

建築空間における音声明瞭度の性能評価に関する研究

— その1・音声伝送における diotic 受聴と dichotic 受聴の差に関する検討 —

橋本典久*・下村喜俊**

Study on Speech Articulation in Architectural Space

— Part 1, Hearing test on discrepancy in diotic and dichotic hearing —

Norihisa HASHIMOTO* and Nobutoshi SHIMOMURA**

Abstract

It is pointed out that STI, Speech Transmission Index, does not correspond to the hearing impression. One of the above reason is based on the discrepancy in the hearing, that is diotic hearing and dichotic hearing. In the present study, the influence of this discrepancy is investigated by the hearing test. The following properties become evident after examining the experimental results. STI is insufficient as the speech intelligibility in case of solitary use. The effect of the dichotic hearing is necessary to be considered in the evaluation of articulation. There is a tendency that the category in “KIKITORINIKUSA”, difficulty in speech hearing, gives the clearer results than “KIKITORIYASUSA”, easiness in speech hearing

Key words: STI, diotic hearing, dichotic hearing, KIKITORINIKUSA

1. はじめに

建築空間における音声伝送性能、特に音声明瞭度の物理的評価指標としては、一般的に STI¹⁾(または、その簡略指標である RASTI)が使われる。この STI は、単音明瞭度や文章了解度などの主観的評価指標とは異なり、被験者を必要とせず簡易に算出できることや、インパルス応答から算出できるため設計指標として用いることが出来るなど、多くの利点を持っており、音響設計や音響対策、あるいは性能確認など多くの実務面で利用されている。しかし一方では、STI は音声明瞭度に関して実際の聴感印象との対応が良くないとの指摘がある。例えば、音響対策において、聴感上はかなり改善されていると感じても STI では数値的な変化が殆ど見

られないとか、かなり明瞭度が悪い場合でも、STI の値が一定値以下にならないなどの指摘がよく聞かれる²⁾。特に、低明瞭性の空間での聴感との不一致は大きな問題となる。すなわち、空間が一定以上の性能を有している場合には、それより良い状態を数値的に表現する必要性はそれほど高くはないが、性能が低い場合には、性能の変化を適性に表現する数値的指標は不可欠である。これら STI の整合性の問題については、実測研究や聴感実験、あるいは数値計算などにより種々検討が行われているが、未だ明確な結論が得られていないのが現状といえる^{3),4)}。

STI が聴感印象との対応が良くないと言われる一つの理由として、STI が一つのマイクロフォンから得られる物理指標であることが考えられる。すなわち、実際の聴感には2つの耳から得られる両耳指標であるのに比べ、STI は1つのマイクロフォンから得られる値であり、いわば単耳指標である。本研究では、STI の妥当性

平成 14 年 12 月 26 日受理

* 建築工学科・教授

** 大学院研究生

に関する基礎的検討として、これらの違いが明瞭度評価にどの程度の影響を与えるかを聴感実験により検討した。実験方法としては、まず音響条件の異なる各種建築空間においてアナウンス音を流し、これを測定位置や高さなど全く同条件で、1chマイクによるモノラル録音とダミーヘッドを用いた2chのバイノーラル録音を行った。これらの現場録音の音源テープを用い、モノラル録音のdiotic受聴とバイノーラル録音のdichotic受聴の差に関する聴感実験を行った。

2. diotic 受聴と dichotic 受聴に関する 既往研究

両方の耳に全く同じ音の刺激が加わることを diotic 受聴(両耳同刺激聴)といい、別々の異なる刺激が加わることを dichotic 受聴という。図1に示すように、人間の実際の受聴は dichotic 受聴であるが、STIのような単一マイクロフォンによる測定は diotic 受聴に相当する。したがって、これらの受聴の差が実際の建築空間で有意となる場合には、STI は実際の聴感印象とは異なることになる。

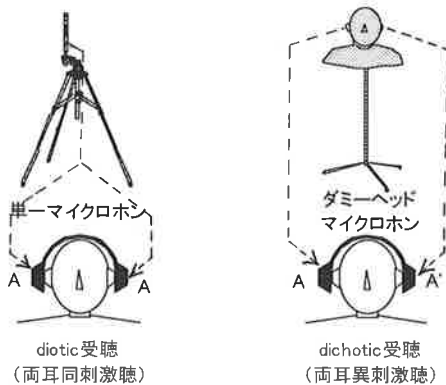


図1 diotic 受聴と dichotic 受聴

diotic 受聴と dichotic 受聴の差に関しては、これまで多くの研究が行われているものの、殆どが両耳マスキングやカクテルパーティ効果な

どの聴覚メカニズムに関するものである。音声の明瞭度に関しては、Jovicic³⁾が電話送話を対象として両耳効果を調べている。騒音下での音声受聴時の両耳効果では、diotic 受聴に較べ dichotic 受聴のほうが S/N 比で 5 dB の効果が見られた。また、騒音下でのスピーチ聞き取りに対する dichotic 受聴の効果に関する実験では⁴⁾、S/N 比が -7.5 dB のホワイトノイズを騒音とした場合について、diotic 受聴と dichotic 受聴の影響を syllable intelligibility test で調べた結果、dichotic 受聴の方が speech intelligibility (了解度) が優れているという結果が報告されている。しかし、これは騒音に関する実験(実験室実験)であり、空間の影響に関するものではない。Miyata⁵⁾は、高残響空間で無指向性マイクとダミーヘッドで収録した音を用いて、dichotic 受聴の実験を行っている。その結果 dichotic 受聴による音声明瞭度は、両耳の RASTI の良い方、すなわち better ear で評価(選択的受聴 selective better-ear listening)できること、dichotic 受聴の効果は、高残響下では大きな効果はないことを示している。また、バイノーラル受聴の評価のため、subjective MTF という指標も提案している。しかし、ここでの空間は、残響時間が 10 秒とか 20 秒というような、かなり特殊な条件が設定されており、一般的な空間条件を網羅しているとはいえないため結果の適用性に疑問が残る。Nabelek⁶⁾は、各年代別の被験者を対象に音声の了解度試験を行い、モノラルに較べてバイノーラルでは 5% 程度スコアが良くなること、また残響の影響が大きいことを示している。ただし、これはイヤホン再生であり、モノラルは片耳再生であるため条件の相違がある。国内での研究では、Nakajima⁷⁾は、無響室において、遅れ時間(4条件)と到達方向(4条件)の異なる 16 の条件に関して、speech intelligibility の試験を行っている。また、STI や IACC の値の測定も行っている。これにより、speech intelligibility は、時間的なモノラルの要素(temporal-monaural factor)

と空間的な両耳受聴の要素（spatial-binaural factor）で決定されるとしている。遅れ時間は特に影響が有意としている。しかし、この実験も STI が 0.68~0.93 という極めて高 STI での結果であり、実際の空間条件での結果とは異なる。著者自身が述べている通り、限られた実験条件での結果といえる。佐藤⁹⁾ は、実際の 6 つのホールのインパルス応答測定結果を用いて、電気音響と建築音響に関して直接音が変わったときの影響を実験検討している。無指向性マイクによるモノラル録音の diotic 受聴と、ダミーヘッドによるバイノーラル（ヘッドホン受聴）、およびトランスオーラル受聴の比較を行っている。モノラルとヘッドホンはよく対応しているが、ホールを対象としているため、STI は 0.6 以上とかなり良い条件の実験となっている。また、聴き取り易さと STI の対応は、モノラルを対象としており、結局、モノラルとバイノーラルの差は明確ではない。この他にも、音声明瞭度や STI に関する研究は数多く見られるものの、本研究のように実際の建築空間を対象とし、低明瞭度空間から高明瞭度空間まで網羅した diotic 受聴と dichotic 受聴の評価実験は見られない。

3. 対象空間の選定と明瞭度関連指標の物理測定

3.1 測定対象空間

検討対象空間として、残響時間に着目して表 1 に示す 6 つの施設を選定し、音響測定およびアナウンス音の収録を行った。残響時間は、A 教会が最も短く 0.6 秒、最も長い空間は F トレーニングセンターで 6.6 秒である。F トレーニングセンターは膜屋根構造であるため残響時間が極端に長くなっている。各空間での測定点位置は、聴感実験での実験内容を考慮して、図 2 に示す 3 点とした。すなわち、音源から 3 m の位置、空間の中央点、および空間の隅角部である。空間の大きさは個々に異なるため、音源か

表 1 検討対象空間とその残響時間

測定施設	残響時間 (500Hz, sec)	室容積 (m ³)
A 教会	0.6	280
B 文化ホール	1.9	4,870
C 公民館	2.6	2,230
D 体育館	3.8	33,890
E 体育館	4.8	16,320
F トレーニングセンター	6.6	76,750

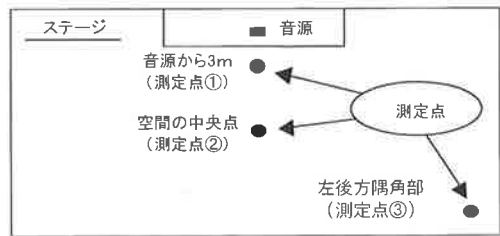


図 2 各施設での測定点位置

ら空間中央点や隅角部までの距離もそれぞれの空間により異なることになる。

3.2 測定内容および測定方法

音源スピーカには、単一スピーカ (BOSE, 101 SDVM) と 12 面体スピーカ (小野測器, SJ-1810) の 2 種を用いた。これらを本論文では、指向性スピーカ、無指向性スピーカと呼ぶ。また、受音には、1/2 インチ単一マイクロフォンとダミーヘッドの 2 種を用い、両者全く同条件で各組み合わせに関する測定を行った。

測定項目は、残響時間とインパルス応答の測定、および聴感実験に使用するアナウンス音 (男声、女声) の現場収録である。残響時間の測定系統図を図 3 に、インパルス応答の測定系統図を図 4 に示した。インパルス応答からは、STI, RASTI, C₈₀ 値, D₅₀ 値, IACC の各音響物理量を算出した。図 5 にインパルス応答波形の 1 例を示した。

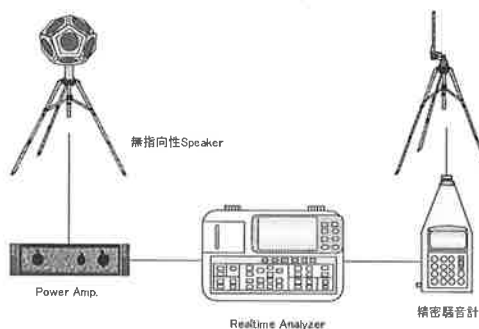


図3 残響時間測定系統図

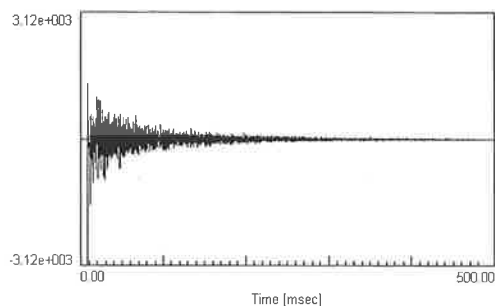


図5 インパルス応答波形の例

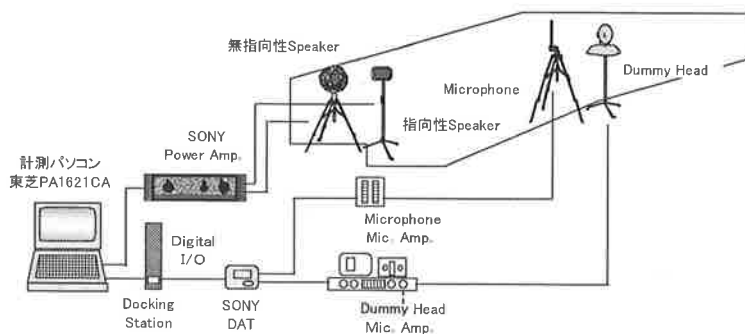


図4 インパルス応答の測定系統図

3.3 音響物理量の測定結果

各施設での残響時間測定結果を図6に示した。残響時間に関しては、測定点による大きな違いは見られない。既に示した表1の残響時間の値は、500 Hzにおけるこれら3点の平均値である。

インパルス応答から得られた各物理量間および残響時間との相互の関係を纏めたものを以下に示す。まず、図7はSTIとRASTIの分布図である。今回の施設では、STIはほぼ0.3~0.8に分布しており、STIの低い空間から高い空間まで網羅されている。また、RASTIはSTIよりやや小さく現れる傾向を示し、指向性スピーカの方が無指向性スピーカよりSTIの値が良くなる傾向を示している。

STIと残響時間の関係を示したものが図8(a), (b)である。測定点①では、音源との距離

が3 mと近いため残響時間に関係なくSTIの値が高くなる。これにより、図8(a)では、STIと残響時間には明確な関係は見られないが、図8(b)に示すように、測定点①のデータを除けば、これらはほぼ一定の関係を示している。逆に言えば、当然のことではあるが、残響時間だけでは明瞭度の評価は出来ないことが分かる。図9, 図10に示すように、STIと C_{80} 値、STIと D_{50} 値は、非常に良く対応する。これらは、各測定点毎に算出されたデータであるが、波形の歪みを表すSTIと直接音のエネルギー比率を表す C_{80} 値や D_{50} 値が、別々の算出根拠にも拘わらず、このような良い対応を示すことは大変に興味深い。これは、 C_{80} 値や D_{50} 値が十分に明瞭度関連の指標となりうることを示している。

図11(a), (b)は、参考としてダミーヘッドマイクロホンの両耳の音からSTIを算出してみ

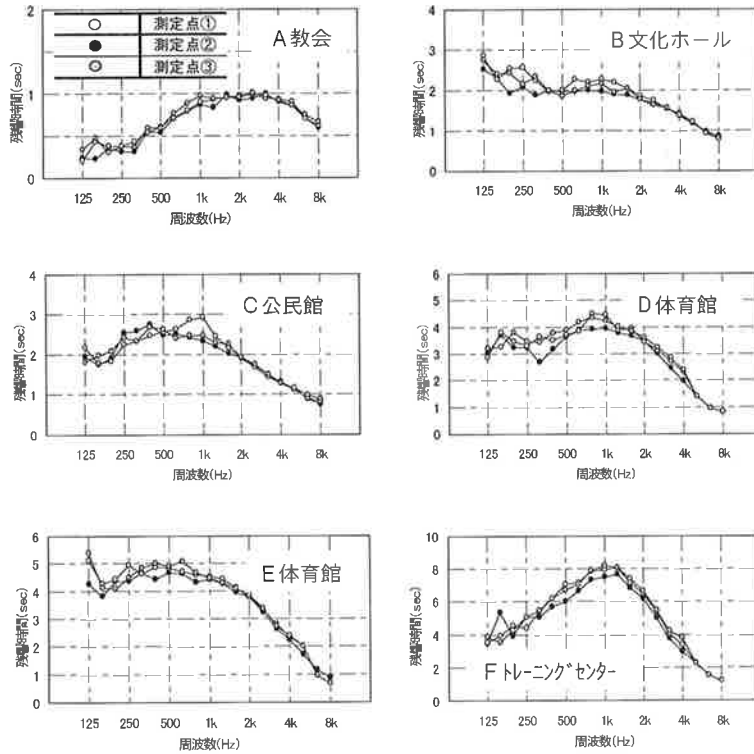


図6 各測定施設の残響時間測定結果

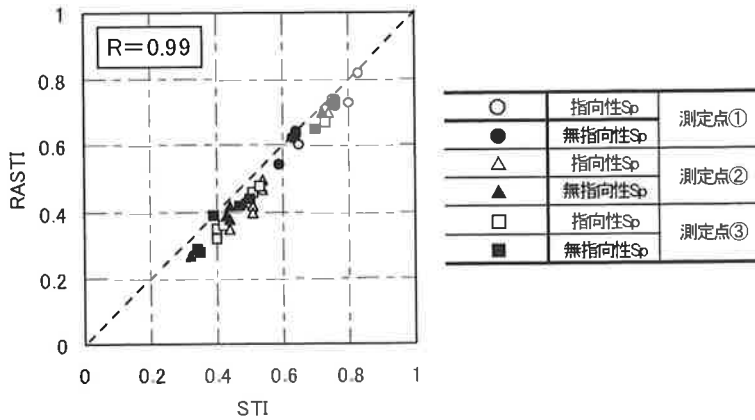
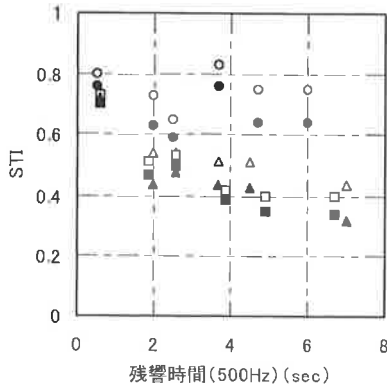


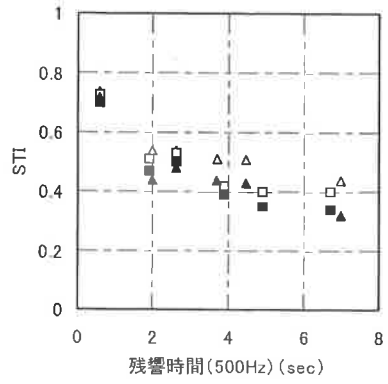
図7 測定施設の STI と RASTI の分布

た結果である。図 11(a) は正面向きの場合、図 11(b) は顔が左向きの場合である。正面向きの場合には右耳と左耳の結果は同じになるが、左向きの場合には、右耳が直接音の影響が大きくなるため STI の値も 0~0.2 程度まで大きくな

る傾向を示している。これらより、頭部の影響の大きさ、すなわち dichotic 受聴の影響の有意さが推察される。また、STI の値自体は、正規の 1 ch の STI より全体的に 0.1 程度小さくなることが観察される。これも頭部の存在を考え



(a) 測定点3点(①,②,③)の結果



(b) 測定点①除く

図8 残響時間とSTIの関係(凡例は図7に同じ)

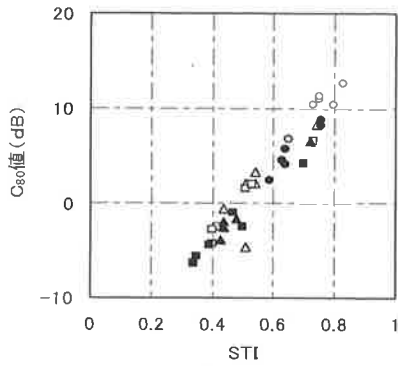


図9 STIとC₈₀の関係(凡例は図7に同じ)

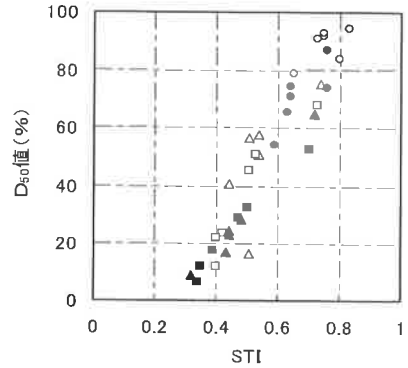
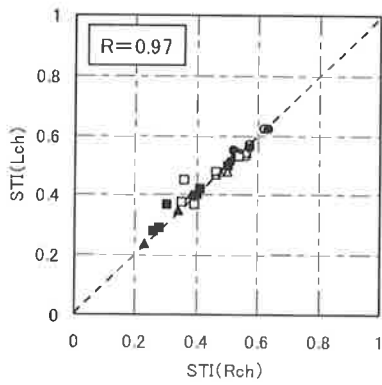
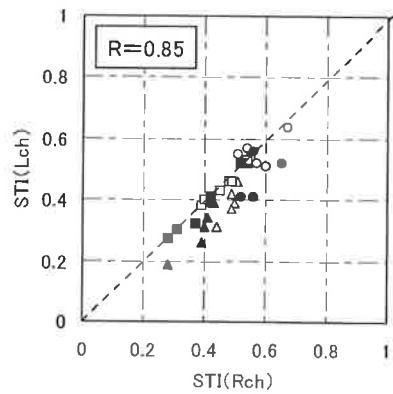


図10 STIとD₅₀の関係(凡例は図7に同じ)



(a) ダミーヘッド正面向き



(b) ダミーヘッド左向き

図11 ダミーヘッドより算出したSTI

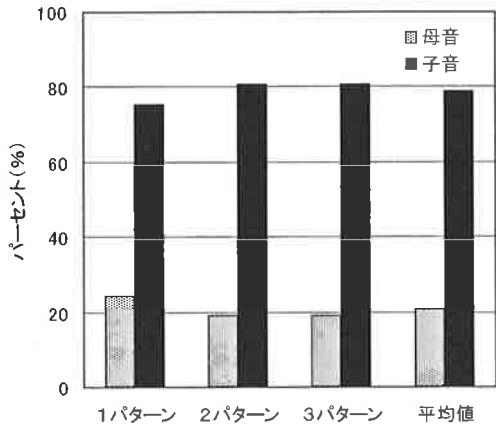


図12 刺激音の母音と子音の割合

れば首肯できる結果といえる。IACC に関して
も分析を行っているが、これについては他の物
理量と明確な対応関係は見られなかった。

4. 聴感実験による音声明瞭度の主観評価

4.1 音源の収録と刺激音の作成

表1に示した各種音響条件の空間で、男声ア
ナウンス、女声アナウンスの現場収録を行なっ
た。音源として指向性スピーカ(単一スピーカ)
と無指向性スピーカ(12面体スピーカ)の2種
を用いた。また、受音には単一マイクロホンと
ダミーヘッドを用い、両者全く同条件で収録を
行い、diotic受聴とdichotic受聴用の音源とし

た。

今回の実験では、指向性スピーカ音源の場合
の男声アナウンスを対象として聴感実験を行
なった。また、ダミーヘッドは正面向きに限定
した。収録した音源(約1分30秒)から、音声
処理ソフト(Voice Base II)を用いて約8秒の
文章を切り出し、3パターンの刺激音を作成し
た。この文章を以下に示す。それぞれの母音と
子音の割合を図12に示したが、ほぼ同様の結果
となっている。

パターン1: 荒川の上流、豊かな水に自然の表
情を映す埼玉県寄居町の朝の模様
をご紹介します。

パターン2: 秩父では早稲の品種を使わないと
いう事で田植えが遅いのですが、6
月の中旬今年もほぼ例年通り順調
な田植えが行なわれました。

パターン3: この風布に住んでいる60歳のお
ばあちゃんが、毎朝9時お孫さん
を送り迎えするのがこのおばあ
ちゃんの日課でございます。

4.2 聴感実験法

ここでは、シェッフェの一对比較法による「聞
き取りやすさ」評価と、評定尺度法による「聞
き取りにくさ」評価の2つの主観評価実験を
行った。

シェッフェの一对比較法では、試聴数が過多

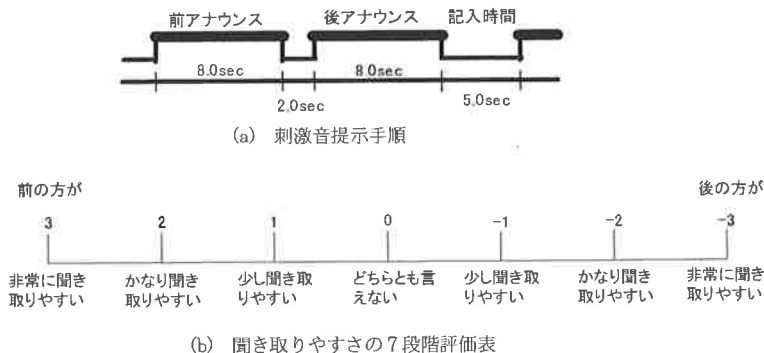
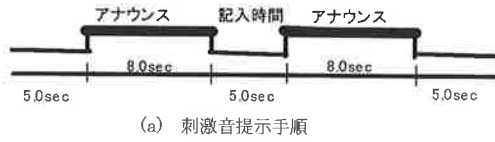


図13 シェッフェの一对比較法実験



(a) 刺激音提示手順

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

(b) 聞き取りやすさの7段階評価表

図14 評定尺度法による聴感実験

になるのを避けるため測定点別の実験とし、1測定点の実験では、6施設×受聴種別 (diotic, dichotic) の12ケースの組み合わせと、前後を逆にしたものを含めて132トラックの刺激音を用いた。これらの提示順序をランダム化し、図13の提示タイムパターンで7段階評価実験を行った。

評定尺度法では、3測定点をまとめたの実験とし、6施設×受聴種別×測定点(①, ②, ③)の108トラックの試聴実験を行った。提示タイムパターン、および評価表は図14の通りである。両実験の被験者数、その他を纏めたものを表2に示した。

表2 聴感実験の諸元

実験方法	シェッフェの一対比較法	評定尺度法
評価内容	聞き取りやすさ (7段階)	聞き取りにくさ (4段階)
受聴法	ヘッドフォン受聴	
刺激音	各測定点132トラック	108トラック
被験者	各測定点10名 (計30名)	20名
	年齢18~25歳	年齢18~22歳
	男性25名, 女性5名	男性16名, 女性4名

4.3 実験結果

4.3.1 シェッフェの一対比較法による実験結果

図15にシェッフェの一対比較法による実験結果を示した。心理的評価値は図13(b)の7段階評価の数値に対応しており、プラス側が聞き取りやすい方となる。図15(a)の測定点①の結果では、diotic受聴とdichotic受聴に関しては、ヤードスティック値から見て有意差があると判断されるが、残響時間と心理評価値に関しては各施設で大きな変化は見られない結果となっている。測定点①の分散分析結果は表3の通りである。なお、測定点①では、測定した音に不備があったため、BとC施設は実験から除

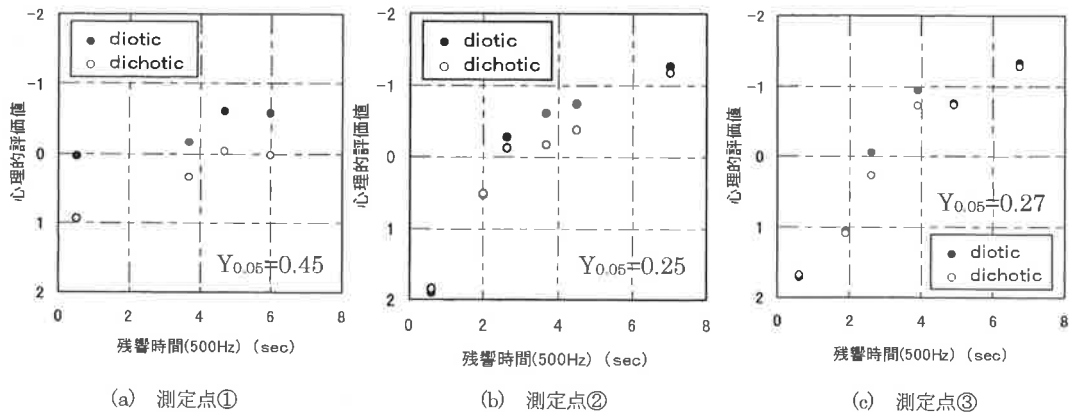


図15 シェッフェの一対比較法による実験結果

表3 測定点①実験の分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	F	$F_{459}^{\text{自由度}}(0.01)$	$F_{459}^{\text{自由度}}(0.05)$
主効果	$S_a=277.56$	7	39.65	25.85**	2.25	1.79
個人差	$S_{(b)}=24.45$	9	2.72	1.77	2.41	1.88
順序効果	$S_b=2.31$	1	2.31	1.51	6.63	3.84
組合せ効果	$S_r=30.14$	21	1.44	0.94	1.00	1.00
主効果×個人	$S_{a(b)}=399.81$	63	6.35	4.14**	1.00	1.00
順序×個人	$S_{b(b)}=144.19$	9	16.02	10.45**	2.41	1.88
誤差	$S_c=703.99$	459	1.53		—	—
総平方和	$S_T=1558.00$	560			—	—

外している。測定点②および測定点③は、ほぼ同じような特性を示しており、残響時間が長くなるにしたがって心理的評価値が悪くなる傾向を示すが、ヤードスティック値からは diotic 受聴と dichotic 受聴には有意差は見られない。これら3点での結果を眺めると、測定点と心理評価値との関係や、diotic 受聴と dichotic 受聴の間には、明確な関係が見られない結果となっている。これは「聞き取りやすさ」というカテゴリ設定にも問題があると考えられ、明確な特性抽出には不向きであるとも考えられる。

4.3.2 評定尺度法による実験結果

評定尺度法を用いて「聞き取りにくさ」に関する判断を行った結果を図16に示した。これらの結果を見ると、残響時間と「聞き取りにくさ」の関係には、図17に示すような関係が見られる。すなわち、残響時間を基本パラメータとし、残響時間が長くなると「聞き取りにくさ」の評価値は悪くなるが、その変化の程度は、直接音と残響音の影響の度合いに対応し、直接音の影響が小さくなる音響条件では「聞き取りにくさ」が増大する、というモデルである。この評価モデルは、音場の定性的傾向を考へても妥当なものであるといえる。また、図18は、STIと「聞き取りにくさ」の関係を示したものである。STIの値が0.5程度の所で、「聞き取りにくさ」は30%から100%近くまで分布する形となり、

STIによる評価だけでは「聞き取りにくさ」の評価に限界があることが分かる。

「聞き取りにくさ」に関する diotic 受聴と dichotic 受聴には統計的に有意差があり、現在のような単耳指標の STI ではなく、dichotic 受聴の効果を検討できる物理指標あるいは補正法といったものが必要といえる。ただし、今回の結果では、「1. はじめに」で述べたような STI と聴感評価との不一致の問題が、diotic 受聴と dichotic 受聴の差に依存するとまでは言えない。評価のカテゴリに関しては、「聞き取りやすさ」より「聞き取りにくさ」の方が、各種物理量とも対応した明確な評価が得られると考えられる。

5. ま と め

音声伝送品質である明瞭度の評価物理量として用いられている STI に関して、聴感実験によりその妥当性を検討した。今回の実験により、STI 単独では評価物理量として十分ではないこと、明瞭度評価に関して dichotic 受聴の影響を考慮する必要があること、「聞き取りにくさ」の方が「聞き取りやすさ」より明確な結果が得られること、などの結果が得られた。併せて、「聞き取りにくさ」評価モデルの考え方も提示した。今後は、実験条件の幅を拡げ、今回得られた基

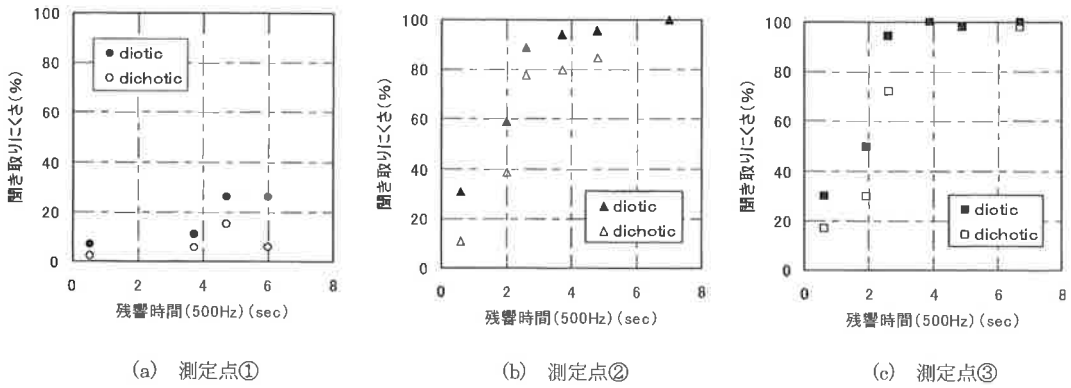


図16 評定尺度法による実験結果

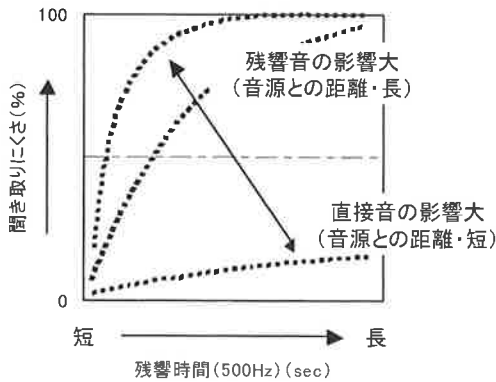


図17 「聞き取りにくさ」の評価モデル

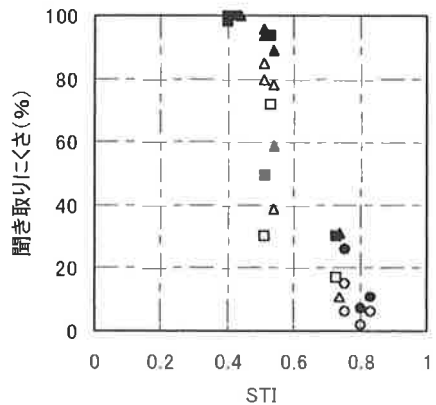


図18 STIと「聞き取りにくさ」の関係(凡例は図7と同じ)

礎的結果の妥当性, 有用性の検証, および提案した「聞き取りにくさ」評価モデルの定量化を, 聴感実験を通して更に進めてゆく予定である。

6. 謝 辞

本実験に協力いただいた方々, および実験を担当してくれた(当時)卒論生, 戸枝加奈子君, 新村道恵君に謝意を表します。なお, 本研究の一部は, 平成13, 14年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(c), 課題番号13650657, 代表者: 橋本典久)により行われた。併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) T. Houtgast and H.J. Steeneken: The modulation transfer function in room acoustics as a prediction of speech intelligibility, *Acustica* 28, 66-73, 1973
- 2) 鈴木和憲, 中島立視: 音像定位拡声が音声の聴取に及ぼす影響, 一残響時間が長く明瞭性が極めて悪い空間における音声伝達品質の改善の例一, 日本音響学会建築音響研究委員会資料, AA96-41, 1-7, 1996
- 3) S.T. Jovicic: Experiments on Binaural Integration and Gain in Intelligibility, *Acustica*, Vol. 61, 148-151, 1986
- 4) S.T. Jovicic: Dichotic Integration of Speech-Envelope Information, *Acustica*, Vol. 71, 140-146, 1990

- 5) H. Miyata. et al: Speech Intelligibility and Subjective MTF under Diotic and Dichotic Listening Conditions in Reverberant Sound Fields, *Acustica*, Vol. 73, 200-207, 1991
- 6) A.K. Nabelek and P.K. Robinson: Monaural and binaural speech perception in reverberation for listeners of various ages, *JASA*, Vol. 71(5), 1242-1248, 1982
- 7) T. Nakajima: Effect of a single reflection with varied horizontal angle and time delay on speech intelligibility, *JASA*, Vol. 90(6), 3173-3179
- 8) 佐藤洋, 他: 多目的ホールにおける話声の「聞き取りやすさ」の評価に関する実験的検討, 日本建築学会技術報告集, 第15号, 147-150, 2002.6