以外の音場では、単語理解度に大きな影響を及ぼすHL_{2k}、HL_{4k}、HL_{2k-4k}における聴力レベルの単純主効果のF値に大きな差がみられないことと、聴力レベルと音場の交互作用が有意ではないことを合わせると、HL_{2k}、HL_{4k}、HL_{2k-4k}が単語理解度に及ぼす影響は、音場によらず一定であるとみなせる。

Table 3.6 F-ratios of the simple main effect of hearing level on word intelligibility scores for each sound field in experiment B1. The ratios were obtained by a two-way repeated measures analysis of variance with hearing level and sound field. The analyses of variance were performed for the hearing levels at each frequency.

Sound Field	RT, s	ΔL , dB	Hearing level					
			HL ₂₅₀	HL ₅₀₀	HL _{1k}	HL _{2k}	HL _{4k}	HL _{2k-4k}
a	0.5	-6	1.12	4.01*	1.67	7.19*	8.63*	7.40*
b	0.9	-6	1.76	2.67	1.25	5.12*	5.91*	5.23*
c	0.9	-12	6.66*	1.72	2.38*	9.13*	6.57*	7.81*
d	0.9	-20	4.06*	4.04*	2.68*	9.01*	5.44*	9.78*
e	2.0	-6	0.53	0.63	0.72	2.19	2.45*	2.22
f	2.0	-12	1.47	2.73*	3.86*	8.35*	6.59*	8.92*
g	2.0	-20	2.20	5.67*	4.27*	10.75*	6.72*	8.00*
h	6.0	-6	0.34	0.76	0.77	0.95	2.09	3.01*

* $p < 0.05$

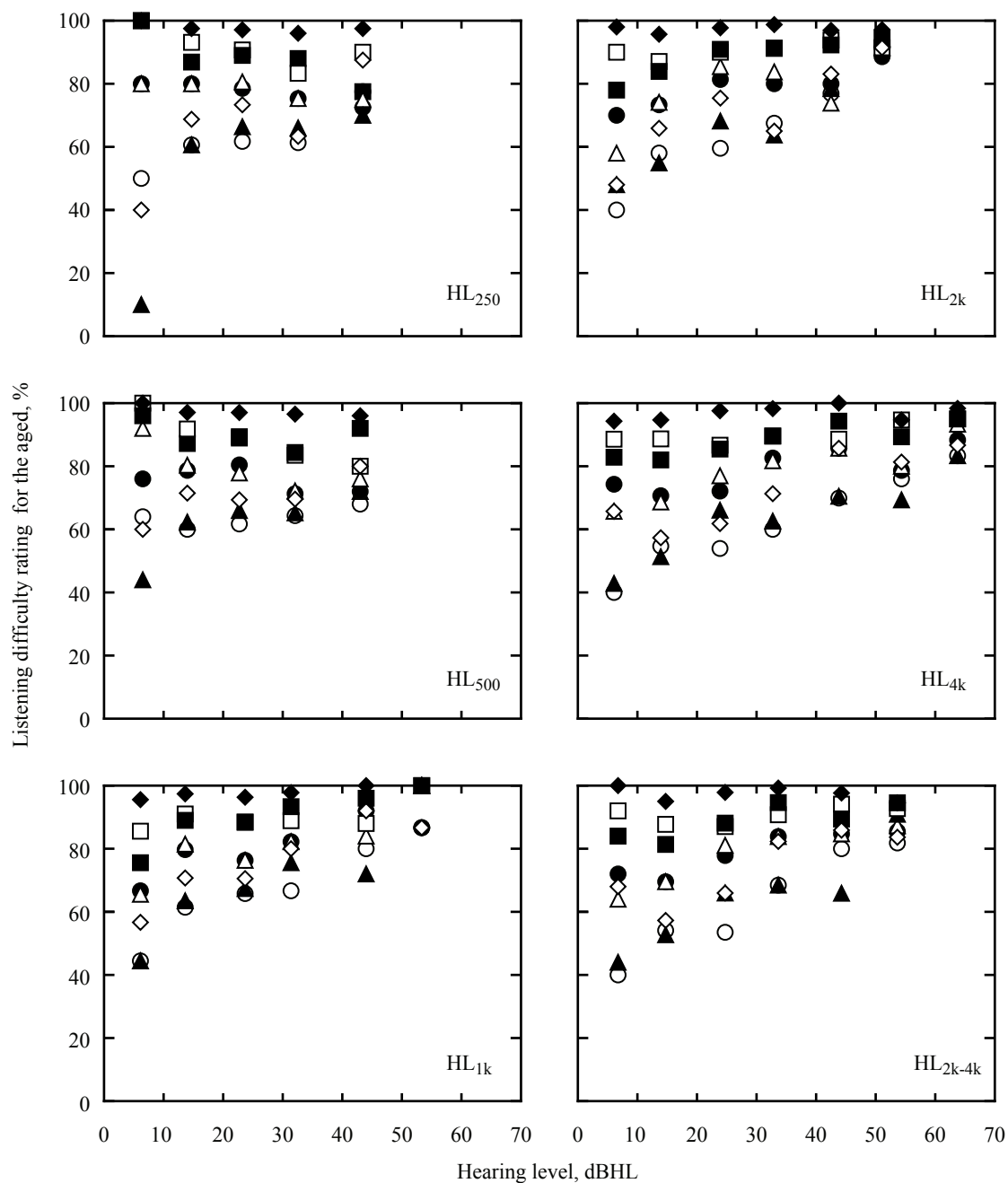
C. 聴き取りにくさ

被験者の分類毎に回答をまとめて聴き取りにくさを算出した。Table 3.4に示した4段階の評価のうち、2から4の選択肢を回答した数、すなわち程度は異なるものの「聴き取りにくい」と回答した数を合計し、それが全回答数に対して占める割合として、聴き取りにくさを算出した。Figure 3.7に6個の聴力レベルと聴き取りにくさの関係をそれぞれ示す。

音場の影響をみると、残響時間が長く、音圧レベル差が小さいほど聴き取りにくさは上昇するが、その影響の大きさは、分類のもとになった聴力レベルの種類やその値によって異なる。全体的に聴力レベルが低いほど音場の影響は大きく、その傾向は高周波数の聴力レベルによって分類した場合のほうがより明らかである。聴力レベルの影響をみると、音場h (◆) やe (□) では、聴力レベルが低い分類でも聴き取りにくさが非常に高いため、ほとんどみられない。一方、音場a (○) やd (▲) では、聴力レベルが高くなるほど聴き取りにくさは増加し、高周波数の聴力レベルで分類すると、その傾向がより明らかになる。

どの周波数の聴力レベルが、聴き取りにくさに大きく影響するかを分析するために、各聴力レベルにおいて、聴力レベルと音場を要因とする繰り返しのある2要因分散分析を行った。Table 3.7に結果を示す。聴力レベルの主効果は、HL_{2k} ($p < 0.01$)、HL_{4k} ($p < 0.01$)、HL_{2k-4k} ($p < 0.05$) の3つの聴力レベルでのみ有意であった。従って、単語理解度と同様に、2kHzと4kHzの聴力レベルは他の周波数の聴力レベルよりも聴き取りにくさに対して大きな影響を及ぼす。音場の主効果は、どの聴力レベルにおいても有意である ($p < 0.01$) が、高周波数の聴力レベルになるほどF値が増加する傾向がみられる。これは、単語理解度と同様の傾向であり、原因もやはり同様に、低周波数の聴力レベルによる分類では、聴き取りにくさに大きな影響を及ぼす2kHzと4kHzの聴力レベルが高い被験者と低い被験者が混在するため、聴き取りにくさが相殺されることにより、音場の影響が出にくくなったと考えられる。

聴力レベルと音場の交互作用は、HL₅₀₀とHL_{1k}を除いて有意であった ($p < 0.01$)。そこで、聴力レベルの単純主効果の検定 ($p < 0.05$) で、それぞれの聴力レベルについて行った。結果をTable 3.8に示す。単語理解度と比較すると、単純主効果が有意な条件は少なく、1kHz以下の聴力レベルではほとんどみられない。HL₂₅₀では、音場dとgで聴力レベルの単純主効果が有意であるが、これは被験者数の少ない聴力レベルが最も低い分類の聴き取りにくさが、大きく変化したためだと考えられ、信頼性のある結果とは考えにくい。聴力レベルの主効果が有意であったHL_{2k}、HL_{4k}、HL_{2k-4k}では、a、c、d、gの



Symbol	○	●	△	▲	□	■	◇	◆
Sound field	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Reverberation time, s	0.5	0.9	0.9	0.9	2.0	2.0	2.0	6.0
ΔL , dB	-6	-6	-12	-20	-6	-12	-20	-6

Figure 3.7 As for Fig. 3.6, but for listening difficulty ratings for the aged.

4音場で聴力レベルの単純主効果が有意であった。これらの音場は、残響時間が短いあるいは音圧レベル差が大きい音場であり、残響音エネルギーが少ない音場では、聴き取りにくさに対する聴力レベルの影響が大きい。一方、聴力レベルの単純主効果は、b, e, f, hの4音場では有意ではなかった。これは、それらの音場における聴き取りにくさが、聴力レベルが低い被験者でも非常に高いため、天井効果により、聴力レベルの影響が出なかったためだと考えられる。

Table 3.7 The summary of two-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the aged in experiment B1.

HL ₂₅₀						HL _{2k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	4	4235.7	1058.9	0.35	0.84	5	45252.0	9050.4	3.24	< 0.01	
Subject	137	414128.4	3022.8			136	379709.4	2792.0			
B: Sound field	7	56466.4	8066.6	26.72	< 0.01	7	77804.5	11114.9	36.80	< 0.01	
Interaction (A×B)	28	28469.6	1016.8	3.37	< 0.01	35	28892.1	825.5	2.73	< 0.01	
Residual	959	289478.7	301.9			952	287515.7	302.0			

HL ₅₀₀						HL _{4k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	4	681.1	170.3	0.06	0.99	6	44758.5	7459.7	3.17	< 0.01	
Subject	137	415498.4	3032.8			135	317476.5	2351.7			
B: Sound field	7	60575.7	8653.7	27.51	< 0.01	7	117281.4	16754.5	55.48	< 0.01	
Interaction (A×B)	28	12929.2	461.8	1.47	0.06	42	22708.3	540.7	1.79	< 0.01	
Residual	959	301614.3	314.5			945	285384.8	302.0			

HL _{1k}						HL _{2k-4k}					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Hearing level	5	29541.7	5908.3	2.07	0.07	5	33015.9	6603.2	2.44	0.04	
Subject	136	388704.4	2858.1			136	367907.2	2705.2			
B: Sound field	7	37423.0	5346.1	16.96	< 0.01	7	86858.2	12408.3	41.49	< 0.01	
Interaction (A×B)	35	11480.3	328.0	1.04	0.41	35	24788.5	708.2	2.37	< 0.01	
Residual	952	300137.6	315.3			952	284683.6	299.0			

Table 3.8 F-ratios of the simple main effect of hearing level on listening difficulty ratings for each sound field in experiment B1. The ratios were obtained by a two-way repeated measures analysis of variance with hearing level and sound field. The analyses of variance were performed for the hearing levels at each frequency.

Sound Field	RT, s	ΔL , dB	Hearing level					
			HL ₂₅₀	HL ₅₀₀	HL _{1k}	HL _{2k}	HL _{4k}	HL _{2k-4k}
a	0.5	-6	1.07	0.15	2.80*	7.13*	6.20*	6.26*
b	0.9	-6	0.12	0.26	0.98	0.98	1.33	1.08
c	0.9	-12	0.08	0.89	1.61	3.23*	2.55*	2.02
d	0.9	-20	7.00*	1.79	4.19*	6.41*	4.94*	5.83*
e	2.0	-6	0.40	0.95	0.33	0.11	0.30	0.18
f	2.0	-12	0.71	0.32	0.92	0.89	0.75	0.67
g	2.0	-20	3.33*	0.80	2.09	5.40*	3.94*	3.12*
h	6.0	-6	0.02	0.04	0.04	0.03	0.14	0.11

*p < 0.05

以上の結果より、2kHzと4kHzの聴力レベルは、他の周波数よりも単語理解度と聴き取りにくさの両者に大きな影響を与える。聴力レベルの影響は、聴き取りにくさよりも単語理解度のほうが大きい。これは実験に用いた音場の多くが、聴力レベルが低い高齢者にとっても非常に聴き取りにくい音場であったため、天井効果によって聴き取りにくさに対する聴力レベルの影響が出にくくなったためである。また、この結果は、音声伝達性能が悪い音場では、単語理解度のほうが聴き取りにくさよりも感度良く評価できるとするMorimotoら[6]の結論と一致する。

D. 若齢者の単語理解度と高齢者の単語理解度の比較

Morimotoら[6]による若齢者の単語理解度と、本実験による高齢者の単語理解度を比較する。ここで、両者の関係を比較するにあたり、単語理解度をz値に変換した。Figure 3.8(a)に示すように横軸に音声伝送性能、縦軸に単語理解度をとると、単語理解度が0%あるいは100%に近づくと音声伝送性能の変化に対する単語理解度の変化は鈍くなり、全体としては累積正規分布曲線のような曲線となる。若齢者の単語理解度と高齢者の単語理解度が、それぞれFig. 3.8(a)に示した実線と点線のように表されると仮定すると、両者の関係はFig. 3.8(b)のような曲線となる。一方、音声伝達性能と単語理解度の関係が累積正規分布曲線で表せると仮定すると、単語理解度のz値と音声伝送性能の関係は、Fig. 3.8(c)に示すような直線的な関係となり、若齢者と高齢者の単語理解度のz値の関係も、Fig. 3.8(d)に示すような直線となる。従って、若齢者と高齢者の単語理解度をz値に変換することにより、両者の関係を直線回帰分析を用いて分析できる。

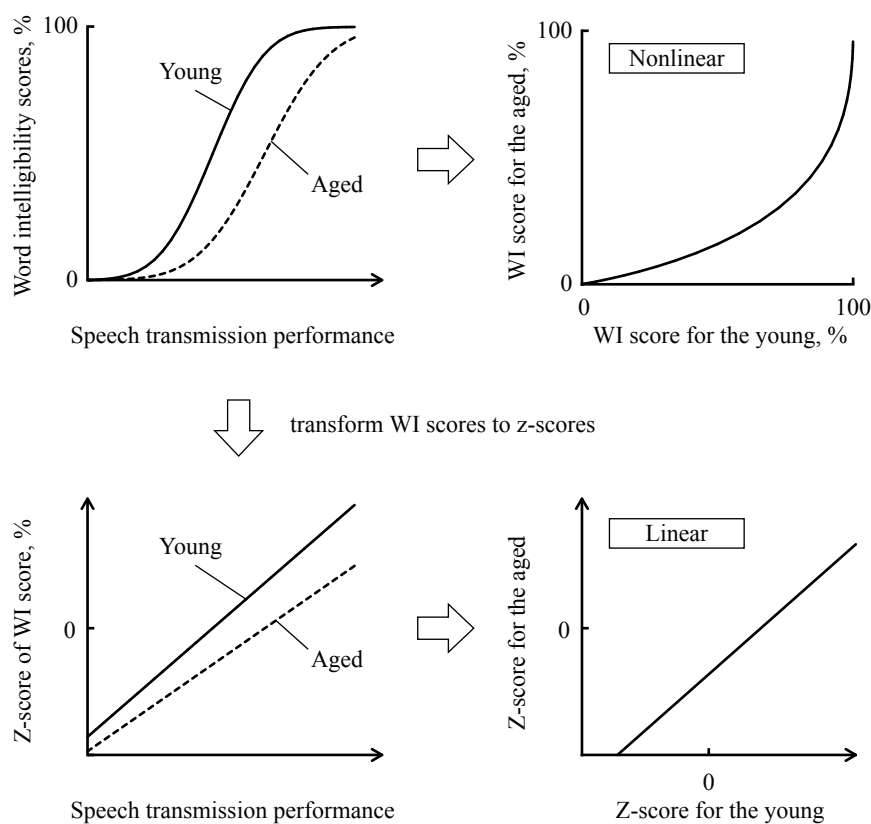


Figure 3.8 The relation between word intelligibility scores and speech transmission performance. The relation changes from nonlinear to linear relation when word intelligibility scores are transformed to z-scores.

Bの節で示したように、高齢者の単語理解度は、2kHzと4kHzの聴力レベルの影響を大きく受ける。そこで、その2つの聴力レベルの平均値である HL_{2k-4k} による被験者の分類を採用し、その分類毎に若齢者の単語理解度と比較する。各分類における高齢者被験者の単語理解度のz値と、若齢者被験者の単語理解度のz値の関係をFigure 3.9に示す。横軸は若齢者の単語理解度のz値、縦軸は高齢者被験者の単語理解度のz値である。図(a)から(f)はそれぞれ10dBHL刻みで HL_{2k-4k} をもとに分類した高齢者被験者の結果である。それぞれの図中に示した聴力レベルは、その分類に含まれる高齢者被験者の HL_{2k-4k} の平均値である。また、それぞれの聴力レベルに対し、相関係数と回帰式及び回帰直線を求めた結果も合わせて示す。図(f)ではデータが7音場分しかないが、これは音場hにおける高齢者の単語理解度が5%以下と非常に低い値であったため、回帰直線に過度な影響を与えると判断し、分析から除外したためである。

若齢者と高齢者の単語理解度のz値は、高い相関があり、聴力レベルによって異なるが、相関係数は0.87から0.98である。この結果は、若齢者の単語理解度から高齢者の単語理解度を予測可能であることを示している。回帰係数（回帰式の傾き）に着目すると、聴力レベルによる差がほとんどみられず、

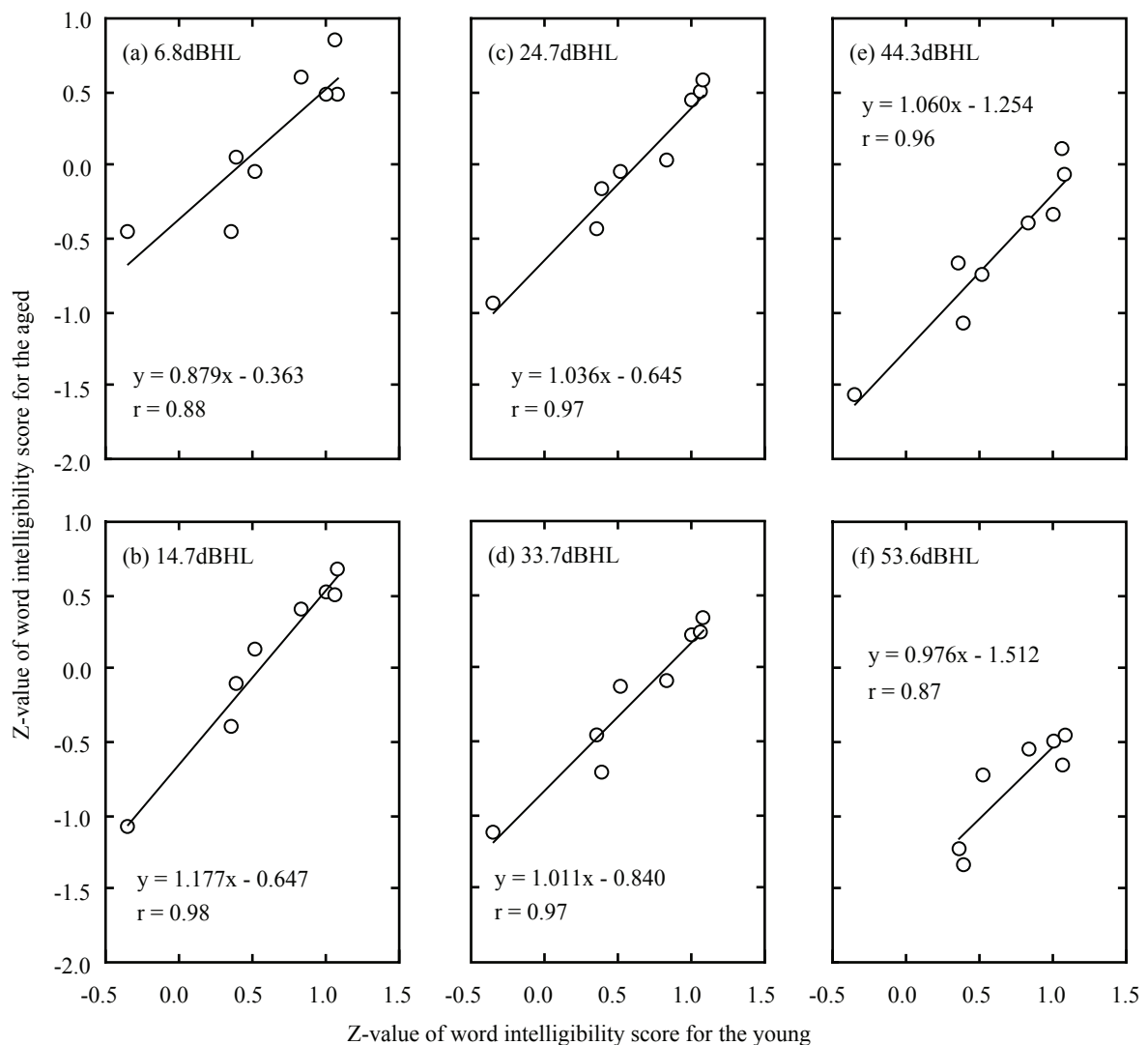


Figure 3.9 Z-scores of word intelligibility scores for the aged as a function of those for the young for each group classified according to the average of hearing levels at 2 kHz and 4 kHz. The word intelligibility scores for the young are obtained by Morimoto et al. [6]

1に近い値である。従って、Fig. 3.6(a)に示したような若齢者の単語理解度と音声伝送性能の関係を示す曲線の形は、高齢者の場合でも大きくは変わらず、聴力レベルが上昇した場合は右に平行移動すると考えられる。このことは、2要因分散分析において単語理解度に対する音場と聴力レベルの交互作用が有意ではなかったという結果と一致する。回帰式の定数項に着目すると、聴力レベルが上昇するにつれて、定数項の値は減少する。Figure 3.10に各分類の HL_{2k-4k} の平均値と定数項の関係を示す。両者の関係は直線的であり、相関係数も-0.97と非常に高い。

以上の結果より、高齢者の単語理解度のz値（ZWIA）は、若齢者の単語理解度のz値（ZWIY）と、高齢者の HL_{2k-4k} の2つの変数で予測できると考えられる。そこで、その2つを説明変数とした重回帰分析を行った。得られた重回帰式を式（3.1）に示す。

$$ZWIA = 1.02 \times ZWIY - 0.0232 \times HL_{2k-4k} - 0.184 \quad (3.1)$$

偏回帰係数と定数項はそれぞれ有意水準1%で有意である。標準偏回帰係数は、ZWIYが0.760、 HL_{2k-4k} が-0.629であり、両者がZWIAに及ぼす影響は同程度である。ZWIYの回帰係数がほぼ1であることを踏まえると、式（3.1）の定数項が有意であることは、 HL_{2k-4k} 以外の要因によってZWIYとZWIAに差が生じることを示唆している。ただし、z値で-0.184の差は、パーセンテージに直すと最大でも7.3%程度であり、若齢者の単語理解度と高齢者の単語理解度の差は、 HL_{2k-4k} によってほぼ決まるとみなせる。

式（3.1）の決定係数は0.91（重相関係数は0.95）と非常に高い。Figure 3.11に式（3.1）およびz値から単語理解度への逆変換により求めた予測値と高齢者の単語理解度の実測値の関係を示す。右上がりの対角線上にほぼデータがプロットされており、特に大きく外れるデータも無いことから、式（3.1）による予測精度は高い。Figure 3.12は式（3.1）を用い、 HL_{2k-4k} をパラメータとして、高齢者の単語理解度と若齢者の単語理解度の関係を図示したものである。この図を用いれば、高齢者の単語理解度がどの程度低下するかを直感的に求めることができる。

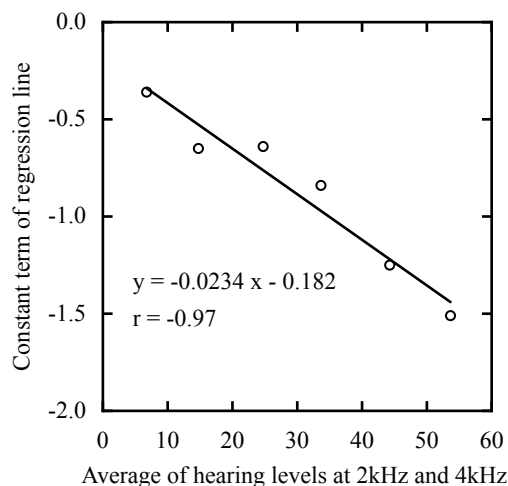


Figure 3.10 Constant terms of regression lines between z-scores of word intelligibility scores for the young and those for the young as a function of the average of hearing levels at 2 kHz and 4 kHz.

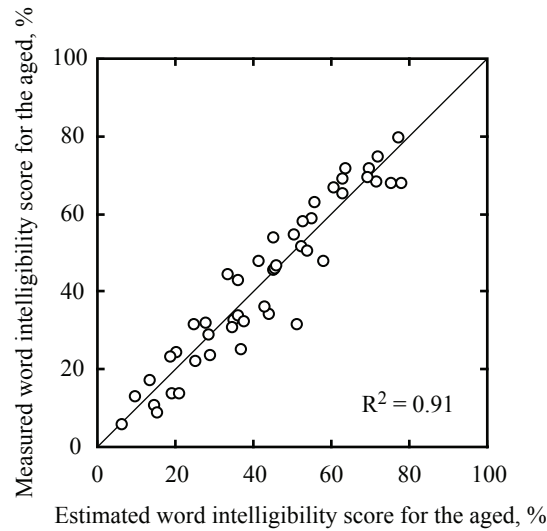


Figure 3.11 The relation between estimated and measured word intelligibility scores for the aged.

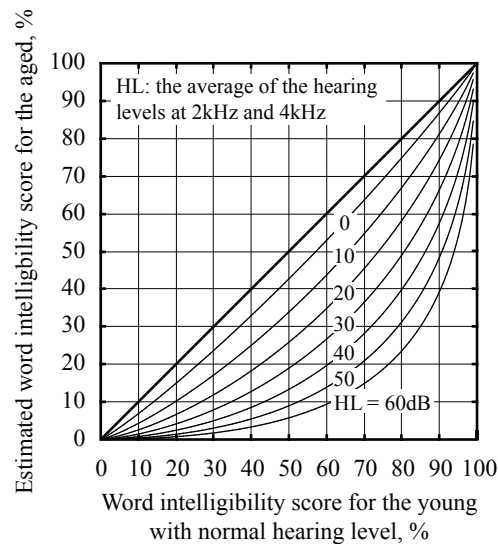


Figure 3.12 Estimated word intelligibility scores for the aged as a function of word intelligibility scores for the young as a parameter of hearing level.

E. 若齢者の聴き取りにくさと高齢者の聴き取りにくさの比較

Morimotoら[6]による若齢者の聴き取りにくさと、本実験による高齢者の聴き取りにくさを比較する。ここで、両者の関係を比較するにあたり、直線回帰分析を用いるために、単語了解度と同様に聴き取りにくさをz値に変換した。Cの節で示したように、高齢者の聴き取りにくさも、単語了解度と同様に2kHzと4kHzの聴力レベルの影響を大きく受ける。そこで、その2つの聴力レベルの平均値である HL_{2k-4k} による被験者の分類を採用し、その分類毎に若齢者の聴き取りにくさと比較する。

各分類における高齢者被験者の聴き取りにくさのz値と、若齢者被験者の聴き取りにくさのz値の関係をFigure 3.13に示す。なお、聴き取りにくさが95%以上であった音場は、回帰直線に過度な影響を及ぼすと判断し、回帰分析の対象から省いた。この操作により、4つの分類 (Fig. 3.13(a), (c), (d), (e)) において、音場hのデータが省かれた。

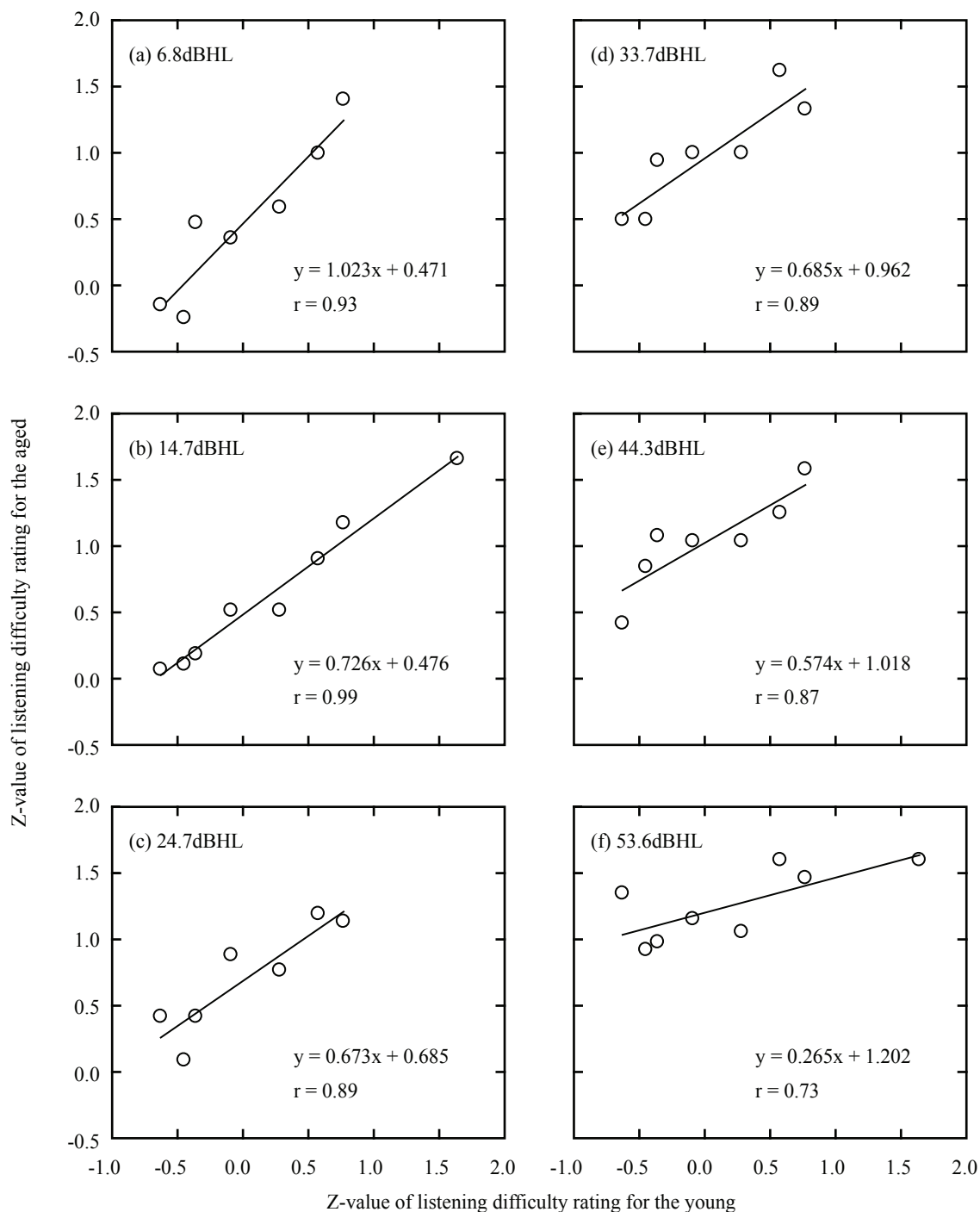


Figure 3.13 As for Fig. 3.9, but for listening difficulty ratings.

若齢者の聴き取りにくさのz値と高齢者の聴き取りにくさのz値は、最もHL_{2k-4k}が高い分類 (Fig 3.13(f)) では比較的相関が低い ($r=0.73$) が、その他の分類では、おおむね単語理解度と同程度の高い相関を示す。各分類で得られた直線回帰式の回帰係数に着目すると、各分類のHL_{2k-4k}の平均値が高くなるほど回帰係数が低くなる傾向がみられる。この傾向は、分類によらず回帰係数がほぼ一定であった単語理解度の傾向と異なる。また、若齢者の聴き取りにくさの変化を音場の影響と置き換えれば、音場と聴力レベルを要因とした2要因分散分析において、交互作用が有意であったという結果とこの傾向は一致する。Figure 3.14に各分類のHL_{2k-4k}の平均値と回帰係数の関係を示す。両者の関係は直

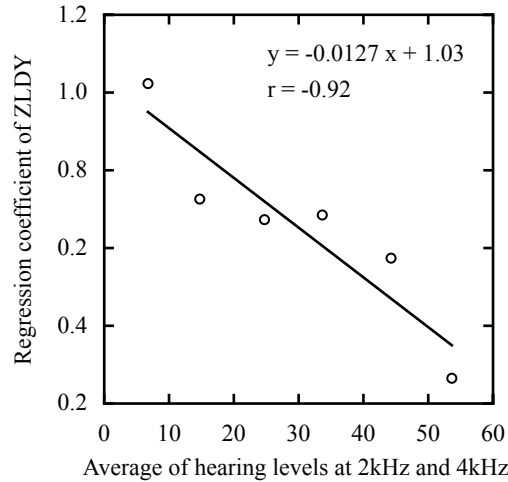


Figure 3.14 Regression coefficients of z-scores of listening difficulty ratings for the young (ZLDY) as a function of the average of hearing levels at 2 kHz and 4 kHz.

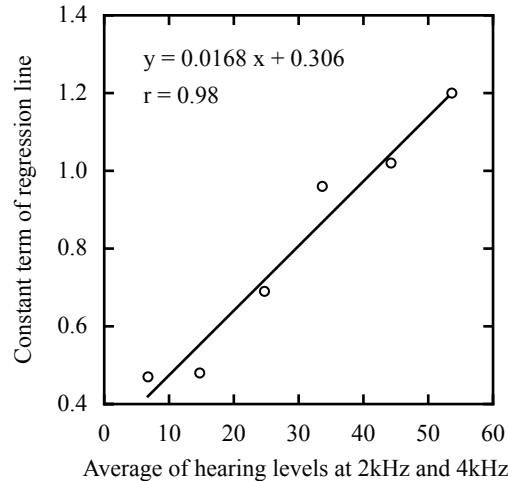


Figure 3.15 Constant terms of regression lines between z-scores of listening difficulty ratings for the young and those for the young as a function of the average of hearing levels at 2 kHz and 4 kHz.

線的であり、相関係数は-0.92と高い相関を示す。回帰式の定数項に着目すると、各分類の HL_{2k-4k} の平均値が高くなるほど定数項が大きくなる傾向がみられる。Figure 3.15に各分類の HL_{2k-4k} の平均値と定数項の関係を示す。両者の関係は直線的であり、相関係数は0.98と非常に高い。

以上の結果より、各分類における回帰式の回帰係数と定数項は、 HL_{2k-4k} から予測できると考えられる。従って、高齢者の聴き取りにくさのz値 (ZLDA) は、若齢者の聴き取りにくさのz値 (ZLDY) と HL_{2k-4k} から、式 (3.2) を用いて予測できると考えられる。

$$ZLDA = (a_1 \times HL_{2k-4k} + a_2) \times ZLDY + (b_1 \times HL_{2k-4k} + b_2) \quad (3.2)$$

式 (3.2) における定数 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 は、Fig. 3.14とFig. 3.15に示した回帰式をそのまま採用することもできるが、回帰を行う回数は少ない方がよい。式 (3.2) を変形すると、

$$ZLDA = A_0 + A_1 \times ZLDY + A_2 \times HL_{2k-4k} + A_3 \times ZLDY \times HL_{2k-4k} \quad (3.3)$$

となり、ZLDAは、ZLDYと HL_{2k-4k} 、及びそれらの積の3つを変数とする重回帰式で表すことができる。そこで、この3つの変数を説明変数とする重回帰分析を行った。その結果として得られた重回帰式を式 (3.4) に示す。

$$ZLDA = 0.298 + 0.979 \times ZLDY + 0.0168 \times HL_{2k-4k} - 0.123 \times ZLDY \times HL_{2k-4k} \quad (3.4)$$

なお、ZLDYと $ZLDY \times HL_{2k-4k}$ の相関係数は0.87と高く、この両者を1つの重回帰分析式に入れるのは冗長である可能性があるが、Fig. 3.14に示した傾向を反映させるために、ここでは両者を説明変数に含めた。偏回帰係数と定数項はそれぞれ有意水準1%で有意である。標準偏回帰係数は、ZLDYが1.18、 HL_{2k-4k} が0.56、 $ZLDY \times HL_{2k-4k}$ が-0.53であり、 HL_{2k-4k} を含む説明変数がZLDAに及ぼす影響はやや小さい。ZLDYの偏回帰係数がほぼ1であることから、定数項は、 HL_{2k-4k} を0dBHLとした場合のZLDYとZLDAの差、すなわち HL_{2k-4k} 以外の要因によるZLDYとZLDAの差を示す。定数項は約0.3であり、これをパーセンテージに直すと最大で11.8%程度の差に相当する。 HL_{2k-4k} 以外の要因による若齢者と高齢者の差は、単語理解度では最大で7.3%であったことと比較すると、どちらもわずかな差ではあるが、聴き取りにくさにおける差のほうがやや大きい。これは、聴き取りにくさのほうが、比較的良好聴取条件における感度が高いことと関連していると考えられる。

式 (3.4) の決定係数は0.89（重相関係数は0.94）単語理解度と同様に高い。Figure 3.16に式 (3.4) およびz値から聴き取りにくさへの逆変換により求めた予測値と高齢者の聴き取りにくさの実測値の関係を示す。右上がりの対角線上にほぼデータがプロットされており、特に大きく外れるデータも無いことから、式 (3.4) による予測精度は高い。Figure 3.17は式 (3.4) を用いて、Fig. 3.12と同様の作図を行ったものである。この図より、若齢者の聴き取りにくさと高齢者の聴き取りにくさの差が HL_{2k-4k} によってどの程度となるかがわかる。若齢者の聴き取りにくさが90%付近になると、 HL_{2k-4k} が高齢者の聴き取りにくさに及ぼす影響が逆転するが、これは $ZLDY \times HL_{2k-4k}$ の項によるものである。実際にこのような逆転がおこることは考えにくい。このような音声伝送性能が悪い音場の評価には、聴き取りにくさよりも単語理解度を用いるべきであるから、実用上は問題ないと考えられる。

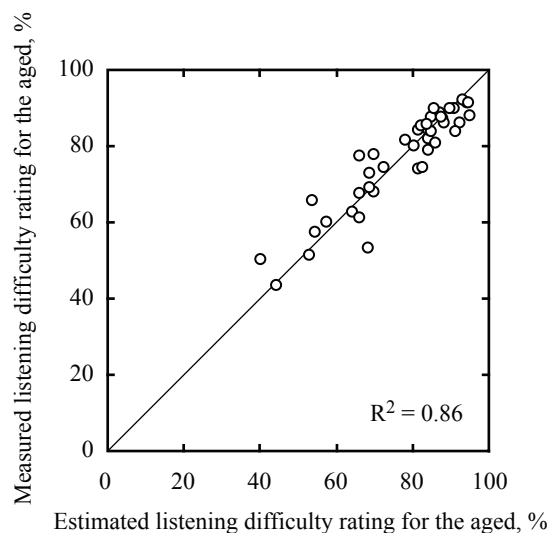


Figure 3.16 The relation between estimated and measured listening difficulty ratings for the aged.

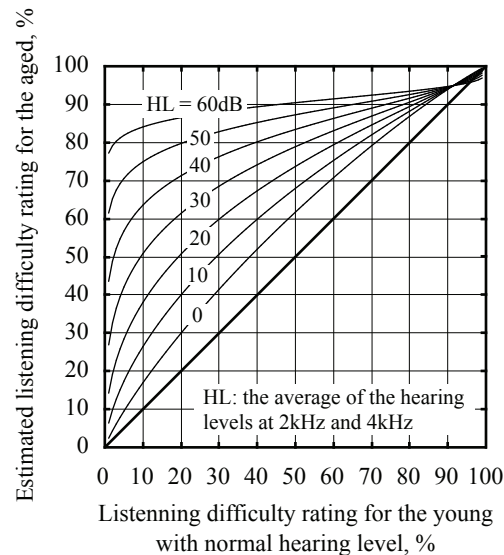


Figure 3.17 Estimated listening difficulty ratings for the aged as a function of listening difficulty ratings for the young as a parameter of hearing level.

3.1.3 まとめ

残響音付加音場における加齢による聴力損失が、聴き取りにくさに及ぼす影響について、特に聴力レベルに着目し、単語了解度と比較することにより検討した。高齢者を被験者とした聴感実験より以下を明らかにした。

- (1) 高齢者の聴き取りにくさは、若齢者と同様に残響音の妨害により上昇する。
- (2) 2kHzと4kHzの聴力レベルは、ほかの周波数の聴力レベルよりも、高齢者の単語了解度及び聴き取りにくさに大きな影響を及ぼす。
- (3) 聴き取りにくさは単語了解度よりも聴力レベルの影響が小さい。ただし、これは聴力が良い高齢者でも、聴き取りにくさが残響音の影響を大きく受けて高い値となるため、聴力レベルの影響が出にくくなったためである。

また、Morimotoら[6]が同じ実験音場で求めた若齢者の単語了解度と聴き取りにくさとの比較を行い、以下を明らかにした。

- (1) 若齢者と高齢者の単語了解度及び聴き取りにくさは、聴力レベルにかかわらず高い相関がある。
- (2) 高齢者の単語了解度は、若齢者の単語了解度と2kHzと4kHzの聴力レベルの平均値の2つを説明変数とする重回帰式により、高い精度で予測できる。
- (3) 高齢者の聴き取りにくさは、若齢者の聴き取りにくさ、2kHzと4kHzの聴力レベルの平均値、及びその2つの積の3つを説明変数とする重回帰式により、高い精度で予測できる。

3.2 実験B2：騒音付加音場における検討

3.2.1 実験方法

A. 被験者

若齢者被験者として、20代の学生（男性6名、女性14名）を用いた。高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる60代後半から70代前半の高齢者20名（男性9名、女性11名）を用いた。全ての被験者に対し、聴力検査を行った。聴力検査をオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 3.18に被験者の平均オーディオグラムを示す。

若齢者と高齢者のどちらにおいても、125Hzから2kHz付近の平均聴力レベルは、ISO7029[4]による20代あるいは60代～80代の予測値と比較して上昇している。この傾向はほとんどの被験者に共通してみられたため、測定室の暗騒音などの外的要因による影響と考えられる。各若齢者被験者の聴力レベルは、全ての周波数においてほぼ15dBHL以下であり、正常な聴力を有している。高齢者被験者の聴力レベルは、個人差が大きい。平均的には周波数が高くなるほど聴力レベルが上昇する傾向があり、典型的な老人性難聴の特徴を持つ。高齢者被験者の中音域（500Hzから2kHz）に対する聴力レベルは、実験1の高齢者被験者と比較するとやや高いが、伝音性難聴を持つ被験者、あるいはその症状を訴えた被験者はいなかった。

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、若齢者と高齢者の両者にとって親密度の高い200語を抽出して用いた。Table 3.9に実験に用いた単語を示す。単語の前の番号は、試験用音源作成の際に、作業を円滑に行うために便宜上用いた番号である。単語長は全て4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

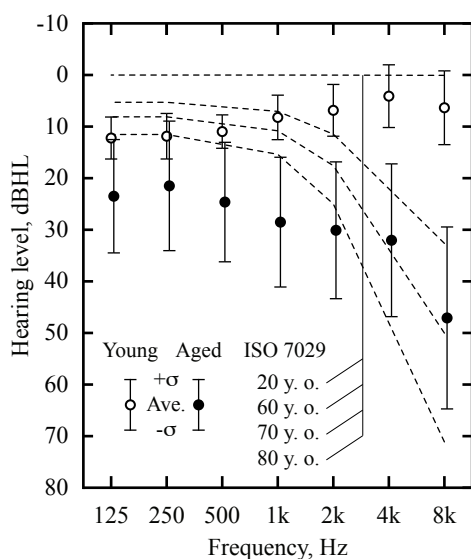


Figure 3.18 Averaged hearing levels of listeners who participated in experiment B2. Open and closed circles respectively represent the results for the young and the aged. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 20, 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

Table 3.9 Test words used in experiment B2.

1	ギンコウ	41	ニホンシュ	81	スキヤキ	121	シタシミ	161	ヨコモジ
2	シアワセ	42	ライネン	82	イザカヤ	122	ガクネン	162	ヤスモノ
3	モクテキ	43	ドウブツ	83	マエムキ	123	ザッソウ	163	ヤジウマ
4	ヒルメシ	44	カラアゲ	84	アジツケ	124	タチヨミ	164	モノマネ
5	ニンジン	45	アサメシ	85	ナツモノ	125	テイネン	165	トリケシ
6	ソウダン	46	セイジカ	86	ドンブリ	126	ケンセツ	166	ラクガキ
7	ユウジン	47	シンユウ	87	ハジマリ	127	ルスバン	167	ヨセナベ
8	ケイサン	48	カイフク	88	シハライ	128	ロウドウ	168	ゲンイン
9	オヤスミ	49	ゴチソウ	89	チチオヤ	129	グウゼン	169	ソノヘン
10	ケンキュウ	50	サクヒン	90	キンキュウ	130	ツウキン	170	ナガネン
11	バンギミ	51	ヒツヨウ	91	コクドウ	131	ヘイボン	171	ケツダン
12	ネブソク	52	ナイヨウ	92	ウメボシ	132	ヨコガオ	172	ヒキダシ
13	ヨウフク	53	ロウジン	93	ケンチク	133	ホウガク	173	チャクジツ
14	セキニン	54	ゼンシン	94	ヤキソバ	134	ソクタツ	174	ゴキゲン
15	スイドウ	55	ヘイジツ	95	マンプク	135	バクダン	175	モクゲキ
16	ジツゲン	56	ヒダリテ	96	ダイキチ	136	チュウトロ	176	コノママ
17	ワリビキ	57	キュウケイ	97	オメデタ	137	タベゴロ	177	ヘンシン
18	レンアイ	58	ベツベツ	98	シュクフク	138	ヒョウバン	178	ムチャクチャ
19	ユウビン	59	コイビト	99	ミギウデ	139	フユフク	179	ナツフク
20	ニホンゴ	60	ホンモノ	100	ドクリツ	140	イヤイヤ	180	ヨクジツ
21	ゼイコミ	61	ケツロン	101	レンゾク	141	リレキシヨ	181	シチガツ
22	キュウジツ	62	トウゼン	102	ガクワリ	142	ツウガク	182	クウフク
23	ヨロコビ	63	レイトウ	103	ユウヤケ	143	ギュウニク	183	イリグチ
24	ジュンスイ	64	ハントシ	104	ロクオン	144	ヒガワリ	184	ケンブツ
25	ワカモノ	65	イチニチ	105	ホンバン	145	ネアガリ	185	マジメサ
26	ユウガタ	66	ネンマツ	106	ユウワク	146	サトイモ	186	ミンカン
27	ブタニク	67	ニューヨク	107	ショクニン	147	チンモク	187	インサツ
28	コウフク	68	ニンシキ	108	ハタラキ	148	ノリモノ	188	ジンザイ
29	ツケモノ	69	ソノママ	109	オトウト	149	チョクゼン	189	ゴブサタ
30	レイボウ	70	オヤユビ	110	シンチク	150	トリニク	190	ドクシン
31	テキトウ	71	オハナシ	111	カワグツ	151	ゴウイン	191	ヨウフウ
32	ケイサツ	72	ギャクテン	112	セイジン	152	セイヒン	192	バイテン
33	ハハオヤ	73	トシシタ	113	トリハダ	153	ゼンガク	193	セイネン
34	ナガソデ	74	ジンカク	114	クチグセ	154	レンキュウ	194	カラッポ
35	ゲンジツ	75	ゼイキン	115	テツドウ	155	ゲツマツ	195	キズグチ
36	トモダチ	76	ネサガリ	116	ユウグレ	156	ハダアレ	196	サイワイ
37	イタズラ	77	セツヤク	117	ドクダン	157	ビンカン	197	ドシャブリ
38	ロクガツ	78	ケイゾク	118	ウリモノ	158	イイワケ	198	クチベニ
39	スイミン	79	ヤスウリ	119	ワタクシ	159	テリヤキ	199	チリガミ
40	チカテツ	80	ガンタン	120	キュウジン	160	ネンカン	200	マルガオ

C. 実験音場

音場のパラメータは、刺激の提示レベル（以下、音声レベル）とSN比（音声レベルと暗騒音レベルの差）である。残響音は付加していない。

音声レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計（小野測器、LA-5110）を用いて測定した。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はslowとし、各単語のピークレベルを測定した。音声レベルは、65dBAと75dBAの2種類に設定した。設定された音声レベルと、各単語のピークレベルの誤差は0.3dBA以下である。

騒音として、実験Aで用いたHothスペクトル[112]を持つ定常騒音を用いた。Figure 3.19に受聴点における騒音の1/1オクターブバンド分析による周波数特性を示す。騒音レベルは、音声レベルと同様に測定したが、ピークレベルではなく中央値を測定した。騒音レベルは、2種類の音声レベルそれぞれに対し、SN比が-5, 0, +10, +15, +20, +25, +30, +35, +40dBの9種類となるよう設定した。また、2種類の音声レベルそれぞれに対し、定常騒音を付加しない条件を加えた。なお、実験を行った無響室の暗騒音は18.3dBAであり、騒音を付加しない条件におけるSN比は、音声レベルが65dBAの場合は+46.7dB, 75dBAの場合は+56.7dBである。

以上の音声レベル2種類、SN比10種類を組み合わせた20音場を実験に用いた。Table 3.10に各音場のパラメータをまとめる。

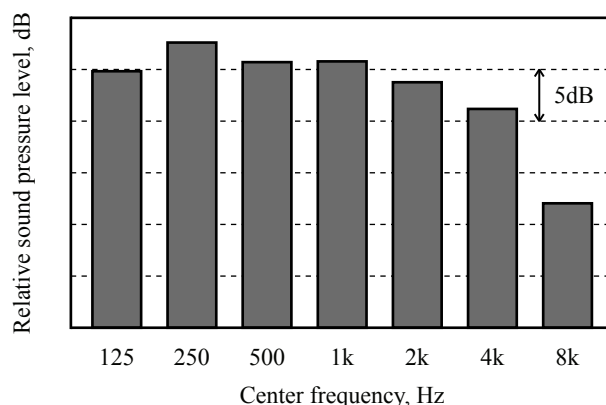


Figure 3.19 Frequency characteristics of additional noise used in experiment B2.

Table 3.10 The parameters of test sound fields used in experiment B2.

Sound field	Speech level, dBA	Speech-to-noise ratio, dB	Noise level, dBA	Sound field	Speech level, dBA	Speech-to-noise ratio, dB	Noise level, dBA
a	65	-5	70	k	75	-5	80
b		0	65	l		0	75
c		10	55	m		10	65
d		15	50	n		15	60
e		20	45	o		20	55
f		25	40	p		25	50
g		30	35	q		30	45
h		35	30	r		35	40
i		40	25	s		40	35
j		(46.7)	18.3 (BGN)	t		(56.7)	18.3 (BGN)

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 使用する200単語を番号の若い順から10個ずつまとめ、計20個の単語群をつくる。
2. 各単語群に含まれる10単語について全20音場をそれぞれ準備する。すなわち、20単語群×20音場の計400の刺激群を作成する。1つの刺激群は、20の互いに異なる単語と、ある1つの音場の組み合わせで構成される。
3. 400の刺激群の中から、単語群が重ならないように20音場を抜き出し、1組の試験用音源を完成させる。
4. 一度用いた刺激群を重複しないように手順3を繰り返し、全刺激群を用いて20組の試験用音源を作成する。

20組の試験用音源を構成する単語群と音場の関係をFigure 3.20に示す。Figure 3.20における数字は、Table 3.9で示した単語番号である。なお、図中の網かけで示した単語群1-10に着目すると、ある1つの単語群がすべての音場において用いられていることがわかる。被験者は、いずれか1つの試験用音源を聴取する。すなわち、10名またはその倍数の人数の被験者によって、すべての試験用音源が聴取されることで、全単語が全音場において聴取されることとなる。これにより、音場間での音韻バランスは保たれる。

1組の試験用音源を、40刺激ずつの5回の試行に分けて、被験者に提示した。試験用音源を5回の試行に分ける際には、各音場から2刺激ずつランダムに振り分けることにより、各試行における音場のバランスを保った。また、被験者には試行毎に刺激の順序をランダムに並び替えて提示した。

	Sound field								
	a	b	c	d	...	q	r	s	t
Test word									
Series of stimuli #1	1-10	11-20	21-30	31-40	...	161-170	171-180	181-190	191-200
Series of stimuli #2	11-20	21-30	31-40	41-50	...	171-180	181-190	191-200	1-10
Series of stimuli #3	21-30	31-40	41-50	51-60	...	181-190	191-200	1-10	11-20
Series of stimuli #4	31-40	41-50	51-60	61-70	...	191-200	1-10	11-20	21-30
⋮					⋮				
Series of stimuli #17	161-170	171-180	181-190	191-200	...	121-130	131-140	141-150	151-160
Series of stimuli #18	171-180	181-190	191-200	1-10	...	131-140	141-150	151-160	161-170
Series of stimuli #19	181-190	191-200	1-10	11-20	...	141-150	151-160	161-170	171-180
Series of stimuli #20	191-200	1-10	11-20	21-30	...	151-160	161-170	171-180	181-190

Figure 3.20 Series of stimuli used in experiment B2. Each series of stimuli consists of 200 combinations of test words and sound fields, and includes different 200 test words.

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 3.21に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。計算機上で、音声刺激と騒音をミックスしてからD/A変換し、1つのスピーカから刺激を提示した。受聴点は、スピーカの正面2mの位置である。受聴点におけるスピーカの周波数特性は、Figure 3.22に示すように、100-10kHzにおいて ± 5 dB以内で平坦である。

F. 実験手順

刺激を11s間隔で被験者に提示した。Figure 3.23に刺激提示の模式図を示す。音声刺激の出だしと騒音の出だしの間隔は135msである。音声刺激の継続時間は単語によって異なり、0.8から1.3sである。騒音の継続時間は5sとし、それぞれ50msの立ち上がりとし、立ち下がりをつけた。騒音の終わりから、次の騒音が提示されるまでの間隔は6sである。1回の試行にかかる時間は約7分である。

回答方法は、実験B1と同様である。事前に実験では用いない20刺激による練習を行った。練習は、実験が可能と判断されるまで繰り返し行った。

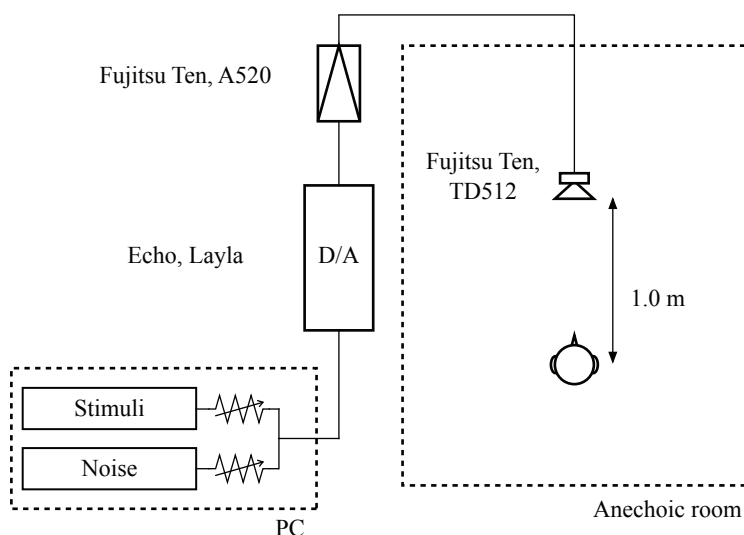


Figure 3.21 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment B2.

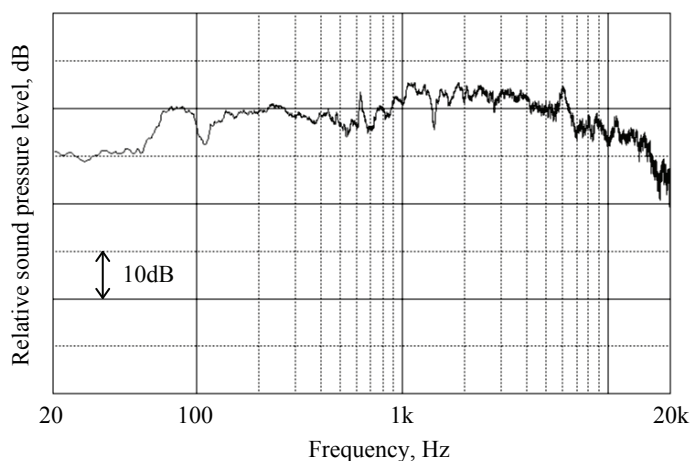


Figure 3.22 Frequency characteristics of loudspeaker used in experiment B2.

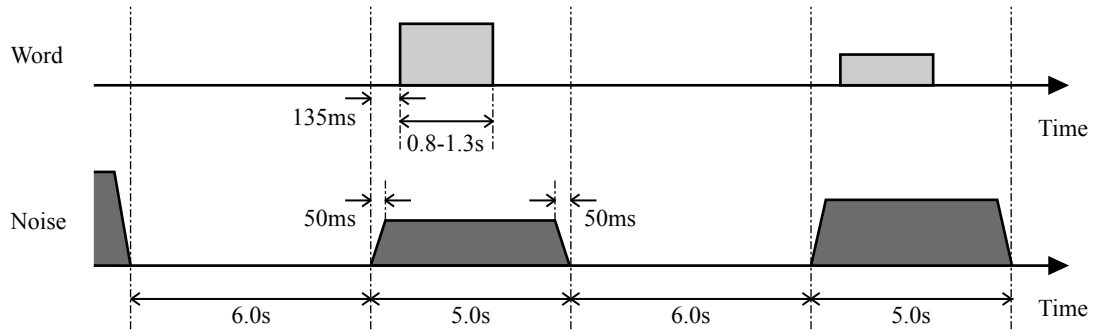


Figure 3.23 Time sequences of presentations of speech signal (word) and additional noise in experiment B2.

3.2.2 結果と考察

高齢者被験者が20名と少数であることから、被験者の聴力レベルによる分類は行わない。聴力レベルの影響については、Cの項で述べる。

A. 単語了解度

若齢者被験者と高齢者被験者のそれぞれについて、全被験者の回答をまとめて、単語を正しく書き取れた割合である単語了解度を算出した。Figure 3.24に結果を示す。音声レベルが65dBAと75dBAの刺激に対する結果を、Fig. 3.24(a)と(b)にそれぞれ示す。

若齢者被験者の単語了解度（○）に対する音声レベルの影響は、SN比が-5dBの条件を除き、ほとんどみられない。SN比が-5dBの条件では、音声レベルが75dBAの刺激に対する単語了解度（54%）は、65dBAの刺激に対する単語了解度（64%）に比べて10%程度低下した。SN比の影響は、SN比が0dB以下の条件でみられ、SN比が+10dB以上の条件では、単語了解度はほぼ100%で一定であった。SN比が0dBの条件における単語了解度は、音声レベルにかかわらず約90%であり、若干の低下がみられた。

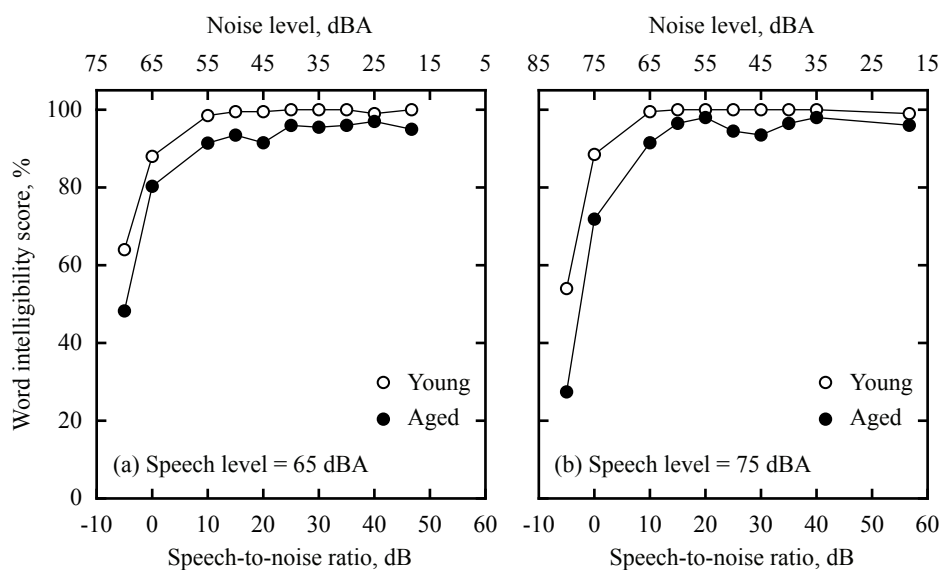


Figure 3.24 Word intelligibility scores as a function of speech-to-noise ratio. Open and closed circles represent word intelligibility scores for the young and the aged, respectively. Panels (a) and (b) represent the results for speech levels of 65 and 75 dBA, respectively.

高齢者被験者の単語理解度（●）に対する音声レベルの影響は、SN比が0dB以下の音場で顕著であり、若齢者の場合と同様に、音声レベルが75dBAの刺激に対する単語理解度がより低下する。SN比が0dBの条件では、音声レベルが65dBAと75dBAの刺激間の単語理解度の差は8%程度（それぞれ80%と72%）であるが、SN比が-5dBの条件では、その差は21%程度（それぞれ48%と27%）まで広がる。SN比の影響は、若齢者と同様に、SN比が10dB以上の条件ではほとんどみられない。

Table 3.11に若齢者被験者と高齢者被験者それぞれについて、音声レベルとSN比を要因とした2要因分散分析を行った結果を示す。なお、以下で行うすべての分散分析において、騒音を付加しない音場のSN比は音声レベルによりSN比が異なるが、これを同じSN比の条件とみなして分析した。若齢者被験者と高齢者被験者の両者において、音声レベルの主効果は有意ではなく、SN比の主効果は有意であった。また、音声レベルとSN比の交互作用は、高齢者のみ有意であった（ $p < 0.01$ ）。ただし、若齢者の場合でも、交互作用のp値は0.07と小さいことから、両者の単語理解度について、音声レベルの単純主効果の検定を行った。その結果、若齢者ではSN比が-5dBの条件（ $p < 0.01$ ）、高齢者ではSN比が0dBの条件（ $p < 0.05$ ）と-5dBの条件（ $p < 0.01$ ）で、音声レベルの単純主効果が有意であった。従って、音声レベルの影響は、SN比が低い条件にのみ有意であるが、高齢者の場合、若齢者よりも高いSN比でも音声レベルは単語理解度に有意な影響を及ぼす。

若齢者と高齢者の単語理解度の差は、両者の単語理解度が一定となるSN比が10dB以上の条件では、5%程度と小さいが、SN比が低くなるにつれてその差は大きくなり、SN比が-5dBの条件では、音声レベルが65dBAの条件で18%、75dBAの条件では27%の差が生じる。

Table 3.12に音声レベルが65dBAと75dBAの条件それぞれについて、被験者の年齢とSN比を要因とした2要因分散分析を行った結果を示す。被験者の年齢とSN比のどちらの主効果も、音声レベルにかかわらず有意であった（ $p < 0.01$ ）。交互作用は、音声レベルが75dBAの条件では有意であった（ $p < 0.01$ ）が、音声レベルが65dBAの条件ではなかった（ $p > 0.05$ ）。しかし、後者のp値は0.08と小さいことから、被験者の年齢の単純主効果の検定を、それぞれの音声レベルにおいて行った。その結果、音声レベルが65dBAの条件ではSN比が+20dB以下、音声レベルが75dBAの条件ではSN比が10dB以下の条件で、それぞれ被験者の年齢の単純主効果が有意であった（ $p < 0.05$ ）。従って、音声レベルを高くすると、暗騒音レベルがある程度高くなっても、若齢者と高齢者の単語理解度の差が生じにくくなると考えられる。ただし、Figure 3.24に示すとおり、SN比が10dB以上の条件における若齢者と高齢者の単語理解度の差はわずかであり、音声レベルが65dBAの条件と75dBAで明確な差はない。SN比が0dBあるいは-5dBと低い音場では、高齢者の単語理解度は若齢者よりも有意に低下し、同じSN比でも音圧レベルが高いほうが、若齢者と高齢者の差は大きくなる。

Table 3.11 The summary of two-way analysis of variance with the factors of speech level and speech-to-noise ratio (SN ratio) for word intelligibility scores in experiment B2. Tables (a) and (b) represent the summaries for the young and the aged, respectively.

(a) Young						(b) Aged					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
S: Subject	19	754.8	39.7			19	11660.5	613.7			
A: Speech level	1	56.3	56.3	0.9	0.35	1	420.9	420.9	3.1	0.10	
A × S	19	1148.8	60.5			19	2605.4	137.1			
B: SN ratio	9	60617.3	6735.3	193.0	< 0.01	9	122544.3	13616.0	127.0	< 0.01	
B × S	171	5967.8	34.9			171	18325.5	107.2			
A × B	9	981.3	109.0	1.8	0.07	9	5268.8	585.4	5.1	< 0.01	
A × B × S	171	10163.8	59.4			171	19576.4	114.5			

Table 3.12 The summary of two-way analysis of variance with the factors of age of subjects (Age) and speech-to-noise ratio (SN ratio) for word intelligibility scores in experiment B2. Tables (a) and (b) represent the summaries for speech levels of 65 and 75 dBA, respectively.

(a) Speech level of 65 dBA						(b) Speech level of 75 dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Age	1	4138.8	4138.8	19.8	< 0.01	1	5982.9	5982.9	27.6	< 0.01	
S: Subject	38	7925.2	208.6			38	8244.2	217.0			
B: SN ratio	9	62183.0	6909.2	85.6	< 0.01	9	120321.3	13369.0	172.9	< 0.01	
A × B	9	1251.3	139.0	1.7	0.08	9	5656.1	628.5	8.1	< 0.01	
B × S	342	27598.4	80.7			342	26435.0	77.3			

B. 聴き取りにくさ

若齢者被験者と高齢者被験者のそれぞれについて、全被験者の回答をまとめて、Morimoroら[6]の方法に従って、聴き取りにくさを求めた。Figure 3.25に結果を示す。音声レベルが65dBAと75dBAの刺激に対する結果を、Figure 3.25(a)と(b)にそれぞれ示す。

若齢者被験者の聴き取りにくさ (○) に対する音声レベルの影響は、単語理解度と同様にほとんどみられない。SN比は0dBと-5dBの条件で、音声レベルが75dBAの刺激に対する聴き取りにくさのほうがやや高いが、音声レベルが65dBAの刺激に対する聴き取りにくさとの差は5%程度と小さい。聴き取りにくさに対するSN比の影響は、単語理解度と比較して大きい。音声レベルにかかわらず、SN比が+20dB以下になると、聴き取りにくさは上昇しはじめ、SN比が-5dBの条件では100%に近い値まで上昇する。

高齢者被験者の聴き取りにくさ (●) に対する音声レベルの影響は、若齢者と同様に小さいが、SN比が+10dBと0dBの条件において、音声レベルが75dBAの刺激に対する聴き取りにくさのほうが10%程度高い。聴き取りにくさに対するSN比の影響も、若齢者と同様に単語理解度と比較して大きい。し

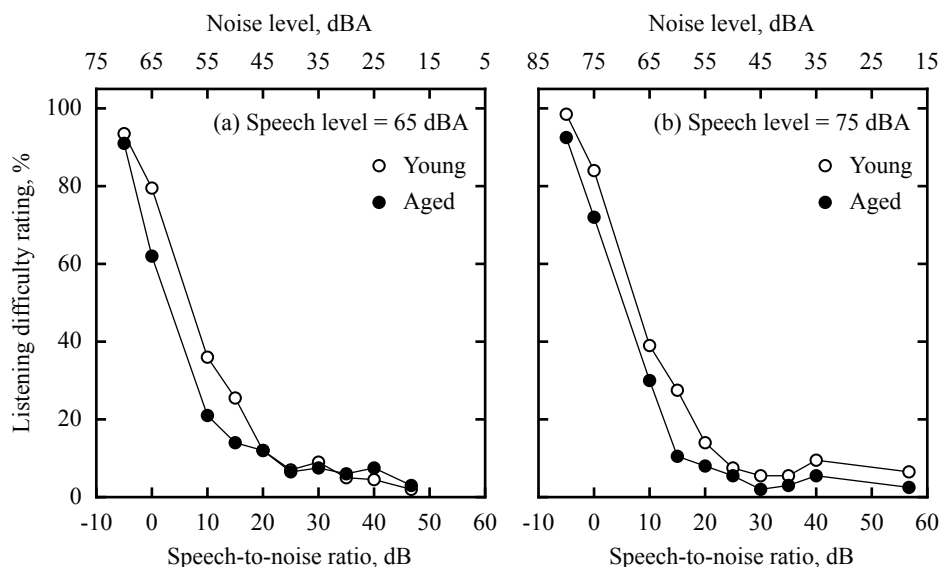


Figure 3.25 Listening difficulty ratings as a function of speech-to-noise ratio. Open and closed circles represent listening difficulty ratings for the young and the aged, respectively. Panels (a) and (b) represent the results for speech levels of 65 and 75 dBA, respectively.

かし、SN比が低くなることによる聴き取りにくさの上昇幅は若齢者と比較して小さく、聴き取りにくさが大きく上昇するのは、SN比が10dB以下の条件である。

Table 3.13に若齢者と高齢者それぞれについて、音声レベルとSN比を要因とした2要因分散分析を行った結果を示す。若齢者の場合、音声レベルの主効果と音声レベルとSN比の交互作用は有意ではなかった ($p>0.05$)。従って、若齢者の聴き取りにくさに対する音声レベルの影響はSN比にかかわらず有意ではない。一方、SN比の主効果は有意であった ($p<0.01$)。高齢者の場合、音声レベルの主効果は有意ではない ($p>0.05$) が、SN比及び音声レベルとSN比の交互作用は有意であった ($p<0.01$)。そこで、音声レベルの単純主効果の検定を行った結果、SN比が10dBと0dBの条件で有意であった ($p<0.01$)。従って、高齢者の聴き取りにくさは、単語理解度と同様にSN比が低い条件では、同じSN比でも音圧レベルが高いほうが有意に高くなる。SN比が-5dBの条件で、音声レベルによる聴き取りにくさの差がみられなかったのは、聴き取りにくさが90%と非常に高い値であるため、両者の差が出にくかったためと考えられる。

若齢者と高齢者の聴き取りにくさを比較すると、音声レベルにかかわらず、高齢者の聴き取りにくさのほうが低く、SN比が低い音場ではその傾向がより明確である。

Table 3.14に音声レベルが65dBAと75dBAの条件それぞれについて、被験者の年齢とSN比を要因とした2要因分散分析を行った結果を示す。被験者の年齢の主効果は、音声レベルにかかわらず有意ではなかった ($p>0.05$)。交互作用は、音声レベルが65dBAの条件では有意であった ($p<0.01$) が、音声レベルが75dBAの条件では有意ではなかった ($p>0.05$)。ここでは、詳細な分析を行うため、被験者の年齢の単純主効果の検定を、それぞれの音声レベルにおいて行った。その結果、音声レベルが

Table 3.13 The summary of two-way analysis of variance with the factors of speech level and speech-to-noise ratio (SN ratio) for listening difficulty ratings in experiment B2. Tables (a) and (b) represent the summaries for the young and the aged, respectively.

(a) Young						(b) Aged					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
S: Subject	19	63872.8	3361.7			19	18912.8	995.4			
A: Speech level	1	552.3	552.3	3.3	0.09	1	2.3	2.3	0.01	0.93	
A × S	19	3212.8	169.1			19	5992.8	315.4			
B: SN ratio	9	408440.3	45382.3	121.8	< 0.01	9	343950.3	38216.7	199.3	< 0.01	
B × S	171	63724.8	372.7			171	32804.8	191.8			
A × B	9	650.3	72.3	0.8	0.58	9	2650.3	294.5	2.9	< 0.01	
A × B × S	171	14634.8	85.6			171	17604.8	103.0			

Table 3.14 The summary of two-way analysis of variance with the factors of age of subjects (Age) and speech-to-noise ratio (SN ratio) for listening difficulty ratings in experiment B2. Tables (a) and (b) represent the summaries for speech levels of 65 and 75 dBA, respectively.

(a) Speech level of 65 dBA						(b) Speech level of 75 dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	df	SSQ	MSQ	F	p	
A: Age	1	1936.0	1936.0	1.6	0.21	1	4356.0	4356.0	3.6	0.06	
S: Subject	38	46248.0	1217.1			38	45743.0	1203.8			
B: SN ratio	9	347339.0	38593.2	204.3	< 0.01	9	401254.0	44583.8	237.7	< 0.01	
A × B	9	5049.0	561.0	3.0	< 0.01	9	2049.0	227.7	1.2	0.29	
B × S	342	64612.0	188.9			342	64157.0	187.6			

65dBAの条件ではSN比が+15dB ($p<0.05$) , +10dB ($p<0.01$) , 0dBの条件 ($p<0.01$) , 音声レベルが75dBAの条件ではSN比が+15dB ($p<0.01$) と0dB ($p<0.05$) の条件で、それぞれ被験者の年齢の単純主効果が有意であった。従って、SN比が+20dB以上であれば、若齢者と高齢者の聴き取りにくさには有意な差は生じない。また、SN比が+15dBから0dBの範囲では、両者の聴き取りにくさの間に有意な差が生じ、高齢者の聴き取りにくさのほうが低くなる。SN比が-5dBの条件で両者の聴き取りにくさに差が生じないのは、聴き取りにくさが非常に高くなるためだと考えられる。

SN比が低い条件において、若齢者の聴き取りにくさよりも高齢者の聴き取りにくさが低いという結果は、聴き取りにくさが単語了解度だけでは決まらないことが原因だと考えられる。Morimotoら[6]の実験、Kobayashiら[88]の実験、本研究の実験B1のいずれにおいても、単語了解度が最大に達して変化しない音場の範囲において聴き取りにくさは変化する。実験B2の結果においても、Fig. 3.24に示すように、SN比が+10から+15dBの条件では、若齢者と高齢者の両者の単語了解度は最大に達しているが、両者の聴き取りにくさはそのSN比の範囲において変化している。これは、「単語は聴き取れるが、聴き取りにくいと感じる」という範囲が存在することを示している。しかし、実験B2の結果では、その範囲におけるSN比の低下に対する聴き取りにくさの上昇幅は、高齢者は若齢者よりも小さく、その影響で、高齢者と若齢者の聴き取りにくさに有意差が生じると考えられる。騒音付加音場において、「単語は聴き取れるが、聴き取りにくいと感じる」原因として、騒音に対するアノイアンスが挙げられる。高齢者の騒音のアノイアンスに対する感度が、若齢者よりも低いとすれば、本実験の結果を説明できる。高齢者の騒音のアノイアンスに対する感度が低い原因は、1) リクルートメント効果を考慮すると一概にはいえないが、聴力レベルの上昇により騒音のラウドネスが若齢者よりも小さく聴こえること、2) 聴き取りにくさの評価構造が若齢者と異なり、音声进行正しく聴き取れたかどうか (= 単語了解度) が評価の大きな割合を占め、アノイアンスを含む他の要因が評価に及ぼす影響が小さいことであると推察される。また、実験B1で検討した残響音付加音場では、このような聴き取りにくさの逆転は起こらないことは、高齢者が残響音と騒音に対して感じるアノイアンスに違いがあることを示唆する。

C. 聴力レベルの影響

高齢者被験者の2kHzと4kHzの聴力レベル (HL_{2k-4k}) を基に、10dBHL刻みで被験者を分類し、その分類ごとに単語了解度を算出した結果をFigure 3.26に示す。音声レベルが65dBAと75dBAの刺激に対する結果を、Figure 3.26(a)と(b)にそれぞれ示す。なお、 HL_{2k-4k} が50dBHL以上の被験者が1名いたが、その分類の単語了解度は省略した。音声レベルとSN比にかかわらず、 HL_{2k-4k} によって単語了解度はばらつくが、 HL_{2k-4k} の上昇によって単語了解度が低下するという傾向はみられない。なお、他の周波数における聴力レベルで分類した場合でも、同様の傾向がみられた。実験Aの結果では、騒音付加音場においても高周波数の聴力レベルと単語了解度の間にはやや相関がみられ (Table 2.8参照) , 本実験の結果と異なる。実験A及び実験B1の実験条件と、実験B2の実験条件で異なるのは、(1) 親密度が若齢者と高齢者の両者にとって最高である単語を抽出して使用したこと、(2) 被験者数及び単語了解度の算出に用いた回答数が少ないことの2点が挙げられる。(1)の違いについては、心的辞書の参照を行いやすくなることによって欠損した情報を補完しやすくなるため、聴力レベルの影響は出にくくなることはあり得る。また、第2章で述べたように、聴力レベルが単語了解度に及ぼす影響は個人差が大きいいため、個人の単語了解度と聴力レベルの相関はそれほど高くない。従って、(2)の違いについても、聴力レベルが単語了解度に及ぼす影響が明確にあらわれない原因となり得る。

単語理解度と同様にして、 HL_{2k-4k} を基にした分類ごとに聴き取りにくさを算出した結果を、Figure 3.27に示す。音声レベルが65dBAと75dBAの刺激に対する結果を、Figure 3.27(a)と(b)にそれぞれ示す。 HL_{2k-4k} が10から19dBHLの分類の聴き取りにくさ(○)は、SN比が+10dB, 0dBの条件において、音声レベルにかかわらず、20から29dBHL(●)及び30から39dBHL(△)の聴き取りにくさよりも、値が低い傾向がみられる。しかし、 HL_{2k-4k} が高いほど聴き取りにくさも高くなるという明確な傾向はみられない。高齢者の聴き取りにくさの評価が、単語理解度に大きく依存すると考えれば、聴き取りにくさに対する聴力レベルの影響が明確ではなかった原因は、単語理解度の場合と同様に、親密度が最も高い単語を用いた影響と、被験者数及びサンプル数が少ないことだと考えられる。

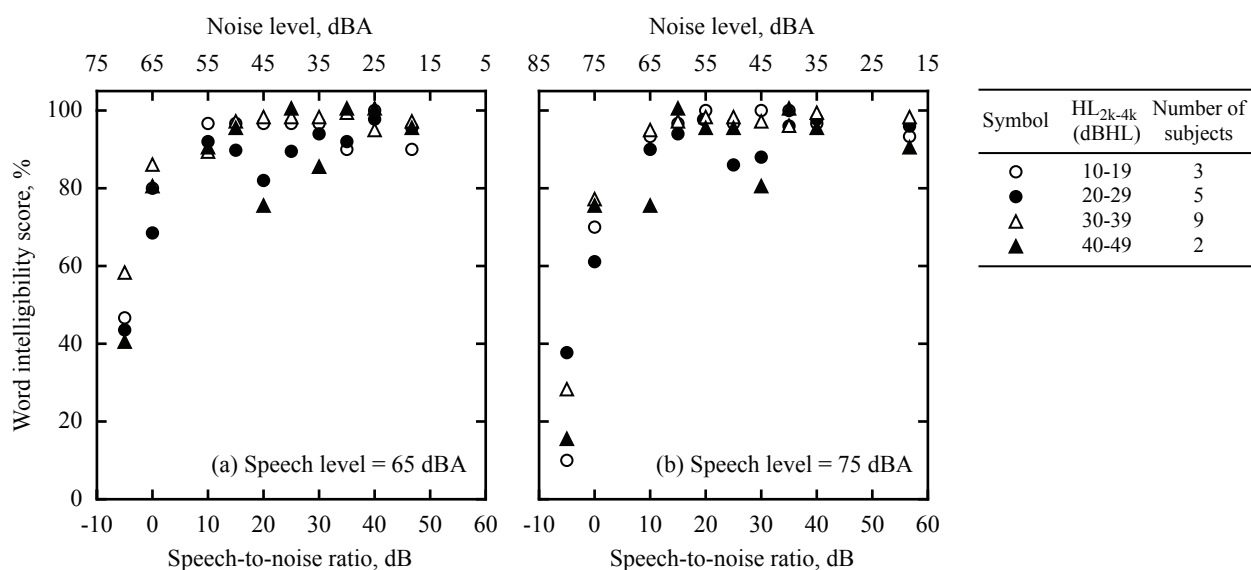


Figure 3.26 Word intelligibility scores for each group of aged subjects. The groups of aged subjects are classified according to the average of hearing levels at 2k and 4k Hz (HL_{2k-4k}) in 10 dBHL steps. Different symbols represent different groups of aged subjects.

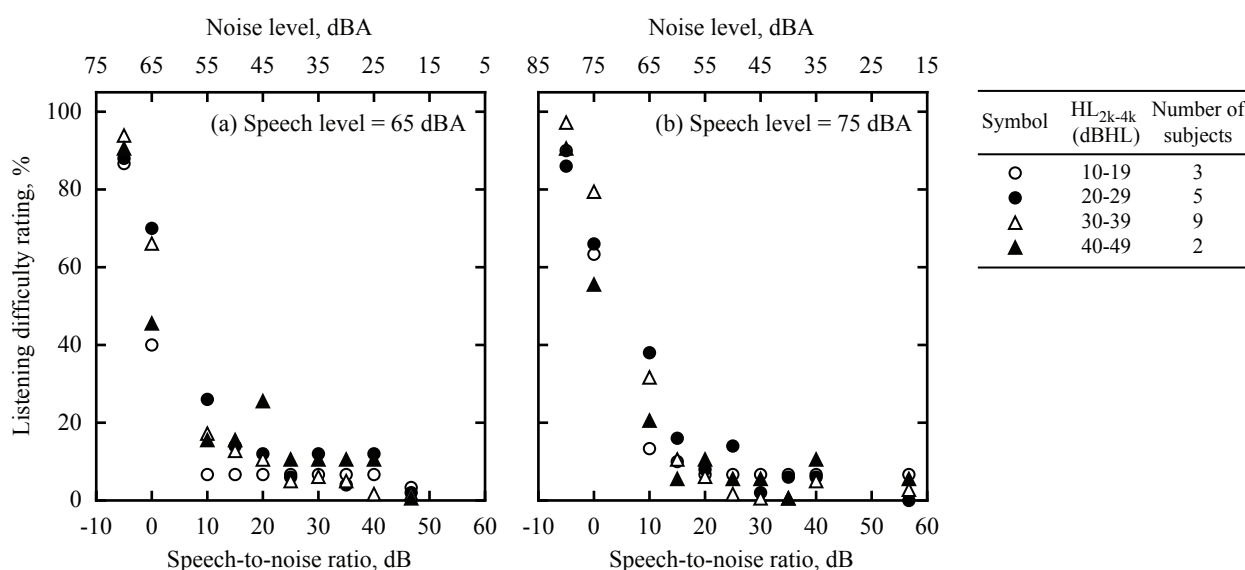


Figure 3.27 Listening difficulty ratings for each group of aged subjects. The groups of aged subjects are classified according to the average of hearing levels at 2k and 4k Hz (HL_{2k-4k}) in 10 dBHL steps. Different symbols represent different groups of aged subjects.

3.2.3 まとめ

騒音付加音場における加齢による聴力損失、SN比、音声レベルが、聴き取りにくさに及ぼす影響について、単語了解度と比較することにより検討した。若齢者と高齢者を被験者とした聴感実験より以下を明らかにした。

- (1) 高齢者の聴き取りにくさは、若齢者と同様にSN比が低くなると上昇する。
- (2) 音声レベルが65dBAと75dBAの刺激に対する単語了解度と聴き取りにくさは、SN比が+10dBから0dBの範囲で高齢者の場合のみ有意であり、音声レベルが65dBAの刺激よりも75dBAの刺激のほうが聴き取りにくさが高い。
- (3) 若齢者と高齢者の聴き取りにくさの差は、SN比が+15dBから0dBの範囲で有意であり、残響音付加音場とは逆に高齢者の聴き取りにくさのほうが低い。この結果は、若齢者と高齢者の聴き取りにくさの評価構造が異なることを示唆している。
- (4) 本実験の結果では、聴力レベルと騒音付加音場における高齢者の単語了解度及び聴き取りにくさの間に対応はみられなかった。

3.3 結論

3章では、加齢による聴力損失が聴き取りにくさに及ぼす影響を、残響音付加音場と騒音付加音場において検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 高齢者の聴き取りにくさは、若齢者と同様に残響音と騒音の妨害により上昇する。従って、高齢者を被験者とした場合でも、聴き取りくさを用いて音声伝送性能を評価できる。
- (2) 若齢者と高齢者の聴き取りにくさの差は、残響音付加音場と騒音付加音場で傾向が異なる。残響音付加音場では、音場にかかわらず高齢者の聴き取りにくさは若齢者の聴き取りにくさよりも高いが、騒音付加音場では、SN比が0から+15dBの範囲において、逆に高齢者の聴き取りにくさは若齢者の聴き取りにくさよりも低い。この違いは、聴き取りにくさの評価構造のうち、単語了解度によらない部分の影響が、若齢者と高齢者、あるいは残響音付加音場と騒音付加音場とで異なることが原因と推察される。
- (3) 残響音付加音場における単語了解度及び聴き取りにくさは、2kHzと4kHzの聴力レベルの影響を大きく受ける。騒音付加音場における単語了解度及び聴き取りにくさと聴力レベルの対応はみられなかったが、少なくとも単語了解度では、既往の研究や実験Aにより聴力レベルとの対応が確認されているため、この結果は試験用音声の親密度が高かったこと、あるいは被験者数が少なかったことが原因として考えられる。
- (4) 残響音付加音場における単語了解度及び聴き取りにくさは、若齢者の単語了解度及び聴き取りにくさと、2kHzと4kHzの聴力レベルの平均値を説明変数とした重回帰式で予測できる。

第4章 聴き取りにくさと音響物理指標の関係

音声コミュニケーションが想定される室の音響設計では、必要とされる音声伝送性能を達成できるように、室容積の調整や吸音面及び反射面の配置を行う。このためには、まず音声伝送性能の良さ／悪さの定量化、すなわち音声伝送性能の評価が必要となる。音声伝送性能は、音声情報をどれだけ劣化させずに相手に伝えることができるかを示す性能であるため、その最終的な評価は人間によって判断される主観量で表される。音声伝送性能の主観評価法としてMorimotoら[6]が提案した「聴き取りにくさ」を用いれば、実在する音場の範囲において、単語了解度よりも感度よく音声伝送性能を評価できることは既に述べた。しかし、「聴き取りにくさ」を求めるためには聴感実験を行う必要があり、時間とコストがかかる。従って、より簡便に測定または推算できる音場の物理量で音声伝送性能が評価できることが望ましい。

物理量を用いて評価するためには、物理量と音声伝送性能を評価できる主観評価指標の関係を明らかにし、それらを相互変換する関係式を導く必要がある。音声伝送性能を評価する物理量として、speech transmission index (STI)[36] やU値[42-44] が提案されており、単音節や単語の同定率と高い相関があることが示されている。しかし、それらの試験用音声は実際に即したものではないため、その同定率による音声伝送性能の評価が持つ意味が不明瞭である。Satoら[39]は「聴き取りにくさ」とU値の関係について報告しているが、実験で用いられた残響音の種類が多くないため、より多様な時間構造や周波数特性を持つ実音場の残響音に適用できるかどうかは明らかでない。本章では、実音場で測定されたインパルス応答を用いた聴感実験により、既往の室内音響の物理指標と「聴き取りにくさ」の関係について明らかにする。

4.1 実験C1：残響音付加音場における検討

4.1.1 実験方法

A. 被験者

被験者として学生55名を用いた。全ての被験者に対し簡易聴力検査を行った。聴力検査はオーディオメータを用いて行い、125-8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。全ての被験者は、全周波数において聴力レベルが15dBHL以下であり、正常な聴力を持つことを確認した。

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、若齢者と高齢者の両者にとって親密度が高い100語を抽出して用いた。Table 4.1に実験に用いた単語を示す。Table 4.1に示した単語の前の番号は、試験用音源作成の

Table 4.1 Test words used in the experiment C1.

1	ギンコウ	21	ゼイコミ	41	ニホンシュ	61	ケツロン	81	スキヤキ
2	シアワセ	22	キュウジツ	42	ライネン	62	トウゼン	82	イザカヤ
3	モクテキ	23	ヨロコビ	43	ドウブツ	63	レイトウ	83	マエムキ
4	ヒルメシ	24	ジュンスイ	44	カラアゲ	64	ハントシ	84	アジツケ
5	ニンジン	25	ワカモノ	45	アサメシ	65	イチニチ	85	ナツモノ
6	ソウダン	26	ユウガタ	46	セイジカ	66	ネンマツ	86	ドンブリ
7	ユウジン	27	ブタニク	47	シンユウ	67	ニュウヨク	87	ハジマリ
8	ケイサン	28	コウフク	48	カイフク	68	ニンシキ	88	シハライ
9	オヤスミ	29	ツケモノ	49	ゴチソウ	69	ソノママ	89	チチオヤ
10	ケンキュウ	30	レイボウ	50	サクヒン	70	オヤユビ	90	キンキュウ
11	バングミ	31	テキトウ	51	ヒツヨウ	71	オハナシ	91	コクドウ
12	ネブソク	32	ケイサツ	52	ナイヨウ	72	ギャクテン	92	ウメボシ
13	ヨウフク	33	ハハオヤ	53	ロウジン	73	トシンタ	93	ケンチク
14	セキニン	34	ナガソデ	54	ゼンシン	74	ジンカク	94	ヤキソバ
15	スイドウ	35	ゲンジツ	55	ヘイジツ	75	ゼイキン	95	マンブク
16	ジツゲン	36	トモダチ	56	ヒダリテ	76	ネサガリ	96	ダイキチ
17	ワリビキ	37	イタズラ	57	キュウケイ	77	セツヤク	97	オメダタ
18	レンアイ	38	ロクガツ	58	ベツベツ	78	ケイゾク	98	シュクフク
19	ユウビン	39	スイミン	59	コイビト	79	ヤスウリ	99	ミギウデ
20	ニホンゴ	40	チカテツ	60	ホンモノ	80	ガンタン	100	ドクリツ

際に作業を円滑に行うために便宜上用いた単語番号である。単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において女声で録音されたものを用いた。

C. 実験音場

インパルス応答を単語に畳み込むことにより、残響音を付加した刺激を作成した。インパルス応答は、日本建築学会音声伝送品質研究SWGによるインパルス応答データベース[114]に収録されているものを用いた。このデータベースには、実音場で測定された966種類のインパルス応答が収録されている。以下の手順で、96種類のインパルス応答を抽出及び作成した。

1. インパルス応答そのものを聴取し、聴感実験への使用に対してSN比が十分であると感じられるインパルス応答を抽出した。その結果、229種類のインパルス応答を得た。
2. 実際に存在する音場を網羅し、且つ順序効果の影響を相殺するために、STIが0.3から1.0までのインパルス応答を均等に実験音場に用いることとした。
3. 1で抽出した229種類のインパルス応答のSTIを算出し、その分布を0.05刻みで求めたところ、STIは0.4から0.7の範囲に集中した。
4. 収録数が少ないSTIが0.4以下及び0.7以上のインパルス応答を、データベースに収録されているインパルス応答を加工することにより人工的に作成した。STIが0.4以下となるインパルス応答は、別のインパルス応答を畳み込むことにより作成した。STIが0.7以上となるインパルス応答は、インパルス応答の音圧波形を計算機上で指数減衰させることにより作成した。

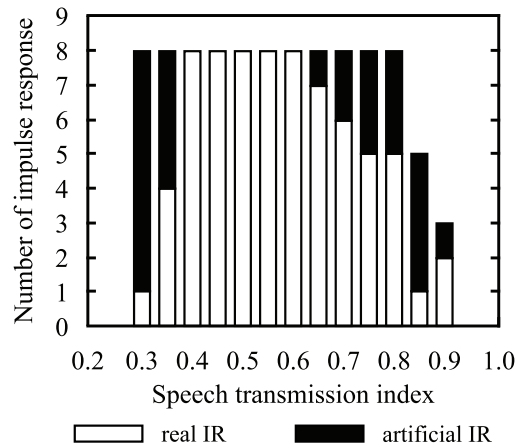


Figure 4.1 Numbers of real and artificial impulse responses used in the experiment C1 as a function of STI in steps of 0.05. Open and closed bars respectively represent frequencies of real and artificial impulse responses.

- STIの分布が0.05刻みで均等になるように、実験音場を決定した。1に示す229種類の実音場で測定されたインパルス応答から71種類を用いた。4に示す人工的に作成したインパルス応答は、STIが0.4以下となるインパルス応答を11種類、STIが0.7以上となるインパルス応答を14種類用いた。以上の合計で96種類のインパルス応答を実験に用いた。

Figure 4.1に実験に用いたインパルス応答のSTIの分布を示す。実験に用いたインパルス応答を測定した物件の用途、室容積、表面積などの詳細については、付録 Aに示す。

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

- 100単語それぞれに96種類のインパルス応答を畳み込み、9600種類の刺激を作成する。これに同じ100単語を無響室録音された状態のまま4回ずつ（400刺激）を加えた、合計10000種類の刺激を用いる。
- 10000種類の刺激の中から、全ての単語が含まれるように100種類の刺激を抜き出し、1組の試験用音源とする。
- 一度用いた刺激を重複しないように、2と同じ手順を繰り返し、全刺激を用いて100組の試験用音源を作成する。

試験用音源を構成する単語と音場の関係をFigure 4.2に模式的に示す。100種類の音場に対応する単語をTable 4.1で示した単語番号で表している。また、網かけで示した単語番号1をみればわかるように、100組の試験用音源が全て聴取されることで、全単語が全音場において聴取される。このことにより、音場間の音韻バランスは保たれる。

1組の試験用音源を50刺激ずつ2回に分けて被験者に提示した。各回の50刺激のうち、最初の2つの刺激は、文脈効果を低減させる[117]ために2種類の基準刺激、すなわちインパルス応答を畳み込んでいない刺激と最もSTIが低い刺激の2つとした。残りの刺激はランダムに提示した。1人の被験者に対し、5組の試験用音源を提示した。従って、20人の被験者によって100組全ての試験用音源が聴取されることになる。

	Sound field										
	1	2	3	4	5	...	96	97	98	99	100
	Test word										
Series of stimuli #1	1	2	3	4	5	...	96	97	98	99	100
Series of stimuli #2	2	3	4	5	6	...	97	98	99	100	1
Series of stimuli #3	3	4	5	6	7	...	98	99	100	1	2
Series of stimuli #4	4	5	6	7	8	...	99	100	1	2	3
Series of stimuli #5	5	6	7	8	9	...	100	1	2	3	4
⋮	⋮										
Series of stimuli #96	96	97	98	99	100	...	91	92	93	94	95
Series of stimuli #97	97	98	99	100	1	...	92	93	94	95	96
Series of stimuli #98	98	99	100	1	2	...	93	94	95	96	97
Series of stimuli #99	99	100	1	2	3	...	94	95	96	97	98
Series of stimuli #100	100	1	2	3	4	...	95	96	97	98	99

Figure 4.2 Series of stimuli used in the experiment C1. A series of stimuli consists of 100 combinations of test words and sound fields. Each series of stimuli includes different 100 test words. Each test word will be presented in all sound fields when all series of stimuli are presented.

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 4.3に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。刺激は、被験者の正面1.5mに位置した1つのスピーカから提示した。実験に用いたスピーカの受聴点における周波数特性をFigure 4.4に示す。100~10kHzにおいて ± 5 dB以内で平坦である。

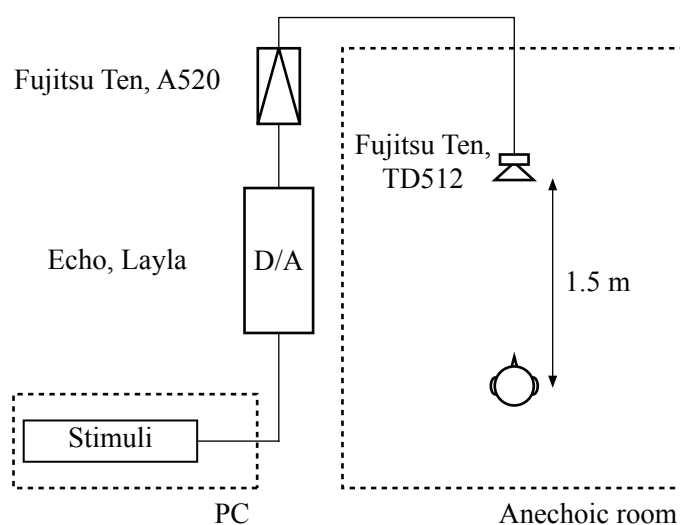


Figure 4.3 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in the experiment C1.

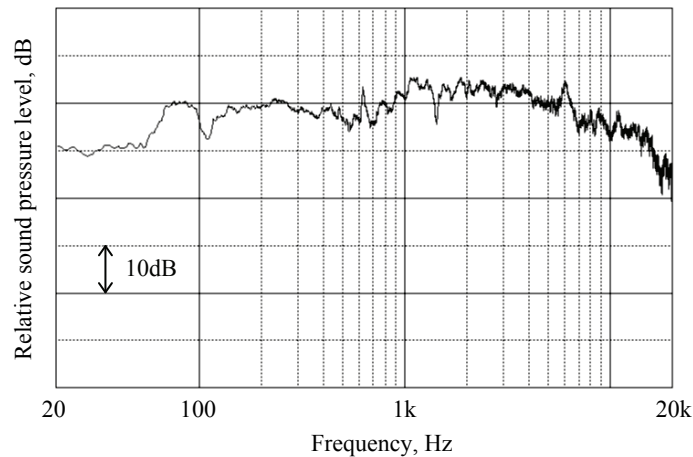


Figure 4.4 Frequency characteristic of loudspeaker used in experiments from C1 to C3 at listening point.

F. 実験手順

刺激を10秒間隔で被験者に提示した。刺激の提示レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計（小野測器，LA-5110）を用いて測定した。騒音計の周波数補正回路はA特性，動特性はslowとし，ピークレベルが 65 ± 1.5 dBAとなるよう調整した。1回の試行，つまり50刺激を聴取するのにかかる時間は約8分である。

被験者には回答用紙をはさんだ野帳を持たせ，無響室に頭を固定せずに座らせた。無響室の照明はつけたままにし，回答の記入に必要十分な明るさを与えた。「聴き取りにくさ」の回答方法は，実験Bと同様に，Morimotoら[6]の方法に従った。被験者には，提示された刺激をカタカナで聞こえたとおりに書かせると同時に，その刺激の聴き取りにくさをTable 4.2の4段階で判断させ，数字で記入させた。事前に全ての被験者に対し20刺激による練習を行い，全被験者が刺激の提示間隔内に回答を記入できることを確認した。

Table 4.2 Categories of listening difficulty[6].

1	聴き取りにくくはない	(Not difficult)
2	やや 聴き取りにくい	(A little difficult)
3	かなり 聴き取りにくい	(Fairly difficult)
4	非常に 聴き取りにくい	(Extremely difficult)

4.1.2 物理指標の算出と物理指標間の相関分析

4.1.1-Cで述べたインパルス応答について，以下の物理指標を算出した。

- STI
- D_{50}
- C_{50}
- 時間重心 (t_s)
- Early decay time (EDT)
- 残響時間 (RT)

STIを除く物理指標は、250Hzから8kHzを中心周波数とするオクターブバンドパスフィルタ、500Hz及び1kHzの2オクターブ幅のバンドパスフィルタ、A特性フィルタをそれぞれ通過させたインパルス応答について求めた。バンドパスフィルタの遮断特性は-48dB/Oct.である。フィルタリングは計算機上で行った。それぞれの物理指標の算出方法は付録Bに示す。

Table 4.3にA特性フィルタを通したインパルス応答から算出した物理指標及びSTIの相関係数行列を示す。D₅₀とC₅₀、EDTとRTのそれぞれの間の相関は0.98と非常に高い。また、この2群の間の相関は-0.75~-0.79と比較的低い。これは、前者はインパルス応答の初期部分への音エネルギーの集中度を示し、後者はインパルス応答の後期部分の音エネルギーの時間減衰速度を示すため、特に直接音が卓越し、インパルス応答の初期部分への音エネルギーの集中が大きい音場（一般的には音源と受音点が近い場合）では、両者の差が他の音場に比べて大きくなるためだと考えられる。t_sはどの物理指標とも±0.9程度の高い相関があり、前述した2群の中間的な特徴を持つ物理指標であると考えられる。STIはt_sと同様にどの物理指標とも相関が高いが、t_sと比較すると、D₅₀及びC₅₀との相関が高い。以上の傾向は他のフィルタを通したインパルス応答から各物理指標を求めた場合でも、定性的には同様であった。

STIはインパルス応答のある区間に音エネルギーが集中していれば値が上昇すると考えられるが、その音エネルギーの集中した区間がインパルス応答の初期部分である必要はない。しかし、卓越したエコーや音の集中の無い一般的な空間、すなわち完全拡散音場のように残響音エネルギーが指数減衰するような音場では、音エネルギーはインパルス応答の初期部分に集中する。従って、STIもD₅₀及びC₅₀と同様に、インパルス応答の初期部分における音エネルギーの集中度に依存するため、それらとの相関が高くなると考えられる。また、このことは本実験で用いたインパルス応答に一般的な音場が多く含まれていることを示唆している。

STIについて、D₅₀やC₅₀と比べて、EDTやRTとの相関が高い点については、以下のような説明が考えられる。説明を簡単にするため、直接音と単一の反射音からなる音場を考える。EDTやRTは残響音エネルギーの時間減衰の速度と捉えることができる。従って、反射音の直接音からの遅れ時間が長くなるほど値が大きくなる。一方、STIはmodulation transfer function (MTF)を基にした物理指標であり、その算出にあたり0.63Hzから12.5Hzの14種類の変調周波数に対するMTFをそれぞれ求める。MTFが最小となるのは、反射音の直接音に対する遅れ時間が、変調周期（変調周波数の逆数）の1/2の奇数倍に相当する場合である。遅れ時間が0から変調周期の1/2に相当する範囲では、MTFは遅れ時間に反比例する。最も低い変調周波数である0.63Hzの場合で考えると、変調周期は約1.6秒となるので、反射音の遅れ時間が800msまでの範囲では、遅れ時間が長くなるほどMTFは減少する。この条件に限れば、EDTやRTと遅れ時間の関係と、MTFと遅れ時間の関係はちょうど逆になるため、EDTやRTとMTFの間には、負の相関関係が存在する。D₅₀やC₅₀では、遅れ時間が50ms以降であれば、遅れ時間が長くなっても値は変わらないため、このような相関関係は存在しない。変調周波数が高くなるにつれて、上

Table 4.3 Correlation coefficients between objective measures. Objective measures except STI are calculated from impulse responses passed through A-weighted filter.

	STI	D ₅₀ (A)	C ₅₀ (A)	t _s (A)	EDT(A)	RT(A)
STI	-					
D ₅₀ (A)	0.96	-				
C ₅₀ (A)	0.97	0.98	-			
t _s (A)	-0.90	-0.92	-0.90	-		
EDT(A)	-0.84	-0.75	-0.77	0.89	-	
RT(A)	-0.85	-0.78	-0.79	0.88	0.98	-

述した相関関係が成り立つ範囲は狭くなる（変調周波数が12.5Hzの場合は遅れ時間が0から40msの範囲）が、この関係がSTIとEDT及びRTの相関に寄与していると推察される。

4.1.3 結果と考察

A. 聴き取りにくさと単語理解度の比較

聴き取りにくさと単語理解度を第3章と同様にして求めた。聴き取りにくさと単語理解度の関係をFigure 4.5に示す。文脈効果を低減させるために用いた基準刺激、すなわちインパルス応答を畳み込んでいない刺激と、最もSTIが低いインパルス応答（STI=0.305）を畳み込んだ刺激の聴き取りにくさは、それぞれ1.3%と98%であった。従って、この2つの刺激は十分に基準刺激としての役割を果たしており、本実験の結果の再現性は高いことが期待される。なお、インパルス応答を畳み込んでいない刺激の結果は、Figure 4.5から除いた。

単語理解度は聴き取りにくさが増加するにつれて減少する。しかし、単語理解度の変動幅は27%程度（73%から100%）しかない。一方、聴き取りにくさはほぼフルレンジ（2%から98%）で変動する。この結果は過去の知見[6, 39, 88]や実験Bの結果と一致する。

B. 聴き取りにくさと物理指標の比較

一般に、心理量と物理量の関係は非線形であり、累積正規分布曲線やロジスティック曲線のようなS字カーブになることが多い。Satoら[39]は聴き取りにくさとU値[42-44]の関係を報告しており、その関係がロジスティック曲線でよく説明できるとしている。従って、聴き取りにくさと物理指標の関係も同様にS字カーブで表されると考えられる。本研究では、分析を簡単にするため、以下の仮定に基づいて聴き取りにくさをz値に変換し、直線回帰分析により物理指標との関係を分析した。

Figure 4.6(a)のような音声の聴き取りにくさに対応する心理量Sを考える。ある刺激 R_1 に対する、心理量S上の反応が、平均値 S_1 、標準偏差 σ の正規分布で表せると仮定する（Figure 4.6(b)）。「聴き取りにくい」という心理的なカテゴリと、「聴き取りにくくはない」というカテゴリの境界が、心理量S上のある不変な点（ T_{LD} ）にあるとすると、「聴き取りにくいと感じる割合」である「聴き取りにくさ」（図中LDR）は、Figure 4.6(c)の斜線部の積分で表される。また、任意の刺激に対する心理的な

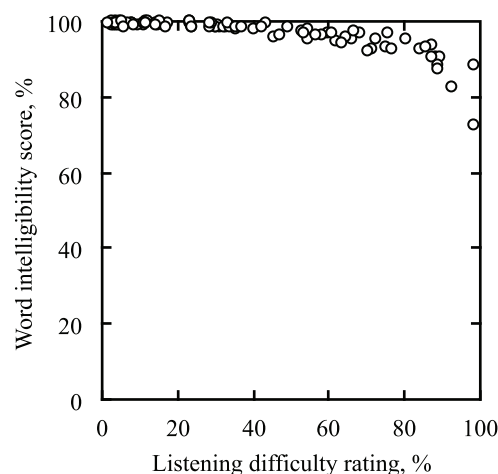


Figure 4.5 The relation between listening difficulty ratings and word intelligibility scores in experiment C.

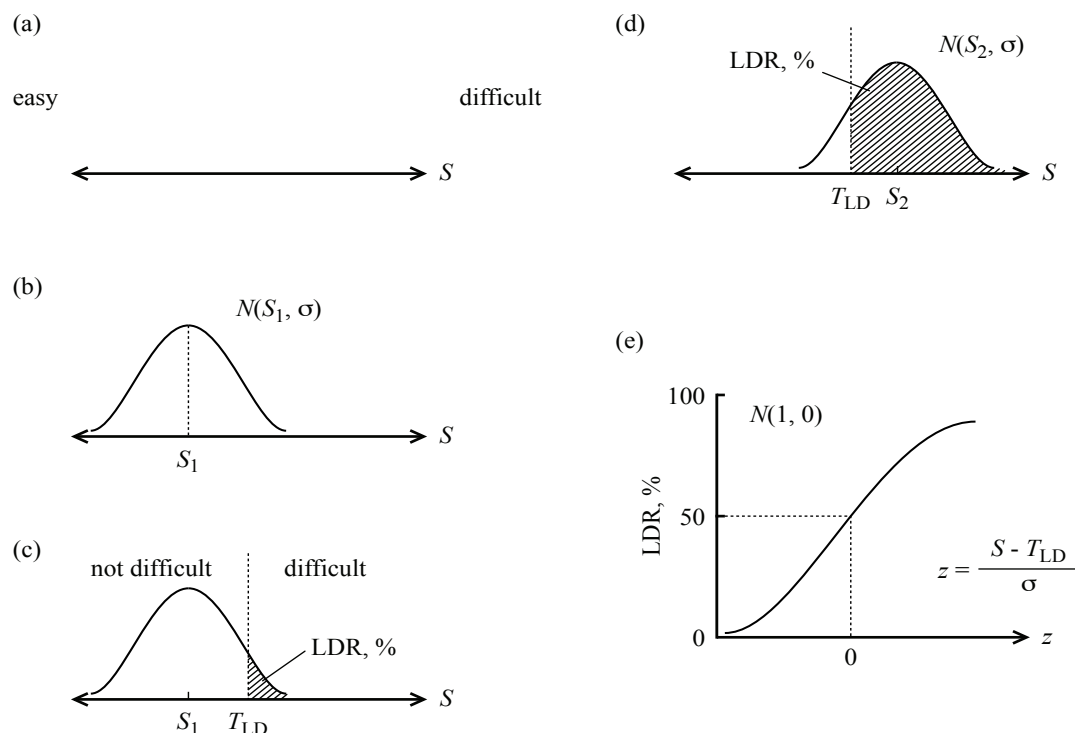


Figure 4.6 The assumption on normal distribution of listening difficulty.

反応分布の標準偏差が、常に σ で一定であると仮定する。この場合、 R_1 よりも聴き取りにくい刺激 R_2 に対する心理的な反応は、Figure 4.6(d) に示すように同じ標準偏差 σ を持つ正規分布で表される。Figure 4.6(c) と (d) より、聴き取りにくさは心理的な反応の平均値である S_1 や S_2 の T_{LD} に対する相対位置によって決定される。そこで、心理量 S を

$$z = \frac{S - T_{LD}}{\sigma} \quad (4.1)$$

のように、 T_{LD} と σ を用いて標準化すると、聴き取りにくさと z の関係は、標準累積正規分布曲線で表される (Figure 4.6(e))。聴き取りにくさと物理指標の関係が累積正規分布曲線で近似できるのであれば、聴き取りにくさの z 値 (Figure 4.6(e) の横軸) と物理指標の関係は線形になる。

聴き取りにくさの z 値と各物理指標の直線回帰分析にあたり、聴き取りにくさが 5% 以下になる音場と 95% 以上になる音場は、実験誤差が z 値に与える影響が大きいため、分析対象から除いた。合計で 16 音場がこの処理により除かれるため、分析対象となる音場は 80 音場である。

相関係数

聴き取りにくさの z 値と各物理指標の相関係数を Table 4.4 に示す。全体的に相関は高く、物理指標の値が幅広く均等に分布している (付録 A 参照) ことを踏まえると、聴き取りにくさと物理指標の関係を累積正規分布曲線で近似することは妥当と考えられる。

聴き取りにくさの z 値と STI の相関が最も高い ($r = -0.97$)。STI の相関係数の絶対値と、それぞれの物理指標の相関係数の絶対値の差について、Fisher の z 変換を行うことにより統計的な差があるかどうかを検定した。その結果、有意水準 5% で STI の相関係数と有意差がみられなかったのは、 D_{50} では

Table 4.4 Correlation coefficients between the z-scores of listening difficulty ratings and each of the objective measures. The objective measures except STI were calculated using the impulse responses (IR) passed through 1/1 octave band filters for each center frequency, a two-octave-band filter that covers octave bands of 500 and 1k Hz, and A-weighted filter.

Objective measure	All-pass IR	Band-pass IR							A-weighted IR
		Center frequency of 1/1 oct. band						Two-oct. -band	
		250	500	1k	2k	4k	8k	500-1k	
STI	-0.97								
D ₅₀		-0.86*	-0.88*	-0.94	-0.93*	-0.92*	-0.88*	-0.93*	-0.94
C ₅₀		-0.85*	-0.88*	-0.93*	-0.92*	-0.93*	-0.88*	-0.93*	-0.94
t _s		0.92*	0.92*	0.94	0.95	0.96	0.92*	0.94	0.95
EDT		0.77*	0.80*	0.81*	0.82*	0.80*	0.72*	0.81*	0.82*
RT		0.72*	0.81*	0.83*	0.83*	0.85*	0.82*	0.82*	0.84*

* statistically different from STI (p<0.05)

1kHzとA特性、C₅₀ではA特性、t_sでは1kHz、2kHz、4kHz、500-1kHzとA特性であった。EDTとRTではどのフィルタを通した場合でも有意差がみられた。

EDTとRTはインパルス応答の後期部分（残響音）の時間減衰速度に着目した物理指標であり、音声聴取に有効とされる初期反射音エネルギーについて評価できない。このことが、聴き取りにくさとの相関を低下させたと考えられる。一方、物理指標間の相関分析より、STI及びt_sは、D₅₀及びC₅₀とEDT及びRTの2群の中間的な特徴を持つが、その2群よりもSTI及びt_sと聴き取りにくさの相関が高くなる傾向がある。この結果は、聴き取りにくさが初期反射音エネルギーと残響音エネルギーの比だけでなく、残響音の時間減衰速度にも影響を受けることを示唆している。ただし、聴き取りにくさとD₅₀またはC₅₀の相関は、STIと比べて大きく低下していないことから、聴き取りにくさの主たる決定要因は初期反射音エネルギーと残響音エネルギーの比であるといえる。

物理指標に関わらず、1kHzから4kHzのオクターブバンドの相関が、他のバンドと比較して相関がやや高い。この傾向はD₅₀またはC₅₀においてより明らかである。音声の1kHzから4kHzのオクターブバンドの成分は、音節明瞭度や単語理解度に対する寄与が高く[56-57]、音声の明瞭性と関係している。また、D₅₀やC₅₀も、初期反射音によって補強される直接音の明瞭性と関係している。従って、聴き取りにくさの主たる決定要因は音声の明瞭性であると考えられる。一般に音場の評価によく用いられる500-1kHzの2オクターブバンドの物理指標と聴き取りにくさのz値の相関は、物理指標に関わらず他のオクターブバンドと比較して高い。これは音声の明瞭性に関係する1kHzの帯域を含んでいるためと考えられる。また、A特性フィルタを通したインパルス応答から求めた物理指標は、STIと統計的に有意差がない相関を示す（EDTとRTを除く）が、これも500-1kHzの場合と同様に、音声の明瞭性に寄与する1kHzから4kHzの帯域がA特性フィルタにより相対的に強調されるためだと考えられる。

散布図、回帰直線、95%予測区間

以下では、STIと、聴き取りにくさのz値との相関がSTIと比較して有意差が無いA特性の物理指標に絞って分析を進める。相関が比較的低かったA特性のEDTとRTについても参考のため同様の分析を行う。Figure 4.7に聴き取りにくさのz値と各物理指標の散布図を示す。また、回帰直線及びその式、95%予測区間も併せて示す。t_s(A)を除き、聴き取りにくさのz値と各物理指標の関係は線形であり、累積正規分布曲線で近似できる。聴き取りにくさのz値とt_s(A)の関係は直線よりもむしろ対数関数で近似

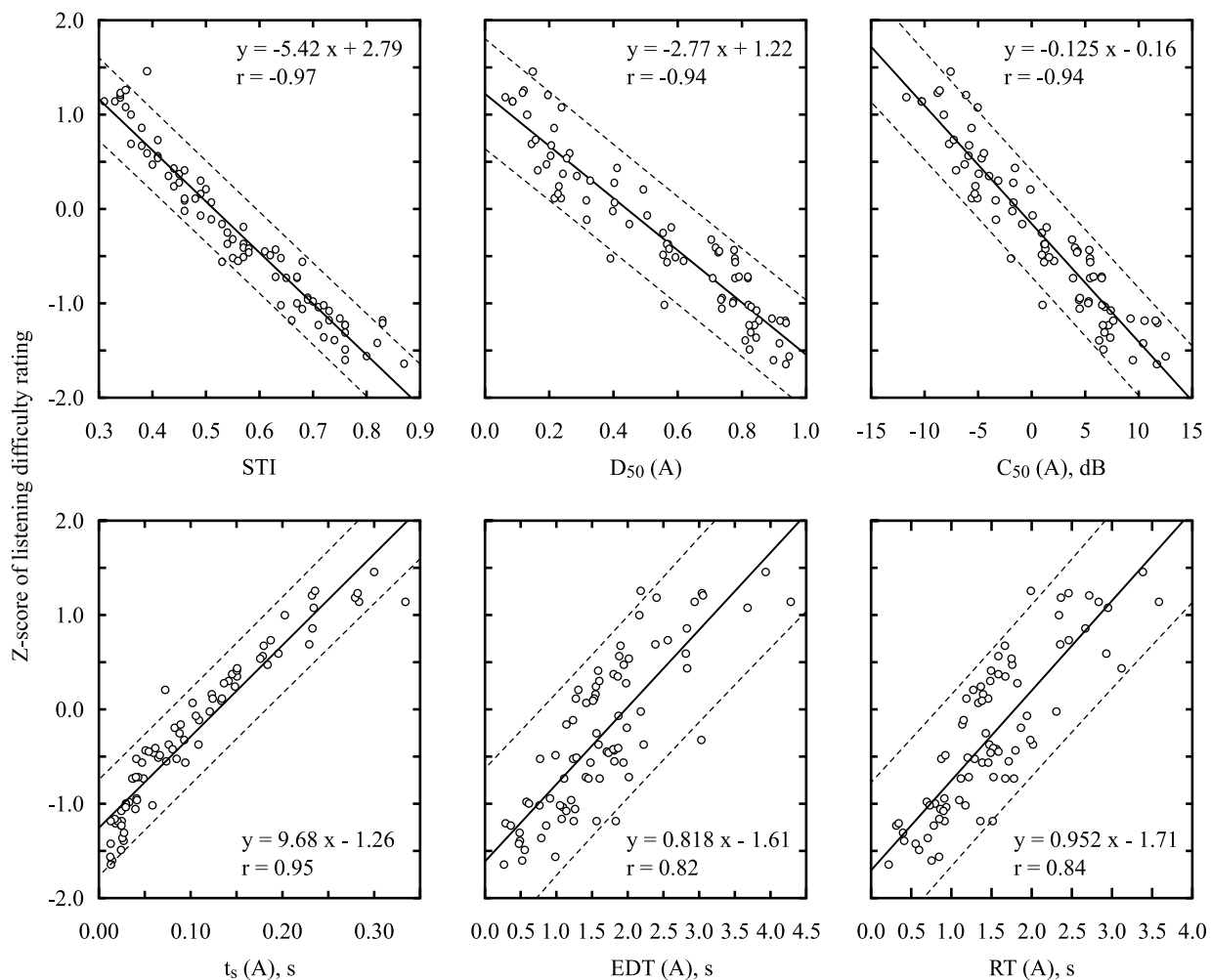


Figure 4.7 Z-score of listening difficulty rating as a function of each of the objective measures. A solid line and dashed lines in each panel respectively represent a linear regression line and 95 % prediction intervals.

すべきだと考えられるが、対数関数で近似しても有意な相関係数の上昇がみられなかったため、ここでは直線回帰のままで分析を進める。

ここで、予測区間のばらつきが、どの程度の影響を及ぼすかを評価するにあたり、弁別閾を基準とすることを考える。Figure 4.6に示した仮定に、さらにもうひとつ「ある刺激に対する心理的連続体における反応分布は、他の刺激に対する反応分布と独立である」という仮定を加える。これにより、サーストンの比較判断の法則のCase V[115]と全く等しい仮定になる。ここで、 S_1 , S_2 , σ をそれぞれ、ある異なる2つの刺激 R_1 , R_2 に対する聴き取りにくさの反応を示す正規分布の平均値と標準偏差（刺激に関わらず等しいと仮定）とする（Figure 4.8(a)）。この仮定のもとでは、刺激 R_1 , R_2 の一对に対する比較判断、ここでは R_1 よりも R_2 が聴き取りにくいと判断される確率の分布は、平均値が $S_2 - S_1$ 、標準偏差が $\sqrt{2}\sigma$ の正規分布となり（Figure 4.8(b)），その確率はFigure 4.8(b)の斜線部の面積となる [115]。一般に、AとBが大きい（小さい）という判断が75%の割合で生じる場合、AとBの心理的な大きさは「弁別」できるといい、この場合のAとBの差を弁別閾とよぶ。上述した仮定と併せて考えると、 $S_2 - S_1$ が比較判断の確率分布の標準偏差の約0.68倍に相当する場合に、 R_1 よりも R_2 が聴き取りにくいと判断される確率が75%となり（Figure 4.8(c)），この2つの刺激の聴き取りにくさを弁別できることになる。ここで、各刺激に対する聴き取りにくさの反応分布の標準偏差（ σ ）を単位とすると、 $0.68 \times \sqrt{2}\sigma$

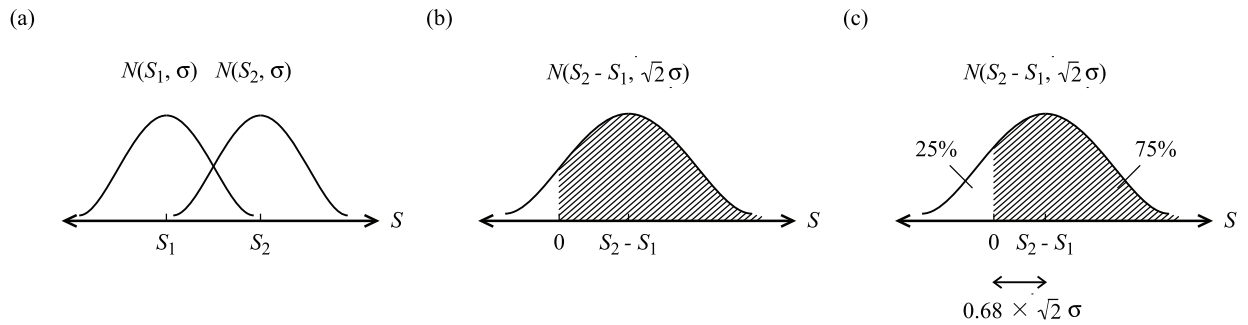


Figure 4.8 Thurstone's Case V model of the law of comparative judgments[115].

$=0.96\sigma$ 程度の心理的な距離があれば、2つの刺激の聴き取りにくさは弁別できる。従って、この 0.96σ が予測区間のばらつきを評価するうえで、ひとつの基準となる。

一方、Bradleyら[116]は話声の明瞭性についてのjndを一对比較法により求めており、その文献に示された回帰式から明瞭性が異なると判断された割合が75%となる C_{50} の差を求めると、約2.2dBとなる。この差をFigure 4.7に示した聴き取りにくさのz値と $C_{50}(A)$ の回帰式から換算すると、聴き取りにくさのz値で約 0.28σ の差に相当する。従って、本実験の結果から推測した弁別閾は、Bradleyによる弁別閾の約3.5倍となる。この差は、本実験に用いた音場の範囲がBradleyの実験(C_{50} が-3.0dB～+9.0dB)に比べて広いことや、実験方法の違い（一对比較法の方が厳密）によると考えられる。また、Bradleyも同じ文献[116]で同様のことを主張しているが、一对比較法による厳密な弁別閾は、実験室内で何度も2つの刺激を聴き比べて初めてわかるような微妙な差であり、実音場において容易に判断できるような差ではない。従って、ここでは実用的な弁別閾として 0.96σ を判断基準とする。

EDTとRTの散布図は、他の物理指標に比べてばらつきが大きく、95%予測区間は約 $\pm 0.90\sigma$ である。この幅は、弁別閾である 0.96σ の約1.9倍の幅に相当するため、EDTとRTによる聴き取りにくさの予測精度は悪いといえる。一方、STIの95%予測区間は約 $\pm 0.43\sigma$ であり、その幅は 0.96σ よりも小さい。従って、Bradleyが測定した精密な弁別閾である 0.28σ の幅に収まるほどの精度はないが、STIによる聴き取りにくさの予測精度は実用的には問題ないと考えられる。 $D_{50}(A)$ と $C_{50}(A)$ の95%予測区間は、それぞれ約 $\pm 0.57\sigma$ と約 $\pm 0.56\sigma$ であり、やや 0.96σ よりも広くなるが、STIに準ずる予測精度がある。 $t_s(A)$ の95%予測区間は約 $\pm 0.51\sigma$ であり、 $D_{50}(A)$ や $C_{50}(A)$ よりも予測精度は高いが、値が0.05s以下になると、回帰直線よりも実測した聴き取りにくさが低くなる傾向があるため、回帰式の使用は0.05s以上の音場に限定すべきである。

4.1.4 まとめ

実測したインパルス応答を用いて作成した96種類の音場における聴き取りにくさと、既存の音響物理指標の関係を、残響音の影響に着目して検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 聴き取りにくさの主たる決定要因は音声の明瞭性であり、特に1kHzから4kHzのオクターブバンドにおける直接音及び初期反射音のエネルギーと残響音エネルギーの比に大きな影響を受ける。ただし、残響音エネルギーの減衰速度も従属的に影響すると考えられる。
- (2) 聴き取りにくさのz値とSTIの相関が最も高く、実用的に問題ない程度の予測精度がある。
- (3) A特性フィルタを通したインパルス応答から求めた D_{50} 、 C_{50} 、 t_s と聴き取りにくさのz値の相関は、STIとの相関と比べて有意差が無く、同等の予測精度がある。

4.2 実験C2：残響音及び騒音付加音場における検討

実験C1では、残響音のみをパラメータとして取り扱ったが、各種交通ターミナルのような暗騒音が大きい場所における音声の聴き取りにくさも予測できることが望ましい。また、残響音と暗騒音の両者が存在する音場における音声の明瞭性を予測する音響物理指標として、STI[36]やU値[42-44]が提案されている。実験C2では、残響音だけでなく、騒音も付加した音場において、聴き取りにくさと音響物理指標の関係を明らかにする。

4.2.1 実験方法

A. 被験者

被験者として、実験C1に参加した学生55名のうち20名を用いた。全ての被験者に対し、簡易聴力検査を行い、全周波数において聴力レベルが15dBHL以下であり、正常な聴力を持つことを確認した。

B. 単語

実験C1と同様である。

C. 実験音場

実験C1と同様にインパルス応答を単語に畳み込むことにより、残響音を付加した音声刺激を作成した。実験C1で用いた96種類のインパルス応答のうち、聴き取りにくさのz値とSTIの回帰直線（Figure 4.7参照）近傍にプロットされるものを14種類用いた。実験に用いたインパルス応答のSTIは、0.3から1.0までほぼ0.05刻みである。

騒音として、Hothスペクトル型[112]の定常騒音を用いた。Figure 4.9に受聴点における騒音の1/1オクターブバンド分析による周波数特性を示す。音声刺激と騒音の提示レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計（小野測器、LA-5110）を用いて測定した。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はslowとした。音声刺激についてはピークレベル、騒音については中央値をそれぞれ測定した。提示レベルの調整は計算機上で波形を縮小して行った。音声刺激の提示レベルは65dBAで固定し、誤差が0.3dBA以下となるように各音声刺激の提示レベルを揃えた。騒音レ

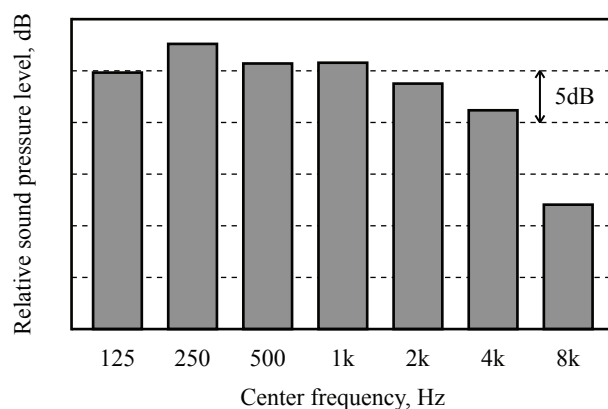


Figure 4.9 Frequency characteristics of additional noise used in the experiment C2.

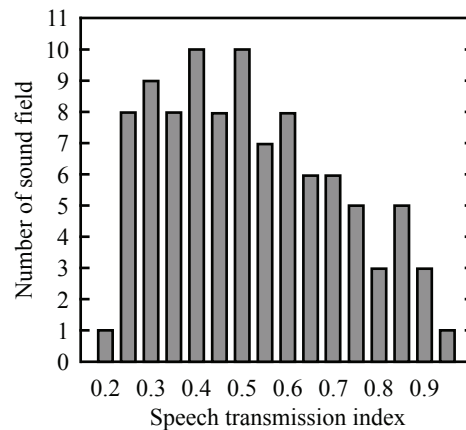


Figure 4.10 Numbers of sound fields used in the experiment C2 as a function of STI in steps of 0.05.

ベルの提示レベルは、35dBAから60dBAまで5dBA刻みとし、これに騒音を付加しない条件を加えた7種類を用いた。

14種類のインパルス応答と7種類の騒音（SN比）を組み合わせた98音場を実験に用いた。Figure 4.10に実験に用いた音場のSTIの分布を示す。実験C2では、聴き取りにくさに対する残響音と騒音の影響をパラメトリックに検討するために、残響音とSN比をそれぞれ14条件と7条件に固定した結果、実験C1と同様にSTIの分布を均等にすることはできなかったが、できるだけ広範囲に分布するようにした。

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 100単語それぞれに14種類のインパルス応答を畳み込み、1400種類の音声刺激を作成する。これらの音声刺激に7種類の騒音を組み合わせ、9800種類の刺激を作成する。さらに、基準刺激として、同じ100単語を残響音と騒音の両者を付加しない状態で2回ずつ（200刺激）加えた、合計10000種類の刺激を用いる。
2. 10000種類の刺激の中から、全ての単語が含まれるように100種類の刺激を抜き出し、1組の試験用音源とする。
3. 一度用いた刺激を重複しないように、2と同じ手順を繰り返し、全刺激を用いて100組の試験用音源を作成する。

試験用音源を構成する単語と音場の関係は実験1と同様である（Figure 4.2参照）。

1組の試験用音源を50刺激ずつ2回に分けて被験者に提示した。各回の50刺激のうち、最初の2つの刺激は、文脈効果を低減させる[117]ために2種類の基準刺激、すなわち残響音と騒音の両者を付加しない刺激と最もSTIが低い刺激の2つとした。残りの刺激はランダムに提示した。1人の被験者に対し、5組の試験用音源を提示した。従って、20人の被験者によって100組全ての試験用音源が聴取されることになる。

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 4.11に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。音声刺激は、騒音と計算機上でミックスし、被験者の正面1.5mに位置した1つのスピーカから提示した。実験に用いたスピーカは実験C1と同じである。

F. 実験手順

刺激を10s間隔で被験者に提示した。Figure 4.12に刺激提示の模式図を示す。音声刺激の出だしと騒音の出だしの間隔は100msである。音声刺激の継続時間はインパルス応答によって異なり、0.8sから4.0sである。騒音の継続時間は5sとし、それぞれ50msの立ち上がりとしち下がりをつけた。騒音の終わりから、次の騒音が提示されるまでの間隔は5sである。1回の試行にかかる時間は約8分である。

回答方法は、実験C1と同様である。事前に全ての被験者に対し20刺激による練習を行い、全被験者が刺激の提示間隔内に回答を記入できることを確認した。

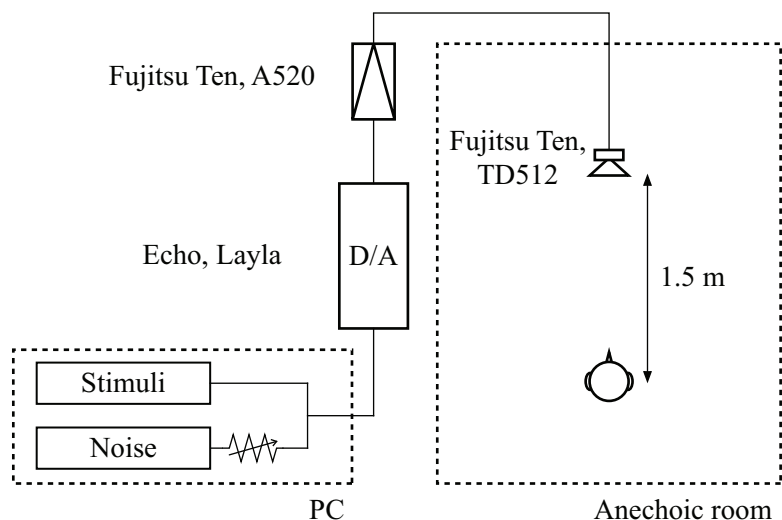


Figure 4.11 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment C2.

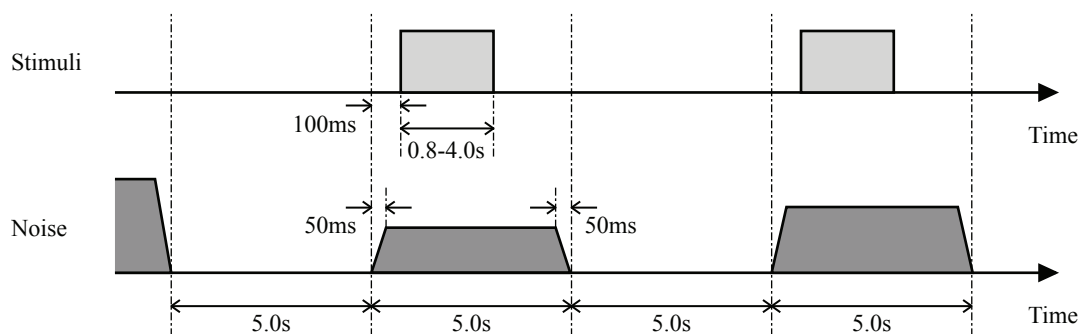


Figure 4.12 Time sequences of presentations of speech stimuli and additional noise in experiment C2.

4.2.2 物理指標の算出

A. Speech transmission index (STI)[36]

STIの算出において、騒音の影響を考慮するためには、1/1オクターブバンド毎のSN比が必要である。まず、実験に用いた100単語を、残響音と騒音の両者を付加せずに切れ目なく再生し、その受聴点における長時間平均スペクトルを125Hzから8kHzまでの7つのオクターブバンドについて求めた。次に、Hothスペクトル型定常騒音の長時間平均スペクトルを同様に求めて、各オクターブバンドレベルにA特性の補正を施して算出したデシベル和が、実験で用いた提示レベル（音声刺激：65dBA，騒音：35から60dBA）となるように、音声刺激と騒音のオクターブバンドレベルをリニアに増減し、それぞれの騒音レベルにおける各バンドのSN比を算出した。騒音を付加しない条件については、実験C1で求めた値をそのまま用いた。

B. U値[42-44]

LochnerとBurger[64]は、直接音からある一定時間内に到達する反射音は明瞭性を高め、それ以降に到達する反射音や暗騒音は明瞭性を害するという考え方に基づき、Useful-detrimental Ratioを、音声の明瞭性を表す物理指標として提案した。Bradley[42-44]はこれを簡略化し、実験C1で取り扱ったC値のように、有効な反射音の積分区間を、ある固定の遅れ時間までとして定め、Useful-detrimental Ratioを求めるU値を提案した。U値の定義式を式4.2に示す。

$$\begin{aligned}
 Useful &= \frac{E_e}{E_e + E_l} \times E_{SL} \\
 Detrimental &= \frac{E_l}{E_e + E_l} \times E_{SL} + E_{BL} \\
 U_{ie} &= 10 \log_{10} \left(\frac{Useful}{Detrimental} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{E_e}{E_e + E_l} \times E_{SL}}{\frac{E_l}{E_e + E_l} \times E_{SL} + E_{BL}} \right), dB
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

ただし、 E_e は初期反射エネルギー、 E_l は後期反射エネルギー、 E_{SL} は音声のエネルギー、 E_{BL} は暗騒音のエネルギーとする。U値の算出にあたって、標準的な周波数領域における帯域制限や重み付け係数は提案されていない。ここでは、実験C1で聴き取りにくさとの相関が高かった1kHz、2kHz、4kHzの1/1オクターブバンド、500-1kHzの2オクターブバンドの帯域、及びA特性の重み付けでU値をそれぞれ求めた。また、U値では有効な反射音エネルギーの積分区間もパラメータとなる。Bradley[42-43]は、50msあるいは80msが単語理解度と相関が高いことを示しているが、Satoら[39]は、聴き取りにくさの場合、初期反射音の時間構造によってより長い積分区間が適当であることを示唆している。ここでは、50ms、80ms、120ms、200msを積分区間としたU値（それぞれ U_{50} 、 U_{80} 、 U_{120} 、 U_{200} と記述する）を検討の対象とした。U値の算出において、暗騒音の影響を考慮するためには、各オクターブバンドの帯域制限またはA特性の重み付けを施した音声刺激と暗騒音のエネルギー比（式(4.2)の真数部分の分母と分子を E_{SL} で除すると、分母に E_{BL}/E_{SL} が残る）が必要である。このエネルギー比はSTIを算出する際に求めたSN比から算出した。

4.2.3 結果と考察

A. 聴き取りにくさと単語了解度の比較

聴き取りにくさと単語了解度を実験C1と同様にして求めた。聴き取りにくさと単語了解度の関係をFigure 4.13に示す。文脈効果を低減させるために用いた基準刺激、すなわち残響音と騒音の両者を付加していない刺激と、最もSTIが低い条件 (STI=0.222) の聴き取りにくさは、それぞれ0%と100%であった。従って、この2つの刺激は十分に基準刺激としての役割を果たしており、本実験の結果の再現性は高いことが期待される。実験C1の結果 (Figure 4.5参照) と比較すると、単語了解度に比べて聴き取りにくさのほうにより幅広い範囲で変化するという点は定性的に一致する。しかし、定量的には、単語了解度が100%から低下しはじめる聴き取りにくさの値が、実験C1では80%付近であるのに対し、実験C2では60%付近と低下しており、違いがみられる。

この結果の説明として以下の3つが考えられる。

- 実験C2の被験者の聴き取りにくさに対する感度が、実験C1の被験者よりも低かった。
- 騒音の付加による音声認識過程の変化によって、単語了解度と聴き取りにくさの関係が変化した。
- 実験C2の基準刺激のSTIが実験C1の基準刺激よりも低いため、全体的に聴き取りにくさに対する感度が低下した。

実験C1で得られた聴き取りにくさについて、被験者全体の結果と、実験C1と実験C2の両方に参加した被験者のみで算出した結果の比較をFigure 4.14に示す。右上がりの対角線近傍に全ての音場がプロットされており、被験者全体から算出した聴き取りにくさと、実験C1と実験C2の両方に参加した被験者の聴き取りにくさはほぼ一致する。従って、実験C2の被験者の聴き取りにくさの感度が特に低いとはいえない。また、実験C1と実験C2は6ヶ月程度の間隔を空けて実施しており、刺激に対する「慣れ」による感度の低下も考えにくい。以上より、説明a)は棄却される。

Figure 4.15は聴き取りにくさと単語了解度の関係について、実験C1 (○) と実験C2 (●) を比較したものである。ただし、聴き取りにくさが40%以上となる音場に注目し、実験C2については、騒音を付加しない音場とSN比が最も高い (+30dB) 音場 (△) と、SN比が低い (+5, +10dB) 音場 (▲) について異なる記号で示した。△と▲を比較すると、▲は左側にプロットされており、同じ単語了解度で

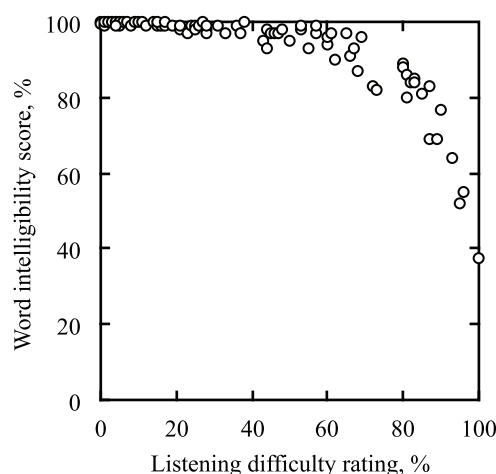


Figure 4.13 The relation between listening difficulty ratings and word intelligibility scores in experiment C2.

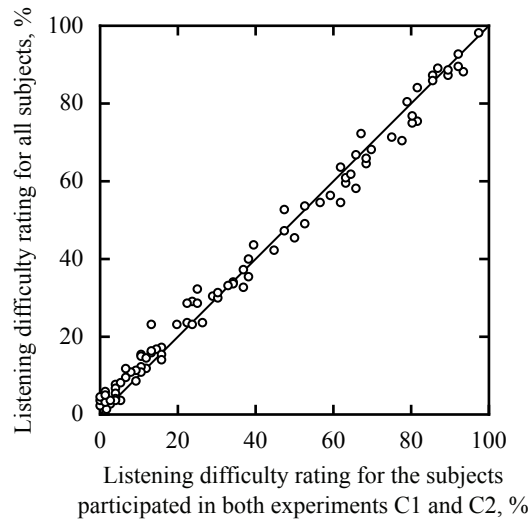


Figure 4.14 The comparison of listening difficulty ratings in the experiment I between those for all subjects and for the subjects participated in both experiments C1 and C2.

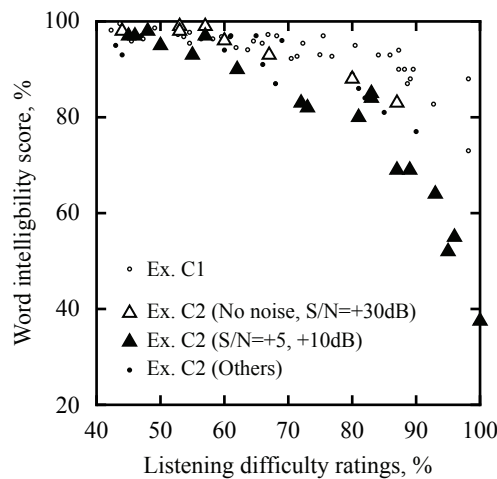


Figure 4.15 The comparison between word intelligibility scores as a function of listening difficulty ratings in the experiment C1 and those in the experiment C2.

も▲のほうが聴き取りにくくないと判断されている。このことは、騒音によって妨害された場合と残響音によって妨害された場合では、両者の単語理解度が等しければ、残響音による妨害のほうが聴き取りにくいと感じることを示唆している。

残響音のみが付加された音場の場合、残響音が単語理解度を上昇させる可能性（試験単語の継続時間が短いため、残響音に注意を向ければ、1回の刺激提示で複数回試験単語を聴くことができる）がある。しかし、騒音が付加されると、残響音がマスクされるため、残響音に注目することによる単語理解度の上昇は生じにくくなる。残響音への注目による聴き取りにくさの低下は無いと仮定すれば、上述したメカニズムにより、同じ単語理解度でも残響音のみが付加された音場のほうがより聴き取りにくいと判断されると考えられる。以上の推論は、説明b)を支持する。

また、△のほうが▲に比べて、実験C1（○）に近い結果となったが、実験C1と比べると、同じ単語理解度でも、△のほうが聴き取りにくさが若干低い傾向がある。この傾向は説明b)では説明できない。裏付けるデータはないものの、この傾向は説明c)によると推察される。

以上の議論をまとめると、説明b)に関しては、単語理解度による音場評価の欠点を指摘するものであり、聴き取りにくさに対する問題にはならない。説明a)及びc)については、聴き取りにくさの再現性に関わる問題である。説明a)については、被験者の違いによる聴き取りにくさの差は無いことを示した。説明c)によって生じる聴き取りにくさの差については、聴き取りにくさを予測する場合に、実験C1と実験C2の結果のどちらを用いるべきかという問題に帰結する。この問題の検討については後述する。

B. 聴き取りにくさとSTIの関係

実験C1と同様に、聴き取りにくさをz値に変換し、物理指標との関係について直線回帰分析を行った。直線回帰分析にあたり、聴き取りにくさが10%以下になる音場と90%以上になる音場は、実験誤差がz値に与える影響が大きいため、分析対象から除いた。合計で35音場がこの処理により除かれるため、分析対象となる音場は63音場である。

Figure 4.16に聴き取りにくさのz値とSTIの関係を散布図で示す。Figure 4.16(a)に相関係数と回帰直線（実線）、及び95%予測区間（破線）を併せて示す。聴き取りにくさのz値とSTIの相関係数は-0.93であり、実験C1と同様に非常に高い相関を示す。聴き取りにくさのz値が0の点における95%予測区間は $\pm 0.52\sigma$ 程度であり、その幅は弁別閾とみなすことができる 0.96σ と同程度である。実験C1と比較すると、聴き取りにくさのz値とSTIの関係はややばらつきが大きい。実験C1と実験C2の違いは騒音の有無であるため、SN比とばらつきの関係に着目する。Figure 4.16(b)にSN比によって記号を変えてプロットした散布図を示す。騒音を付加しない音場とSN比が最も高い音場（図(b), ○）における聴き取りにくさのz値は、STIが同程度のSN比が低い音場（図(b), ●）と比較して低い値をとる傾向が、STIに関わらずみられる。この結果は、特にSN比が低い場合に、STIは騒音が聴き取りにくさに及ぼす影響を小さく見積もること、またはその逆に、SN比が高い場合に残響音の影響を大きく見積もることを示唆している。

この結果の原因を推測すると、STIでは、残響音によるMTFと騒音によるMTFをそれぞれ算出し、その積を2つを統合したMTFとして用いるため、両者の交互作用を考慮していないこと、あるいはマス

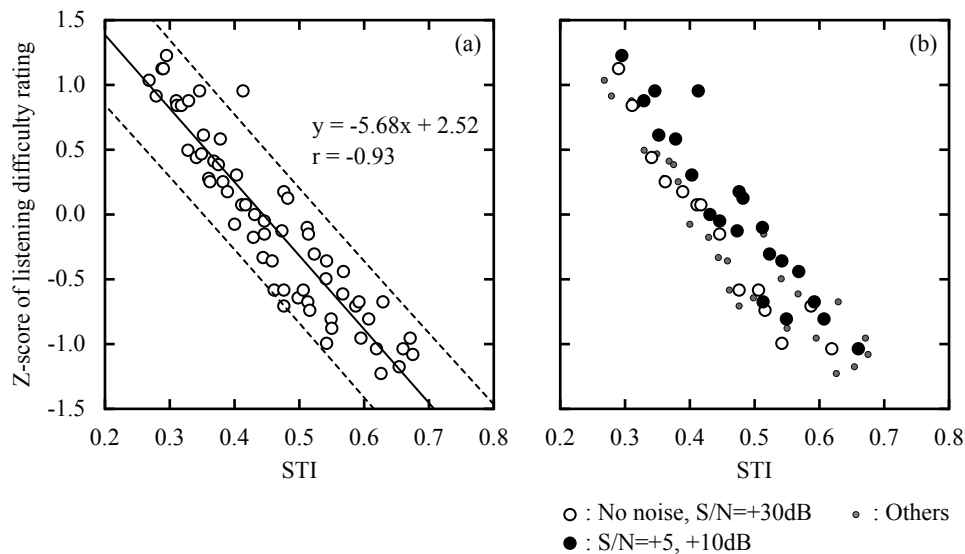


Figure 4.16 Z-score of listening difficulty ratings as a function of STI. A solid line and dashed lines in panel (a) respectively represent a linear regression line and 95 % prediction intervals. Open and closed circles in panel (b) respectively represent sound fields with soft (SNR=+30dB) or no background noise and those with loud (SNR=+5, +10dB) background noise.

キング量と無関係な評価基準，例えばアノイアンスのような騒音に対する評価基準が，聴き取りにくさの評価に含まれるのではないかと考えられる。

C. 聴き取りにくさとU値の関係

Table 4.5に聴き取りにくさのz値とU値の相関係数を示す。STIの場合と同様に，聴き取りにくさが10%以下と90%以上の音場を除いた63音場を分析の対象とした。相関係数は，-0.82から-0.88の範囲に分布し，STIと比べて相関はやや低い。積分区間毎にみると，バンドあるいは重み付けによる相関係数の差は，最大でも0.03程度とあまり変化しないが，4kHzのオクターブバンドにおけるU値の相関は，他のバンドあるいはA特性の相関よりも若干低い。各バンド及びA特性の重み付けにおける積分区間による相関係数の差も，同様に最大で0.03程度であり，顕著な差はみられない。4kHzのオクターブバンド，500-1kHzの2オクターブバンド，及びA特性の重み付けによるU値では，積分区間が長くなるほど相関が高くなる傾向がみられる。

Figure 4.17に，一例としてA特性の重み付けによるU値の散布図を示す。図(a)及び(b)は，積分区間をそれぞれ50ms ($U_{50}(A)$) と200ms ($U_{200}(A)$) として求めた結果である。STIと比較すると，どちらもばらつきが大きく，特に $U_{50}(A)$ ではデータが縦に並んでプロットされており，U値がほぼ同じでも聴き取りにくさが異なる音場が多い。95%予測区間を比較すると，聴き取りにくさのz値が0となる点において， $U_{50}(A)$ では $\pm 0.75\sigma$ ， $U_{200}(A)$ では $\pm 0.69\sigma$ であり， $U_{200}(A)$ のほうが若干狭いものの，両者とも弁別閾 (0.96σ) の約1.5倍の幅である。従って，U値による聴き取りにくさの予測は実用的ではない。

聴き取りにくさのz値とU値の相関が，STIと比較して低い理由について考察する。Figure 4.18は，2つのインパルス応答 (IR-A, IR-B) に着目し，そのインパルス応答を用いて作成した音場における結果を， $U_{50}(A)$ と $U_{200}(A)$ のそれぞれについて抽出したものである。どの組み合わせも7音場ずつデータがプロットされているが，これはIR-AまたはIR-Bと7種類のSN比の組み合わせからなる音場を示す。IR-Aの場合，聴き取りにくさのz値は0.0から1.2の範囲に分布し，SN比の差を評価できているが， $U_{50}(A)$ (○) は，SN比が低い2音場は比較的低い値であるものの，その他の5音場はほぼ同じ値であり，SN比の差が評価できていない。他の3つの組み合わせ，つまり，IR-Aと $U_{200}(A)$ (●)，IR-Bと $U_{50}(A)$ (△)，IR-Bと $U_{200}(A)$ (▲) でも同様の傾向がみられるが，騒音なしの条件におけるU値，すなわちC値が高くなるにつれて，SN比の増加によるU値の増加量は大きくなる。これは，C値が高い，つまり積分区間より遅れ時間が長い反射音のエネルギーが少ない音場では，騒音エネルギーがU値に及

Table 4.5 Correlation coefficients between the z-scores of listening difficulty ratings and various useful-detrimental ratios. Useful-detrimental ratios were calculated for each 1/1 octave band of 1k, 2k, and 4k Hz, and for a two-octave-band that covers octave bands of 500 and 1k Hz, and for the combination of A-weighted impulse responses and speech-to-noise ratios.

U_{xx}	Center frequency of 1/1 oct. band			Two-oct.-band	A-weighted
	1k	2k	4k	500-1k	
U_{50}	-0.86	-0.87	-0.82	-0.84	-0.84
U_{80}	-0.86	-0.88	-0.83	-0.85	-0.86
U_{120}	-0.86	-0.87	-0.84	-0.86	-0.86
U_{200}	-0.86	-0.85	-0.85	-0.87	-0.87

ばす影響が相対的に大きくなるためである。しかし、C値が高くなっても、SN比が高い5音場（SN比が+15dB以上の音場）については、U値にほとんど差がみられない。このことが散布図の縦方向のばらつきを増加させ、聴き取りにくさのz値とU値の相関を低下させていると考えられる。

一方、前述したU値の積分区間が長くなるほど相関が高くなる傾向については、積分区間を長くするとC値が高くなり、結果として、積分区間が長くなるほどU値でSN比の違いを評価できるようになることが関係していると考えられる。従って、この結果から、「聴き取りにくさの判断には、200ms程度までの遅れ時間を持つ反射音のエネルギーが有効に作用している」と結論づけることはできない。

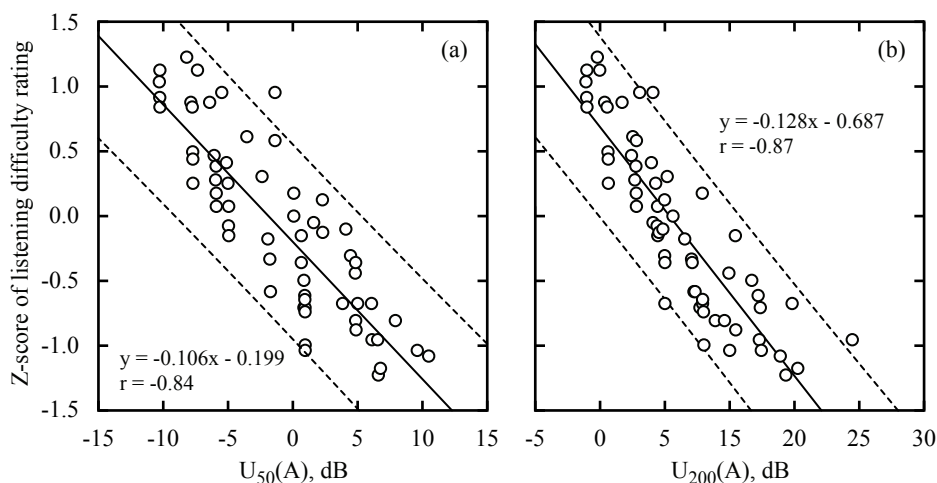


Figure 4.17 Z-score of listening difficulty ratings as a function of useful-detrimental ratio (U_{xx}). Panels (a) and (b) respectively represent results for $U_{50}(A)$ and $U_{200}(A)$. Solid lines and dashed lines in both panels respectively represent a linear regression line and 95 % prediction intervals.

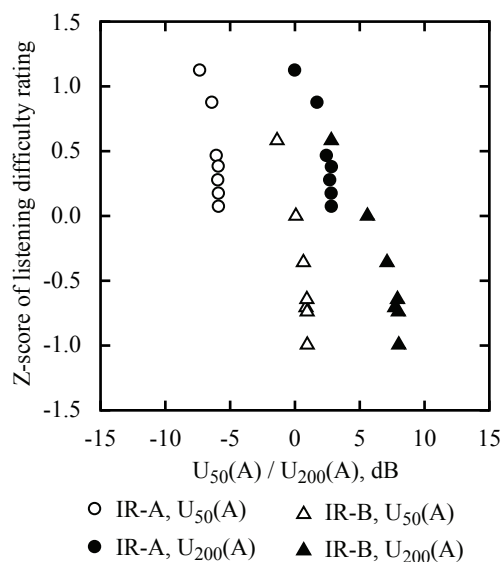


Figure 4.18 As for Fig. 4.17, but only for the sound fields stimulated by two impulse responses (IR-A and IR-B). Circles and triangles respectively represent the results for IR-A and those for IR-B. Open and closed symbols respectively represent $U_{50}(A)$ and $U_{200}(A)$.

D. D値とSN比による聴き取りにくさの予測

STIやU値のように、残響音と騒音の影響を一つの値で評価できることは便利であるが、実際には残響音と騒音に対する音響設計を別々に行うことも多く、それぞれに対して設計目標があることが望ましい。そこで、C値またはD値といった残響音の影響を評価する物理指標と、騒音の影響を評価するSN比の2つをパラメータとした重回帰式で、聴き取りにくさを予測する手法について検討する。

C値及びD値については、実験C1で高い相関を示したA特性による値を用い、積分区間は50msとして求めた。Figure 4.19に実験C2で得られた聴き取りにくさのz値と $C_{50}(A)$ (図(a)), $D_{50}(A)$ の関係をそれぞれ示す。記号の違いはSN比の違いを示す。図中の実線は、SN比毎に求めた回帰直線である。どちらの物理指標でも、SN比が低下するに従って、回帰直線は上方にシフトする。 $C_{50}(A)$ ではSN比が低下するに従って回帰直線の傾きがゆるやかになり、 $C_{50}(A)$ が低くなるほどSN比が聴き取りにくさに与える影響が小さくなる交互作用がみられる。一方、 $D_{50}(A)$ でも若干の交互作用がみられるが、 $C_{50}(A)$ と比較するとその影響は小さく、各回帰直線は互いにほぼ平行である。重回帰分析に用いるパラメータは互いに独立であることが望ましいことから、 $D_{50}(A)$ を残響音の影響を評価するパラメータとして用いることとする。

Figure 4.20(a)に聴き取りにくさのz値とSN比の関係を示す。全ての残響音場についてプロットすると煩雑になるため、例としてIR-AとIR-B (Fig. 4.18のIR-A, IR-Bと同じ) を用いて残響音を付加した音場の結果を示す。騒音なしの条件のSN比については、無響室の暗騒音 (18.3dBA) を用いて求めた。聴き取りにくさのz値とSN比の関係は線形とはいえないため、SN比をそのまま重回帰分析にかけべきではない。そこで、聴き取りにくさのz値との関係が線形とするためにSN比を対数に変換した。結果を Figure 4.20(b)に示す。相関係数に着目すると、IR-AではSN比の場合 (図(a)) では-0.87であるが、SN比の対数をとった場合 (図(b)) は-0.97であり、聴き取りにくさのz値との関係が線形により近づいている。IR-Bでも同様に相関係数が-0.87から-0.98と向上した。この傾向は、他のインパルス応答を用いた音場でも同様である。以上の検討から、騒音の影響を評価するパラメータとして、SN比の対数 ($\log_{10} \text{SNR}(A)$) を用いることとする。SNR(A)が0dB以下の音場は取り扱うことができないが、そのような音場は、聴き取りにくさよりもむしろ単語理解度で評価すべき音場であると考えられる。

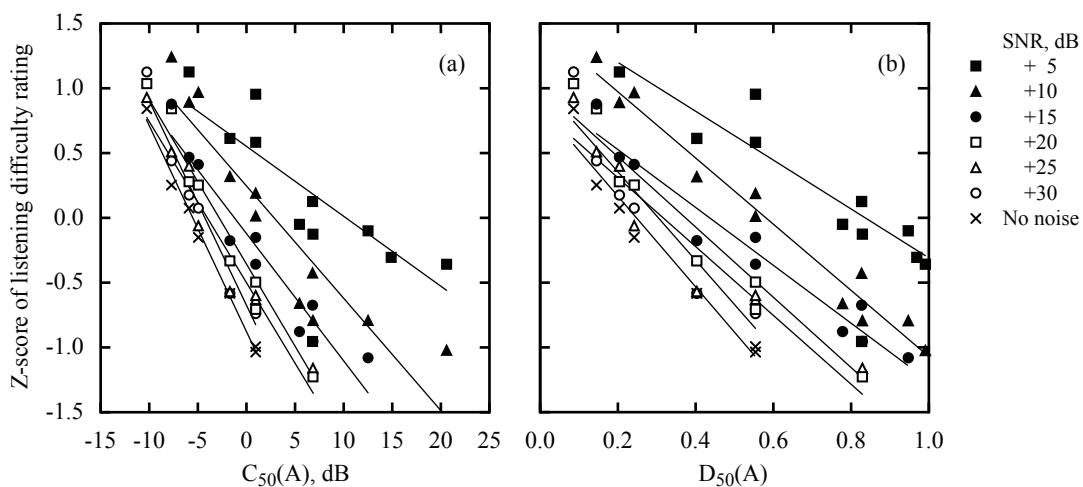


Figure 4.19 Z-scores of listening difficulty ratings as a function of $C_{50}(A)$ (panel (a)), and of $D_{50}(A)$ (panel (b)). Different symbols represent different speech-to-noise ratio (SNR). Solid lines are linear regression lines for each SNR.

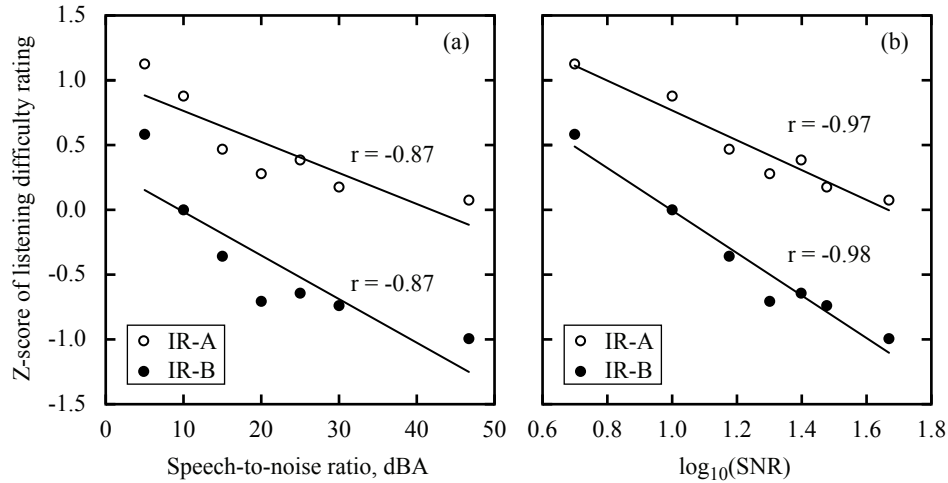


Figure 4.20 Z-scores of listening difficulty ratings as a function of speech-to-noise ratio (panel (a)), and of common logarithms of speech-to-noise ratio ($\log_{10}\text{SNR(A)}$, panel (b)). Open and closed circles respectively represent the results for IR-A and those for IR-B. Solid lines are linear regression lines for each impulse response.

$D_{50}\text{(A)}$ と $\log_{10}\text{SNR(A)}$ の2つを説明変数，聴き取りにくさのz値（ZLDR）を目的変数として，重回帰分析を行った．その結果得られた重回帰式を式4.3に示す．また，式4.3を用いて予測した聴き取りにくさのz値と，実験C2で得られた聴き取りにくさのz値の比較をFigure 4.21に示す．重相関係数は-0.95であり，聴き取りにくさのz値とSTIの相関よりも高い．

$$\text{ZLDR} = -2.52 \times D_{50}\text{(A)} - 1.57 \times \log_{10} \text{SNR(A)} + 3.05 \quad (4.3)$$

重回帰式の95%予測区間は，横軸の予測値がどのような $D_{50}\text{(A)}$ と $\log_{10}\text{SNR(A)}$ の組み合わせで求められるかによって異なるため，Figure 4.16や4.17のように95%予測区間を図示することはできない．そこで，聴き取りにくさのz値が0となる組み合わせのみに着目する．Figure 4.22は下の横軸に $D_{50}\text{(A)}$ ，上の横軸に聴き取りにくさのz値が0となるように $\log_{10}\text{SNR(A)}$ をとり，その2つの組み合わせにおける95%予測区間の幅を縦軸に示したものである．95%予測区間の幅は 0.89σ から 0.95σ の範囲に分布し，弁別閾（ 0.96σ ）と同程度である．従って，式4.3による聴き取りにくさの予測は，実用的には問題ない精度を持っていると考えられる．

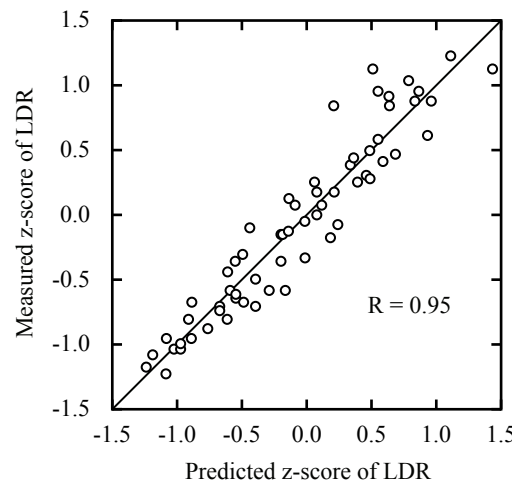


Figure 4.21 The comparison between measured z-scores of listening difficulty ratings and predicted listening difficulty ratings.

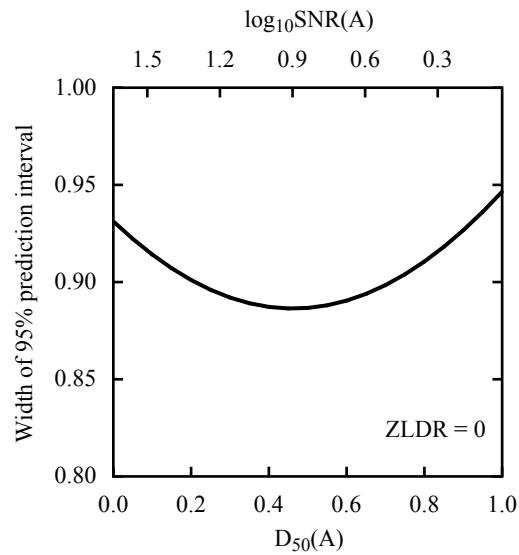


Figure 4.22 Width of 95% prediction interval of a multiple linear regression line at z-score of listening difficulty rating (ZLDR) of zero as a function of the parameters of the regression line, which are $D_{50}(A)$ and $\log_{10} \text{SNR}(A)$.

Figure 4.23に式4.3を用いて予測した聴き取りにくさと $D_{50}(A)$ 及び $\text{SNR}(A)$ の関係を示す。この図より、例えば、 $D_{50}(A)$ が0.6程度の音場において、騒音レベルを $\text{SNR}(A)$ が+10dB以上となるように抑えれば、聴き取りにくさがおよそ50%以下になるということが直感的にわかる。

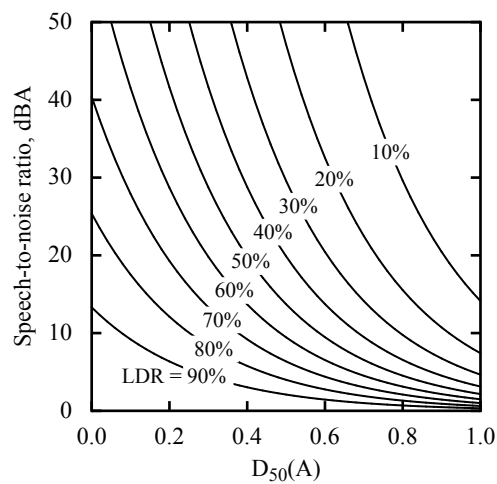


Figure 4.23 Equal curves of listening difficulty as parameters of $D_{50}(A)$ and A-weighted speech-to-noise ratio.

4.2.4 まとめ

実測したインパルス応答と一般的な暗騒音として高域減衰型の定常騒音を用いて、残響音と騒音の両者を付加した音場における聴き取りにくさと既存の音響物理指標の関係を検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) STIは、残響音と騒音の両者が付加された音場においても、聴き取りにくさと高い相関があり、実用的に問題ない程度の予測精度がある。
- (2) U値は、C値が比較的低い音場において、SN比が15dB以上になると値がほぼ一定となり、SN比が聴き取りにくさのz値に及ぼす影響を評価できなくなる。その結果として、聴き取りにくさとの相関はSTIよりも低くなる。
- (3) A特性の重み付けをしたD値 ($D_{50}(A)$) とSN比の対数 ($\log_{10} \text{SNR}(A)$) の2つを説明変数とした重回帰式を用いても、実用的には問題ない程度の精度で聴き取りにくさを予測できる。

4.3 実験C3：加齢による聴力損失の影響

実験C3では、加齢による聴力損失が、聴き取りにくさと音響物理指標の関係に与える影響について検討する。実験A及びBでは、高齢者被験者を聴力レベルにより分類し、聴力レベルの違いによる単語理解度と聴き取りにくさの差について論じたが、ここでは、公共空間を利用する高齢者全体を母集団とし、その集団が感じる聴き取りにくさを検討の対象とする。つまり、聴き取りにくさの判断のばらつきには、個人差だけでなく聴力レベルの差も含まれる。実験音場は、一般性を考慮し、残響音と騒音の両者を付加した音場とした。

4.3.1 実験方法

被験者を高齢者としたことを除き、実験方法は実験C2と同様である。

A. 被験者

被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会活動を日常的に営んでいる66歳から79歳（平均72.5歳）の34名を用いた。全ての被験者に対し簡易聴力検査を行った。聴力検査はオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 4.24に被験者の平均オーディオグラムを示す。2kHz以上の高周波数で聴力レベルが上昇しており、老人性難聴の傾向がみられる。また、実験A及びBで用いた高齢者被験者と同様に、低い周波数ではISO7029 [4] による聴力レベルの予測値よりも聴力レベルが上昇するが、高周波数においては、70歳または80歳の予測値とほぼ同程度の聴力レベルであり、年齢相応の聴力レベルである。低周波数での聴力レベルの上昇は、どの実験でも共通してみられることから、測定室の暗騒音などの外的要因によると考えられる。従って、実験C3に参加した被験者は、聴力レベルの点からみると、代表的な高齢者の集団とみなすことができる。

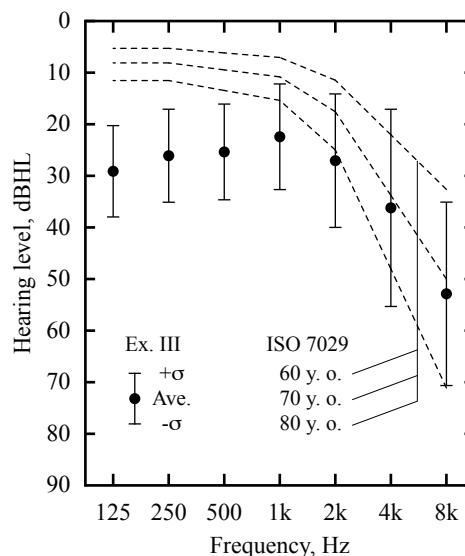


Figure 4.24 Averaged hearing levels of aged subjects who participated in experiment C3. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

4.3.2 結果と考察

A. 聴き取りにくさと単語理解度の比較

聴き取りにくさと単語理解度の関係を、Figure 4.25に実験2の結果（若齢者，○）と併せて示す。高齢者の場合（●），聴き取りにくさだけでなく，単語理解度もほぼフルレンジで変化する。従って，実験に用いた音場に対する評価の感度について，単語理解度と聴き取りにくさに明確な差はない。ただし，単語理解度が高い場合は，聴き取りにくさのほうに感度良く変化する。逆に聴き取りにくさが高い場合は，単語理解度のほうに感度良く変化する。この結果は，Morimotoら[6]の「音声伝送性能の比較的高い音場では，単語理解度よりも聴き取りにくさのほうに感度良く音場を評価できる」という結論と一致する。

高齢者の結果は全体的に左にシフトしており，高齢者と若齢者の単語理解度が同じであれば，高齢者のほうが聴き取りにくさは低くなる。この結果は実験Bと一致する。この結果の説明としては，

- 高齢者の聴き取りにくさの判断において，単語理解度が占める割合が大きい。つまり，単語が聴き取れさえすれば，「聴き取りにくくはない」と判断する。その結果，聴き取りにくさの感度が低下した。
- 残響音，騒音が聴き取りにくさ及び単語理解度に及ぼす影響が，若齢者の場合と異なるため，聴き取りにくさと単語理解度の関係が変化した。
- 聴力の低下により，基準音場の刺激がより聴き取りにくくなったため，全体的に聴き取りにくさの感度が低下した。

以上の3つが考えられる。説明a)とc)については，裏付けるデータは無いので可能性として記述しておくに止める。説明b)について検討する。Figure 4.15と同様に，SN比が高い音場（騒音なし，SNR=+30dB）とSN比が低い音場（SNR=+5dB，+10dB）に着目し，聴き取りにくさと単語理解度の関係を図示したものをFigure 4.26に示す。図(a)が高齢者の結果，図(b)が若齢者の結果（Figure 4.15の再掲）である。同じ単語理解度で比較した場合，若齢者ではSN比の高い音場（○）のほうがSN比の低い音場（●）に比べて聴き取りにくさが高いが，高齢者では逆にSN比の高い音場（○）のほうが聴き取りにくさが低い。つまり，高齢者は残響音によって単語理解度が低下した場合と，騒音によって単語了

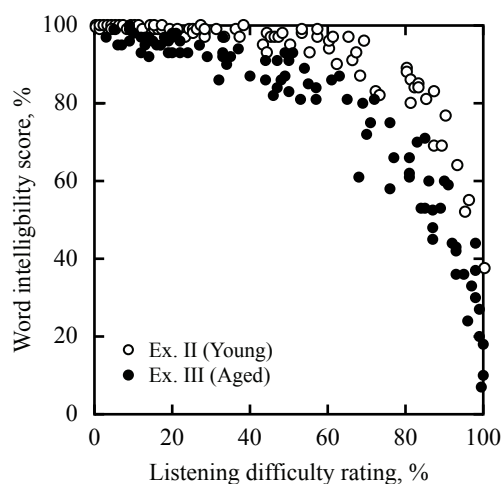


Figure 4.25 The relation between listening difficulty ratings and word intelligibility scores. Open and closed circles respectively represent the results in experiments C2 (young subjects) and C3 (aged subjects).

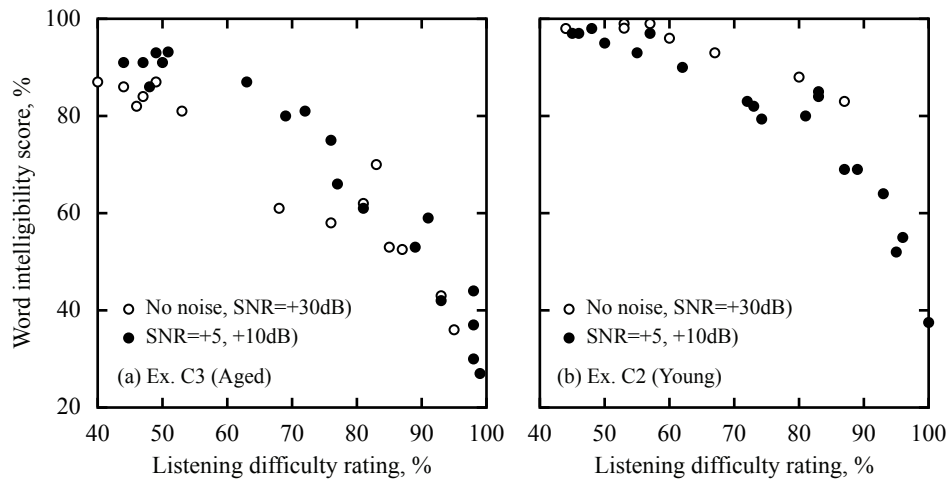


Figure 4.26 The comparison between word intelligibility scores as a function of listening difficulty ratings in experiment C3 (panel (a)) and those in experiment C2 (panel (b)).

解度が低下した場合とでは、後者のほうをより聴き取りにくいと判断する傾向がある。この理由について推論すると、高齢者の聴き取りにくさの判断には、音声刺激を同定できたかどうかの判断よりも、むしろ音声刺激が聴こえたかどうかの判断の影響が大きいのではないかと考えられる。騒音による妨害は音声信号そのものがマスキングにより聴こえにくくなるが、残響音による妨害は音声信号の同定はしにくくなるものの、音声信号そのものが聴こえるかどうかに関しては、あまり影響を与えないと考えられる。高齢者は聴力損失により、若年者よりも音声信号の同定に負荷がかかると考えれば、聴き取りにくさの判断において、音声信号の同定、あるいはそれよりも基礎的な音声信号が聴こえるかどうか、大きな影響を及ぼすことは十分に考えられる。また、この推論は説明a)も支持する。

B. 高齢者の聴き取りにくさとSTIの関係

実験C2と同様に、聴き取りにくさをz値に変換し、物理指標との関係について直線回帰分析を行った。直線回帰分析にあたり、聴き取りにくさが10%以下になる音場と90%以上になる音場は、実験誤差がz値に与える影響が大きいため、分析対象から除いた。合計で27音場がこの処理により除かれるため、分析対象となる音場は71音場である。

Figure 4.27に高齢者の聴き取りにくさのz値とSTIの関係を示す。Figure 4.27(a)に示すように、相関係数は-0.93であり、高い相関を示す。聴き取りにくさのz値が0の点における95%予測区間は $\pm 0.54\sigma$ であり、若齢者の場合と同様に、その幅は弁別閾とみなすことができる 0.96σ と同程度である。従って、STIは若齢者と高齢者の聴き取りにくさの両者を、実用的には問題ない程度の精度で予測することができる。

回帰式を若齢者と高齢者で比較すると、高齢者の回帰式の傾きは若干緩やかであり、STIが高くなるほど両者の聴き取りにくさの差は大きくなる。両者の聴き取りにくさのz値の差は、0.23 (STI=0) から0.77 (STI=1) であるが、実音場におけるSTIは0.5から0.7付近に集中していることを考慮すると、両者の差はおおよそ0.5から0.6程度とみなせる。

実験C2と同様に、SN比が聴き取りにくさのz値とSTIの関係のばらつきに与える影響について検討する。Figure 4.27(b)にSN比によって記号を変えてプロットした散布図を示す。騒音を付加しない音場とSN比が最も高い音場 (図(b), ○) と、SN比が低い音場 (図(b), ●) では、分布に系統だった差がみられない。この傾向は、残響音の影響が騒音に比べて小さく見積もられるという若齢者の傾向

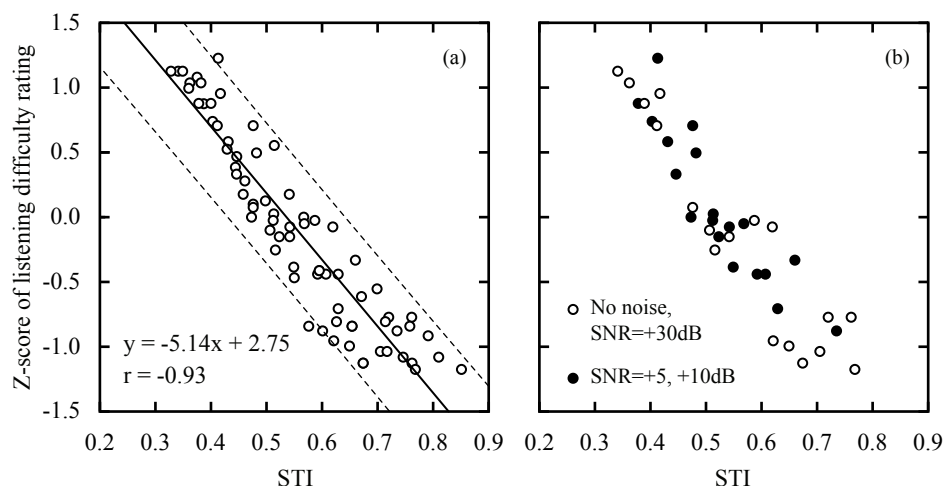


Figure 4.27 Z-score of listening difficulty ratings for the aged as a function of STI. A solid line and dashed lines in panel (a) respectively represent a linear regression line and 95 % prediction intervals. Open and closed circles in panel (b) respectively represent sound fields with soft (SNR=+30dB) or no background noise and those with loud (SNR=+5, +10dB) background noise.

(Figure 4.16(b)参照) と異なる。この結果の原因として、前述した高齢者の聴き取りにくさに対する残響音の影響が、暗騒音に比べて小さいことが考えられる。

C. 高齢者の聴き取りにくさとU値の関係

Table 4.6に聴き取りにくさのz値とU値の相関係数を示す。STIの場合と同様に、聴き取りにくさが10%以下と90%以上の音場を除いた71音場を分析の対象とした。相関係数は、-0.75から-0.92の範囲に分布した。積分区間毎にみると、バンドあるいは重み付けによる相関係数の差は、最大でも0.05程度とあまり変化しない。一方、積分区間による相関係数の差は、どの周波数帯域あるいは重み付けにおいても0.1程度の差がみられ、若齢者の場合とは逆に、積分区間が長くなるほど相関が低くなる傾向がみられる。

Figure 4.28に、一例としてA特性の重み付けによるU値の散布図を示す。図(a)及び(b)は、積分区間をそれぞれ50ms ($U_{50}(A)$) と200ms ($U_{200}(A)$) として求めた結果である。 $U_{50}(A)$ では、若齢者と同様にプロットが縦に並ぶ傾向が見られ、相関を低下させている。 $U_{200}(A)$ でも同様の傾向がみられるが、それに加えて、特に値が20dBを超える4音場が他の分布から離れてプロットされており、さらに相関を低下させている。上記の音場は $U_{50}(A)$ と $U_{200}(A)$ の差が他の音場と比べて大きい。これは残響音が少なく、初期に反射音が集中している音場で顕著にみられる傾向である。従って、積分区間を長くすることは、C値の高い音場ではむしろ不適當であり、汎用性を考えると、聴き取りにくさとの対応をみ

Table 4.6 As for Table 4.5, but for the aged.

U_{xx}	Center frequency of 1/1 oct. band			Two-oct.-band	A-weighted
	1k	2k	4k	500-1k	
U_{50}	-0.89	-0.92	-0.89	-0.87	-0.91
U_{80}	-0.84	-0.89	-0.88	-0.83	-0.90
U_{120}	-0.83	-0.84	-0.86	-0.83	-0.88
U_{200}	-0.76	-0.75	-0.78	-0.78	-0.80

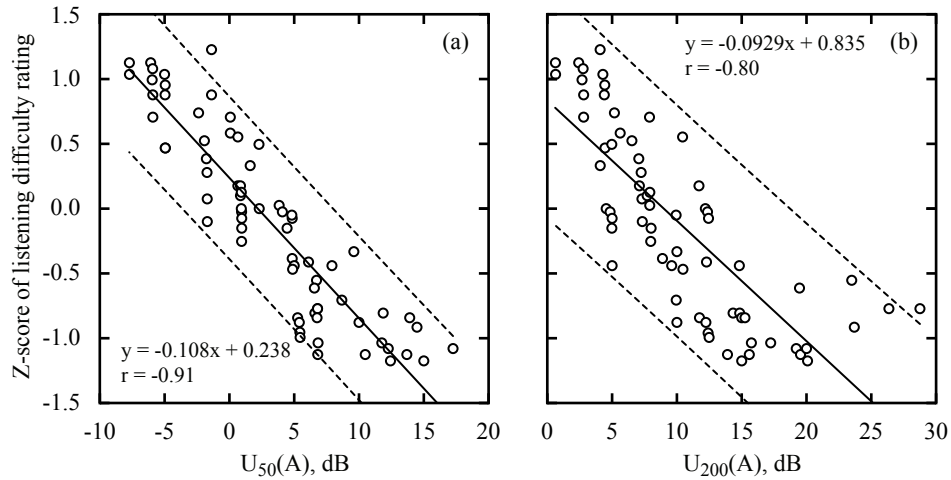


Figure 4.28 Z-score of listening difficulty ratings for the aged as a function of useful-detrimental ratio (U_{xx}). Panels (a) and (b) respectively represent results for $U_{50}(A)$ and $U_{200}(A)$. Solid lines and dashed lines in both panels respectively represent a linear regression line and 95 % prediction intervals.

る限りは、積分区間は50ms程度として問題ないと考えられる。なお、若齢者の場合、聴き取りにくさが非常に低い値となったため、上記の音場は分析対象から外れている。

95%予測区間を比較すると、聴き取りにくさのz値が0となる点において、 $U_{50}(A)$ では $\pm 0.63\sigma$ 、 $U_{200}(A)$ では $\pm 0.89\sigma$ であり、いずれも両者とも弁別閾 (0.96σ) よりも広い幅である。従って、U値による聴き取りにくさの予測は、高齢者においても実用的ではないと考えられる。

D. D値とSN比による高齢者の聴き取りにくさの予測

若齢者と同様に、 $D_{50}(A)$ と $\log_{10} \text{SNR}(A)$ の2つを説明変数、高齢者の聴き取りにくさのz値 (ZLDRA) を目的変数として、重回帰分析を行った。その結果得られた重回帰式を式4.4に示す。また、式4.4を用いて予測した高齢者の聴き取りにくさのz値と、実験3で得られた高齢者の聴き取りにくさのz値の比較をFigure 4.29に示す。重相関係数は-0.97と非常に良く対応しており、高齢者の聴き取りにくさのz値とSTIの相関よりも高い。

$$\text{ZLDRA} = -2.80 \times D_{50}(A) - 1.35 \times \log_{10} \text{SNR}(A) + 3.45 \quad (4.4)$$

Figure 4.30は下の横軸に $D_{50}(A)$ 、上の横軸に聴き取りにくさのz値が0となるように $\log_{10} \text{SNR}(A)$ をとり、その2つの組み合わせにおける95%予測区間の幅を縦軸に示したものである。95%予測区間の幅は 0.70σ から 0.80σ の範囲に分布するが、 $D_{50}(A)$ が低い値になると、高齢者の聴き取りにくさのz値を0にするためには、実際にはありえない高いSN比(100dBなど)が必要となる。SN比の上限を音声刺激の提示レベルである65dBとすると、95%予測区間の幅はおおよそ0.7程度である。いずれにせよ、95%予測区間の幅は弁別閾 (0.96σ) よりも狭く、式4.4による聴き取りにくさの予測は、実用的には問題ない精度を持っていると考えられる。

Figure 4.31に式4.4を用いて予測した高齢者の聴き取りにくさと $D_{50}(A)$ 及び $\text{SNR}(A)$ の関係を示す。 $D_{50}(A)$ が0.6程度の音場における聴き取りにくさを50%にすることを考えると、若齢者では $\text{SNR}(A)$ を10dB以上にすれば達成できる (Figure 4.23参照) が、高齢者では $\text{SNR}(A)$ を20dB以上にしなければならないことがわかる。また、若齢者と比較すると、聴き取りにくさの等曲線の傾きが急である。これ

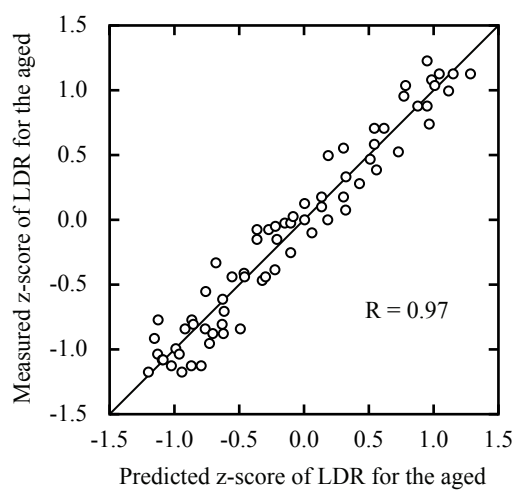


Figure 4.29 As for Fig. 4.21, but for the aged.

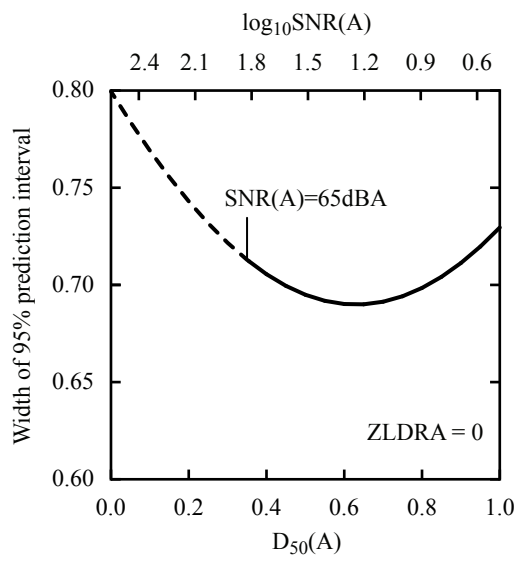


Figure 4.30 As for Fig. 4.22, but for the aged.

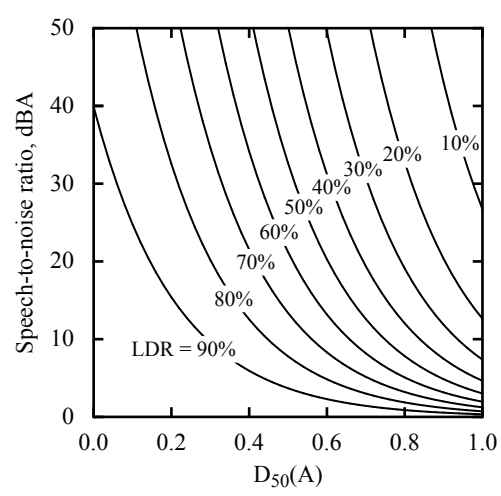


Figure 4.31 As for Fig. 4.23, but for the aged.

は、高齢者の聴き取りにくさを低下させるには、 $SNR(A)$ よりもむしろ $D_{50}(A)$ を上昇させるほうが効果的であることを示唆している。

4.3.4 まとめ

実測したインパルス応答と一般的な暗騒音として高域減衰型の定常騒音を用いて、残響音と騒音の両者を付加した音場における高齢者の聴き取りにくさと既存の音響物理指標の関係を検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) STIまたはA特性の重み付けをしたD値 ($D_{50}(A)$) とSN比の対数 ($\log_{10}SNR(A)$) の2つを説明変数とした重回帰式により、残響音と暗騒音の両者が付加された音場における高齢者の聴き取りにくさは、実用的に問題ない程度の精度で予測できる。
- (2) 高齢者の聴き取りにくさを低下させるには、SN比よりもむしろD値を上昇させるほうが効果的である。

4.4 総合的考察

4.4.1 聴き取りにくさによる音場の相対評価と絶対評価

Figure 4.5あるいはFigure 4.13は、本実験で用いた音場の範囲では、明確に単語理解度よりも聴き取りにくさのほうが、感度良く音場の違いを評価できることを示している。また、Figure 4.16に示した聴き取りにくさの z 値とSTIの回帰式より、聴き取りにくさが2% ($z=-2$) から98% ($z=2$) までほぼフルスケールで変化するSTIの範囲は0.1から0.8程度である。従って、現実には公共空間において存在する音場のほとんどは、聴き取りにくさでその違いを評価することができる。

高齢者を対象とした場合、本実験で用いた音場の範囲では、単語理解度と聴き取りにくさの音場の違いに対する感度は、音場の音声伝送性能が比較的良い場合は聴き取りにくさ、比較的悪い場合は単語理解度のほうがそれぞれ良い。しかし、Figure 4.27に示した回帰式より、聴き取りにくさが2% ($z=-2$) から98% ($z=2$) までほぼフルスケールで変化するSTIの範囲は0.15から0.9程度である。従って、高齢者を対象とした場合でも、聴き取りにくさを用いて公共空間に存在するほとんどの音場の違いを評価することができる。以上より、公共空間の音声伝送性能の相対評価に対し、聴き取りにくさは若齢者と高齢者の両者に対して非常に有用な指標である。

本章では、若齢者の聴き取りにくさと物理指標の関係について、残響音のみを付加した音場（実験C1）と残響音と暗騒音の両者を付加した音場（実験C2）について検討した。ここで、両実験において聴き取りにくさと良い対応を示したSTIに着目すると、上述した相対評価であれば、それぞれの実験で得られた回帰式の傾きに大きな差は無い（実験C1: -5.42, 実験C2: -5.68）ため、大きな問題は生じないと考えられる。しかし、音場の絶対評価、つまりある1つの音場がどれだけ聴き取りにくいのかを定量的に評価する際は、同じSTIに対する実験C1と実験C2の聴き取りにくさの z 値の予測値の間に、0.3から0.5程度の差が生じることが問題となる。弁別閾 (0.96σ) よりもその差は小さいものの、いずれかに統一しておくべきである。実験C1と実験C2で得られた結果のどちらを採用すべきかについては、両者の差に前述した基準刺激の差が大きく影響していると考えられるものの、実験結果の汎用性を考えると暗騒音の影響の評価は必須であり、実験C2の結果を採用することが妥当と考えられる。

4.4.2 主観評価に基づいた音声伝送性能の絶対評価のランクの提案

Steenekenら[118]は、様々な国で行われた明瞭度及び理解度試験の結果と、Listening effort に関する主観評価実験の結果から、Figure 4.32に示したようなBadからExcellent までの5段階のランクを提案しており、ISO[119]でも採用されている。この5段階のランクは音場の音声伝送性能に対し、BadやGoodといった絶対評価を与えるものである。しかし、その絶対評価の科学的根拠は明確に示されていない。ここでは、聴き取りにくさに基づいた絶対評価のランクを提案する。

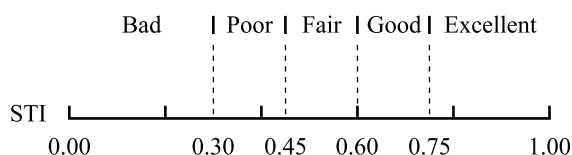


Figure 4.32 The relation between Intelligibility Index and STI [119].

聴き取りにくさが50%, すなわち「聴き取りにくいと判断される割合が50%」となる音場は、一般論として、改善すべき音場とそうでない音場の境界線とみなせる。また、心理学的測定法の観点からは、聴き取りにくさの評価を聴き取りにくいかどうかの2択で行ったとみなせば、聴き取りにくさが50%となる音場は「聴き取りにくい」という判断が起こる絶対閾である。そこで、この聴き取りにくさが50%となる音場、すなわち、聴き取りにくさの z 値が0となる音場を、絶対評価のランクの基準点とする。

次に、この基準点からどの程度心理的な距離が離れれば、隣接するランクに移行するかを考える。Figure 4.6及び4.8で仮定したサーストンの比較判断の法則のCase Vが成り立つとすると、聴き取りにくさの心理的な反応分布の標準偏差 σ の0.96倍程度心理的距離が離れれば、2つの音声刺激の聴き取りにくさは弁別できるとみなせる。前述したように、この 0.96σ という心理的距離は、Bradley[116]が一对比較法で精密に求めた弁別閾よりもかなり大きい、あまり細かくランクを分類しても実用的ではない。以上より、十分に2つの音声刺激の聴き取りにくさを弁別できる心理的距離として、若干値を丸めた 1σ を採用し、ランクの境界とする。

また、音声による情報伝送の最も基礎的な達成目標は、「音声情報を正しく伝えること」である。従って、音声伝送性能の絶対評価において、この目標を達成できているかどうかは重要である。この目標の達成度を直接的に評価する指標は、単語了解度あるいは文章了解度である。一般に音声情報は文章として伝送されるため、現実にもっと近い評価指標は文章了解度と考えられる。しかし、文章了解度は文脈効果の影響が強く、評価実験に用いる音声刺激を統制するのは困難である。従って、実際に案内放送などで頻繁に使用される高親密度の単語を、音声刺激とした単語了解度による評価が適当である。単語了解度と文章了解度では差が生じるが、一般に文章了解度のほうが値が高くなるため、単語了解度による評価は常に安全側の結果となり、問題は生じない。

Figure 4.25に示した若齢者及び高齢者の単語了解度と聴き取りにくさの関係は、あるひとつの曲線で表せると考えられる。そこで、以下の手順で、両者の間の直線回帰式を求めた。

- 1) 実験に用いた全音場を、聴き取りにくさが10%刻みとなるように10のグループに分類し、それぞれのグループの単語了解度及び聴き取りにくさの平均値を求める。
- 2) 1)で求めた平均値を z 値にそれぞれ変換し、直線回帰式を求める。

なお、音場をグループ化したのは、特に若齢者の場合に単語了解度が100%となる音場の数が多く、 z 値に変換することができないため、音場をグループ化して平均値を求めることにより、それらの音場の影響も反映させることが目的である。また、 z 値に変換したのは直線回帰分析を用いるためである。上述した手法で、若齢者及び高齢者の聴き取りにくさと単語了解度を、 z 値に変換して比較したものをそれぞれFigure 4.33(a), 4.34(a)に示す。相関係数はそれぞれ-0.97, -0.99と相関は非常に高い。また、Figure 4.33(b), 4.34(b)に示すように、回帰式による予測値(実線)と実測値(○)の対応も良い。単語了解度の z 値が2以上(約98%以上)に達していれば、最大値に達したとみなすと、回帰式より、その場合の聴き取りにくさの z 値は、若齢者で-0.47以下(32%以下)、高齢者で-1.43以下(8%以下)である。

以上の検討を踏まえ、まず若齢者の音声伝送性能のランクを提案する。Figure 4.35にFigure 4.33(a)に示した回帰式による聴き取りにくさと単語了解度の関係と、それを基にした音声伝送性能のランクを示す。聴き取りにくさによるランク(Rank based on LDR)は、聴き取りにくさの z 値が0となる点を基準として、 z 値で1刻み、すなわち 1σ 刻みで境界線を引いたものである。また、その下の単語了解度(Word intelligibility)は、聴き取りにくさの z 値が-0.5以下になれば、最大値に達した

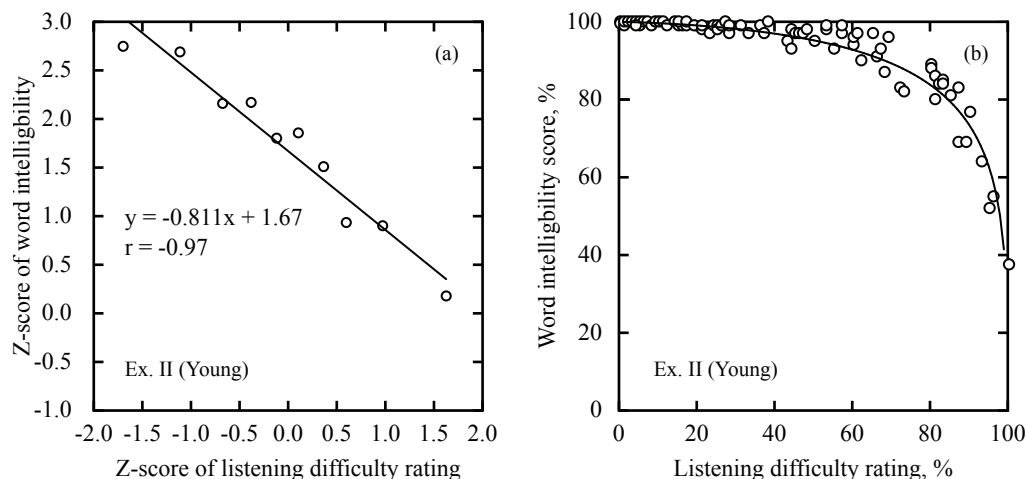


Figure 4.33 The relation between listening difficulty ratings and word intelligibility scores for the young. Panel (a) represent the relation between z-scores of the average of the sound fields, which are grouped in steps of 0.1 of listening difficulty ratings. The solid line in panel (b) represent predicted word intelligibility scores from the regression equation in panel (a).

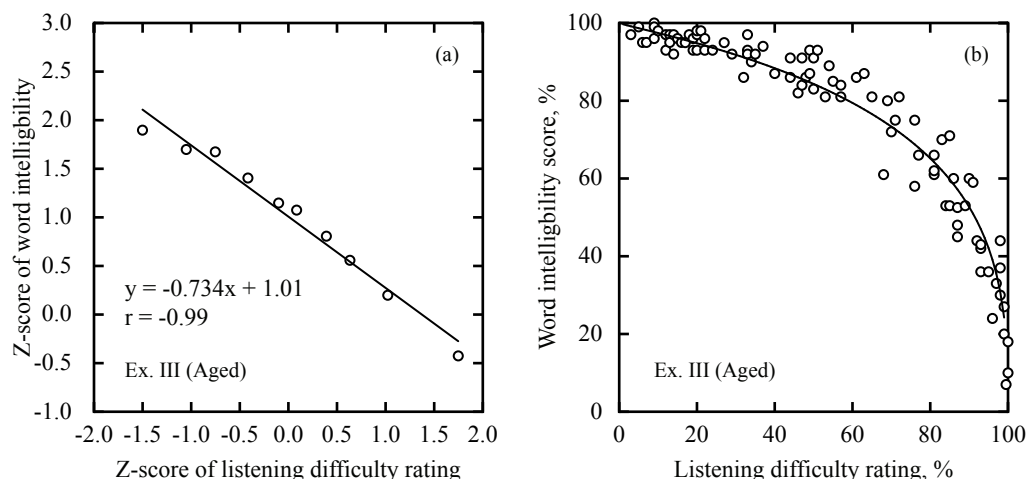


Figure 4.34 As for Fig. 4.33, but for the aged.

(maximized) とみなしている。音声伝送性能のランク (Rank of STP) は、以下の考え方にに基づき決定した。

- 1) 聴き取りにくさのランクのうち、(D)以下は聴き取りにくさが50%以上となるため、ランクを設けない。
- 2) 聴き取りにくさのランクのうち、(C)はその中間点である聴き取りにくさのz値が-0.5となる点で、単語理解度が最大値に達するため、2つに分割する。
- 3) 聴き取りにくさのz値が-2以下、すなわち聴き取りにくさが2%以下となった場合、聴き取りにくさが最小値に達したとみなし、(A)以上のランクは設けないこととする。
- 4) 音声伝送性能が高い順で、1st, 2nd, 3rd, 4thと名前を付ける。

それぞれのランクの位置づけとしては、単語理解度が最大値に達する3rdのランクは、最低限実現すべき音声伝送性能であるといえる。4thのランクは、屋外や残響過多となる大空間、あるいは工場や鉄道駅ホームなど暗騒音レベルが必然的に高くなる空間などで、どうしても3rdのランクを達成できない

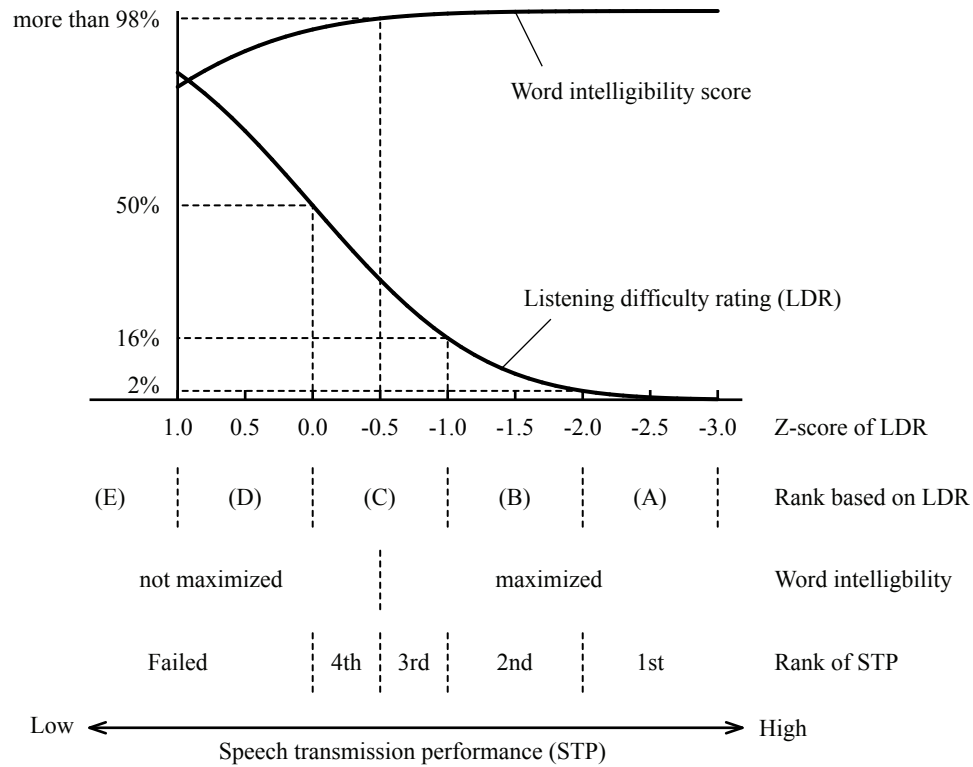


Figure 4.35 Rank of speech transmission performance based on listening difficulty ratings and word intelligibility scores.

場合にのみ許されるランクである。2ndのランクは、音声によるコミュニケーションが主目的となる空間で達成すべき音声伝送性能である。1stのランクは、ほとんどの人が聴き取りにくいと感じない性能であり、音声伝送性能が最高に達しているとみなせる。

4.4.3 音声伝送性能のランクと既存の評価指標の比較

4.4.2で提案した音声伝送性能のランクと物理指標を比較する。Figure 4.36は音声伝送性能のランクとSTI及びFigure 4.32に示したIntelligibility rating [119]を比較したものである。なお、聴き取りにくさとSTIの関係は、Figure 4.16に示した回帰式から算出した。

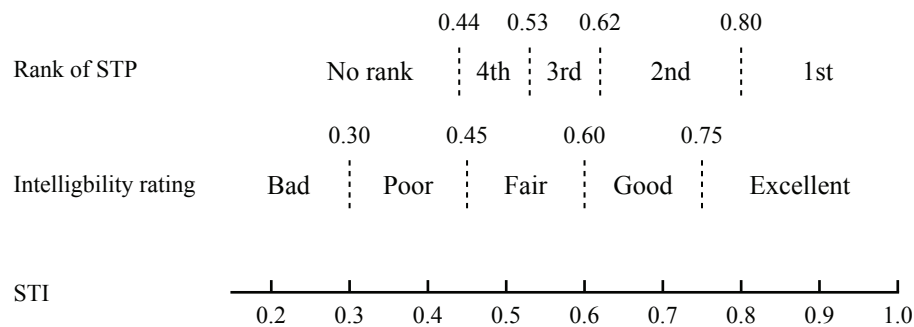


Figure 4.36 The comparison among Rank of STP (speech transmission performance), Intelligibility rating, and STI.

本研究で提案する音声伝送性能のランク (Rank of STP) の”4th”と”No rank”の境界は、Intelligibility ratingの”Poor”と”Fair”の境界にほぼ一致する。Intelligibility ratingのうち、”Bad”と”Poor”の2つは否定的な意味が強い形容詞であり、音声伝送性能が許容できないものであることを示唆している。従って、聴き取りにくさが50%以上となり、改善の必要があると考えられる”No rank”とは、ランクの位置づけとしても一致する。また、”3rd”と”2nd”との境界と、”Fair”と”Good”の境界もほぼ一致している。この境界も、音声伝送性能が悪くも良くもない状態から、1段階良い状態に移る境界であると考えることができ、位置づけとして一致している。一方、異なる点として、”Fair”に相当するランクが”3rd”と”4th”に分かれる点と、音声伝送性能が最高に達するために必要な性能が、Intelligibility ratingでは若干低い点があげられる。

Intelligibility ratingは前述したように、明瞭度や了解度のような「音声情報が正しく伝わったかどうか」を評価する指標と、Listening effortに関する主観評価実験の結果を基に定められている。本研究で提案した音声伝送性能のランクと共通点が多いのは、Intelligibility rating が明瞭度や了解度試験の結果よりも、むしろListening effortという聴き取りにくさに似た概念を評価語とした主観評価実験の結果を重視して決定されたためではないかと推測される。その一方で、Intelligibility ratingはSTIでちょうど0.15刻みで5段階に分類されている。これは、明瞭度・了解度試験や主観評価実験の結果を重視しつつも、最終的にはSTIを基準として、きりのよい境界を採用したためと考えられる。このことが、単語了解度と聴き取りにくさの2つの主観評価指標のみに基づいて提案した、本研究の音声伝送性能のランクと異なる部分である。音声伝送性能は、あくまで聴取者によって主観的に決定されるものであることを考えれば、本研究で提案したランクのほうが、より実際に近いランクになっていると考えられる。

Figure 4.37は、 $D_{50}(A)$ と $\log_{10} \text{SNR}(A)$ を用いた重回帰式を用いて予測した聴き取りにくさから、音声伝送性能のランクの等曲線を求めたものである。この図より、例えば、2ndのランクを達成するためには、少なくともSN比が10dBA以上必要であることがわかる。

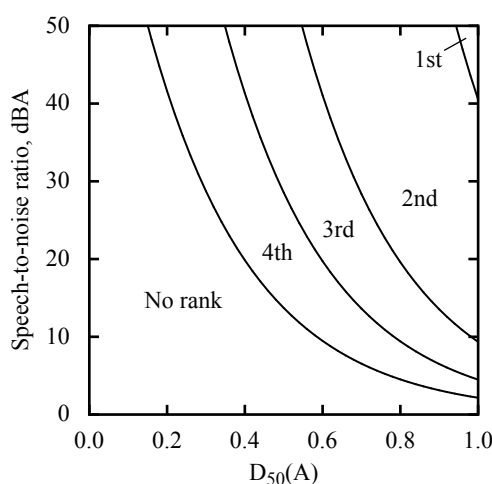


Figure 4.37 Equal curves of rank of speech transmission performance as parameters of $D_{50}(A)$ and A-weighted speech-to-noise ratio.

4.4.4 高齢者を対象とした音声伝送性能のランク

高齢者を対象とした場合，Figure 4.34に示すように，高齢者の単語理解度が最大に達したとみなせるのは，聴き取りにくさが8%以下となる場合である．Figure 4.27に示した高齢者の聴き取りにくさとSTIの回帰式より，高齢者の聴き取りにくさを8%以下にするには，STIを0.81以上という非常に高い値にする必要がある．従って，若齢者と同様に音声伝送性能のランクを考えることは難しい．ここで，若齢者のランクの境界として採用した，聴き取りにくさのz値が-2, -1, 0となる場合の高齢者の単語理解度を，Figure 4.34に示した回帰式から求めると，それぞれ99%，96%，83%である．そこで，高齢者の音声伝送性能のランクを以下の3段階で考えることを提案する．3rdのランクでは単語理解度の確保は保証されないため，実際には2nd以上にすることを推奨する．

1st (aged)	高齢者の聴き取りにくさが2%以下．高齢者にとっても音声伝送性能は最大に達している．
2nd (aged)	高齢者の聴き取りにくさが16%以下．単語理解度もほぼ最大に達しており，高齢者にとっても十分な音声伝送性能である．
3rd (aged)	高齢者の聴き取りにくさが50%以下．ただし，単語の聴き間違いはある程度生じる．高齢者に対応するためには最低限必要な音声伝送性能である．

Figure 4.38に高齢者を対象とした音声伝送性能のランクとSTIの関係を示す．1st, 2ndのランクを達成するためには，若齢者の1st, 2ndと比べて0.1程度STIを改善する必要がある．

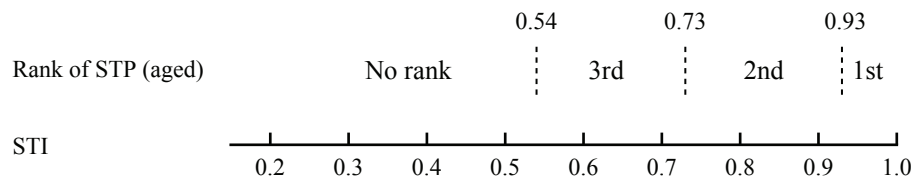


Figure 4.38 The relation between rank of speech transmission performance (STP) for the aged and STI.

4.5 結論

4章では、聴き取りにくさと音場の物理指標の関係について明らかにするために、様々な実音場で測定されたインパルス応答と、一般的な暗騒音のモデルとして高域減衰型の周波数特性を持つ定常騒音を用いてシミュレートした音場で聴き取りにくさの聴感実験を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) STIは残響音付加音場における聴き取りにくさと最も相関が高く、回帰式による予測は実用上問題ない精度を持つ。また、1kHzから4kHzの帯域のD値及びC値、あるいはそれらの帯域の影響が大きくなるA特性の重み付けをしたD値及びC値も、聴き取りにくさと相関が高い。
- (2) STIは暗騒音の影響を考慮した場合でも、聴き取りにくさと高い相関があり、回帰式による予測は実用上問題ない精度を持つ。これは、被験者に高齢者を用いた場合でも同様である。
- (3) A特性の重み付けをしたD値とSN比を用いた重回帰式により、STIよりも高い精度で若齢者と高齢者の聴き取りにくさをそれぞれ予測できる。
- (4) 音声伝送性能の絶対評価のランクを、聴き取りにくさの心理的な反応分布の標準偏差と単語了解度を基に作成した。
- (5) 音声伝送性能のランクを高齢者に対応させるためには、STIで0.1程度高い音声伝送性能にする必要がある。

第5章 聴き取りにくさによる許容音声レベルの検討

第4章では、音声レベルを一般的なレベル（65dBA）で固定し、音場の残響音と暗騒音が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響を、物理指標で評価できるかどうかについて検討した。しかし、実音場では、空間の音圧分布を考える必要があり、音声レベルはどの場所でも一定とは限らない。また、騒音レベルが高い音場では、拡声設備を用いて音声レベルを増幅することにより、SN比を高くできる。従って、音声伝送性能を最適化するにあたり、音声レベルをパラメータとすることは不可欠である。

拡声設備は、スピーカの限界があるものの、かなり大きなレベルまで音声を増幅できるが、第1章で述べたように、音声レベルには最適値があり、増幅すれば良いというわけではない。一方、不特定多数の人々が利用する公共空間のような建築空間においては、できるだけ多くの利用者にとって、最適な音声レベルで拡声を行うべきである。最適音声レベルは利用者の聴力レベルに依存するが、もし、利用者の聴力レベルに関わらず許容できる音声レベルが存在するのであれば、そのレベルで拡声することが望ましい。しかし、そのような観点から音声レベルを取り扱った研究は見当たらない。

既往の研究では、調整法や極限法を用い、ラジオ放送などの文章を音声刺激として最適音声レベルを求めているが、本研究では、Kobayashiら[88]が用いた、「聴き取りにくさ」により求める方法を用いる。この方法には以下のような利点がある。

- (1) 「聴き取りにくさ」では、案内放送等で頻繁に用いられる高親密度の単語を音声刺激として用いるため、現実に近い評価ができる。
- (2) 最適音声レベルは了解度に着目して評価すると、着目しない場合に比べて高くなる[82,84]。公共空間における案内放送や非常放送では、了解度は基礎的な評価基準であり、利用者が了解度に着目して放送を聴取する状況を想定するのが自然である。「聴き取りにくさ」の試験法では、提示された単語を書き取った直後に、聴き取りにくさを評価するため、必然的にその評価は了解度に着目してなされる。
- (3) 実験は恒常法で行われるため、実験の結果から、聴き取りにくさを音声レベルの関数として表すことが可能であり、許容音声レベルの上限／下限を求めるのに適している。

本章では、健常な聴力を持つ若齢者と、加齢による聴力損失を持つ高齢者に対する最適音声レベルをそれぞれ明らかにし、それらを比較することにより、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルを明らかにする。なお、本章における検討でも、実験C3と同様に、公共空間を利用する高齢者全体を対象とした聴き取りにくさを取り扱うこととし、高齢者被験者の聴力レベルによる分類は行わない。

5.1 最適音声レベルと許容音声レベル

本章では、残響音も暗騒音も付加しない音場（実験D1）、残響音を付加した音場（実験D2）、暗騒音を付加した音場（実験D3）について、それぞれ若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルを求める。ここで、単語了解度が最大かつ聴き取りにくさが最小となる音声レベルを、最適音声レベル（OSL: Optimum Speech Level）、単語了解度が最大かつ聴き取りにくさがその音場における最小値と有意な差がない音声レベルを、許容音声レベル（ASL: Acceptable Speech Level）と定義する。

各実験において、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルを求める手順は、共通である。以下にその手順を示す。

手順1: 音声レベルをパラメータとした「聴き取りにくさ」の聴感実験を行い、単語了解度と聴き取りにくさをそれぞれ求める。

手順2: 単語了解度が最大となる音声レベル（MRL: Minimum Required Level）を求める。

手順3: 聴き取りにくさが最小となる音声レベルを求め、それが手順2で求めたMRLよりも大きければ、そのレベルをOSLとする。

手順4: 手順3で求めたOSLにおける聴き取りにくさと、有意差がない聴き取りにくさになる音声レベルの区間を求める。

手順5: 手順4で求めた音声レベルの区間の下限値と、手順2で求めたMRLを比較し、下限値が大きければ、手順4で求めた音声レベルの区間をASLとする。逆に、MRLが大きければ、MRLから手順4で求めた音声レベルの上限値の区間をASLとする。

手順6: 手順1から5により若齢者と高齢者のASLをそれぞれ求め、両者を比較する。重複する区間があれば、その区間が若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルである。

5.2 実験D1：妨害音がない音場における許容音声レベル

5.2.1 実験方法

A. 被験者

若齢者被験者として、20歳代の学生10名（男性4名、女性6名）を用いた。高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる65歳から77歳（平均68.8歳）の高齢者20名（男性9名、女性11名）を用いた。全ての被験者に対し簡易聴力検査を行った。聴力検査はオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 5.1に被験者の平均オーディオグラムを示す。

若齢者の平均オーディオグラム（○）は、125Hz及び250Hzにおいて、ISO7029[4]による20歳の聴力レベルの予測値よりも若干高いものの、おおむね一致している。また、若齢者被験者のPTA（Pure-tone Threshold Average, 500Hz, 1kHz, 2kHzの聴力レベルの平均値）は最大で6.7dBHLであり、全員が正常な聴力を有している。

一方、高齢者の平均オーディオグラム（●）は、2kHz以上の高周波数で聴力レベルが上昇しており、老人性難聴の傾向がみられる。1kHz以上の聴力レベルは、おおよそISO7029[4]による70歳の聴力レベルとほぼ一致するが、低い周波数では予測値よりも聴力レベルが高い。この傾向は、これまでの章における実験で用いた高齢者被験者と同様であることから、測定室の暗騒音などの外的要因によると考えられる。従って、実験D1に参加した高齢者被験者は、聴力レベルの点からみると、年齢相応の聴力を持つ代表的な高齢者の集団とみなすことができる。

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、若齢者と高齢者の両者にとって親密度の高い200語を抽出して用いた。Table 5.1に実験で用いた単語を示す。Table 5.1に示した単語の前の番号は、試験用音源作成の

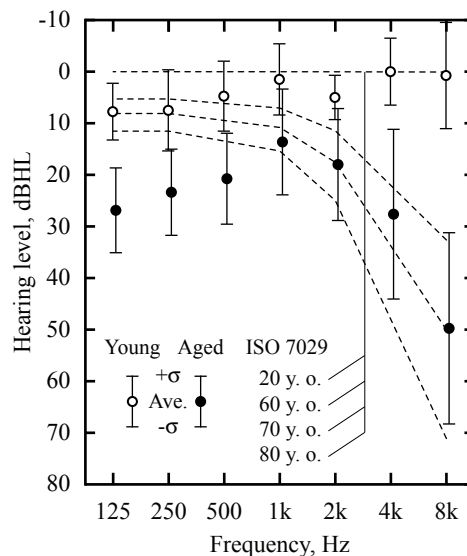


Figure 5.1 Averaged hearing levels of subjects who participate in experiment D1. Open and closed circles respectively represent the results for the young and the aged. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 20, 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

Table 5.1 Test words used in the experiment D1.

1	ギンコウ	41	ニホンシュ	81	スキヤキ	121	シタシミ	161	ヨコモジ
2	シアワセ	42	ライネン	82	イザカヤ	122	ガクネン	162	ヤスモノ
3	モクテキ	43	ドウブツ	83	マエムキ	123	ザッソウ	163	ヤジウマ
4	ヒルメシ	44	カラアゲ	84	アジツケ	124	タチヨミ	164	モノマネ
5	ニンジン	45	アサメシ	85	ナツモノ	125	テイネン	165	トリケシ
6	ソウダン	46	セイジカ	86	ドンブリ	126	ケンセツ	166	ラクガキ
7	ユウジン	47	シンユウ	87	ハジマリ	127	ルスバン	167	ヨセナベ
8	ケイサン	48	カイフク	88	シハライ	128	ロウドウ	168	ゲンイン
9	オヤスミ	49	ゴチソウ	89	チチオヤ	129	グウゼン	169	ソノヘン
10	ケンキュウ	50	サクヒン	90	キンキュウ	130	ツウキン	170	ナガネン
11	バングミ	51	ヒツヨウ	91	コクドウ	131	ヘイボン	171	ケツダン
12	ネブソク	52	ナイヨウ	92	ウメボシ	132	ヨコガオ	172	ヒキダシ
13	ヨウフク	53	ロウジン	93	ケンチク	133	ハウガク	173	チャクジツ
14	セキニン	54	ゼンシン	94	ヤキソバ	134	ソクタツ	174	ゴキゲン
15	スイドウ	55	ヘイジツ	95	マンブク	135	バクダン	175	モクゲキ
16	ジツゲン	56	ヒダリテ	96	ダイキチ	136	チュウトロ	176	コノママ
17	ワリビキ	57	キュウケイ	97	オメデタ	137	タベゴロ	177	ヘンシン
18	レンアイ	58	ベツベツ	98	シュクフク	138	ヒョウバン	178	ムチャクチャ
19	ユウビン	59	コイビト	99	ミギウデ	139	フユフク	179	ナツフク
20	ニホンゴ	60	ホンモノ	100	ドクリツ	140	イヤイヤ	180	ヨクジツ
21	ゼイコミ	61	ケツロン	101	レンゾク	141	リレキシヨ	181	シチガツ
22	キュウジツ	62	トウゼン	102	ガクワリ	142	ツウガク	182	クウフク
23	ヨロコビ	63	レイトウ	103	ユウヤケ	143	ギュウニク	183	イリグチ
24	ジュンスイ	64	ハントシ	104	ロクオン	144	ヒガワリ	184	ケンブツ
25	ワカモノ	65	イチニチ	105	ホンバン	145	ネアガリ	185	マジメサ
26	ユウガタ	66	ネンマツ	106	ユウワク	146	サトイモ	186	ミンカン
27	ブタニク	67	ニュウヨク	107	ショクニン	147	チンモク	187	インサツ
28	コウフク	68	ニンシキ	108	ハタラキ	148	ノリモノ	188	ジンザイ
29	ツケモノ	69	ソノママ	109	オトウト	149	チョクゼン	189	ゴブサタ
30	レイボウ	70	オヤユビ	110	シンチク	150	トリニク	190	ドクシン
31	テキトウ	71	オハナシ	111	カワグツ	151	ゴウイン	191	ヨウフウ
32	ケイサツ	72	ギャクテン	112	セイジン	152	セイヒン	192	バイテン
33	ハハオヤ	73	トシシタ	113	トリハダ	153	ゼンガク	193	セイネン
34	ナガソデ	74	ジンカク	114	クチグセ	154	レンキュウ	194	カラッポ
35	ゲンジツ	75	ゼイキン	115	テツドウ	155	ゲツマツ	195	キズグチ
36	トモダチ	76	ネサガリ	116	ユウグレ	156	ハダアレ	196	サイワイ
37	イタズラ	77	セツヤク	117	ドクダン	157	ビンカン	197	ドシャブリ
38	ロクガツ	78	ケイゾク	118	ウリモノ	158	イイワケ	198	クチベニ
39	スイミン	79	ヤスウリ	119	ワタクシ	159	テリヤキ	199	チリガミ
40	チカテツ	80	ガンタン	120	キュウジン	160	ネンカン	200	マルガオ

際に、作業を円滑に行うために便宜上用いた番号である。単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

C. 実験音場

音場のパラメータは刺激の提示レベル（以下、音声レベル）のみである。残響音や騒音といった妨害音は付加せず、直接音のみが被験者に到達するものとした。音声レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計（小野測器、LA-5110）を用いて測定した。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はslowとし、各単語のピークレベルを測定した。

音声レベルを30dBAから75dBAまで5dB刻みで設定した10音場を実験音場とした。設定された音声レベルと、各単語のピークレベルの誤差は0.3dBA以下である。

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 使用する200単語を番号の若い順から20個ずつまとめ、計10個の単語群をつくる。
2. 各単語群に含まれる20単語について全10音場をそれぞれ準備する。すなわち、10単語群×10音場の計100の刺激群をつくる。
3. 100の刺激群の中から単語群が重ならないように10音場を抜き出し、1組の試験用音源を完成させる。
4. 一度用いた刺激群を重複しないように同じ手順を繰り返し、全刺激群を用いて10組の試験用音源を作成する。

10組の試験用音源を構成する単語群と音場の関係をFigure 5.2に示す。Figure 5.2における数字は、Table 5.1で示した単語番号である。なお、図中の網かけで示した単語群1-20に着目すると、ある1つの単語群がすべての音場において用いられていることがわかる。被験者は、いずれか1つの試験用音源を聴取する。すなわち、10名またはその倍数の人数の被験者によって、全ての試験用音源が聴取されることで、全単語が全音場において聴取されることとなる。これにより、音場間での音韻バランスは保たれる。

1組の試験用音源を、50刺激ずつの4回の試行に分けて、被験者に提示した。試験用音源を4回の試行に分ける際には、各音場から5刺激ずつランダムに抜き出し、さらにそれらをランダムに並べ替えることにより、各試行における音場のバランスを保った。

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 5.3に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。刺激は、被験者の正面2mに位置した1つのスピーカから提示した。実験に用いたスピーカの周波数特性をFigure 5.4に示す。100-10kHzにおいて±5dB以内で平坦である。

F. 実験手順

刺激の終了から次の刺激が開始されるまでの間隔を10秒として被験者に提示した。刺激の提示間隔は、若齢者と高齢者で同様である。1回の試行、つまり50刺激を聴取するのにかかる時間は、10分弱である。また、刺激を提示する際に、合図としてスピーカ下に設置した電球を点灯させた。これは、低

Speech level, dBA	Sound field									
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Test word										
Series of stimuli #1	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200
Series of stimuli #2	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20
Series of stimuli #3	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40
Series of stimuli #4	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60
Series of stimuli #5	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80
Series of stimuli #6	101-120	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Series of stimuli #7	121-140	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120
Series of stimuli #8	141-160	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140
Series of stimuli #9	161-180	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160
Series of stimuli #10	181-200	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180

Figure 5.2 Series of stimuli used in experiment D1. Each series of stimuli consists of 200 combinations of test words and sound fields, and includes different 200 test words. Each test word will be presented in all sound fields when all series of stimuli are presented.

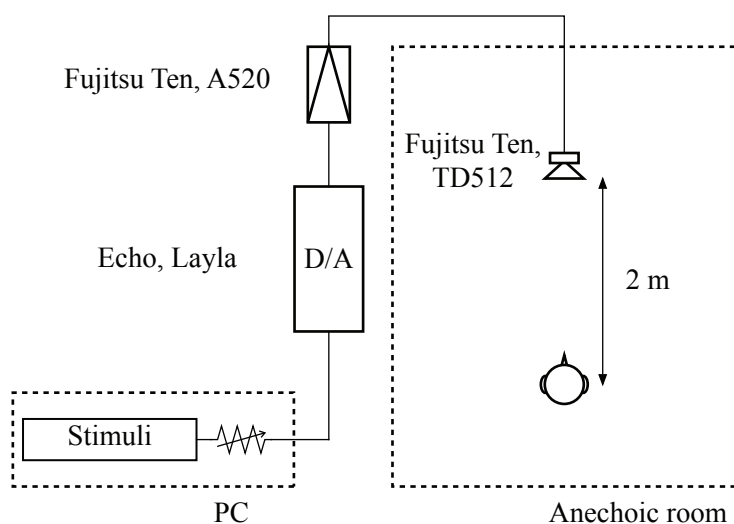


Figure 5.3 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment D1.

い音声レベルの刺激が提示された場合に、高齢者被験者が刺激の提示に気付かず、次の刺激の回答欄を誤る危険性をなくすためである。

被験者には回答用紙をはさんだ野帳を持たせ、無響室に頭を固定せずに座らせた。無響室の照明はつけたままにし、回答の記入に必要な十分な明るさを与えた。「聴き取りにくさ」の回答法は、

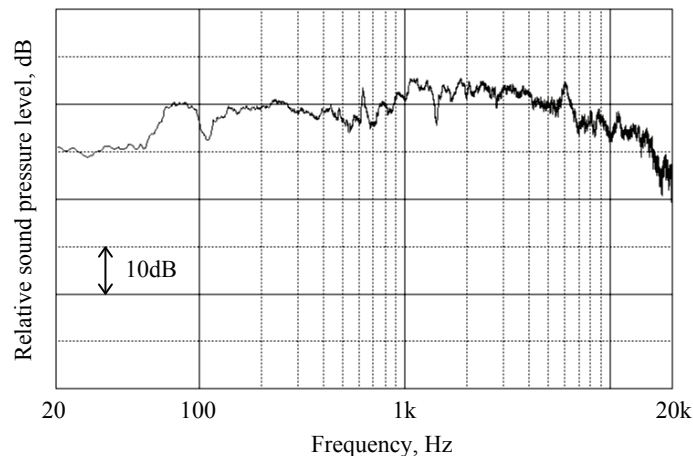


Figure 5.4 Frequency characteristics of loud speaker used in experiments D1 and D3 at listening point.

Morimotoら[6]の方法に従った。被験者には、提示された刺激をカタカナで聴こえた通りに書かせると同時に、その刺激の聴き取りにくさをTable 5.2の4段階で判断させ、数字で記入させた。

高齢者被験者は、事前に実験では用いない10刺激による練習を行った。練習は、実験が可能と判断されるまで繰り返し行った。若齢者被験者は、過去に同様の試験法による実験の被験者となった経験があるので、練習を行わなかった。

Table 5.2 Categories of listening difficulty[6].

1	聴き取りにくくはない	(Not difficult)
2	やや 聴き取りにくい	(A little difficult)
3	かなり 聴き取りにくい	(Fairly difficult)
4	非常に 聴き取りにくい	(Extremely difficult)

5.2.2 結果と考察

A. 若齢者の結果

単語理解度と聴き取りにくさを、前章と同様にして求めた。Figure 5.5に若齢者の結果を示す。

単語理解度（●）は、音声レベルに関わらずほぼ100%に近い値である。被験者毎に単語理解度を求め、音声レベルを要因とした1要因分散分析を行った結果をTable 5.3に示す。音声レベルの主効果は有意ではない（ $p > 0.05$ ）ことから、本実験の範囲では、単語理解度は音声レベルに影響を受けない。従って、若齢者の単語理解度を最大にする音声レベル（MRL）は、30dBA以下である。

一方、聴き取りにくさ（○）は、音声レベルに大きく影響を受け、3%から90%まで幅広い値をとる。分散分析を行った結果（Table 5.4）、音声レベルの主効果は有意であった（ $p < 0.05$ ）。聴き取りにくさは、音声レベルが60dBAの場合に最も低く、音声レベルが60dBAから離れるに従って値が上昇

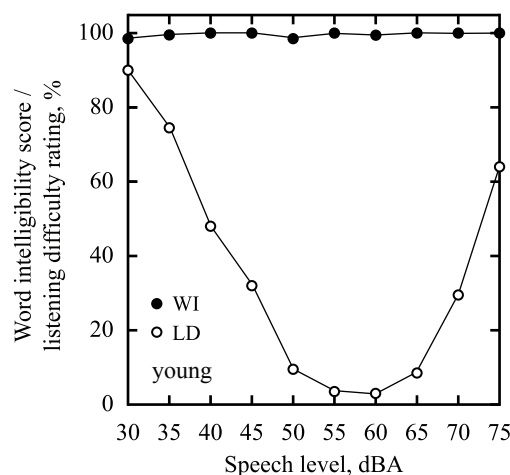


Figure 5.5 Word intelligibility scores (WI) and listening difficulty ratings (LD) for the young in experiment D1 as a function of speech level. Open and closed circles respectively represent LD and WI.

Table 5.3 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the young in experiment D1.

Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Speech level	9	34.0	3.78	1.74	0.09
Subject	9	24.0	2.67	1.23	
Residual	81	176.0	2.17		
Total	99	234.0			

Table 5.4 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the young in experiment D1.

Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Speech level	9	89876.3	9986.25	25.41	<0.01
Subject	9	14461.3	1606.81	4.09	
Residual	81	31831.3	392.98		
Total	99	136168.8			

する。若齢者のMRLは30dBA以下であり、60dBAよりも小さいことから、若年者の最適音声レベル（OSL）は60dBAである。

各音声レベルにおける聴き取りにくさの間の差を、統計的に検定するために、TukeyのHSD[120]による多重比較（ $p < 0.05$ ）を行った。有意水準5%におけるHSDを算出した結果、HSDは28.8%であった。従って、聴き取りにくさの差が28.8%以上であれば、その差は有意水準5%で有意である。聴き取りにくさの最小値は3%であることから、最小値と有意差がみられないのは、聴き取りにくさが31.8%以下の場合である。この条件を満たす音声レベルは50dBAから70dBAの範囲である。若齢者のMRLは30dBA以下であり、上述した区間の下限値である50dBAよりも小さい。以上より、若齢者の許容音声レベル（ASL）は50dBAから70dBAの区間である。

B. 高齢者の結果

Figure 5.6に高齢者の結果を示す。単語理解度（●）は、音声レベルが50dBA以上の場合、約95%で一定である。しかし、若齢者とは異なり、音声レベルが45dBA以下に低下すると、音声レベルが低下するに従って単語理解度も低下し、最も低い30dBAの音場では約65%まで低下する。分散分析の結果（Table 5.5），音声レベルの主効果は有意であった（ $p<0.01$ ）。

HSDによる多重比較（ $p<0.05$, HSD=9.1%）の結果、単語理解度の最大値（96.0%）と有意差がみられなかったのは、音声レベルが45dBA以上の場合であった。従って、高齢者の単語理解度は、有意差を基準とすると45dBAで最大に達するとみなせる。以上より、高齢者のMRLは45dBAである。

高齢者の聴き取りにくさ（○）は、若齢者と同様に音声レベルの影響を大きく受け、6.8%から96.8%と幅広い値をとる。分散分析の結果（Table 5.6），音声レベルの主効果は有意であった（ $p<0.05$ ）。聴き取りにくさは、音声レベルが増加するにつれて減少し、音声レベルが70dBAの場合に最小となる。MRLは45dBAであり、70dBAよりも低いことから、高齢者のOSLは70dBAである。

HSDによる多重比較（ $p<0.05$, HSD=16.8%）の結果、音声レベルが70dBAの場合の聴き取りにくさと、音声レベルが60dBA以上の聴き取りにくさの間に有意差がみられなかった。下限値である60dBAが、高齢者のMRLよりも高いことを踏まえると、高齢者のASLは60dBA以上である。ASLの上限値については、少なくとも75dBA以上であり、本実験の結果から定量的に求めることはできない。

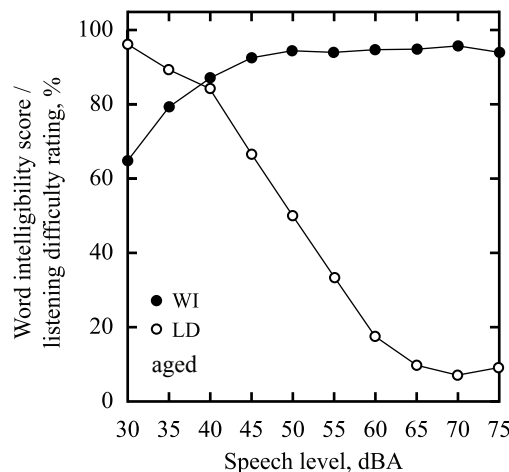


Figure 5.6 As for Fig. 5.5, but for the aged.

Table 5.5 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the aged in experiment D1.

Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Speech level	9	18021.1	2002.35	25.06	< 0.01
Subject	19	9922.4	522.23	6.54	
Residual	171	13661.4	79.89		
Total	199	41604.9			

Table 5.6 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the aged in experiment D1.

Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Speech level	9	233671.1	25963.46	94.73	< 0.01
Subject	19	37232.5	1959.60	7.15	
Residual	171	46867.4	274.08		
Total	199	317771.0			

C. 若齢者と高齢者の比較及び考察

若齢者のOSLは60dBAであり、Vocal effort[57]がnormalの場合の、唇から1mの点における音声レベルとほぼ一致した。このことは、妨害音がない音場では、通常の会話音声の受聴レベルが最も聴き取りにくくないと判断されることを示唆している。一方、高齢者のOSLは、70dBAと若齢者よりも10dB高い値となった。若齢者及び高齢者被験者のPTA（Pure-tone Threshold Average：500, 1k, 2kHzの聴力レベルの平均値）は、それぞれ3.8dBHLと17.5dBHLであるから、OSLは、PTAが1dBHL増加するにあたり、0.73dB増加したことになる。高齢者被験者の聴力レベルのばらつきが大きいため、上記の値は目安でしかないが、既往の研究の結果[108-111]（0.18dB/dBHL～0.78dB/dBHL）と大きな差はない。聴力レベルの上昇量とOSLの上昇量が一致しないのは、老人性難聴者に多い感音性難聴の特徴である、リクルートメント効果[91]、すなわち、感音性難聴者でも音圧レベルが高くなるにつれて、健常者と変わらないラウドネスを感じるようになる現象の影響と推察される。

若齢者のASLは50dBAから70dBA、高齢者のASLは60dBA以上であり、60dBAから70dBAの区間が重複している。従って、妨害音がない音場では若齢者と高齢者の両者が許容できる音声レベルが存在し、それは60dBAから70dBAの区間である。この区間は、Vocal effortではRaised（1m地点で66.5dBA）に相当するため、会話距離であれば、肉声でもそれほど無理なく実現できる音声レベルである。

5.2.3 まとめ

妨害音のない音場における最適音声レベルと許容音声レベルを、若齢者と高齢者のそれぞれに対して、単語了解度と聴き取りにくさを基にして求めた。その結果、以下を明らかにした。

- (1) 若齢者の最適音声レベルは60dBAである。また、許容音声レベルは50dBAから70dBAの区間である。
- (2) 高齢者者の最適音声レベルは70dBAである。また、許容音声レベルの下限值は60dBAであり、上限値は少なくとも75dBA以上である。
- (3) 若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルが存在し、その区間は60dBAから70dBAである。

5.3 実験D2：残響音付加音場における許容音声レベル

実験D2では、妨害音として残響音を取り上げ、残響音が最適音声レベルや許容音声レベルに与える影響を検討する。

5.3.1 実験方法

A. 被験者

若齢者被験者として、20歳代の学生43名（男性23名、女性20名）を用いた。高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる59歳から77歳（平均67.0歳）の男女49名（男性24名、女性25名）を用いた。高齢者被験者に対し簡易聴力検査を行った。聴力検査はオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 5.7に高齢者被験者の平均オーディオグラムを示す。実験D1の高齢者被験者の平均オーディオグラムとほぼ同様であり、老人性難聴の典型的な特徴である2kHz以上の周波数における聴力レベルの上昇と、測定室の暗騒音等の外的要因によって考えられる低周波数における聴力レベルの上昇がみられる。従って、実験D2の高齢者被験者も、年齢相応の聴力レベルを持つ代表的な高齢者の集団とみなせる。若齢者被験者に対しては、聴力検査を実施しなかったが、自覚的な聴力障害がないことを口頭で確認した。

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、若齢者と高齢者の両者にとって親密度の高い120語を抽出して用いた。Table 5.7に実験で用いた単語を示す。実験D1で用いられていない単語が18語（*が付記された単語）あるが、これは単語を抽出する際に用いた親密度のデータが異なるためである。しかし、その18語も高親密度の単語であることは変わらないため、実験結果に影響を及ぼすことはないと考えられ

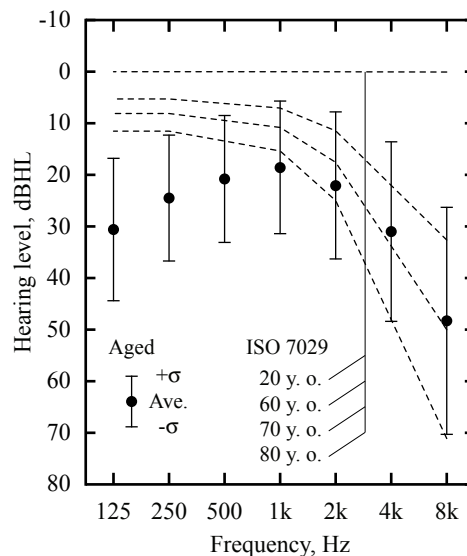


Figure 5.7 Averaged hearing levels of aged subjects who participate in experiment D2. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 20, 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

Table 5.7 Test words used in experiment D2. The test words with asterisk(*) was not used in experiment D1.

1 イタズラ	26 ウリモノ	51 オメデタ	76 カワグツ	101 ギュウニク
2 ケイサン	27 ケンチク	52 サイワイ	77 シハライ	102 スイミン
3 セキニン	28 タベゴロ	53 ツケモノ	78 トウゼン	103 ドロボウ*
4 ニホンシュ	29 ノリモノ	54 ヒダリテ	79 ビンカン	104 ホンモノ
5 ミズイロ*	30 ユウビン	55 ヨコヅナ*	80 レンアイ	105 ワカモノ
6 イチニチ	31 オトウト	56 オヤスミ	81 ガンタン	106 ギンコウ
7 ゲツマツ	32 ケンブツ	57 サクヒン	82 シュッシン*	107 スキヤキ
8 セツヤク	33 チカテツ	58 テイネン	83 ドウブツ	108 ドンブリ
9 ニュウヨク	34 ハジマリ	59 ヒツヨウ	84 フウセン*	109 マエムキ
10 モクテキ	35 ユウヤケ	60 ヨロコビ	85 レンキュウ	110 ワリビキ
11 イリグチ	36 オハナシ	61 オヤユビ	86 キュウキョク*	111 グウゼン
12 ケツロン	37 コウフク	62 ザッソウ	87 ジンカク	112 ゼイキン
13 ソウダン	38 チチオヤ	63 テキトウ	88 ドクリツ	113 ニクマン*
14 ニンジン	39 ハハオヤ	64 ヒトヅマ*	89 ブタニク	114 マンプク
15 ヤキソバ	40 ヨウフク	65 ライネン	90 レンゾク	115 ワルモノ*
16 インサツ	41 オヒサマ*	66 ガイジン*	91 キュウケイ	116 ケイサツ
17 ケンキュウ	42 ゴチソウ	67 シアワセ	92 シンユウ	117 セイネン
18 ソノママ	43 チリガミ	68 デタラメ*	93 トモダチ	118 ニホンゴ
19 ネブソク	44 バングミ	69 ヒョウバン	94 ヘイジツ	119 ミギウデ
20 ユウガタ	45 ヨクジツ	70 ルスバン	95 ロウジン	120 ワレワレ*
21 ウメボシ	46 オフクロ*	71 カラアゲ	96 キュウジツ	
22 ゲンジツ	47 コンダテ*	72 シナモノ*	97 スイドウ	
23 タナバタ*	48 ツウキン	73 テッドウ	98 トリニク	
24 ネンマツ	49 ハンソデ*	74 ヒルメシ	99 ヘイボン	
25 ユウジン	50 ヨコガオ	75 レイトウ	100 ロウドウ	

る。Table 5.7に示した単語の前の番号は、試験用音源作成の際に、作業を円滑に行うために便宜上用いた番号である。単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

C. 実験音場

音場のパラメータは、残響時間と音声レベルの2つである。

インパルス応答を畳み込むことにより、単語に残響音を付加した。インパルス応答の模式図をFigure 5.8に示す。インパルス応答は、直接音とそれに続く残響音から構成される。残響音はリバーブレータ(YAMAHA, SPX-900)を用いて作成した。残響音の直接音に対する遅れ時間と音圧レベル差(図中の Δt 及び ΔL)は、それぞれ50msと-20dBに固定した。遅れ時間は、Haas効果[62]を考慮し、残響音がすべて妨害音として働くよう設定した。残響音を構成する反射音群の到来間隔は変えずに、残響音の音圧の時間減衰の傾きを変えることにより、残響時間を0.5s, 1.0s, 2.0sの3種類に設定した。以下では、それぞれRT05, RT10, RT20と記す。なお、残響時間の周波数特性は平坦である。実験音場の物理指標をTable 5.8に示す。残響音の遅れ時間が50msであるため、 $D_{50}(A)$ や $C_{50}(A)$ は比較的低い。

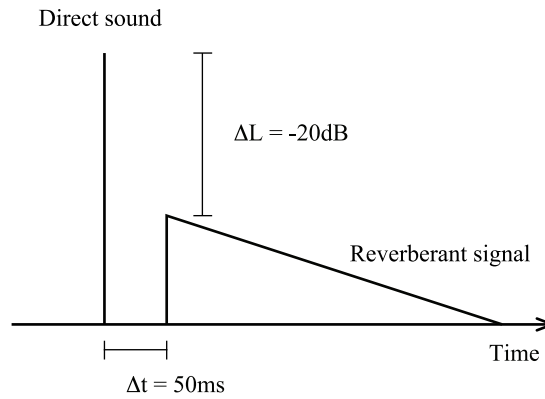


Figure 5.8 Impulse response of test sound fields used in experiment D2.

Table 5.8 Objective measures for impulse responses used in experiment D2.

Impulse response	Reverberation time, s	STI	$D_{50}(A)$	$C_{50}(A)$
A	0.5	0.56	0.38	-2.11
B	1.0	0.49	0.29	-3.81
C	2.0	0.38	0.20	-6.12

音声レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計を用いて測定した。音声レベルの測定は、直接音のみを再生して行った。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はslowとし、各刺激のピークレベルを測定した。直接音のみを再生した場合の音声レベルを、35dBAから70dBAまで5dB刻みで8種類に設定した。従って、残響音を付加した場合の音声レベルは、同じ音声レベルの設定でも残響時間や単語によって異なる。残響音を含めた音声レベルは、残響時間0.5s, 1.0s, 2.0sのそれぞれの場合において、直接音のみを再生した場合の音声レベルより、実験に用いた120語の平均で5.6dB, 6.7dB, 8.2dBずつ増加する。実際に音場で測定できるのは、残響音を含めた音声レベルであるため、以下では直接音のみを再生した場合の音声レベルに上述した値を加えたレベルを用いて分析を進める。

3種類の残響時間と8種類の音声レベルを組み合わせた24音場を実験音場とした。Table 5.9に実験音場のパラメータについてまとめる。

Table 5.9 The summary of parameters of test sound fields used in experiment D2.

Sound field	RT, s	Speech level (with rev.), dBA	Sound field	RT, s	Speech level (with rev.), dBA	Sound field	RT, s	Speech level (with rev.), dBA
1	0.5	35 (40.6)	9	1.0	35 (41.7)	17	2.0	35 (43.2)
2		40 (45.6)	10		40 (46.7)	18		40 (48.2)
3		45 (50.6)	11		45 (51.7)	19		45 (53.2)
4		50 (55.6)	12		50 (56.7)	20		50 (58.2)
5		55 (60.6)	13		55 (61.7)	21		55 (63.2)
6		60 (65.6)	14		60 (66.7)	22		60 (68.2)
7		65 (70.6)	15		65 (71.7)	23		65 (73.2)
8		70 (75.6)	16		70 (76.7)	24		70 (78.2)

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 使用する120単語を番号の若い順から5個ずつまとめ、計24個の単語群をつくる。なお、同じ単語群に第1モーラが同じ単語が入らないよう配慮した。
2. 各単語群に実験音場を1音場ずつ割り当てることにより、1組の試験用音源を完成させる。
3. 手順2を、同じ単語群に同じ音場を割り当てないように繰り返し、合計10組の試験用音源を完成させる。

10組の試験用音源を構成する単語群と音場の関係をFigure 5.9に示す。Figure 5.9における数字は、Table 5.8で示した単語番号である。実験D1と同様に単語の音韻バランスを取るためには、試験用音源を24組用意し、24の倍数の被験者に1組ずつ試験用音源を提示する必要があったが、本実験では、10組の試験用音源をそれぞれ4回または5回用いた。音韻バランスは完全には取れていないが、複数の試験用音源を用いていることから、ある程度のバランスが取れていると考えられ、音韻バランスの影響があったとしても無視できる程度だと考えられる。

1組の試験用音源を、40刺激ずつの3回の試行に分けて、被験者に提示した。試験用音源を3回の試行に分ける際には、最初に刺激をランダムに並べ替え、前から順に40刺激ずつ分けた。

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 5.10に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。刺激は2chのwave形式でデジタル化されており、Lchに直接音のみの刺激、Rchに残響音のみを畳み込んだ刺激が収録されている。音声レベルの測定は、図中のsw.をoffにし、直接音のみを再生して行った。実

	Sound field									
	1	2	3	4	5	...	21	22	23	24
	Test word									
Series of stimuli #1	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	...	101-105	106-110	111-115	116-120
Series of stimuli #2	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	...	106-110	111-115	116-120	1-5
Series of stimuli #3	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	...	111-115	116-120	1-5	6-10
Series of stimuli #4	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	...	116-120	1-5	6-10	11-15
Series of stimuli #5	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	...	1-5	6-10	11-15	16-20
Series of stimuli #6	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	...	6-10	11-15	16-20	21-25
Series of stimuli #7	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	...	11-15	16-20	21-25	26-30
Series of stimuli #8	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	...	16-20	21-25	26-30	31-35
Series of stimuli #9	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	...	21-25	26-30	31-35	36-40
Series of stimuli #10	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	...	26-30	31-35	36-40	41-45

Figure 5.9 Series of stimuli used in experiment D2. Each series of stimuli consists of 120 combinations of test words and sound fields, and includes different 120 test words.

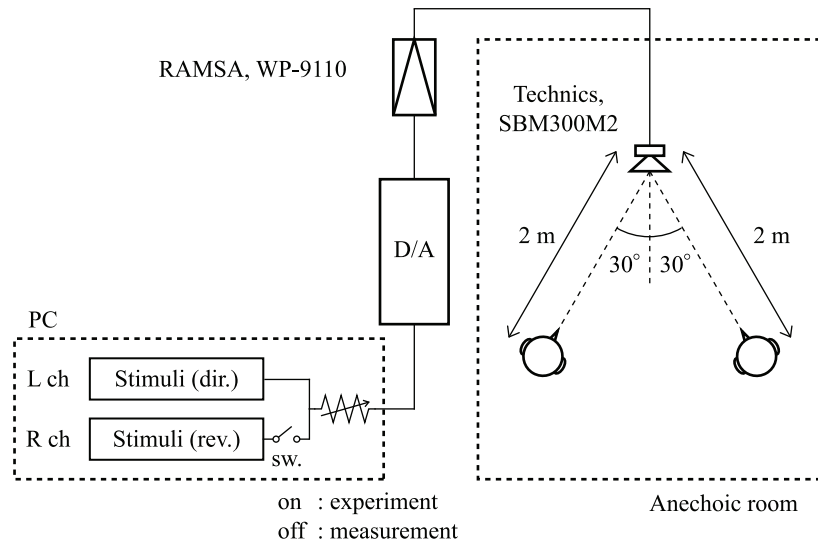


Figure 5.10 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment D2.

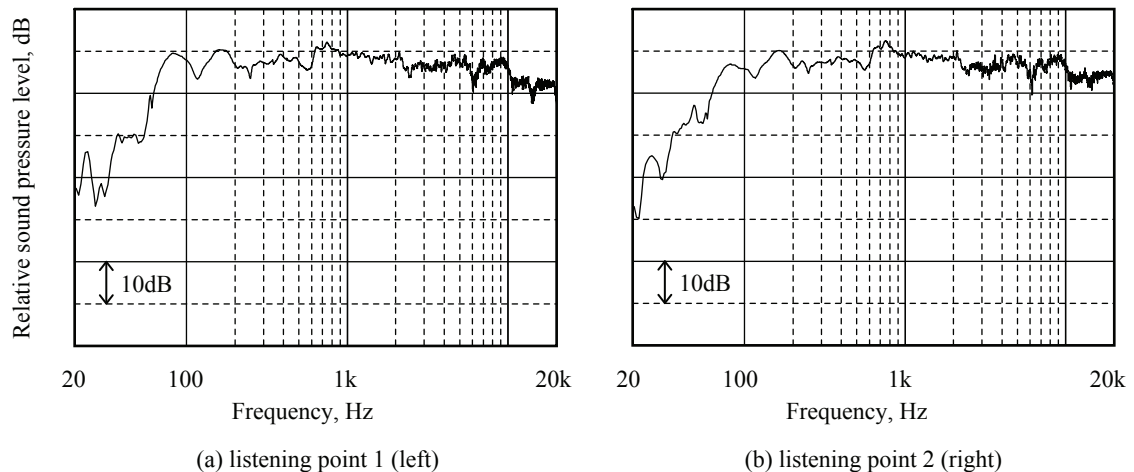


Figure 5.11 Frequency characteristics of loud speaker used in experiments D2. Panels (a) and (b) respectively represent the characteristics at left and right listening points.

験では、計算機上でLchとRchをミックスしてからD/A変換し、1つのスピーカから刺激を提示した。受聴点は、スピーカ正面に対し左右30°の2点であり、スピーカとの距離はそれぞれ2mである。実験に用いたスピーカのそれぞれの受聴点における周波数特性をFigure 5.11に示す。左右の受聴点における周波数特性はほぼ等しく、100-10kHzにおいて±5dB以内で平坦である。

F. 実験手順

刺激の終了から次の刺激が開始されるまでの間隔を約10秒として被験者に提示した。刺激の提示間隔は、若齢者と高齢者で同様である。1回の試行、つまり40刺激を聴取するのにかかる時間は、9分弱である。

回答方法は実験D1と同様である。若齢者及び高齢者被験者は、事前に実験では用いない10刺激による練習を行った。練習は、実験が可能と判断されるまで繰り返し行った。

5.3.2 結果と考察

A. 若齢者の結果

単語理解度とMRL

単語理解度の結果を Figure 5.12に示す。横軸の音声レベルは、残響音を含めたレベルとした。

残響時間の影響をみると、RT05（残響時間0.5sの音場、○）が他の2音場と比べて値が高く、特に音声レベルが低い音場で、その傾向はより明らかである。Glasbergら[94]は、感覚レベル（Sensation level）が低くなるほど、聴覚の時間分解能も低下することを報告している。残響音によるマスキング効果と聴覚の時間分解能に関連があると仮定すると、本実験の結果は説明できる。一方、RT10（残響時間1sの音場、△）とRT20（残響時間2sの音場、□）では、単語理解度にほとんど差がみられない。

音声レベルの影響をみると、RT05では、音声レベルが最大（75.6dBA）の場合のみ単語理解度が低下するが、それより低い音声レベルでは、単語理解度はほぼ一定である。一方、RT10とRT20では、音声レベルが低い場合に単語理解度が大きく低下する。また、RT05と同様に、音声レベルが高い場合に単語理解度が低下する傾向もみられる。

単語理解度が最大となる音声レベル（MRL）を、RT05、RT10、RT20のそれぞれについて求める。Table 5.10にRT05、RT10、RT20のそれぞれについて、音声レベルを要因とする1要因分散分析を行った結果を示す。分散分析は被験者毎の単語理解度を算出して行ったが、実験D2の場合、1音場あたりの回答数は5と少なく、被験者の違いによる分散（Subject）は回答数が多い場合に比べて大きくなる可能性があるが、その分散を分離した上で音声レベルの主効果を検定しているので問題はない。どの残響時間においても、音声レベルの主効果は有意であった（ $p<0.05$ ）。従って、有意差が生じる音声レベルの組み合わせが、どの残響時間においても存在する。TukeyのHSDによる多重比較（ $p<0.05$ ）を行った結果（RT05、RT10、RT20のそれぞれにおいて、HSD=4.9%, 8.1%, 8.2%）、RT05では音声レベルが75.6dBAと50.6, 55.6, 60.6dBAの各組み合わせ、RT10では音声レベルが41.7dBAと56.7dBAの組み合わせ、RT20では音声レベルが43.2dBAと53.2, 63.2dBAの各組み合わせにおいてそれぞれ有意差がみられた。つまり、RT05では75.6dBA、RT10では41.7dBA、RT20では43.2dBAにおける単語理解度が、他の音声レベルの音場に比べて有意に単語理解度が低下した。従って、RT05、

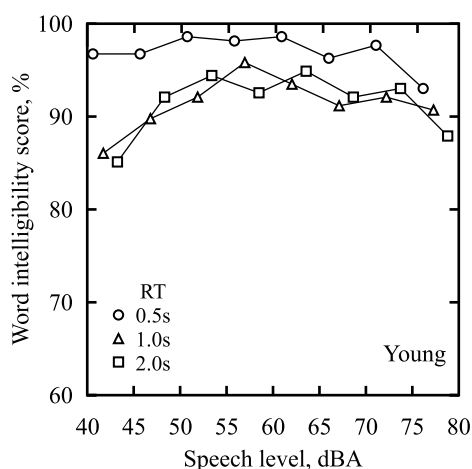


Figure 5.12 The word intelligibility scores for the young in experiment D2. Open circles, triangles and squares represent the word intelligibility scores for the reverberation times of 0.5, 1.0 and 2.0 s, respectively.

Table 5.10 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the young in experiment D2.

Reverberation time = 0.5s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	7	1004.7	143.52	2.56	0.01
Subject	42	1755.8	41.81	0.75	
Residual	294	16495.3	56.11		
Total	343	19255.8			

Reverberation time = 1.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	9	2437.21	348.2	2.29	0.03
Subject	19	5830.23	138.8	0.91	
Residual	171	44662.79	151.9		
Total	199	52930.23			

Reverberation time = 2.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	9	3344.19	477.7	3.09	< 0.01
Subject	19	12013.95	286.0	1.85	
Residual	171	45455.81	154.6		
Total	199	60813.95			

RT10, RT20におけるMRLは、それぞれ40.6dBA以上70.6dBA以下、46.7dBA以上、48.2dBA以上である。

聴き取りにくさとOSL, ASL

聴き取りにくさの結果をFigure 5.13に示す。音声レベルに関わらず、残響時間が長くなるほど聴き取りにくさは高くなる。RT05, RT10, RT20における聴き取りにくさの最小値は、それぞれ、25.6%, 50.7%, 60.9%である。

聴き取りにくさと音声レベルの関係は、実験D1と同様にある極小値を持つ関数となる。音声レベルの影響はRT05において最も大きく、聴き取りにくさは25.6%から65.1%まで変化する。実験Iと合わせて考えると、残響時間が短くなるほど音声レベルが聴き取りにくさ及ぼす影響は小さくなるが、これは、聴き取りにくさの最小値が残響時間が長くなるほど高くなるためである。

RT05, RT10, RT20において、聴き取りにくさが最小値をとるのは、それぞれ55.6dBA, 56.7dBA, 53.2dBAの場合であり、それぞれの音場におけるMRLよりも高い。従って、それぞれの音場における最適音声レベル (OSL) は、55.6dBA, 56.7dBA, 53.2dBAである。

Table 5.11にRT05, RT10, RT20のそれぞれについて、音声レベルを要因とする1要因分散分析を行った結果を示す。どの残響時間においても、音声レベルの主効果は有意 ($p < 0.01$) であり、有意差が生じる音声レベルの組み合わせが、どの残響時間においても存在する。TukeyのHSDによる多重比較 ($p < 0.05$) を行った結果 (RT05, RT10, RT20のそれぞれにおいて、HSD=14.4%, 14.0%, 11.3%) をTable 5.12に示す。表中の*はその音声レベルの組み合わせにおいて、聴き取りにくさに有意差があることを示す。また、各残響時間におけるOSLを網かけで示す。

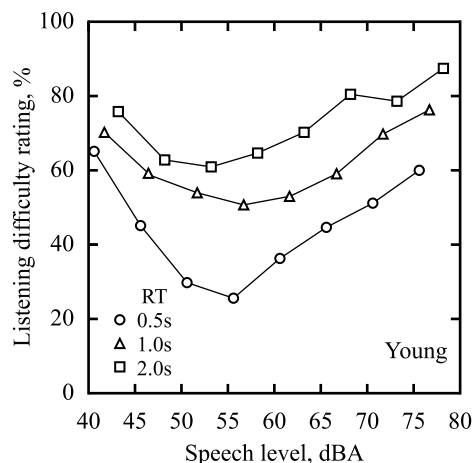


Figure 5.13 The listening difficulty ratings for the young in experiment D2. Open circles, triangles and squares represent the listening difficulty ratings for the reverberation times of 0.5, 1.0 and 2.0 s, respectively.

Table 5.11 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the young in experiment D2.

Reverberation time = 0.5s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	7	58147.7	8306.81	17.25	< 0.01
Subject	42	134620.9	3205.26	6.65	
Residual	294	141602.3	481.64		
Total	343	334370.9			

Reverberation time = 1.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	9	26780.2	3825.75	8.47	< 0.01
Subject	19	155323.3	3698.17	8.19	
Residual	171	132769.8	451.60		
Total	199	314873.3			

Reverberation time = 2.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech level	9	27077.9	3868.27	13.17	< 0.01
Subject	19	163395.3	3890.37	13.24	
Residual	171	86372.1	293.78		
Total	199	276845.3			

RT05において、OSLにおける聴き取りにくさと有意差がみられないのは、音声レベルが50.6dBAと60.6dBAの場合である。RT05におけるMRLは40.6dBA以上70.6dBA以下であるから、上記の区間では、単語理解度は最大に達している。従って、許容音声レベル(ASL)は50.6から60.6dBAの区間である。同様にしてRT10及びRT20におけるASLを求めると、それぞれ46.7から66.7dBA、48.2から63.2dBAの区間である。

Table 5.12 The results of multiple comparisons between listening difficulty ratings for the young for each reverberation time in experiment D2. Asterisk (*) represents that there is a significant difference ($p<0.05$) between listening difficulty ratings.

Reverberation time = 0.5s, HSD=14.4% ($p<0.05$)								
	40.6	45.6	50.6	55.6	60.6	65.6	70.6	75.6
40.6	-	*	*	*	*	*		
45.6		-	*	*				*
50.6			-			*	*	*
55.6				-		*	*	*
60.6					-		*	*
65.6						-		*
70.6							-	
75.6								-

Reverberation time = 1.0s, HSD=14.0% ($p<0.05$)								
	41.7	46.7	51.7	56.7	61.7	66.7	71.7	76.7
41.7	-		*	*	*			
46.7		-						*
51.7			-				*	*
56.7				-			*	*
61.7					-		*	*
66.7						-		*
71.7							-	
76.7								-

Reverberation time = 2.0s, HSD=11.3% ($p<0.05$)								
	43.2	48.2	53.2	58.2	63.2	68.2	73.2	78.2
43.2	-	*	*					*
48.2		-				*	*	*
53.2			-			*	*	*
58.2				-		*	*	*
63.2					-			*
68.2						-		
73.2							-	
78.2								-

B. 高齢者の結果

単語了解度とMRL

単語了解度の結果を Figure 5.14に示す。

残響時間の影響をみると、全体的には残響時間が短いほど単語了解度は上昇する。単語了解度の最大値は、RT05, RT10, RT20において、それぞれ77.1%, 69.0%, 66.9%であり、残響音の影響により大きく低下している。RT05の単語了解度は常に他の残響時間よりも高いが、RT10とRT20の単語了解度は、音声レベルが50から60dBAの区間では前者のほうが高いが、他の音声レベルの区間ではあまり明確な差はみられない。若齢者の単語了解度では、音声レベルが低い場合に残響時間による単語了解度の差が大きくなる傾向がみられたが、高齢者の単語了解度ではその傾向はみられない。

音声レベルの影響をみると、残響時間に関わらず、音声レベルがおおよそ55から60dBA以下になると、単語了解度が低下し始める。若齢者では、音声レベルが最も高い場合に単語了解度が低下する傾

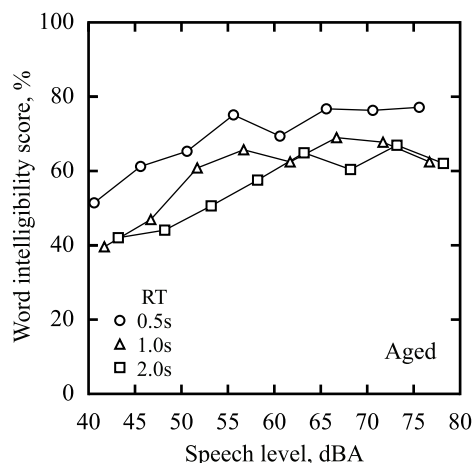


Figure 5.14 As for Fig. 5.12, but for the aged.

向がみられたが、高齢者では、RT10, RT20において最大の音声レベルにおける単語理解度が低下しているようにみえるものの、その傾向は明確ではない。

Table 5.13にRT05, RT10, RT20のそれぞれについて、音声レベルを要因とする1要因分散分析を行った結果を示す。どの残響時間においても、音声レベルの主効果は有意 ($p < 0.01$) であり、有意差が生じる音声レベルの組み合わせが、どの残響時間においても存在する。TukeyのHSDによる多重比較 ($p < 0.05$) を行った結果 (RT05, RT10, RT20のそれぞれにおいて、 $HSD = 11.2\%$, 12.8% , 11.4%)、それぞれの音場における単語理解度の最大値と有意差がみられたのは、RT05では50.6dBA

Table 5.13 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the aged in experiment D2.

Reverberation time = 0.5s					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Speech level	7	29400.0	4200.00	12.68	< 0.01
Subject	48	138169.4	2878.53	8.69	
Residual	336	111300.0	331.25		
Total	391	278869.4			

Reverberation time = 1.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Speech level	7	37713.3	5387.61	12.49	< 0.01
Subject	48	143977.6	2999.53	6.95	
Residual	336	144936.7	431.36		
Total	391	326627.6			

Reverberation time = 2.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
Speech level	7	30529.6	4361.37	12.70	< 0.01
Subject	48	110000.0	2291.67	6.67	
Residual	336	115420.4	343.51		
Total	391	255950.0			

以下、RT10では46.7dBA以下、RT20では53.2dBA以下の音声レベルにおける単語理解度であった。従って、RT05、RT10、RT20におけるMRLは、それぞれ55.6dBA、51.7dBA、58.2dBAである。

聴き取りにくさとOSL、ASL

聴き取りにくさの結果をFigure 5.15に示す。音声レベルに関わらず、残響時間が長くなるほど聴き取りにくさは高くなる。RT05、RT10、RT20における聴き取りにくさの最小値は、それぞれ、42.0%、56.7%、64.9%である。

聴き取りにくさと音声レベルの関係は、若齢者の場合と異なり、明確な極小値がみられない。音声レベルが55から60dBAまでの区間では、音声レベルが上昇するに従って聴き取りにくさは低下するが、音声レベルがそれ以上になると、聴き取りにくさはほぼ一定となる。ただし、RT10とRT20では、音声レベルが75dBAを超えると聴き取りにくさが上昇する傾向がみられる。聴き取りにくさが最小となる音声レベルは、RT05、RT10、RT20において、それぞれ55.6dBA、66.7dBA、73.2dBAである。これらの音声レベルは、それぞれの音場におけるMRLよりも高く、5.1節に示した手順から考えればOSLになるが、上述したように聴き取りにくさと音声レベルに関係において明確な極小値がみられないため、参考値として捉えることとする。

Table 5.14にRT05、RT10、RT20のそれぞれについて、音声レベルを要因とする1要因分散分析を行った結果を示す。どの残響時間においても、音声レベルの主効果は有意 ($p<0.05$) であり、有意差が生じる音声レベルの組み合わせが、どの残響時間においても存在する。

TukeyのHSDによる多重比較 ($p<0.05$) を行った結果 (RT05、RT10、RT20のそれぞれにおいて、HSD=12.2%、13.0%、12.4%) をTable 5.15に示す。聴き取りにくさが最小となる音声レベルを網かけで示している。

RT05において、聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが50.6dBA以下の場合である。RT05の場合、音声レベルが60.6dBA以上における聴き取りにくさがほぼ一定であることを踏まえると、音声レベルが60.6dBA以上の聴き取りにくさと、音声レベルが50.6dBAと45.6dBAの場合の聴き取りにくさに有意差がみられないことから、45.6dBAを聴き取りにくさの最小値と有意差がないレベルの下限值と考えることもできる。しかし、RT05におけるMRLは55.6dBAであるから、RT05のASLの下限值は55.6dBAであり、上限値は少なくとも75.6dBA以上である。

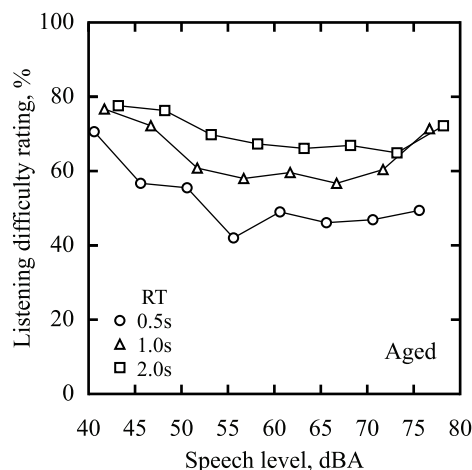


Figure 5.15 As for Fig. 5.13, but for the aged.

Table 5.14 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the aged in experiment D2.

Reverberation time = 0.5s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Speech level	7	27265.3	3895.04	8.63	< 0.01
Subject	48	220767.3	5256.37	11.64	
Residual	336	132734.7	451.48		
Total	391	380767.3			

Reverberation time = 1.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Speech level	7	20342.9	2906.12	5.70	< 0.01
Subject	48	177898.0	4235.67	8.31	
Residual	336	149857.1	509.72		
Total	391	348098.0			

Reverberation time = 2.0s					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
Speech level	7	7811.2	1115.89	2.41	0.02
Subject	48	127040.8	3024.78	6.52	
Residual	336	136338.8	463.74		
Total	391	271190.8			

Table 5.15 The results of multiple comparisons between listening difficulty ratings for the aged for each reverberation time in experiment D2. Asterisk (*) represents that there is a significant difference ($p < 0.05$) between listening difficulty ratings.

Reverberation time = 0.5s, HSD=12.2% ($p < 0.05$)								
	40.6	45.6	50.6	55.6	60.6	65.6	70.6	75.6
40.6	-	*	*	*	*	*	*	*
45.6		-		*				
50.6			-	*				
55.6				-				
60.6					-			
65.6						-		
70.6							-	
75.6								-

Reverberation time = 1.0s, HSD=13.0% ($p < 0.05$)								
	41.7	46.7	51.7	56.7	61.7	66.7	71.7	76.7
41.7	-		*	*	*	*	*	
46.7		-		*		*		
51.7			-					
56.7				-				*
61.7					-			
66.7						-		*
71.7							-	
76.7								-

Table 5.15 Continued.

Reverberation time = 2.0s, HSD=11.2% (p<0.05)								
	43.2	48.2	53.2	58.2	63.2	68.2	73.2	78.2
43.2	-						*	
48.2		-						
53.2			-					
58.2				-				
63.2					-			
68.2						-		
73.2							-	
78.2								-

RT10において、聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが46.7dBA以下の場合と76.7dBAの場合である。RT10におけるMRLは51.7dBAであり、聴き取りにくさの最小値と有意差がない音声レベルの下限值である51.7dBAと等しい。従って、RT10におけるASLは、51.7から71.7dBAの区間である。

RT20において、聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが43.2dBAの場合のみである。つまり、音声レベルが48.2dBA以上では、聴き取りにくさに有意差が無い。RT20におけるMRLは58.2dBAであるから、RT20におけるASLの下限値は58.2dBAであり、上限値は少なくとも78.2dBA以上である。

C. 若齢者と高齢者の比較及び考察

若齢者のRT05, RT10, RT20におけるOSLは、それぞれ55.6dBA, 56.7dBA, 53.2dBAであった。妨害音のない音場におけるOSLが60dBAであったこと、及び本実験では音声レベルを5dB刻みで変化させたことを合わせて考えると、残響音が付加されても、OSLは55から60dBA程度の値で大きく変化しない可能性がある。若齢者のMRLはいずれの音場においてもOSLよりも低いため、OSL付近における聴き取りにくさの評価は、残響音によるマスキング量よりも、むしろ音声刺激のラウドネスが適当であるかどうか大きく依存すると考えれば、OSLが残響音の特性によらないという結果を説明できる。しかし、本実験ではパラメータを限定した3種類の残響音場しか用いていないため、この結論を一般化するためには、より多くのパラメータを変化させて音場を用いて検討する必要がある。

一方、高齢者のOSLは、聴き取りにくさと音声レベルの関係に、明確な極小値がみられなかったため、定量的な値を明らかにすることはできなかった。これは、残響音の付加により、たとえ音声レベルが最適であったとしても、高齢者の聴き取りにくさが高い値となってしまうことが原因である。また、高齢者の場合、聴力レベルが被験者によって大きく異なることも極小値がみられない原因のひとつである。聴力レベルの違いによるMRL, OSL, ASLの違いに関しては、5.5節でまとめて述べる。

Figure 5.16に実験D1（残響音付加なし）及び実験D2（残響時間0.5, 1.0, 2.0 s）で求めたASLを示す。どの条件においても、若齢者と高齢者のASLは重複している区間があり、両者にとって許容できる音声レベルが存在する。それぞれの条件における若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルは、妨害音のない条件では60から70dBA, RT05では55.6から60.6dBA, RT10では51.7から66.7dBA, RT20では58.2から63.2dBAの区間である。また、60dBA付近の音声レベルは、どの条件及び被験者のASLにも含まれている。前述したように、60dBAはVocal effortがNormalの場合の音声レベルに相当することから、暗騒音が無視できるほど小さい場合、若齢者と高齢者に関わらず、人間は

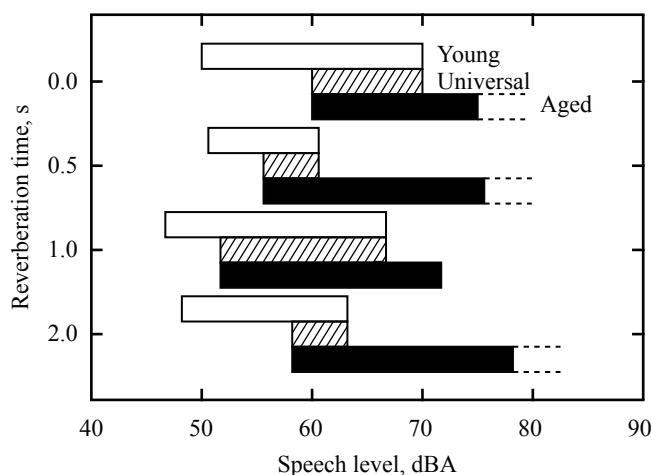


Figure 5.16 The acceptable ranges of speech level for each sound field. Open and closed bars represent the acceptable ranges for the young and the aged, respectively. The hatched bars represent the universally acceptable range, that is, the acceptable range for both the young and the aged.

通常の会話音声程度のラウドネスが、最も聴き取りにくくないと感じると考えられる。また、実験D2の結果より、そのことは残響音がある場合でも同様であることが示唆された。

5.3.3 まとめ

残響音を付加した音場における最適音声レベルと許容音声レベルを、若齢者と高齢者のそれぞれに対して、単語了解度と聴き取りにくさを基にして求めた。その結果、以下を明らかにした。

- (1) 若齢者の最適音声レベルは、残響時間を0.5, 1.0, 2.0sに設定した音場において、それぞれ55.6dBA, 56.7dBA, 53.2dBAであり、残響音の違いによる差は小さい。
- (2) 若齢者の許容音声レベルは、残響時間を0.5, 1.0, 2.0sに設定した音場において、それぞれ50.6から60.6dBA, 46.7から66.7dBA, 48.2から63.2dBAの区間であった。
- (3) 高齢者の最適音声レベルは、本実験では明確に示すことはできなかったが、許容音声レベルは、残響時間を0.5, 1.0, 2.0sに設定した音場において、それぞれ55.6dBA以上, 51.7から71.7dBA, 58.2dBA以上から73.2dBAの区間であった。
- (4) 若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルは、実験に用いたどの残響音場でも存在し、残響時間を0.5, 1.0, 2.0sに設定した音場において、それぞれ55.6から60.6dBA, 51.7から66.7dBA, 58.2から63.2dBAの区間である。
- (5) 暗騒音が無視できる程度に小さい音場では、残響音がない音場も含め、音声レベルが60dBA程度であれば、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルであることが示唆された。

5.4 実験D3：騒音付加音場における許容音声レベル

実験D1及びD2の結果より、暗騒音が無視できるほど小さい音場の許容音声レベルは、通常の会話音声の音声レベルに相当する60dBA付近であることを明らかにした。しかし、実際の公共空間においては、むしろ暗騒音の影響が大きい音場のほうが多く、暗騒音の影響を無視することはできない。そこで、実験D3では暗騒音が若齢者及び高齢者の最適音声レベル及び許容音声レベルに及ぼす影響を明らかにする。

5.4.1 実験方法

A. 被験者

若齢者被験者として、20歳代の学生52名（男性28名、女性24名）を用いた。高齢者被験者として、高齢者向けの人材派遣組織に所属し、社会的活動を日常的に営んでいる65歳から80歳（平均71.3歳）の高齢者52名（男性25名、女性27名）を用いた。全ての被験者に対し、簡易聴力検査を行った。聴力検査はオーディオメータを用いて行い、125Hzから8kHzまでの1オクターブごとの純音について、聴力レベルを5dB刻みで測定した。Figure 5.17に被験者の平均オーディオグラムを示す。

若齢者の平均オーディオグラム（○）は、全体的にISO7029による20歳の聴力レベルの予測値より若干上昇しているが、全周波数において15dBHL以下であり、聴力は正常である。高齢者の平均オーディオグラム（●）は、他の実験の高齢者被験者と同様に、2kHz以上の高周波数で聴力レベルが上昇する老人性難聴の傾向がみられる。実験1や実験2の高齢者被験者の聴力レベルと比較すると、実験3の高齢者被験者の聴力レベルは全体的に高く、その差は最大で10dBHL程度である。しかし、高齢者被験者の聴力レベルはばらつきが大きいいため、実験間の聴力レベルの差が標準偏差を超えることはない。従って、実験3に参加した高齢者被験者は、聴力レベルの点からみると、年齢相応の聴力を持つ代表的な高齢者の集団とみなすことができる。

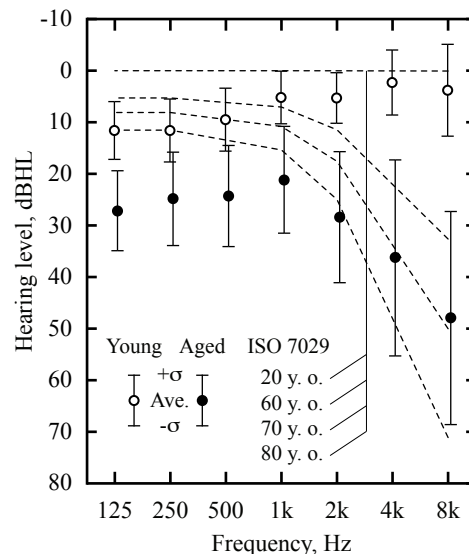


Figure 5.17 Averaged hearing levels of subjects who participate in experiment D3. Open and closed circles respectively represent the results for the young and the aged. Bars represent a standard deviation between ears. Dashed lines represent estimated hearing levels from ISO 7029[4] for 20, 60, 70, and 80 year-old people. Estimated hearing levels are the average of those for male and female.

B. 単語

坂本らによる単語リスト[32]から、若齢者と高齢者の両者にとって親密度の高い52語を抽出して用いた。Table 5.15に実験で用いた単語を示す。なお、この52語はTable 5.1に示した実験1で用いた単語のうち、単語番号が1から52の単語と一致する。Table 5.15に示した単語の前の番号は、試験用音源作成の際に、作業を円滑に行うために用いた番号である。単語長はすべて4モーラである。刺激の作成には、無響室において、女声で録音されたものを用いた。

C. 実験音場

音場のパラメータは、騒音レベルと音声レベルの2つである。残響音は付加していない。

騒音として、2章及び3章の実験でも用いたHothスペクトル[112]を持つ定常騒音を用いた。騒音レベルは、被験者の頭部中心に相当する位置において、被験者がいない状態で騒音計（小野測器、LA-5110）を用いて測定した。騒音計の周波数補正回路はA特性、動特性はslowとし、中央値を測定した。公共空間で想定される騒音レベルを考慮し、40dBAから70dBAまで5dB刻みで7種類に設定した。

音声レベルは、騒音レベルと同様にして、各単語のピークレベルを測定した。音声レベルは、45dBAから85dBAまで5dB刻みで9種類に設定した。設定された音声レベルと、各単語のピークレベルの誤差は0.3dBA以下である。

Table 5.16に実験で用いた騒音レベルと音声レベルの組み合わせを示す。実験音場は、全部で52音場である。第3章の実験結果（Figure 3.25参照）を基に、SN比の最小値は若齢者と高齢者の両者の聴き取りにくさが90%以上となる-5dBとした。また、騒音レベルが40dBA及び45dBAの条件では、騒音レベルが小さいため、実験D1の結果(Figure 5.5, 5.6参照)から音声レベルが85dBAの条件では、聴き取りにくさが最小値よりも十分に高くなると判断し、実験音場から省いた。さらに、文脈効果を低減させる[117]ために、騒音を付加しない条件と音声レベルが65dBAの条件を組み合わせた音場を、聴き取りにくさが最も低くなる基準刺激として実験音場に含めた。なお、基準刺激の音声レベルは、実験D1の結果より、妨害音のない音場において若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルの区間が60から70dBAであることから、その中央値を採用した。また、聴き取りにくさが最も高くなる基準刺激として、SN比が-5dBの音場のうち、騒音レベルが70dBA、音声レベルが65dBAの組み合わせを用いた。

Table 5.15 Test words used in experiment D3

1 ギンコウ	12 ネブソク	23 ヨロコビ	34 ナガソデ	45 アサメシ
2 シアワセ	13 ヨウフク	24 ジュンスイ	35 ゲンジツ	46 セイジカ
3 モクテキ	14 セキニン	25 ワカモノ	36 トモダチ	47 シンユウ
4 ヒルメシ	15 スイドウ	26 ユウガタ	37 イタズラ	48 カイフク
5 ニンジン	16 ジツゲン	27 ブタニク	38 ロクガツ	49 ゴチソウ
6 ソウダン	17 ワリビキ	28 コウフク	39 スイミン	50 サクヒン
7 ユウジン	18 レンアイ	29 ツケモノ	40 チカテツ	51 ヒツヨウ
8 ケイサン	19 ユウビン	30 レイボウ	41 ニホンシュ	52 ナイヨウ
9 オヤスミ	20 ニホンゴ	31 テキトウ	42 ライネン	
10 ケンキュウ	21 ゼイコミ	32 ケイサツ	43 ドウブツ	
11 バングミ	22 キュウジツ	33 ハハオヤ	44 カラアゲ	

Table 5.16 The summary of parameters of test sound fields used in experiment D3

Noise level, dBA	Speech level, dBA									Number of sound fields
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
-					○					1
40	○	○	○	○	○	○	○	○		8
45	○	○	○	○	○	○	○	○		8
50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9
55		○	○	○	○	○	○	○	○	8
60			○	○	○	○	○	○	○	7
65				○	○	○	○	○	○	6
70					○	○	○	○	○	5
										Total: 52

D. 試験用音源の作成

以下に試験用音源の作成手順を示す。

1. 各単語について、全52音場をそれぞれ準備する。すなわち、52単語×52音場の計2704個の刺激をつくる。
2. 2704個の刺激の中から、単語が重複しないように52音場を抜き出す。
3. 文脈効果を低減させる[117]ために、2つの基準刺激（Table 5.16の下線がある音場）を最初に配置し、残りの50音場をランダムに並べ替え、1組の試験用音源を完成させる。
4. 1度用いた刺激を重複しないように同じ手順2と3を繰り返し、全刺激を用いて52組の試験用音源を作成する。

52組の試験用音源を構成する単語と音場の関係を、Figure 5.18に示す。Figure 5.18における数字は、Table 5.15に示した単語番号である。なお、図中の網かけで示した単語番号1の単語に着目すると、この単語がすべての音場において用いられていることがわかる。従って、52組の試験用音源が1回ずつ聴取されることによって、全単語が全音場で聴取されることとなる。これにより、音場間の音韻バランスは保たれる。

1組の試験用音源を聴取する実験を1試行とし、被験者1人につき4試行ずつ実施した。つまり、13人の被験者によって全ての試験用音源が聴取されることになる。被験者は若齢者と高齢者のどちらも52名であるため、1組の試験用音源をそれぞれの被験者群に対し4回ずつ繰り返して使用し、音場間の音韻バランスを保った。

E. 実験装置

実験は無響室で行った。Figure 5.19に実験装置のブロックダイアグラムとスピーカ配置を示す。計算機上で、音声刺激と騒音をミックスしてからD/A変換し、1つのスピーカから刺激を提示した。受聴点は、スピーカ正面1mの位置である。実験に用いたスピーカは実験1と同一であり、その周波数特性は、Figure 5.4に示す通り100-10kHzにおいて±5dB以内で平坦である。

		Sound field											
		1	2	3	4	5	...	48	49	50	51	52	
		Test word											
Series of stimuli #1		1	2	3	4	5	...	48	49	50	51	52	
Series of stimuli #2		2	3	4	5	6	...	49	50	51	52	1	
Series of stimuli #3		3	4	5	6	7	...	50	51	52	1	2	
Series of stimuli #4		4	5	6	7	8	...	51	52	1	2	3	
Series of stimuli #5		5	6	7	8	9	...	52	1	2	3	4	
⋮													
Series of stimuli #48		48	49	50	51	52	...	43	44	45	46	47	
Series of stimuli #49		49	50	51	52	1	...	44	45	46	47	48	
Series of stimuli #50		50	51	52	1	2	...	45	46	47	48	49	
Series of stimuli #51		51	52	1	2	3	...	46	47	48	49	50	
Series of stimuli #52		52	1	2	3	4	...	47	48	49	50	51	

Figure 5.18 Series of stimuli used in experiment D3. A series of stimuli consists of 52 combinations of test words and sound fields. Each series of stimuli includes different 52 test words. Each test word will be presented in all sound fields when all series of stimuli are presented.

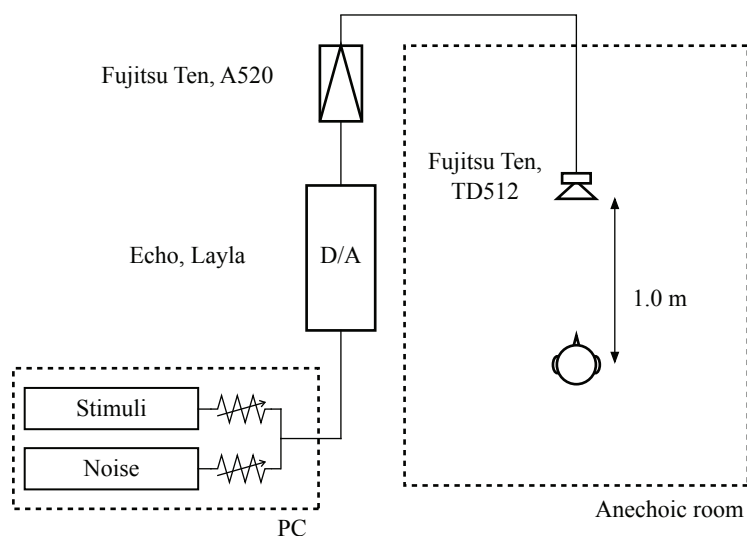


Figure 5.19 Block diagram of stimulus presentation and loudspeaker arrangement in experiment D3.

F. 実験手順

刺激を10s間隔で被験者に提示した。Figure 5.20に刺激提示の模式図を示す。音声刺激の出だしと暗騒音の出だしの間隔は135msである。音声刺激の継続時間は単語によって異なり、0.8から1.3sである。暗騒音の継続時間は5sとし、それぞれ50msの立ち上がりと立ち下がりをつけた。暗騒音の終わってから、次の暗騒音が提示されるまでの間隔は5sである。1回の試行にかかる時間は約9分である。

回答方法は実験D1及びD2と同様である。事前の練習は、実験では用いない20刺激による練習を若齢者と高齢者の両者とも行った。練習は、実験が可能と判断されるまで繰り返し行った。

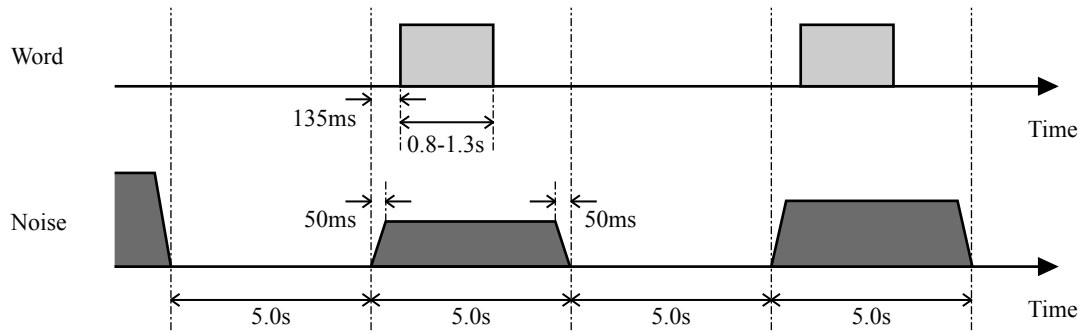


Figure 5.20 Time sequences of presentations of speech signal (word) and additional noise in experiment III.

5.4.2 結果と考察

A. 若齢者の結果

単語理解度とMRL

単語理解度の結果をFigure 5.21に示す。ほとんどの音場において、単語理解度はほぼ100%に近い値で一定である。ただし、騒音レベルが50dBA以上の音場では、SN比が-5dBの場合に単語理解度が90%程度まで低下する。

音声レベルが単語理解度に及ぼす影響を検討するために、騒音レベルごとに音声レベルを要因とした1要因分散分析を行った。実験D3では、被験者それぞれが4試行ずつ実験を行い、各音場につき4回ずつ回答を行っている。各音場の単語理解度を試行 (Trial) ごとに算出し、試行による単語理解度の分散を除いて、音声レベルによる単語理解度の分散が有意であるかどうかを有意水準5%で検定した。分散分析の結果をTable 5.17に示す。暗騒音レベルが40dBAと45dBAの音場では、音声レベルの主効果は有意ではない ($p>0.05$)。一方、暗騒音レベルが55dBA以上の音場では、音声レベル主効果はすべて有意であった ($p<0.01$)。従って、有意差が生じる音声レベルの組み合わせが存在する。

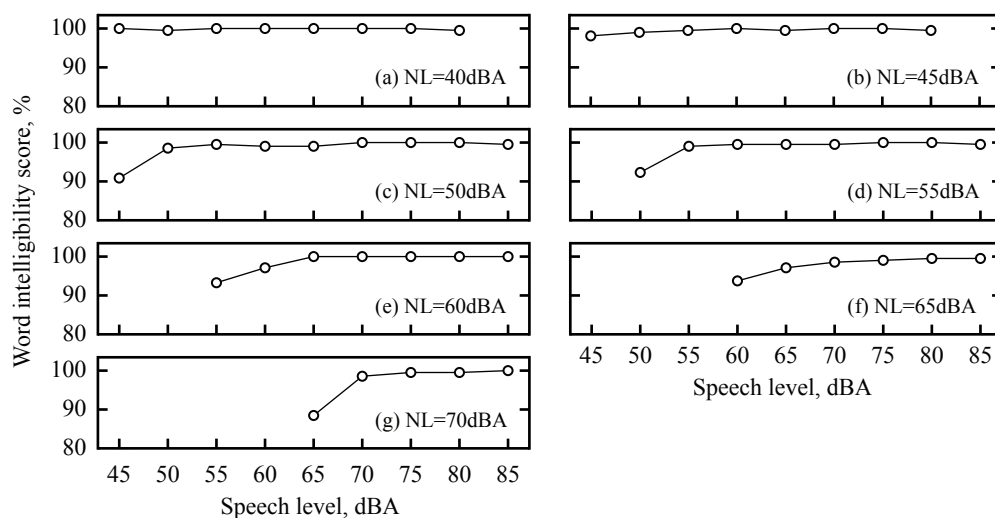


Figure 5.21 The word intelligibility scores for the young in experiment D3. Panels (a)-(g) represent the scores for background noise levels (NL) from 40 to 70dBA, respectively.

Table 5.17 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility scores for the young in experiment D3.

Noise level = 40dBA						Noise level = 45dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	7	1.4	0.20	0.82	0.58	L _{sp}	7	11.9	1.70	1.12	0.39
Trial	3	0.5	0.15	0.64		Trial	3	2.2	0.73	0.48	
Residual	21	5.1	0.24			Residual	21	32.0	1.52		
Total	31	6.9				Total	31	46.1			

Noise level = 50dBA						Noise level = 55dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	8	270.8	33.85	32.41	< 0.01	L _{sp}	7	188.1	26.88	20.02	< 0.01
Trial	3	8.2	2.74	2.62		Trial	3	8.8	2.93	2.18	
Residual	24	25.1	1.04			Residual	21	28.2	1.34		
Total	35	304.1				Total	31	225.1			

Noise level = 60dBA						Noise level = 65dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	6	161.7	26.94	35.31	< 0.01	L _{sp}	5	99.2	19.85	6.11	< 0.01
Trial	3	1.1	0.35	0.46		Trial	3	6.8	2.26	0.70	
Residual	18	13.7	0.76			Residual	15	48.7	3.25		
Total	27	176.5				Total	23	154.7			

Noise level = 70dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	4	387.2	96.80	27.80	< 0.01
Trial	3	18.3	6.10	1.75	
Residual	12	41.8	3.48		
Total	19	447.3			

TukeyのHSDによる多重比較 ($p < 0.05$) を行った結果、SN比が-5dBの音場における単語理解度は、それぞれの暗騒音レベルにおける単語理解度の最大値と有意差がみられた。なお、HSDはそれぞれの暗騒音レベルにおいて、2.5% (50dBA)、2.8% (55dBA)、2.0% (60dBA)、4.1% (65dBA)、4.2% (70dBA) である。暗騒音レベルが60dBAの音場では、音声レベルが60dBA、すなわちSN比が ± 0 dBの音場においても単語理解度が有意に低下した。しかし、この音場における単語理解度は97%であり、SN比が-5dBの音場の単語理解度 (88%から93%の範囲に分布) と比較すると、むしろ100%に近い値と考えられる。そこで、ここではこの有意差は無視する。以上より、騒音付加音場における若齢者の単語理解度が最大となる音声レベル (MRL) は、暗騒音レベルが45dBA以下の場合45dB以下であり、暗騒音レベルが50dBA以上の場合SN比が ± 0 dBとなる音声レベルである。

聴き取りにくさとOSL, ASL

聴き取りにくさの結果をFigure 5.22に示す。単語理解度とは異なり、聴き取りにくさは音声レベルの影響を受けて大きく変化する。単語理解度と同様にして、1要因分散分析を行った結果をTable 5.18に示す。どの暗騒音レベルにおいても、音声レベルの主効果は有意水準5%で有意であった。

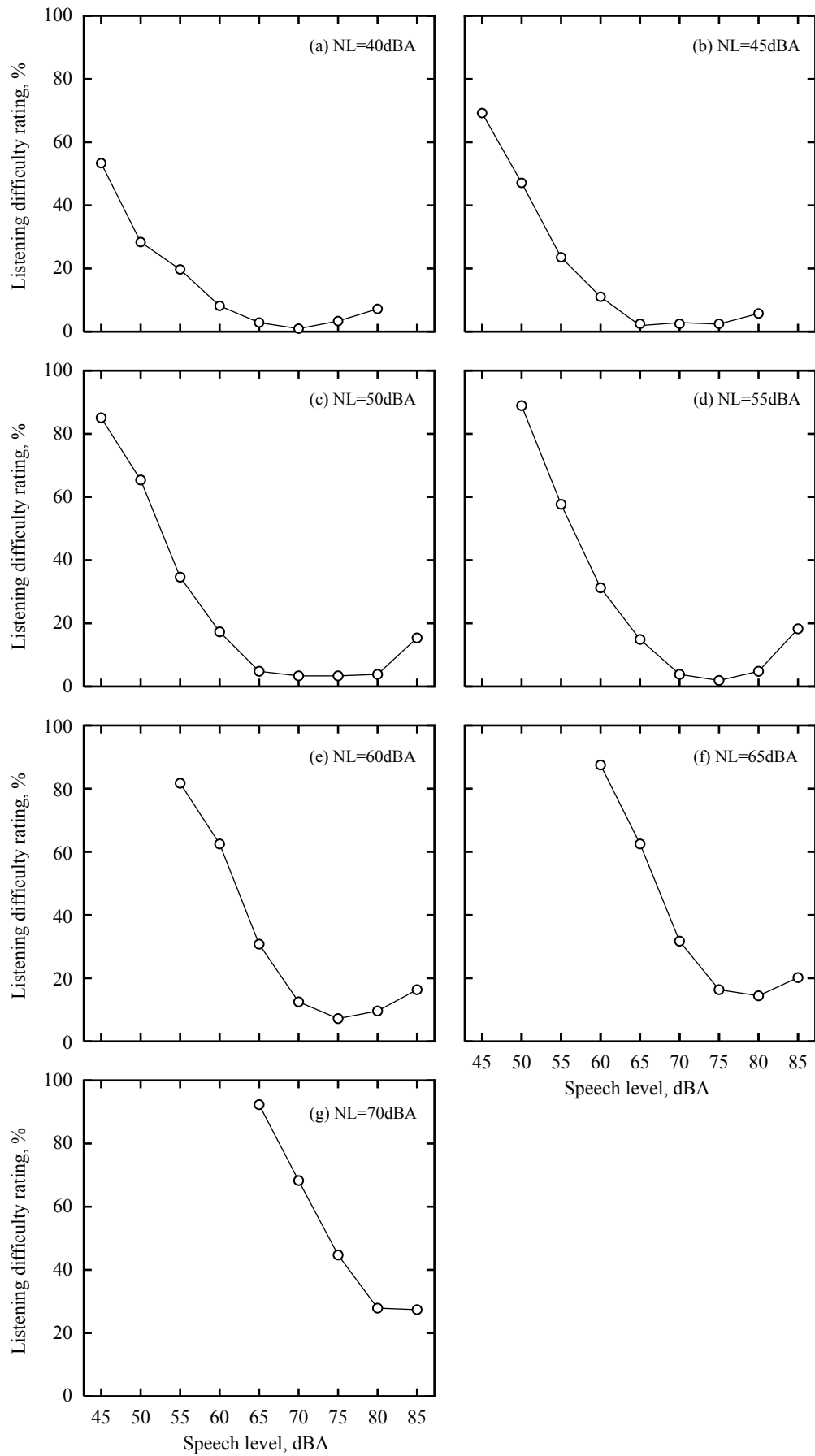


Figure 5.22 The listening difficulty ratings for the young in experiment D3. Panels (a)-(g) represent the ratings for background noise levels (NL) from 40 to 70dBA, respectively.

Table 5.18 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the young in experiment D3.

Noise level = 40dBA						Noise level = 45dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	7	9028.8	1289.82	37.92	< 0.01	L _{sp}	7	17525.8	2503.68	102.17	< 0.01
Trial	3	766.9	255.64	7.52		Trial	3	751.1	250.36	10.22	
Residual	21	714.2	34.01			Residual	21	514.6	24.51		
Total	31	10509.9				Total	31	18791.5			

Noise level = 50dBA						Noise level = 55dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	8	29081.8	3635.23	158.39	< 0.01	L _{sp}	7	26691.8	3813.12	136.04	< 0.01
Trial	3	866.5	288.84	12.58		Trial	3	647.5	215.85	7.70	
Residual	24	550.8	22.95			Residual	21	588.6	28.03		
Total	35	30499.2				Total	31	27928.0			

Noise level = 60dBA						Noise level = 65dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	6	20576.7	3429.44	126.66	< 0.01	L _{sp}	5	17712.0	3542.41	112.54	< 0.01
Trial	3	950.3	316.77	11.70		Trial	3	1051.5	350.51	11.14	
Residual	18	487.4	27.08			Residual	15	472.1	31.48		
Total	27	22014.3				Total	23	19235.7			

Noise level = 70dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	4	12515.90	3128.98	57.14	< 0.01
Trial	3	1190.09	396.70	7.24	
Residual	12	657.17	54.76		
Total	19	14363.2			

L_{sp}: Speech level

騒音レベルが70dBAの音場を除き、聴き取りにくさと音声レベルの関係には極小値がみられる。ただし、騒音レベルが50dBA以下の音場では、聴き取りにくさが0%に近い値で一定となる音声レベルの区間があり、聴き取りにくさが極小となる音声レベルが明確ではない。聴き取りにくさが0%に近い値で一定あるいは極小となる音声レベルは、騒音レベルが増加するに従って増加する。また、騒音レベルが60dBA以上になると、聴き取りにくさの最小値は0%に近い値まで低下しなくなり、音声レベルを最適にしたとしても、まったく聴き取りにくくない音場とすることはできない。

聴き取りにくさが最小となる音声レベルは、少なくともSN比が+15dB以上を満たす音声レベルであり、MRLよりも高い。従って、聴き取りにくさが最小となる音声レベルが最適音声レベル（OSL）である。OSLは騒音レベルが低い順に、70dBA、65dBA、70または75dBA、75dBA、75dBA、80dBA、85dBAである。ただし、騒音レベルが50dBA以下の音場では、音声レベルが65dBAから75dBAの区間の聴き取りにくさにほとんど差はない。このことを踏まえると、騒音付加音場におけるOSLは、下限値が65dBAかつSN比+15dBという条件を満たすような音声レベルであると考えられる。

TukeyのHSDによる多重比較 ($p<0.05$) を行った結果をTable 5.19に示す。各騒音レベルにおけるHSDも合わせて示す。表中の*はその音声レベルの組み合わせにおいて、聴き取りにくさに有意差があることを示す。また、暗騒音レベルにおけるOSLを網かけで示す、以下に、暗騒音レベルにおけるASLの検討を示す。

騒音レベルが40dBA及び45dBAの場合

OSLにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが55dBA以下の場合である。どちらの音場もMRLは45dBA以下であることから、許容音声レベル (ASL) の下限値は60dBAであり、上限値は少なくとも80dBAより高い。

騒音レベルが50dBAの場合

OSLは聴き取りにくさが等しい70dBAと75dBAである。この2つの音声レベルにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが60dBA以下の場合と85dBAの場合である。MRLは50dBAであるから、ASLは65dBAから80dBAの区間である。

騒音レベルが55dBAの場合

OSLにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが65dBA以下の場合と85dBAの場合である。MRLは55dBAであるから、ASLは70dBAから80dBAの区間である。

騒音レベルが60dBAの場合

OSLにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが65dBA以下の場合である。MRLは60dBAであるから、ASLの下限値は70dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

騒音レベルが65dBAの場合

OSLにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが70dBA以下の場合である。MRLは65dBAであるから、ASLの下限値は75dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

騒音レベルが70dBAの場合

OSLにおける聴き取りにくさと有意差があるのは、音声レベルが75dBA以下の場合である。MRLは70dBAであるから、ASLの下限値は80dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

以上の結果をまとめると、ASLの下限値はおおよそSN比が+10dBとなる音声レベルであるが、騒音レベルが低くなったとしても、60dBAより低くなることはないと考えられる。ただし、実験D1の結果より、騒音を付加しない場合のASLの下限値は50dBAであることから、騒音レベルの低下に従って50dBA程度までゆるやかに低下していくことも考えられる。一方、騒音レベルが55dBA程度までは、音声レベルが85dBAになると有意に聴き取りにくさが増加するため、ASLの上限値は80dBA程度と考えられる。騒音レベルが60dBA以上になると、音声レベルが85dBAであっても有意な聴き取りにくさの増加は認められない。しかし、騒音レベルが60dBA及び65dBAの音場では、音声レベルが85dBAになると、OSLにおける聴き取りにくさよりも若干増加する傾向がみられるため、騒音レベルが非常に高い場合でも、85dBAを超える音声レベルはASLの区間外となる可能性がある。

以上の若齢者のMRL, OSL, ASLに関する議論を図にまとめたものをFigure 5.23に示す。図中の太線が、横軸に示した騒音レベルにおけるMRL, OSL, ASLの上限値及び下限値を示す。本実験では、音声レベル及び暗騒音レベルを5dB刻みで変化させたため、Figure 5.23に示す関係は厳密なものではないが、目安としては十分に有用であると考えられる。

Table 5.19 The results of multiple comparisons between listening difficulty ratings for the young for each background noise level in experiment D3. Asterisk (*) represents that there is a significant difference ($p<0.05$) between listening difficulty ratings.

Noise level = 40dBA, HSD=13.8% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	-
50		-		*	*	*	*	*	-
55			-		*	*	*		-
60				-					-
65					-				-
70						-			-
75							-		-
80								-	-
85									-

Noise level = 45dBA, HSD=11.7% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	-
50		-	*	*	*	*	*	*	-
55			-	*	*	*	*	*	-
60				-					-
65					-				-
70						-			-
75							-		-
80								-	-
85									-

Noise level = 50dBA, HSD=11.5% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	*
50		-	*	*	*	*	*	*	*
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-	*	*	*	*	*
65					-				*
70						-			*
75							-		*
80								-	*
85									-

Noise level = 55dBA, HSD=12.6% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	*	*	*	*	*	*	*
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-	*	*	*	*	*
65					-		*		*
70						-			*
75							-		*
80								-	*
85									-

Noise level = 60dBA, HSD=12.2% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-	*	*	*	*	*
65					-	*	*	*	*
70						-			*
75							-		*
80								-	*
85									-

Noise level = 65dBA, HSD=12.9% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	-	-	-	-	-	-
60				-	*	*	*	*	*
65					-	*	*	*	*
70						-	*	*	*
75							-	*	*
80								-	*
85									-

Noise level = 70dBA, HSD=16.7% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	-	-	-	-	-	-
60				-	-	-	-	-	-
65					-	*	*	*	*
70						-	*	*	*
75							-	*	*
80								-	*
85									-

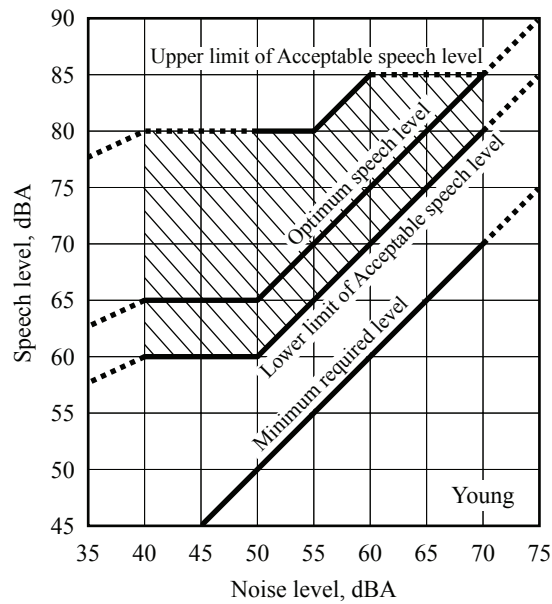


Figure 5.23 Minimum required level, optimum speech level, and the range of acceptable speech level for the young in noisy sound fields

B. 高齢者の結果

単語理解度とMRL

単語理解度の結果をFigure 5.24に示す。若齢者と同様に、音声レベルが高くなると単語理解度は最大値に達し一定になる。単語理解度の最大値は騒音レベルによっては95%程度の場合もあり、単語理解度の最大値がどの暗騒音レベルにおいてもほぼ100%であった若齢者と比較すると、全体的にやや低

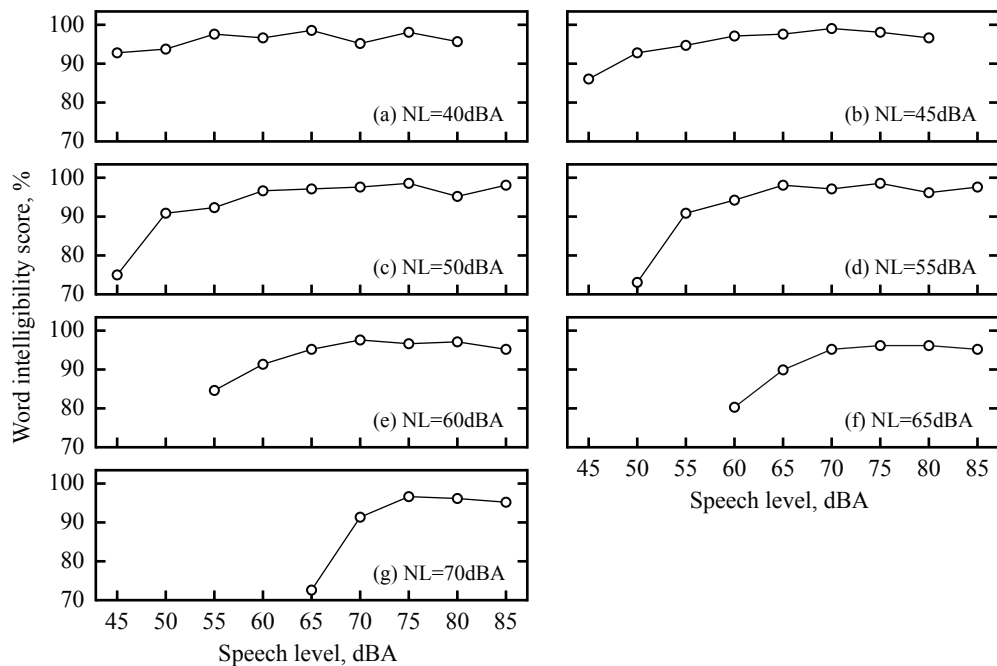


Figure 5.24 As for Fig. 5.21 but for the aged.

い、騒音レベルが40dBAの音場では、最も低いSN比が+5dBであることもあり、音声レベルが低くなっても単語理解度の低下はみられない。騒音レベルが45dBAの音場では、最も小さい音声レベル（45dBA, SN比では ± 0 dB）の場合に単語理解度の低下がみられる。騒音レベルが50dBA以上の音場では、SN比が-5dBとなる音声レベルにおいて明らかな単語理解度の低下がみられる。単語理解度の低下量は若齢者に比べて大きく、騒音レベルが50, 55, 70dBAの各音場では70%付近まで低下した。

若齢者の場合と同様にして、1要因分散分析を行った結果をTable 5.20に示す。騒音レベルが40dBAの音場を除いて、音声レベルの主効果は有意であった（ $p < 0.01$ ）。騒音レベルが45dBA以上の音場について、TukeyのHSDによる多重比較（ $p < 0.05$ ）を行った結果をTable 5.21に示す。各騒音レベルにおけるHSDも合わせて示す。表中の*はその音声レベルの組み合わせにおいて、単語理解度に有意差があることを示す。

騒音レベルが45dBAの音場では、音声レベルが45dBA、すなわちSN比が ± 0 dBの場合の単語理解度と、他の音声レベルすべての組み合わせに有意差がみられた。一方、騒音レベルが50dBA以上の音場では、一部例外はあるが、SN比が-5dBとなる音声レベルにおける単語理解度と、他の音声レベルすべての組み合わせに有意差がみられ、SN比が ± 0 dB以上となる音声レベル間の組み合わせには有意差はみ

Table 5.20 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for word intelligibility for the aged in experiment D3.

Noise level = 40dBA						Noise level = 45dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	7	119.7	17.10	2.35	0.06	L _{sp}	7	496.4	70.91	13.81	< 0.01
Trial	3	7.9	2.62	0.36		Trial	3	24.4	8.13	1.58	
Residual	21	153.0	7.29			Residual	21	107.8	5.13		
Total	31	280.6				Total	31	628.6			

Noise level = 50dBA						Noise level = 55dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	8	1758.7	219.84	22.53	< 0.01	L _{sp}	7	2029.3	289.90	24.15	< 0.01
Trial	3	57.9	19.31	1.98		Trial	3	41.0	13.68	1.14	
Residual	24	234.2	9.76			Residual	21	252.1	12.00		
Total	35	2050.9				Total	31	2322.4			

Noise level = 60dBA						Noise level = 65dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p	Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	6	510.1	85.02	6.70	< 0.01	L _{sp}	5	785.3	157.05	12.25	< 0.01
Trial	3	43.3	14.44	1.14		Trial	3	49.9	16.64	1.30	
Residual	18	228.5	12.69			Residual	15	192.3	12.82		
Total	27	781.9				Total	23	1027.5			

Noise level = 70dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	F	p
L _{sp}	4	1651.26	412.81	34.61	< 0.01
Trial	3	32.54	10.85	0.91	
Residual	12	143.12	11.93		
Total	19	1826.9			

L_{sp}: Speech level

られなかった。従って、騒音レベルが50dBA以上の音場のMRLは、若齢者と同様にSN比が ± 0 dBとなる音声レベルである。

暗騒音レベルが45dBAの音場において、SN比が ± 0 dBの場合における単語理解度が低下したのは、妨害音のない場合の高齢者のMRLが45dBAであることを踏まえると、SN比だけでなく音声レベルそのものが低いことも原因のひとつとして考えられる。高齢者のMRLが45dBA以下になることはないため、暗騒音レベルが50dBA未満の音場では、騒音レベルが低下するに従って、MRLが50dBAから45dBAまで緩やかに低下すると考えれば、多重比較の結果と良く一致する。

Table 5.21 The results of multiple comparisons between word intelligibility scores for the aged for each background noise level in experiment D3. Asterisk (*) represents that there is a significant difference ($p < 0.05$) between word intelligibility scores.

Noise level = 45dBA, HSD=5.4% ($p < 0.05$)										Noise level = 50dBA, HSD=7.5% ($p < 0.05$)									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85		45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	-	45	-	*	*	*	*	*	*	*	*
50		-				*			-	50		-					*		
55			-						-	55			-						
60				-					-	60				-					
65					-				-	65					-				
70						-			-	70						-			
75							-		-	75							-		
80								-	-	80								-	
85									-	85									-

Noise level = 55dBA, HSD=8.2% ($p < 0.05$)										Noise level = 60dBA, HSD=8.3% ($p < 0.05$)									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85		45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	*	*	*	*	*	*	*	50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-							55			-		*	*	*	*	*
60				-						60				-					
65					-					65					-				
70						-				70						-			
75							-			75							-		
80								-		80								-	
85									-	85									-

Noise level = 65dBA, HSD=8.2% ($p < 0.05$)										Noise level = 70dBA, HSD=7.8% ($p < 0.05$)									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85		45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-	50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	-	-	-	-	-	-	55			-	-	-	-	-	-	-
60				-	*	*	*	*	*	60				-	-	-	-	-	-
65					-					65					-	*	*	*	*
70						-				70						-			
75							-			75							-		
80								-		80								-	
85									-	85									-

聴き取りにくさとOSL, ASL

聴き取りにくさの結果をFigure 5.25に示す。音声レベルが聴き取りにくさに及ぼす影響は、単語了解度の場合よりも大きい。騒音レベルが55dBAと60dBAの音場において、聴き取りにくさと音声レベルの関係に明確な極小値がみられるが、他の騒音レベルの音場では、聴き取りにくさは音声レベルが増加するに従って単調減少するか、あるいはある最小値で一定になる。騒音レベルが55dBA以上の音場では、聴き取りにくさの最小値が0%から大きく離れ始め、音声レベルを最適にしても、まったく聴き取りにくくない音場にはならない。

SN比が-5dBの場合における若齢者の聞き取りにくさは90%付近まで増加するが、高齢者の場合は、70から80%程度までしか増加せず、むしろ若齢者の聴き取りにくさよりも低い。この結果の原因として、高齢者は聴力レベルが高いため、暗騒音が若齢者よりも小さく聴こえたことが考えられる。しかし、騒音レベルが高い場合は、リクルートメント効果により、若齢者と高齢者の騒音に対するラウドネスが変わらなくなる可能性もあり、その場合は上述した原因は成立しない。4章 (p. 74-76) においても述べたが、高齢者は聴き取りにくさの評価において、音声がかどうか、あるいは聴き取ることができたかどうかを主な判断基準としていると推測される。高齢者はその判断基準のみで聴き取りにくさを判断したのに対し、若齢者はそれに加えて騒音そのものが大きく聴こえるかどうかに対する評価も行った結果、両者の聴き取りにくさが逆転したということも考えられる。

それぞれの騒音レベルにおける聴き取りにくさが最小となる音声レベルは、騒音レベルが低い音場の順で、75dBA, 80dBA, 75dBA, 80dBA, 80dBA, 85dBA, 85dBAであり、いずれもMRLよりも高い。この結果より、一部例外はあるものの、全体として騒音レベルが増加するにつれてOSLも緩やかに増加すると考えられる。若齢者とは異なり、OSLにおけるSN比は一定ではなく、騒音レベルが低い場合は必要なSN比が高い。騒音レベルが70dBAの音場については、OSLは85dBA以上と考えられるが、非常に大きな音声レベルといってよく、リクルートメント効果を考えると、若齢者のOSLである85dBAと大きな差は生じないと推測される。妨害音がない音場における高齢者のOSLが70dBAであることを踏まえると、騒音レベルが70dBA未満の音場では、OSLは騒音レベルが40dBAまで低下するに従って85dBAから75dBAまで低下し、さらに騒音レベルが低下するとOSLは70dBAに近づいていくと考えると、実験結果とほぼ一致する。

若齢者の場合と同様にして、1要因分散分析を行った結果をTable 5.22に示す。音声レベルの主効果は、どの騒音レベルにおいても有意であった ($p < 0.01$)。それぞれの暗騒音レベルの音場について、TukeyのHSDによる多重比較 ($p < 0.05$) を行った結果をTable 5.23に示す。表中の*はその音声レベルの組み合わせにおいて、聴き取りにくさに有意差があることを示す。各暗騒音レベルにおけるHSDも合わせて示す。また、各騒音レベルにおいて聴き取りにくさが最小となった音声レベルを網かけで示す。以下に、各騒音レベルにおけるASLの検討を示す。

騒音レベルが55dBA以下の場合

聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、共通して音声レベルが60dBA以下の場合である。この騒音レベルの区間における高齢者のMRLは、最大でも55dBAである。従って、ASLの下限値は共通して65dBAである。ASLの上限値については、少なくとも80dBAまたは85dBA以上である。

騒音レベルが60dBAの場合

聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが65dBA以下の場合である。MRLは60dBAであるから、ASLの下限値は70dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

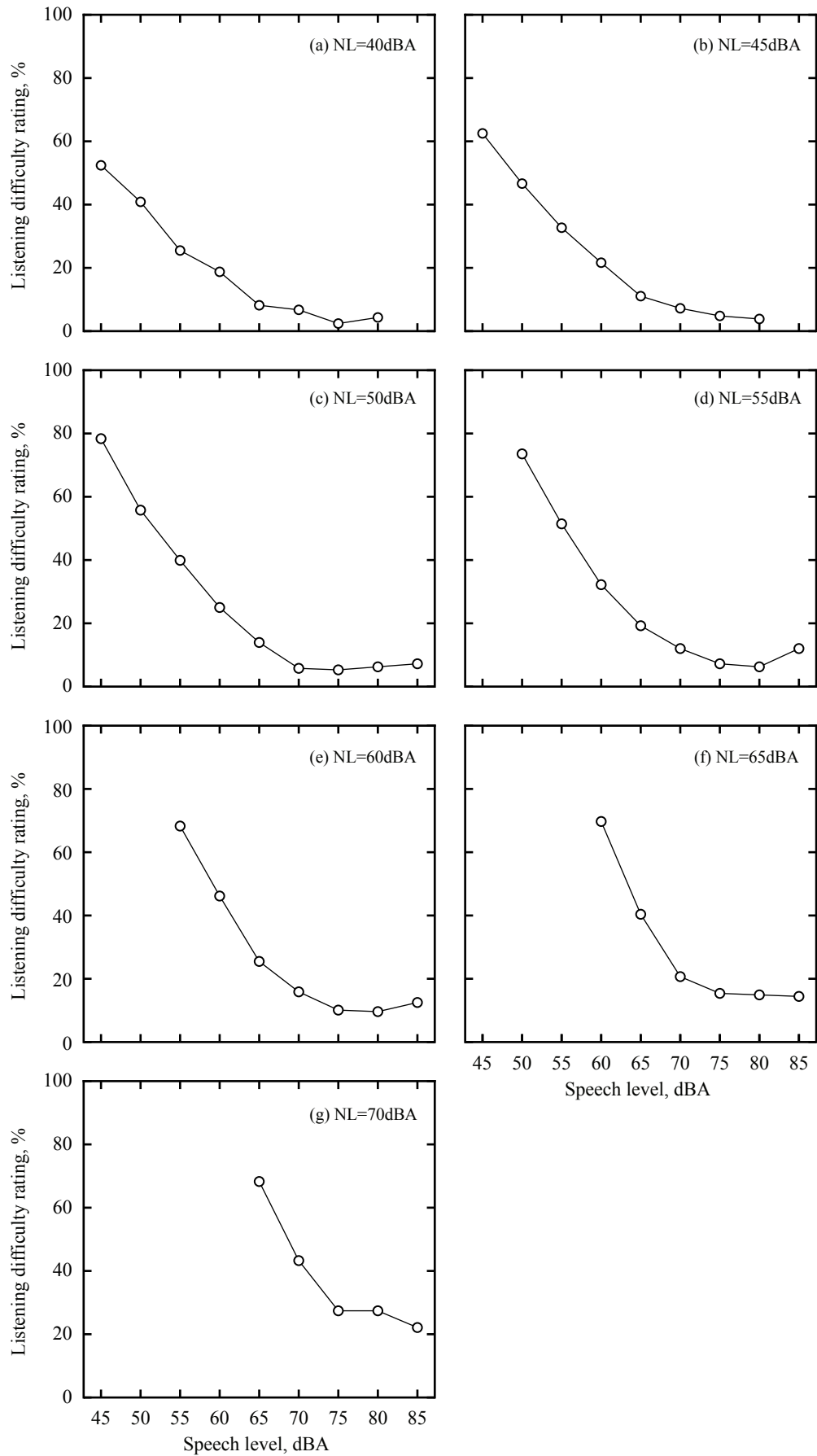


Figure 5.25 As for Fig. 5.22, but for the aged.

Table 5.22 The summary of one-way repeated measures analysis of variance for listening difficulty ratings for the aged in experiment D3.

Noise level = 40dBA						Noise level = 45dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p	Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
L _{sp}	7	9552.4	1364.63	36.78	< 0.01	L _{sp}	7	13197.1	1885.30	69.86	< 0.01
Trial	3	597.6	199.20	5.37		Trial	3	723.9	241.31	8.94	
Residual	21	779.1	37.10			Residual	21	566.8	26.99		
Total	31	10929.1				Total	31	14487.8			

Noise level = 50dBA						Noise level = 55dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p	Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
L _{sp}	8	22192.0	2774.00	78.75	< 0.01	L _{sp}	7	16492.1	2356.02	67.26	< 0.01
Trial	3	1175.6	391.87	11.12		Trial	3	896.2	298.75	8.53	
Residual	24	845.5	35.23			Residual	21	735.6	35.03		
Total	35	24213.1				Total	31	18124.0			

Noise level = 60dBA						Noise level = 65dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p	Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
L _{sp}	6	11977.5	1996.25	99.29	< 0.01	L _{sp}	5	9810.3	1962.06	83.95	< 0.01
Trial	3	955.6	318.53	15.84		Trial	3	1022.4	340.80	14.58	
Residual	18	361.9	20.11			Residual	15	350.6	23.37		
Total	27	13295.0				Total	23	11183.3			

Noise level = 70dBA					
Factor	df	SSQ	MSQ	<i>F</i>	p
L _{sp}	4	5681.58	1420.40	49.19	< 0.01
Trial	3	1341.72	447.24	15.49	
Residual	12	346.52	28.88		
Total	19	7369.8			

L_{sp}: Speech level

騒音レベルが65dBAの場合

聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが65dBA以下の場合である。MRLは65dBAであるから、ASLの下限値は70dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

騒音レベルが70dBAの場合

聴き取りにくさの最小値と有意差があるのは、音声レベルが70dBA以下の場合である。MRLは70dBAであるから、ASLの下限値は75dBAであり、上限値は少なくとも85dBAより大きい。

以上の結果をまとめると、騒音レベルが55dBA以下の場合は、高齢者のASLの下限値は65dBAである。ただし、妨害音のない音場におけるASLの高齢者のASLの下限値が60dBAであることを考えると、ASLの下限値は騒音レベルが低下するに従って、60dBAまで緩やかに減少すると考えられる。騒音レベルが60dBA以上の場合、ASLの下限値はSN比が+5dBから+10dBとなる音声レベルである。騒音レベルが65dBAと70dBAの音場では、若齢者のASLの下限値（SN比+10dB）よりも、高齢者のASLの下限値（SN比+5dB）のほうが低い。このことについては、前述した高齢者の聴き取りにくさの

Table 5.23 The results of multiple comparisons between listening difficulty ratings for the aged for each background noise level in experiment D3. Asterisk (*) represents that there is a significant difference ($p<0.05$) between listening difficulty ratings.

Noise level = 40dBA, HSD=14.5% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-		*	*	*	*	*	*	-
50		-	*	*	*	*	*	*	-
55			-		*	*	*	*	-
60				-			*	*	-
65					-				-
70						-			-
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 45dBA, HSD=12.3% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	-
50		-	*	*	*	*	*	*	-
55			-		*	*	*	*	-
60				-		*	*	*	-
65					-				-
70						-			-
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 50dBA, HSD=14.3% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	*	*	*	*	*	*	*	*
50		-	*	*	*	*	*	*	*
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-		*	*	*	*
65					-				
70						-			
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 55dBA, HSD=14.0% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	*	*	*	*	*	*	*
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-		*	*	*	*
65					-				
70						-			
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 60dBA, HSD=10.5% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	*	*	*	*	*	*
60				-	*	*	*	*	*
65					-		*	*	*
70						-			
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 65dBA, HSD=11.1% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	-	-	-	-	-	-
60				-	*	*	*	*	*
65					-	*	*	*	*
70						-			
75							-	-	-
80								-	-
85									-

Noise level = 70dBA, HSD=12.1% ($p<0.05$)

	45	50	55	60	65	70	75	80	85
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-	-	-	-
55			-	-	-	-	-	-	-
60				-	-	-	-	-	-
65					-	*	*	*	*
70						-	*	*	*
75							-	-	-
80								-	-
85									-

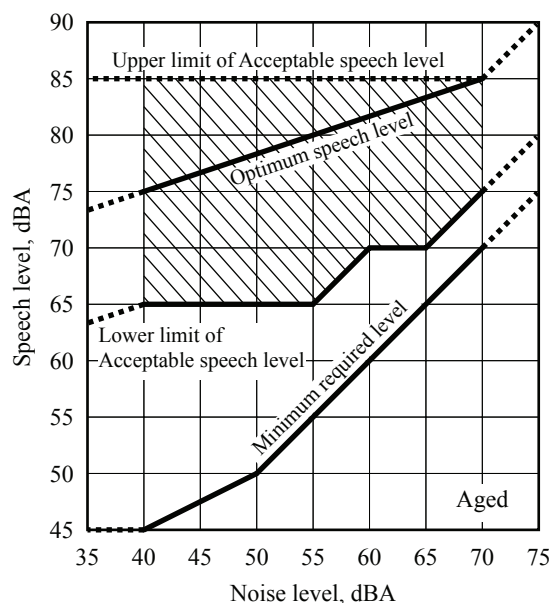


Figure 5.26 Minimum required level, optimum speech level, and the range of acceptable speech level for the aged in noisy sound fields.

評価基準が若齢者と異なることが原因として考えられる。高齢者のASLの上限値は明確には求められなかったが、少なくとも85dBA以上である。騒音レベルが55dBAおよび60dBAの音場では、有意差はみられなかったものの、音声レベルが85dBAの場合に若干の聴き取りにくさの上昇がみられる。従って、上限値は85dBA以上ではあるが、それほど85dBAと大きな差はないと推測される。また、リクルートメント効果を踏まえれば、高齢者のASLの上限値と若齢者のASLの上限値の差が大きく異なることは、やはり考えにくい。

以上の高齢者のMRL, OSL, ASLに関する議論を図にまとめたものをFigure 5.26に示す。図中の太線が、横軸に示した騒音レベルにおけるMRL, OSL, ASLの上限値及び下限値を示す。

C. 若齢者と高齢者の比較及び考察

Figure 5.27に若齢者と高齢者のMRLとASLを重ね合わせて示す。若齢者と高齢者のMRLはほぼ等しいが、高齢者の場合、音声レベルが低くなりすぎると単語理解度が低下するため、騒音レベルが50dBA未満になると、高齢者のMRLは若齢者のMRLより高くなる。従って、図中で太線で示した高齢者のMRLを満たせば、常に両者の単語理解度を有意差が出ない程度に保つことができる。

一方、若齢者と高齢者のASLは異なる部分も多いが、重複している区間が存在する。ASLの上限値は、若齢者のほうが低いため、重複する区間の上限値は若齢者のASLにより決まる。下限値については、騒音レベルが55dB未満の音場では、高齢者のASLの下限値で決まるが、騒音レベルが60dBAより高い音場では、若齢者のASLの下限値により決まる。図中の細かく網かけされた区間が、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルである。騒音レベルが40dBAから55dBAの音場では、65dBAから80dBAの区間で一定である。騒音レベルが55dBより高い音場では、下限値がSN比が+10dBとなる音声レベル、上限値は85dBA程度である。騒音レベルが40dBA未満の音場では、実験D1の結果を踏まえると、騒音レベルが低下するにしたがって、下限値は65dBAから60dBA、上限値は80dBAから70dBAまで低下すると推測される。

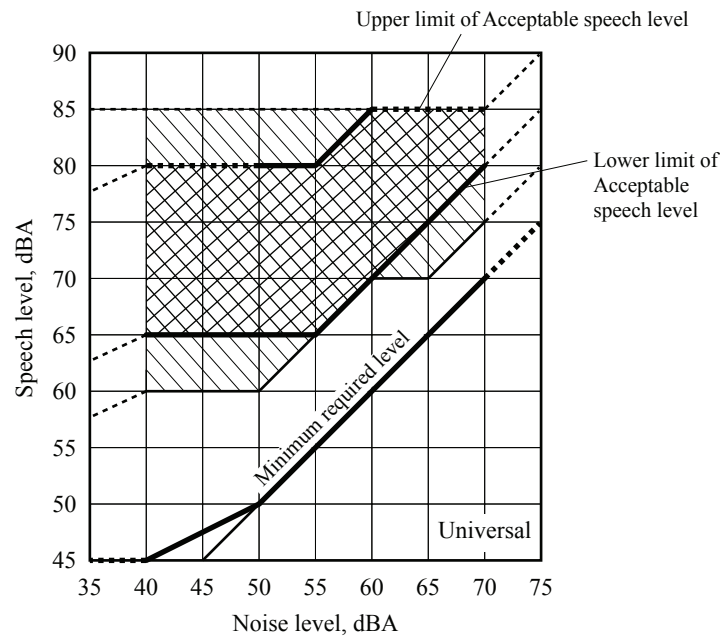


Figure 5.27 Minimum required level and the range of acceptable speech level for both the young and the aged in noisy sound fields. The minutely hatched area represents the range of universally acceptable speech level.

5.4.3 まとめ

暗騒音を付加した音場における最適音声レベルと許容音声レベルを、若齢者と高齢者のそれぞれに対して、単語理解度と聴き取りにくさを基にして求めた。その結果、以下を明らかにした。

- (1) 若齢者の最適音声レベルは、下限値が65dBAかつSN比+15dBという条件を満たすような音声レベルである。
- (2) 若齢者の許容音声レベルの下限値は、SN比が+10dBとなる音声レベルである。ただし、騒音レベルが低い場合でも、50dBAから60dBA程度の音声レベルが必要である。上限値は80dBA程度であるが、騒音レベルが60dBA以上になると、音声レベルが85dBAでも許容される。
- (3) 高齢者の最適音声レベルは、下限値が70dBAから75dBAであり、騒音レベルが増加するに従って、SN比+15dB以上を保ちながら緩やかに増加する。
- (4) 高齢者の許容音声レベルの下限値は、騒音レベルが低い場合でも60dBAから65dBAであり、暗騒音レベルが55dBAを超えると、SN比が+5dBから+10dBとなる音声レベルが下限値となる。上限値は騒音レベルに関わらず85dBA程度と推察される。
- (5) 若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルが存在し、騒音レベルが40dBAから55dBAの音場では、65dBAから80dBAの区間で一定である。騒音レベルが55dBより高い音場では、下限値がSN比が+10dBとなる音声レベル、上限値は85dBA程度である。騒音レベルが40dBA未満の音場では、騒音レベルが低下するにしたがって、下限値は65dBAから60dBA、上限値は80dBAから70dBAまで低下すると推測される。

5.5 結論

5章では、建築空間における若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルを明らかにするために、妨害音のない音場、残響音付加音場、騒音付加音場のそれぞれについて、音声レベルをパラメータとした聴き取りにくさの聴感実験を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルが、音場にかかわらず存在する。
- (2) 暗騒音が無視できる程度に小さい音場では、残響音にかかわらず、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルは、60dBA程度であった。なお、この音声レベルは、1m程度離れて会話する際の音声レベルに一致する。
- (3) 騒音付加音場における若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルは、騒音レベルが40dBAから55dBAの音場では、65dBAから80dBAの区間で一定である。騒音レベルが55dBより高い音場では、下限値がSN比が+10dBとなる音声レベル、上限値は85dBA程度である。騒音レベルが40dBA未満の音場では、騒音レベルが低下するにしたがって、下限値は65dBAから60dBA、上限値は80dBAから70dBAまで低下すると推測される。

第6章 総括

本論文は、ユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能について、実際に即した絶対的な評価が可能な「聴き取りにくさ」を用いて検討した。

第1章では、まず建築空間における音声伝送性能の定義を述べた。次に音に関するユニバーサルデザインが必要であるにもかかわらず顧みられていない現状を指摘し、この一因として、実際に即した絶対的な評価が可能な音声伝送性能の評価法が確立されていなかったことを挙げた。また、音声伝送性能の評価法に関する既往の研究について概説し、Morimotoら[6]が提案した「聴き取りにくさ」が、現時点で最も有効な主観評価法であることを示した。さらに、音声伝送性能の物理評価法と高齢者の受聴特性について既往の研究を概説し、本論文で取り扱う問題として、次の2点を挙げた。

- ・ 「聴き取りにくさ」による音声伝送性能の評価が、若齢者を対象とした場合と同様に、高齢者を対象とした場合でも有効であるかどうか。
- ・ 音声伝送性能に影響を及ぼす主な物理要因である残響音、騒音、音声レベルと「聴き取りにくさ」の対応を、若齢者と高齢者のそれぞれについて定量的に明らかにする。

本論文では、第2章と第3章で前者の問題、第4章と第5章で後者の問題をそれぞれ検討した。以下、各章で得られた成果を要約する。

第2章では、試験用音声の統制に用いられる単語親密度が単語理解度に及ぼす影響について検討した。現在データベース化されている単語親密度は、若齢者を対象として求めたものであるため、高齢者を被験者として用いた場合にも、試験用音声の統制に有効であるかどうかに着目し、聴感実験とその結果の分析を行った。その結果、単語親密度が高齢者の単語理解度に与える影響は、音場にかかわらず有意であることを示した。すなわち、若齢者を対象として測定された単語親密度による試験用音声の統制は、高齢者を対象とした場合でも有効であった。また、単語親密度が単語理解度に及ぼす影響を若齢者と高齢者と比較し、単語理解度が等しい場合は、両者に差がないことを示した。この結果は、若齢者と高齢者の単語理解度の差は、末梢の聴覚器官の衰えに大きく依存することを示唆し、その証左として、2kHzと4kHzの聴力レベルと単語理解度の相関が高いことを示した。

第3章では、加齢による聴力損失が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響について検討した。その結果、高齢者の「聴き取りにくさ」は、若齢者と同様に残響音と騒音の妨害により上昇することを示した。この結果と、第2章の結果を合わせて考えると、「聴き取りにくさ」による音声伝送性能の評価は、高齢者を被験者とした場合でも有効である。また、残響付加音場における高齢者の単語理解度及び「聴き取りにくさ」は、若齢者の単語理解度及び「聴き取りにくさ」と聴力レベルから予測可能であることを示した。

第4章では、残響音及び騒音が「聴き取りにくさ」に及ぼす影響について、既存の音声の明瞭性の評価に用いられる物理指標を用いて検討した。その結果、若齢者と高齢者のどちらの「聴き取りにくさ」も、既存の物理指標と良く対応し、それらの物理指標を用いて予測可能であることを示した。また、「聴き取りにくさ」心理的な反応分布の標準偏差と単語理解度を基にした、音声伝送性能の絶対評価のランクを提案し、ランクと物理指標の関係を明らかにした。このランクを用いれば、残響音と騒

音が音声伝送性能に及ぼす影響を、絶対評価で表すことが可能である。さらに、音声伝送性能のランクを高齢者に対応させるためには、STIで0.1程度高い音声伝送性能が必要であることを示した。

第5章では、音声レベルが音声伝送性能に与える影響について検討した。単語理解度が最大かつ「聴き取りくさ」がその音場における最小値と有意差がない音声レベルを許容音声レベルと定義し、妨害音のない音場、残響音付加音場、騒音付加音場における許容音声レベルを若齢者と高齢者の両者について求めた。その結果、若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルが、音場にかかわらず存在することを明らかにし、ユニバーサルデザインを考慮した音声レベルの設定が可能であることを示した。若齢者と高齢者の両者にとって許容できる音声レベルは、暗騒音が無視できるほど小さい場合は60dBA程度であり、騒音レベルが高い場合については、騒音レベルと許容音声レベルの関係を示す図を求めた。

本論文で得られた成果により、「聴き取りにくさ」による音声伝送性能の評価の有効性は、相対評価の観点、絶対評価の観点、さらにユニバーサルデザインの観点といった複数の観点から確立されたと考える。また、第4章と第5章で得られた成果は、ユニバーサルデザインを実現するために必要な音響条件を定量的に示すものであり、これまでの音声伝送性能に関する研究成果に、新たな一石を積み上げることができたと考える。しかし、本論文で取り扱ったテーマにおいても、音声レベルの影響については、音場の物理量から許容音声レベルを予測できる段階には至っておらず、まだ研究の余地が残っている。また、聴覚障害者の「聴き取りにくさ」を効率よく低減させる残響音や騒音の処理法なども、ユニバーサルデザインを実現するためには必要であろう。さらに、音を用いたユニバーサルデザインの問題として、聴覚障害者だけではなく、視覚障害者に対する誘導鈴を用いた移動支援なども考えなくてはならない。

より良い音環境を実現するために、残された課題、あるいは新たに浮かび上がってくる課題に対する研究成果をひとつひとつ積み上げていくことを今後の目標とし、本論文の結びとする。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々にご指導及びご協力を頂きました。

神戸大学森本政之教授には、本研究を進めるにあたり、終始丁寧かつ厳しくご指導頂きました。森本先生との議論では、音響学に対する知識だけでなく、あらゆる物事をどのように捉えて整理し、それに対する対策を考えていくかということを学ばさせて頂きました。その議論の積み重ねで得られたものは、研究者として今後活動していく上で大切な羅針盤になると考えております。また、なによりも神戸大学で助教として研究に従事する場を与えてくださったことに対し、深く感謝いたします。

神戸大学阪上公博准教授には、ゼミナールを通して、特に音響理論に基づいた異なる視点からの様々な貴重なご意見、ご指導を頂きました。

東北大学鈴木陽一教授、同大学坂本修一助教、NTTコミュニケーション科学基礎研究所天野成昭博士、同研究所近藤公久博士には、本研究に必須であった親密度データベース及び親密度で統制した単語了解度試験音源の使用に関してご協力を頂きました。

日本建築学会音声伝送品質研究SWGには、第4章で用いたインパルス応答データベースの使用について快く承諾頂くとともに、主査の鴻池組西川嘉雄博士をはじめとする委員の皆様には、本論文の内容について多くのご意見を頂きました。

神戸大学環境音響学研究室の学生の皆様には、聴感実験の被験者としてご協力頂きました。特に太田涼氏（現大気社）と和田恵氏（現トステム）には、本論文をまとめるうえで多大なご協力を頂きました。また、筆者が東北大学の学生時代に行った研究については、神田淳氏（現NHKアイテック）、西谷修一氏（現鹿島建設）、澤谷郁子氏（現NHK）にご協力を頂きました。

最後に、産業技術総合研究所佐藤洋博士（元東北大学）には、筆者が東北大学の学生であった時分から、音響学の基礎だけでなく、本論文のテーマにもなった高齢者を対象とした音声伝送性能評価に関する研究についてご指導を頂きました。また、筆者が神戸大学に移ってから、本研究の共同研究者として、非常に多くのご助言、ご指導を頂きました。特に、筆者を音響学の研究に導いてくださったことに対し、深く感謝いたします。

他にもここに記すことのできなかった多くの方々にご協力を頂きました。

以上のすべての方々に、重ねて感謝いたします。

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] 長友 宗重, 佐藤 洋, "高齢社会における建築空間の音響設計," 日本音響学会誌 **55**, 845-850 (1999).
- [3] 内閣府, 平成19年版高齢社会白書 (2007).
- [4] ISO 7029:2000, *Acoustics - Statistical Distribution of Hearing Thresholds as a Function of Age* (International Organization for Standardization, Geneva, 2000).
- [5] 交通エコロジー・モビリティ財団, "公共交通機関旅客施設の移動円滑化整備ガイドライン追補版," (2002).
- [6] 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).
- [7] 戸井田 義徳, "空間内における音声情報伝達," 日本音響学会誌 **51**, 312-316 (1995).
- [8] 日本音響コンサルタント, 単音節明瞭度テープ (1979).
- [9] 小川 有子, 西 隆司, 古川 宣一, "無意味三連音節による明瞭度試験," 日本音響学会第1回シンポジウム「試験用音声の標準化」, 10-16 (1985).
- [10] 飯田 茂隆, "明瞭度テストにおける遠聴の傾向," 日本音響学会誌 **29**, 527-534 (1973).
- [11] 小林 陽太郎, 石井 聖光, "教室に於ける聴取明瞭度試験に就いて," 日本音響学会誌 **7**, 59-63 (1952).
- [12] 幸田 彰, 久我 新一, "講演室の明瞭度試験について: 室の音響条件の計測方法としての性能について," 日本建築學會研究報告 **21**, 569-574 (1953).
- [13] 藤井 正一, 久我 新一, "講演明瞭度による東京都内2. 3のホールの検討," 日本建築學會研究報告 **26**, 1-4 (1954).
- [14] 久我 新一, "東京都内三ホールの明瞭度試験報告," 日本音響学会誌 **10**, 271-281 (1954).
- [15] 久我 新一, "歌舞伎座の明瞭度試験成績の検討," 日本建築學會研究報告 **34**, 89-92 (1955).
- [16] 中島 立視, "室内での音声の「聴き取りやすさ」とSTI(1) -マスク付加による単音節明瞭度試験用音源改善の試み-, " 日本音響学会講演論文集, 1-2 (1985).
- [17] 是永 雄二, 安藤 四一, "音場の時間構造が音声明瞭度に及ぼす影響の予測法: 2波までの反射音場における音節異聴," 日本音響学会誌 **52**, 940-947 (1996).
- [18] 是永 雄二, 安藤 四一, "音場の時間構造が音声明瞭度に及ぼす影響の予測法(その2): 音節異聴モデルの提案," 日本音響学会誌 **54**, 263-275 (1998).
- [19] 植松 道治, 曾根 敏夫, 二村 忠元, "ランダム変動騒音下の音声明瞭度と了解度に関する基礎実験: 変動騒音の言語聴取妨害に関する研究 その1," 日本音響学会誌 **34**, 516-521 (1978).
- [20] 曾根 敏夫, 植松 道治, 金指 久則, 二村 忠元, "ランダム変動騒音下の音声明瞭度の予測: 変動騒音の言語聴取妨害に関する研究その2," 日本音響学会誌 **35**, 58-62 (1979).
- [21] 坂田 展甫, "騒音場における音声伝達特性解析 -明瞭度と損失情報量による受聴系の基礎解析-, " 日本建築学会論文報告集 **276**, 79-86 (1979).

- [22] 坂田 展甫, 吉田 拓正, 徳山 久雄, 春田 千秋, 大鶴 徹, "騒音場における音声伝達特性解析: 推移行列の安定性及び発音音節構成による損失情報量の変動," 日本建築学会論文報告集 **286**, 93-99 (1979).
- [23] 坂田 展甫, 吉田 拓正, 徳山 久雄, 春田 千秋, 大鶴 徹, "騒音場における音声伝達特性解析: 損失情報量, クラスター分析, 因子分析による日本語音節分類," 日本建築学会論文報告集 **294**, 111-121 (1980).
- [24] 小川 有子, "無意味三連音節による明瞭度試験," 日本音響学会第1回シンポジウム「試験用音声の標準化」, 10-16 (1985).
- [25] 持丸 聡, 木村 翔, 関口 克明, 橋本 修, "三連音節とMTF - STI法による室内音場の明瞭度評価に関する研究," 日本建築学会計画系論文報告集 **392**, 22-30 (1988).
- [26] 橋本 修, 木村 翔, 持丸 聡, 中井 秀, "三連音節明瞭度試験用音源の問題点の検討," 日本建築学会学術講演梗概集D, 371-372 (1989).
- [27] 橋本 修, 木村 翔, 宇津木 淳一, "会話音声の発生レートを考慮した三連音節明瞭度試験用音源による室内音場の明瞭度評価について," 日本建築学会計画系論文集 **456**, 1-9 (1994).
- [28] 日本音響学会明瞭度委員会, 明瞭度試験法の基準 (1957).
- [29] 田中 美郷 他, "補聴器適合評価器機の試作に関する研究," 科学研究費補助金研究成果報告書, (1988).
- [30] 戸井田 義徳, "野外拡声装置の明瞭度改善に関する研究," 博士学位請求論文, 東京都立大学, (1984).
- [31] 佐藤 洋, 長友 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 **495**, 15-20 (1997).
- [32] 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了解度試験用リストの構築," 日本音響学会誌 **54**, 842-849 (1998).
- [33] 天野 成昭, 近藤 公久, 日本語の語彙特性 (三省堂, 東京, 1999).
- [34] 吉田 拓正, "定常広帯域騒音下における連続音声と単音節音声の主観的了解度の評定," 日本音響学会誌 **40**, 707-713 (1984).
- [35] 中島 立視, 前田 節雄, "室内での音声の「聴き取り易さ」とSTI," 日本音響学会建築音響研究会資料 AA-84-30, (1984).
- [36] T. Houtgast and H. J. M. Steeneken, "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility," *Acustica* **28**, 66-73 (1973).
- [37] 佐藤 洋, 長友 宗重, 吉野 博, 矢島 吉紀, "残響・騒音の音声聴取に及ぼす影響の評価に関する実験的検討," 日本建築学会計画系論文集 **484**, 1-8 (1996).
- [38] H. Scheffe, "An analysis of variance for paired comparisons," *J. Am. Stat. Assoc.* **47**, 381-400 (1952).
- [39] Hi. Sato, J. Bradley, and M. Morimoto, "Using listening difficulty ratings of conditions for speech communication in rooms," *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 1157-1167 (2005).
- [40] T. Houtgast, "The effect of ambient noise on speech intelligibility in classrooms," *Appl. Acoust.* **14**, 15-25 (1981).
- [41] V. M. A. Peutz, "Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room," *J. Audio. Eng. Soc.* **19**, 915-919 (1971).
- [42] J. S. Bradley, "Speech intelligibility studies in classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 846-854 (1986).

- [43] J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," J. Acoust. Soc. Am. **80**, 837-845 (1986).
- [44] 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).
- [45] 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**, 861-875 (2000).
- [46] H. G. Latham, "The signal-to-noise ratio for speech intelligibility—an auditorium acoustics design index," Appl. Acoust. **12**, 253-320 (1979).
- [47] D. N. Kalikow, K. N. Stevens and L. L. Elliot, "Development of a test of speech intelligibility in noise using sentences materials with controlled word predictability," J. Acoust. Soc. Am. **61**, 1337-1351 (1977).
- [48] J. H. Owen, "Influence of acoustical and linguistic factors on the SPIN test difference score," J. Acoust. Soc. Am. **70**, 678-682 (1981).
- [49] R. Plomp and A. M. Mimpen, "Speech-reception threshold for sentences as a function of age and noise level," J. Acoust. Soc. Am. **66**, 1333-1342 (1979).
- [50] R. Plomp and A. M. Mimpen, "Effect of the Orientation of the Speaker's Head and the Azimuth of a Noise Source on the Speech-Reception Threshold for Sentences," Acustica **48**, 325-328 (1981).
- [51] A. W. Bronkhorst and R. Plomp, "Effect of multiple speechlike maskers on binaural speech recognition in normal and impaired hearing," J. Acoust. Soc. Am. **92**, 3132-3139 (1992).
- [52] B. Gabriel and M. Meis, "Control if hearing aid fittings are successful (II)," Refarate des Horgerate-Akustiker-Kongresses (2001).
- [53] M. Picard and J. S. Bradley, "Revisiting speech interference in classrooms," Audiology **40**, 221-244 (2001).
- [54] N. R. French and J. C. Steinberg, "Factors governing the intelligibility of speech sounds," J. Acoust. Soc. Am. **19**, 90-119 (1947).
- [55] K. D. Kryter, "Methods for the calculation and use of the articulation index," J. Acoust. Soc. Am. **34**, 1689-1697 (1962).
- [56] ANSI S3.5-1969, *Methods for the calculation of the articulation index*, (American National Standards Institute, New York, 1969).
- [57] ANSI S3.5-1997, *Methods for the calculation of the speech intelligibility index*, (American National Standards Institute, New York, 1997).
- [58] R. Thiele, "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Rämen," Acustica **3**, 291-302 (1953).
- [59] W. Reichardt, O. A. Alim, and W. Schmidt, "Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances," Acustica **32**, 126-137 (1975).
- [60] L. Cremer and H. A. Müller (translated by T. J. Schultz), *Principles and Applications of Room Acoustics, Vol. 1*, (Applied Science, Essex, UK, 1982).
- [61] IEC 60268-16, *Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, (International Electrotechnical Commission, 2003).

- [62] H. Haas, "The influence of a single echo on the audibility of speech," J. Audio Eng. Soc. **20**, 146-159 (1972).
- [63] R. H. Bolt and A. D. MacDonald, "Theory of speech masking by reverberation," J. Acoust. Soc. Am. **21**, 570-580 (1949).
- [64] J. P. A. Lochner and J. F. Burger, "The influence of reflections on auditorium acoustics," J. Sound Vib. **1**, 426-454 (1964).
- [65] J. S. Bradley, "Relationships among measures of speech intelligibility in rooms," J. Audio Eng. Soc. **46**, 396-405 (1998).
- [66] G. A. Studebaker and R. L. Shebecoe, "Monosyllabic word recognition at higher-than-normal speech and noise levels," J. Acoust. Soc. Am. **105**, 2431-2444 (1999).
- [67] J. R. Dubno, A. R. Horwitz, and J. B. Ahlstrom, "Word recognition in noise at higher-than-normal levels: Decreases in scores and increase in masking," J. Acoust. Soc. Am. **118**, 914-922 (2005).
- [68] J. R. Dubno, A. R. Horwitz, and J. B. Ahlstrom, "Spectral and threshold effects on recognition of speech at higher-than-normal levels," J. Acoust. Soc. Am. **120**, 310-320 (2006).
- [69] 電子情報通信学会, 聴覚と音声 (コロナ社, 東京, 1980).
- [70] 小椋 靖夫, 浜田 晴夫, 三浦 種敏, "音場における音声伝送品質のためのMTFとSTIについて," 日本音響学会誌 **40**, 181-191 (1984).
- [71] 佐藤 洋, 長友 宗重, 吉野 博, "単音節明瞭度試験法による帯域騒音及び聴力損失が音声情報伝達に及ぼす影響の評価について," 日本建築学会計画系論文集 **494**, 1-6 (1997).
- [72] H. Onaga, Y. Furue, and T. Ikeda, "The disagreement between speech transmission index (STI) and speech intelligibility," Acoust. Sci. & Tech. **22**, 265-271 (2001).
- [73] 増田 潔, 藤原 恭司, 森谷 秀樹, "室内音響設計のための明瞭性評価指標SNRstatとその応用," 日本音響学会誌 **56**, 232-242 (2000).
- [74] 山口 静馬, 為末 隆弘, 佐伯 徹郎, 加藤 裕一, "無意味外来雑音下での音声聴取時における心理評価と聴取成績に関する一考察," 日本音響学会誌 **57**, 398-405 (2001).
- [75] 為末 隆弘, 山口 静馬, 佐伯 徹郎, 老松 建成, "音声聴取時の無意味定常雑音がうるささと聴取成績に及ぼす影響," 日本音響学会誌 **58**, 704-710 (2002).
- [76] L. L. Beranek, *Noise and Vibration Control* (McGraw-Hill, New York, 1971).
- [77] F. B. Stumpf, *Analytical Acoustics* (Ann Arbor Science, MI, 1980).
- [78] I. Sharland, Woods of Colchester Ltd., *Woods Practical Guide to Noise Control* (Woods of Colchester Ltd., Great Britain, 1972).
- [79] P. H. Parkin and H. R. Humphreys, *Acoustics, Noise and Buildings* (Faber, London, 1969).
- [80] W. Burns, *Noise and Man* (John Murray, London, 1968).
- [81] L. L. Kopra and D. Blosser, "Effects of method of measurement on most comfortable loudness level for speech," J. Speech Hear. Res. **11**, 497-508 (1968).
- [82] I. M. Ventry and R. W. Woods, "Most comfortable loudness for pure tones, noise, and speech," J. Acoust. Soc. Am. **49**, 1805-1813 (1971).
- [83] K. W. Berger and J. F. Lowry, "Relationships between various stimuli for MCL," Sound **5**, 11-14 (1971).

- [84] I. Hochberg, "Most comfortable listening for the loudness and intelligibility of speech," *Audiology* **14**, 27-33 (1975).
- [85] 田中 良久, 心理学的測定法 (東京大学出版会, 東京, 1977).
- [86] A. M. Richards, "Most comfortable loudness for pure tones and speech in the presence of masking noise," *J. Speech Hear. Res.* **18**, 498-505 (1975).
- [87] E. V. Heusden, R. Plomp, and L. C. W. Pols, "Effects of ambient noise on the vocal output and the preferred listening level of conversational speech," *Appl. Acoust.* **12**, 31-43 (1979).
- [88] M. Kobayashi, M. Morimoto, Hi. Sato, and Ha. Sato, "Optimum speech level to minimize listening difficulty in public spaces ," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 251-256 (2007).
- [89] B. C. J. Moore, *Cochlear hearing loss* (Whurr Publishers Ltd., London, 1998).
- [90] L. J. Brant and J. L. Fozard, "Age changes in pure-tone hearing thresholds in a longitudinal study of normal human aging," *J. Acoust. Soc. Am.* **88**, 813-820 (1990).
- [91] J. C. Steinberg, M. B. Gardner, "The dependence of hearing impairment on sound intensity," *J. Acoust. Soc. Am.* **9**, 11-23 (1937).
- [92] B. R. Glasberg and B. C. J. Moore, "Auditory filter shapes in subjects with unilateral and bilateral cochlear impairments ," *J. Acoust. Soc. Am.* **79**, 1020-1033 (1986).
- [93] P. J. Fitzgibbons and F. L. Wightman, "Gap detection in normal and hearing-impaired listeners," *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 761-765 (1982).
- [94] B. R. Glasberg, B. C. J. Moore, and S. P. Bacon, "Gap detection and masking in hearing-impaired and normal-hearing subjects," *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 1546-1556 (1987).
- [95] A. J. Duquesnoy, "The intelligibility of sentences in quiet and in noise in aged listeners," *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 1136-1144 (1983).
- [96] K. D. Kryter, C. Williams, and D. M. Green, "Auditory acuity and the perception of speech," *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 1217-1223 (1962).
- [97] A. J. Duquesnoy and R. Plomp, "Effect of reverberation and noise on the in cases of prebycusis ," *J. Acoust. Soc. Am.* **68**, 537-544 (1980).
- [98] A. K. Nabelek and P. K. Robinson, "Monaural and binaural speech perception in reverberation for listeners of various ages ," *J. Acoust. Soc. Am.* **71**, 1242-1248 (1982).
- [99] E. J. Kreul, N. C. Nixon, K. C. Kryter, D. W. Bell, J. S. Land, and E. G. Schubert, "A proposed clinical test of speech discrimination," *J. Speech Hear. Res.* **11**, 536-552 (1968).
- [100] R. J. Irwin and S. F. McAuley, "Relations among temporal acuity, hearing loss, and the perception of speech distorted by noise and reverberation," *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 1557-1565 (1987).
- [101] A. K. Nabelek, "Identification of vowels in quiet, noise, and reverberation: Relationships with age and hearing loss," *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 476-484 (1988).
- [102] K. S. Helfer and R. A. Huntley, "Aging and consonant errors in reverberation and noise," *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 1786-1796 (1991).
- [103] 佐藤 洋, 長友 宗重, 吉野 博, "無意味三連音節明瞭度試験法による残響及び聴力損失が音声情報伝達に及ぼす影響の評価について," *日本建築学会計画系論文集* **495**, 9-13 (1997).
- [104] Hi. Sato, M. Nagatomo, H. Yoshino, "Effect of noise and reverberation on the intelligibility of sentences for listeners with normal hearing and presbycusis," *Proceedings of Noise Effects '98* , 168-173 (1998).

- [105] 落合 博明, 牧野 康一, 山田 一郎, 館野 誠, 村瀬 真理子, "環境騒音下での言葉の明瞭度に関する基礎的研究(2) -耳介・頭部による影響および, 高齢者を用いた実験-, " 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 473-474 (1995).
- [106] 翁長 博, 加治屋 真紀, "残響音場における高齢者及び聴覚障害者の文章了解度," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 94, 1-6 (1994).
- [107] 翁長 博, 池田 哲朗, "発声レートが青年および高齢者の了解度に及ぼす影響およびそれを考慮した物理指標の試み," 日本建築学会計画系論文集 520, 17-23 (1999).
- [108] C. A. Kamm, D. D. Dirks, and M. R. Mickey, "Effect of sensorineural hearing loss on loudness discomfort level and most comfortable loudness judgments," J. Speech Hear. Res. 21, 668-681 (1978).
- [109] I. M. Ventry and J. I. Johnson, "Evaluation of a clinical method for measuring comfortable loudness for speech," J. Speech Hear. Disord. 43, 149-159 (1978).
- [110] B. J. Edgerton, R. C. Beattie, and J. W. Wides, "Loudness discomfort levels of hearing-impaired listeners using speech material," Ear Hear. 1, 206-210 (1980).
- [111] R. C. Beattie and V. G. Warren, "Relationships among speech threshold loudness discomfort, comfortable loudness, and PB max in the elderly hearing impaired," Am. J. Otol. 3, 353-358 (1982).
- [112] D. F. Hoth, "Room noise spectra at subscribers' telephone locations," J. Acoust. Soc. Am. 12, 499-504 (1941).
- [113] 森 敏昭, 吉田 寿夫, 心理学のためのデータ解析テクニカルブック (北大路書房, 京都, 1998).
- [114] 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-, " 日本建築学会環境系論文集 605, 9-14 (2006).
- [115] L. L. Thurstone, "A law of comparative judgement," Psychol. Rev. 35, 273-286 (1927).
- [116] J. S. Bradley, R. Reich, and S. G. Norcross, "A just noticeable difference in C₅₀ for speech," Appl. Acoust. 58, 99-108 (1999).
- [117] 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, 47-58 (2004).
- [118] H. J. M. Steeneken and T. Houtgast, "A multilingual evaluation of the RASTI-Method for estimating speech intelligibility in auditoria," Acustica 54, 185-199 (1984).
- [119] ISO 9921: 2003, *Ergonomics - Assessment of speech communication in rooms* (International Organization for Standardization, Geneva, 2003).
- [120] J. W. Tukey, "The problem of multiple comparisons, Mimeographed Monograph (1953)," appears in full in *Collected Work of J.W. Tukey*, edited by H. Braun (Chapman & Hall Inc., New York, 1994).
- [121] T. Houtgast and H. J. M. Steeneken, "A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria," J. Acoust. Soc. Am. 77, 1069-1077 (1985).
- [122] M. R. Schroeder, "Modulation transfer functions: Definition and measurement," Acustica 49, 179-182 (1981).

付録 A：実験Cで用いたインパルス応答の詳細

Table A1に実験Cで用いられたインパルス応答の詳細を示す。インパルス応答（IR）は、西川らによるデータベース[114]に収録されているものであり、実音場で測定されたインパルス応答をそのまま用いたもの（表中R）と、データベースに収録されているインパルス応答を基に人工的に作成したもの（表中A）の2つに分けられる。表の「室の種類（Kind of room）」に記されている記号は、

Mc：音楽ホール（クラシック音楽用）

Mp：音楽ホール（ポピュラーミュージック用）

Ad：講堂

At：アトリウム

B：宴会場

Ch：教会

Cl：教室

Cn：会議場／会議室

Mv：映画館

Sh：展示場

Sp：競技施設

をそれぞれ示す。表中の物理指標は、STIを除き、すべて500Hzと1kHzの2オクターブバンド幅のバンドパスフィルタを通したインパルス応答から算出した。

Table A1 The impulse responses (IR) used in experiments from C1 to C3.

IR	LD (%)	STI	D ₅₀	C ₅₀ (dB)	t _s (s)	EDT (s)	RT (s)	Kind of room	Volume (m ³)	Surface (m ²)
A1	98.2	0.305	0.108	-9.19	0.341	3.43	2.90	Sp	10000	3100
R1	98.2	0.310	0.093	-9.91	0.382	4.64	3.51			
A2	87.3	0.311	0.074	-10.99	0.284	3.03	2.96			
A3	87.3	0.326	0.114	-8.90	0.324	4.56	3.69			
A4	88.2	0.336	0.073	-11.03	0.262	2.29	2.26			
A5	89.1	0.336	0.135	-8.08	0.268	2.97	2.47			
A6	88.6	0.341	0.150	-7.54	0.241	2.85	2.56			
A7	89.5	0.347	0.188	-6.36	0.220	2.32	2.07			
A8	85.9	0.351	0.176	-6.71	0.298	3.99	3.23			
A9	75.5	0.362	0.154	-7.41	0.217	2.19	2.21			
A10	84.1	0.365	0.133	-8.16	0.191	1.99	2.28	Mc	5600	2600
A11	80.5	0.376	0.191	-6.26	0.231	2.51	2.40			
R2	75.0	0.380	0.195	-6.17	0.189	1.78	1.67	Sp	10000	3100
R3	92.7	0.389	0.152	-7.46	0.300	3.91	3.38	Mc	15500	5200
R4	72.3	0.393	0.233	-5.18	0.222	2.95	2.93	Mc	15500	5200
R5	68.2	0.396	0.176	-6.70	0.185	2.00	1.80	Mc	12500	4000
R6	71.4	0.411	0.232	-5.20	0.174	1.96	1.60	Mc	15500	5200
R7	70.5	0.413	0.265	-4.42	0.179	2.00	1.78	Mc	5600	2600
R8	76.8	0.415	0.175	-6.74	0.202	2.67	2.49	Mc	5600	2600
R9	63.6	0.433	0.329	-3.10	0.150	1.85	1.69	Mc	15500	5200
R10	59.5	0.440	0.181	-6.54	0.162	1.56	1.39	Mc	-	-
R11	66.8	0.445	0.340	-2.89	0.238	3.79	3.74	Sh	93441	16488
R12	60.9	0.446	0.404	-1.69	0.133	2.22	1.92	Mc	28800	8200
R13	64.5	0.446	0.233	-5.18	0.152	1.85	1.63	Mc	11000	3400
R14	53.6	0.458	0.282	-4.06	0.142	1.54	1.42	Mc	7200	2700
R15	65.9	0.458	0.212	-5.70	0.143	1.56	1.47	Mc	28800	8200
R16	49.1	0.462	0.419	-1.43	0.115	2.25	2.36	Mc	7200	2700
R17	54.5	0.465	0.232	-5.21	0.139	1.48	1.41	Mc	5700	2500
R18	54.5	0.485	0.257	-4.62	0.126	1.40	1.26	Ad		8200
R19	61.8	0.487	0.306	-3.55	0.155	1.77	1.51	Ad		1216
R20	47.3	0.488	0.421	-1.39	0.144	2.47	2.26	Mc	11000	3400
R21	56.4	0.491	0.258	-4.60	0.118	1.78	1.47	Mc	6500	2400
R22	58.2	0.501	0.368	-2.35	0.111	1.70	1.46	Sp	29100	8400
R23	52.7	0.506	0.473	-0.46	0.092	1.43	1.31	Mc	4900	2100
R24	45.5	0.507	0.355	-2.60	0.101	1.21	1.15	Ad		3400
R25	43.6	0.526	0.431	-1.21	0.096	1.26	1.17	Sp	10000	3100
R26	28.6	0.527	0.557	1.00	0.105	2.07	1.50	Mc	-	-
R27	35.5	0.536	0.491	-0.16	0.123	2.14	1.94	Mp		1108
R28	40.0	0.542	0.493	-0.12	0.093	1.52	1.37	Ad		2500
R29	30.0	0.547	0.399	-1.78	0.086	0.83	0.90	Mp Sh Sp	725624	96499
R30	37.3	0.552	0.537	0.64	0.148	2.52	1.85			
R31	29.1	0.557	0.468	-0.55	0.109	2.03	1.85	Mc	7100	2700
R32	34.1	0.567	0.465	-0.60	0.098	1.84	1.55	Ad		4000
R33	42.3	0.568	0.629	2.29	0.077	1.83	1.77	Mp		1927
R34	30.5	0.570	0.448	-0.90	0.092	1.43	1.41	Ad		2500
R35	35.5	0.570	0.586	1.50	0.074	1.63	1.45	Mp		1927
R36	32.3	0.575	0.544	0.76	0.086	1.76	1.52	Ad		4000
R37	33.6	0.580	0.565	1.13	0.075	1.68	1.50	Mp		1927

Table A1 Continued.

IR	LD (%)	STI	D ₅₀	C ₅₀ (dB)	t _s (s)	EDT (s)	RT (s)	Kind of room	Volume (m ³)	Surface (m ²)
R38	32.7	0.612	0.773	5.32	0.048	1.87	1.64	Mc, Mp	4600	1800
R39	31.4	0.619	0.575	1.30	0.062	1.07	0.94	Ad		1800
R40	23.6	0.632	0.626	2.23	0.080	1.88	1.52	Ad		4000
R41	33.2	0.632	0.820	6.59	0.047	2.14	2.08	Sh	93441	16488
R42	30.0	0.638	0.688	3.43	0.056	1.35	1.47	Mp	-	-
R43	15.5	0.643	0.634	2.38	0.050	0.61	0.63	Ch	1200	1000
R44	23.2	0.649	0.691	3.50	0.053	1.16	1.16	At	3973	2054
R45	23.2	0.649	0.638	2.46	0.059	1.27	1.56	B	2065	1108
R46	11.8	0.659	0.605	1.84	0.060	1.07	0.98	Mp	5900	2300
R47	15.9	0.670	0.617	2.06	0.051	0.83	0.86	Ad, Cl	2350	1951
R48	23.2	0.673	0.772	5.31	0.046	1.51	1.69	B	4130	1927
R49	23.6	0.673	0.723	4.16	0.055	1.45	1.35	Mp	-	-
R50	28.6	0.677	0.776	5.39	0.049	1.52	1.44	Mp	12500	4700
A12	14.5	0.678	0.718	4.07	0.045	1.21	0.88			
R51	16.8	0.691	0.720	4.09	0.045	1.23	1.11	Mp	6630	-
R52	17.3	0.694	0.617	2.07	0.056	0.91	0.94	Ad		1600
R53	16.4	0.702	0.711	3.91	0.038	0.59	0.67	Ad, Cn	315	313
R54	15.0	0.705	0.768	5.21	0.039	1.13	0.94	Ad		2500
R55	10.9	0.706	0.756	4.92	0.036	0.84	0.75	Mp	-	-
R56	8.6	0.717	0.848	7.47	0.026	0.75	0.72	Mp	4500	1730
R57	15.5	0.724	0.762	5.06	0.041	1.09	1.18	At	3973	2054
A13	14.1	0.725	0.743	4.62	0.040	1.09	0.95			
R58	11.8	0.733	0.787	5.67	0.050	1.96	1.53	Ad		4000
A14	8.2	0.740	0.745	4.66	0.037	0.49	0.40			
R59	12.3	0.752	0.832	6.95	0.029	1.21	0.93	Ap	7700	2300
R60	5.5	0.760	0.792	5.81	0.030	0.59	0.72	Ad, Cn	315	313
A15	9.5	0.761	0.757	4.93	0.037	0.52	0.41			
A16	10.9	0.764	0.849	7.48	0.027	0.41	0.33			
R61	6.8	0.764	0.745	4.66	0.038	0.58	0.54	Ad, Cn	315	313
R62	4.5	0.765	0.782	5.54	0.028	0.49	0.41	Cn	59	94.4
A17	3.2	0.775	0.814	6.42	0.028	0.54	0.44			
R63	3.6	0.777	0.761	5.04	0.028	0.54	0.52	Ad, Cn	430.5	402.1
A18	5.9	0.800	0.863	8.00	0.027	1.27	0.87			
R64	4.1	0.807	0.827	6.79	0.025	0.56	0.44	Ad		4000
R65	4.1	0.824	0.862	7.97	0.024	0.28	0.27	Mp	4600	1760
A19	7.7	0.824	0.853	7.62	0.022	0.58	0.59			
R66	11.8	0.831	0.948	12.65	0.011	1.00	1.40	B	4130	1927
R67	3.6	0.834	0.867	8.13	0.020	0.56	0.48	Ad, Cn	430.5	402.1
R68	11.4	0.835	0.932	11.39	0.018	0.27	0.33	Mv	560	510
A20	2.3	0.848	0.903	9.69	0.017	0.32	0.26			
R69	4.1	0.854	0.896	9.37	0.015	0.71	0.67	Ad, Cn	315	313
A21	5.0	0.865	0.908	9.92	0.023	0.26	0.22			
A22	3.6	0.868	0.973	15.62	0.011	0.23	0.27			
A23	2.7	0.869	0.938	11.83	0.013	0.39	0.36			
A24	2.7	0.894	0.963	14.15	0.014	0.31	0.23			
R70	3.6	0.905	0.969	14.94	0.007	0.54	0.81	Ad, Cl	2900	1600
A25	3.2	0.909	0.973	15.54	0.012	0.20	0.17			
R71	3.6	0.921	0.963	14.14	0.008	0.37	0.56	Ad, Cn	430.5	402.1

付録 B：実験Cで用いた物理指標の算出法

以下に、実験C1で用いた物理指標の定義式を示す。物理指標はインパルス応答から算出した。

D値[58]

直接音から50ms以内に到来する反射音エネルギーは直接音を補強する効果を持つと考え、そのエネルギーの全音響エネルギーに対する比により定義される値。

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

C値[59]

Reichardtは、D値の中の積分区間を80msで区分し、音楽に対する”Clarity”とした。本研究では積分区間をHaas効果[62]を考慮して50msとしたC₅₀を算出した。

$$C_{50} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

時間重心[60]

Cremerは、音の減衰モーメントに着目し、時間重心を提案した。

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Speech transmission index (STI) [36]

HoutgastとSteenekenは、明瞭度及び了解度と対応する伝送系の物理量として、変調伝達関数 (modulation transfer function: MTF) に着目し、これとArticulation Index の考え方を組み合わせたSTIを提案した。以下に文献[121]に従ってその概略を示す。

・MTFの算出

変調角周波数 ω (変調周波数 $F=\omega/2\pi$) におけるMTFを $m(\omega)$ とすると、騒音の影響を考慮しない場合、 $m(\omega)$ は伝送路のインパルス応答 $h(t)$ を用いて、次の式(1)で表される[122]。

$$m(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (1)$$

一方、定常騒音のみが存在する伝送路のMTFを m_{noise} とすると、 m_{noise} は変調角周波数 ω によらず、次の式(2)で表される。

$$m_{noise} = \frac{1}{1 + 10^{-(SNR/10)}} \quad (2)$$

SNR: SN比

騒音の影響を考慮した伝送路の全体のMTFは、騒音が独立にMTFに寄与すると考えると、次の式(3)で表される。

$$m(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \times m_{noise} = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \times \frac{1}{1 + 10^{-(SNR/10)}} \quad (3)$$

STIの算出にあたり、まず、125Hzから8kHzの7つのオクターブバンド ($k = 1, 2, \dots, 7$) について、0.63Hzから12.5Hzまで1/3オクターブ毎に14の変調周波数 ($i = 1, 2, \dots, 14$) におけるMTF、つまり98個のMTF ($m_k(F_i)$) を求める。

・見かけ上のSN比の算出

室内音響及び騒音による妨害を、騒音のみの妨害として換算し、見かけ上のSN比を求める。具体的には、 $m_k(F_i)$ を、次の式(4)を用いて見かけ上のSN比 ($SNR'_k(F_i)$) に換算する。

$$SNR'_k(F_i) = 10 \log_{10} \frac{m_k(F_i)}{1 - m_k(F_i)} \quad (4)$$

・見かけ上のSN比の正規化

式(5)を用いて、見かけ上のSN比を正規化し、Transmission Index ($TI_k(F_i)$) を求める。これは、見かけ上のSN比を、-15dBから+15dBの範囲のみ考慮するものとし、それぞれを0, 1と換算するためである。

$$TI_k(F_i) = \frac{SNR'_k(F_i) + 15}{30}, \quad 0 \leq TI_k(F_i) \leq 1 \quad (5)$$

- Modulation Transfer Index (MTI) の算出

14の変調周波数について求めた $TI_k(F_i)$ を平均し、7つのオクターブバンド毎に MTI_k を求める.

$$MTI_k = \sum_{i=1}^{14} TI_k(F_i) \quad (6)$$

- STIの算出

7つのオクターブバンドの明瞭度に対する寄与率 (w_k) を、それぞれのバンドにおける MTI_k に乘じ、その総和を算出する.

$$STI = \sum_{k=1}^7 w_k \times MTI_k \quad (7)$$

$$w_k = 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17, 0.14 \quad (k = 1, 2, \dots, 7)$$

本研究に関する発表論文等一覧

A. 原著論文

題目	掲載誌	共著者	本文の章
単語親密度と加齢による聴力損失が残響および騒音下における単語理解度に及ぼす影響	日本音響学会誌 58, 346-354 (2002)	佐藤 洋 吉野 博 鈴木 陽一 天野 成昭 近藤 公久 長友 宗重	第2章
Effects of aging on word intelligibility and listening difficulty in various reverberant fields	Journal of Acoustical Society of America 121, 2915-2922 (2007)	佐藤 洋 森本 政之	第3章
The relation between listening difficulty and acoustical objective measures in reverberant sound fields	Journal of Acoustical Society of America (submitted)	森本 政之 佐藤 洋 和田 恵	第4章
Acceptable range of speech level for both young and aged listeners in reverberant and quiet sound fields	Journal of Acoustical Society of America 122, 1616-1623 (2007)	佐藤 洋 森本 政之 太田 涼	第5章

B. 国際会議プロシーディングス

題目	掲載誌	共著者	本文の章
The relation between listening difficulty ratings and various objective measures in rooms (invited)	CD-ROM Proceedings of Forum Acusticum, Budapest, Hungary (2005)	森本 政之 佐藤 洋	第4章
Objective measures for estimating listening difficulty ratings for young and elderly listeners in public spaces (invited)	CD-ROM Proceedings of Western Pacific Acoustics Conference IX, Seoul, Korea (2006).	森本 政之 和田 恵 佐藤 洋	第4章
Optimal speech level by public address system for young and elderly listeners (invited)	CD-ROM Proceedings of 18th International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan (2004)	森本 政之 太田 涼 佐藤 洋	第5章

C. 学術講演

題目	発表会議名	共著者
聴き取りにくさによる残響付加音場における音声の最適受聴レベルに関する検討	日本建築学会近畿支部研究発表会（2002.6）	佐藤 洋 吉野 博 森本 政之
聴力レベルと音声の聴き取りにくさの関係	日本音響学会秋季研究発表会（2002.9）	佐藤 洋 吉野 博 森本 政之
公共空間における音声伝達環境のユニバーサルデザインに関する研究 -単語理解度と聴き取りにくさによる検討-	日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会（2002.12）	
加齢による聴力損失が最適音声レベルに及ぼす影響	日本音響学会秋季研究発表会（2003.9）	森本 政之 太田 涼
聴き取りにくさによる音声伝達性能評価	シンポジウム「音声伝送性能の評価技術の確立に向けて」-日本建築学会音声伝送品質研究SWG活動成果報告会（2005.3）	森本 政之 佐藤 洋
Optimal speech level for speech transmission in noisy environment for young adults and aged persons (invited)	149th Meeting of the Acoustical Society of America（2005.5）	太田 涼 森本 政之 佐藤 洋
音声の聴き取りにくさと音響物理指標の関係-実測インパルス応答を用いた検討-	日本音響学会秋季研究発表会（2005.9）	森本 政之 和田 恵 佐藤 洋
音声の聴き取りにくさと音響物理指標の関係（2）-暗騒音と加齢による聴力損失を考慮した場合-	日本音響学会春季研究発表会（2006.3）	森本 政之 和田 恵 佐藤 洋
音声の聴き取りにくさと音響物理指標の関係（3）-重回帰式による聴き取りにくさの予測-	日本音響学会秋季研究発表会（2006.9）	森本 政之 佐藤 洋
主観評価に基づいた音声伝送品質のランク	第61回 音シンポジウム室内の音声伝送品質の設計・評価基準の確立に向けて（2007.3）	森本 政之 佐藤 洋
ユニバーサルデザインを考慮した公共空間における最適拡声レベル	日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会（2007.11）	森本 政之 佐藤 洋