多目的ホールにおける話声の「聴き取りやすさ」の評価に関する実験的検討

—聴感実験の際の音場シミュレーション方法と物理指標による評価の検討—

佐藤 洋 —*1 佐藤逸人 —*2
松永剛文 —*3 吉野 博 —*4
長友宗重 —*5

キーワード：
多目的ホール, 「聴き取りやすさ」, 物理指標, バイノーラル受聴, 音場シミュレーション

Keywords:
Multipurpose hall, "Easiness of speech perception", Physical indices, Binaural hearing, Simulation of sound field

1. はじめに

ホールにおける音声伝達はステージ上から空間へ直接拡声する場合と、電気音響設備を用いて拡声する場合がある。現在、音声伝達性能を評価する際にこれらを明確に区別はせず、D 値やC 値あるいはSTI(Speech Transmission Index¹⁾)などの物理指標で同様に評価している。しかし、これらの直接音で基準化した物理指標は室内音響のみの評価の際には妥当であるが、電気音響設備を用いた際に生じる拡声された直接音の周波数特性などの変化、拡声スピーカの数・位置の違いにより起こり得る影響を評価できない。本研究では直接音(拡声音)の特性の変化がスピーチ受聴の際にどのような影響を及ぼすかを把握するために、宮城県内の6ホールにおいて測定したインパルス応答を用いて聴感実験及び物理指標の算出を行い、その結果を比較した。また、音場の空間的因子の影響を検討するために聴感実験の際のシミュレーション方法に関する検討を行った。

2. インパルス応答の測定

本報告では話声を対象としているため、フルレンジスピーカ(ステージ中央、前縁から3m、高さ1.2m)より測定用音源に用いたスイープパルス²⁾を拡声し測定を行った。この条件(以下「単一音源」)の他に、各ホールにおいて通常の講演会の拡声システムの設定を用い、ステージ上に設置したマイクロホンにより拡声された測定用音源を收音しホール既設のスピーカシステムにより拡声した条件においても測定を行った(以下「拡声」)。表1に各ホールにおけるスピーカシステムの配置を示す。なお、測定には無指向性マイク(リオンNL-11)とダミーヘッド(ノイマン)を用い、受音点はステージ前縁か

EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF "EASINESS OF SPEECH PERCEPTION" IN MULTIPURPOSE HALLS

—Simulation method of sound fields and physical indices for evaluation of speech transmission quality—

Hiroshi SATO —*1 Hayato SATO —*2
Takefumi MATSUNAGA —*3 Hiroshi YOSHINO —*4
Muneshige NAGATOMO —*5

Speech would be radiated with sound system in multipurpose halls, so speech transmission quality would be influenced by the difference of the number/position and of frequency characteristic of loudspeakers. In this study, subjective rating of speech transmission quality called "easiness of speech perception" was measured in simulated sound fields with monaural/binaural systems to find binaural effects. The results suggest binaural simulation is needed. And the relations between subjective rating and several physical indices were examined. As a result, subjective rating would be influenced by frequency characteristic that could not be evaluated with existing indices such as STI.

表1 各ホールにおけるスピーカシステムの配置

ホール記号	プロセニアム	ステージサイド
a	LR	
b	LCR	LR
c	C	LR
d	C	LR
e	天井(客席中央)	
f	C	LR

*L, C, R:それぞれ左, 中央, 右に設置してあることを示す

ら10m, 側壁方向に2mにシフトした客席とした。

3. 聴感実験による音場のシミュレーション方法に関する検討

聴感実験はシェッフェの対比較法により行い、5秒間の男声アナウンスを提示した後、被験者に5段階で「聴き取りやすさ」(教示: いかに苦労なく聴き取れるか)を評価させた。これらは文献³⁾と同様の回答方法と音源であることを付け加えておく。被験者は聴力検査の結果、聴力健常と認められた5名を用いた。刺激は6ホール×2条件の計12刺激として前後入れ替えを含む132対を構成し、図1に示したモノラルシミュレーション及びバイノーラルシミュレーション(トランスオーラル⁴⁾, ヘッドホン)を用いて、被験者の耳元で約70dBA(Fastピーク値)となるように音量を調節して提示した。モノラルシミュレーションでは無指向性マイクにより測定したインパルス応答を無響室録音された音源に畳み込んだ同一の刺激を左右のスピーカから提示し、トランスオーラルシステムによるバイノーラルシミュレーションでは、ダミーヘッドで測定したインパルス応答及び実験系における各被験者の頭部伝達関数を畳み込んだ刺

*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 講師・博士(工学)
(〒980-8759 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 修士課程

*3 三菱重工業 修士(工学)

*4 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

*5 工博

*1 Lecturer, Dept. of Archit. and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Dept. of Archit. and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.

*3 Mitsubishi Heavy Industries

*4 Prof., Dept. of Archit. and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

*5 Dr. Eng.

激を左右のスピーカから提示した⁴⁾。被験者の頭部の固定は特に行わなかった。ヘッドホンによるバイノーラルシミュレーションでは、ダミーヘッドで測定したインパルス応答を畳み込んだ刺激をヘッドホンで被験者に提示した。1条件あたりの試行回数は2回とした。なお、実験結果に個人差が現れたため、被験者ごとに2回の結果を用いて心理尺度構成値を求め、各被験者間の判断の相関係数が0.85以上となる被験者のみの結果で心理尺度構成値を算出した。その結果、モノラル、トランスオーラル、ヘッドホンのそれぞれにつき4名、4名、3名の結果を用いて分析を行った。トランスオーラルシステムの話声に対する方向感の再現性について、特に前方から到来する音に対する方向感が得られているため、音源位置に関する空間的因子をある程度反映できるという前提で議論を進める。

図2, 3, 4に各システムにおける聴感実験結果を比較したものを示す。モノラルシミュレーションとバイノーラルシミュレーションを比較(図2, 3)すると同様の値をとらない音場が散見される。「拡声」の条件に着目すると、図2のb,c,f及び図3のb,cの音場においてモノラルシミュレーションによる「聴き取りやすさ」が低下している。これは、本来空間的に分離して聞こえるはずの反射音を一方方向にまとめたことによるカラレーションやひずみの発生が増加したことが「聴き取りやすさ」を低下させたと推測できる。一方、音場a, d, e及び図3における音場fについては、モノラルシミュレーションとバイノーラルシミュレーションの結果が対角線上にプロットされており、「聴き取りやすさ」の差はほとんどみられなかった。逆に「単一音源」の条件では図3の音場Dを除いてモノラルシミュレーションの条件が向上する傾向がみられた。これは、「拡声」と比較して「単一音源」は反射音の到来数が少ないため、上記したカラレーションやひずみの発生が起こりにくく、逆に少ない反射音が一方方向にまとめられたことによる定位の安定が「聴き取りにくさ」を若干ではあるが上昇させたと推測できる。以上の結果とそれに対する推測は、モノラルシミュレーションによる音場の空間的因子の簡略化が音場によっては「聴き取りやすさ」に影響を及ぼすことを示唆している。従って、本検討で用いたようなシミュレーション音場において「聴き取りやすさ」の測定を行う場合は、正確を期すならばバイノーラルシミュレーションによって刺激を提示することが望ましいといえる。また、バイノーラル同士を比較(図4)すると、ホールfにおいて若干結果が異なるものの、ほぼ対角線上に乗っており、本実験内ではヘッドホンとトランスオーラルの結果に明確な差はみられなかった。

図5にシミュレーション方法毎に「単一音源」と「拡声」における「聴き取りやすさ」を同一ホールで比較したものを示す。モノラルシミュレーションでは「拡声」の条件の「聴き取りやすさ」が「単一音源」の条件と比較して低下する傾向(ホールa,b,c,f)がある。「拡声」の条件では到来する反射音の数と到来方向が「単一音源」よりも増加することを考慮すると、この結果は上記したカラレーションやひずみが「聴き取りやすさ」に影響を及ぼすという推測を支持している。一方、バイノーラルシミュレーションにおいても「単一音源」の条件が「拡

声」の条件より「聴き取りやすさ」が高くなる傾向があるが、モノラルシミュレーションと比較すると両者の差は小さい。両者の差は拡声設備の特性(周波数特性、スピーカの数、etc.)によると考えられるが、その差が小さいことから「聴き取りやすさ」は建築音響の影響を大きく受けるといえる。また、モノラルシミュレーションにおいてもこの拡声系の特性が「聴き取りやすさ」に影響を及ぼしていると推測できる。なお、バイノーラルシミュレーションにおいても「単一音源」と「拡声」の条件における両者の差が大きいホールaでは、拡声システムの調整を行ってもハウリング気味の音が若干残ることが「聴き取りやすさ」に影響を与え、「拡声」の条件において値が低下したと考えられる。有意差を示すヤードスティックは、モノラルが $Y(0.05)=0.27$ 、ヘッドホンが $Y(0.05)=0.30$ 、トランスオーラルが $Y(0.05)=0.20$ であった。

4. 物理指標と「聴き取りやすさ」の関係

話声の聴取に関連した物理指標として測定したインパルス応答から D_{50} 、 C_{80} 、残響時間(Overall)、STIを算出した。上記の物理指標はモノラルのインパルス応答により求められることから、バイノーラル受聴の影響を取り除くため、心理量についてもモノラルシミュレーションによる結果を用いた。図6に一例としてホールbにおけるインパルス応答を、図7に各物理指標と「聴き取りやすさ」

図1 測定から聴感実験までのブロックダイアグラム

図2 モノラルとヘッドホンの比較

図3 モノラルとトランスオーラルの比較

図4 ヘッドホンとトランスオーラルの比較

図5 各シミュレーション音場における「単一音源」と「拡声」の条件間の比較

の心理尺度構成値との関係を示す。

物理指標に関しては、「単一音源」の場合、直接音は音源スピーカからのみ到達するが、「拡声」の場合には、直接音に加えてプロセニアムやステージサイドに設置されたスピーカにより、複数の方向から直接音と同等のエネルギーを持つ音が短い遅れ時間で到達し、直接音を補強するため、直接音として知覚される音のエネルギーが大きい。また、拡声スピーカは比較的吸音力の大きい客席に向けて設置されており、直接音として知覚される音のエネルギー増加と比較して反射音のエネルギーの増加はそれほど大きくないと推測されるため、「単一音源」の条件と比較すると「拡声」の条件の物理指標が明瞭性に優位となる（ホールaの残響時間、STIを除く）と考えられる。また、上記を踏まえると「単一音源」と「拡声」の条件の差異は直接音成分に大きく表れるといえる。

「聴き取りやすさ」の測定は「単一音源」及び「拡声」の条件を混合して行ったが、それぞれの条件毎に物理指標と対応する傾向がみられる。図5で示したように「拡声」の条件における「聴き取りやすさ」は拡声系の特性の影響によって「単一音源」の条件に比べ小さくなるが、物理量は拡声設備の使用により明瞭性に優位である方向にシフトする。以上より、直接音の補強は「聴き取りやすさ」を向上させるが、拡声設備を用いてこれを行った場合は「聴き取りやすさ」が逆に低下するといえる。また、「単一音源」の条件では物理

図6 ホールBのインパルス応答(直接音部分)

量と心理量の対応が良いが、「拡声」の条件では両者は対応しているもののばらつきがみられる。これは、「拡声」の条件において直接音成分のエネルギー量以外の因子が「聴き取りやすさ」に影響を与えていることを示唆しており、モノラルシミュレーションであることを踏まえると、空間的因子ではなく拡声系の周波数特性がその因子に該当すると考えられる。

ここで、拡声系の特性のうち周波数特性に着目して検討を行う。図8はインパルス応答に実験に用いた男声アナウンスを畳み込み、発声時間内の $Leq(125-12kHz)$ を全条件でそろえ、その値を基準とし各オクターブバンドごとに「拡声」から「単一音源」の値を引いたものである（以後「レベル差」と記す）。「拡声」の物理量が「単一音源」と比べ同等、あるいは向上しているにもかかわらず心理量が大きく低下しているのはホールb,c,fであるが、これらのホールでは1kHz付近の「レベル差」がマイナスを示しており、この帯域の音圧レベルが「聴き取りやすさ」に影響している可能性が示唆される。ホールaでは1kHz付近の「レベル差」はプラスとなっているが、心

図7 各物理指標と「聴き取りやすさ」の関係(大文字:「単一音源」、小文字「拡声」)

理量が低下している。このホールでは拡声設備の使用によりD値とC値は上昇しているが、残響時間とSTIは明瞭性が低下する方向にシフトしている。従って、拡声スピーカから放出された音の高次の反射音が十分に吸音されずに残留し、その結果として残響減衰がゆるやかとなったことが「聴き取りやすさ」の低下につながったと推測される。一方、ホールdは1kHz帯域の「レベル差」がプラスであり、かつ心理量に差がない。ホールeは残響時間が示す通り他のホールと比べ非常に響くホールであり「聴き取りやすさ」がいずれの条件も低いと判断されたため心理量に差があまりない。以上より本実験条件内では、「拡声」の条件において「聴き取りやすさ」の低下が大きなホールは「単一音源」の条件に比べ中音域での音圧レベルの低下が見られ、一方、低下が少ないホールは中音域での音圧レベルが上昇する傾向があるといえる。

5. まとめ

以下に本報告における検討で得られた知見をまとめる。

1) 音場のシミュレーション方法について

モノラルシミュレーションによる音場の空間的因子の簡略化が「聴き取りやすさ」に影響を及ぼすことを示した。従って音場のシミュレーションはバイノーラルシミュレーションによって行うことが望ましいといえる。また、バイノーラルシミュレーションをヘッドホンとトランスオーラルのどちらの手法を用いても「聴き取りやすさ」は同様の結果となることを示した。

2) 拡声設備の使用が聴感印象に与える影響について

拡声設備の使用により話声の「聴き取りやすさ」が低下することを示した。また、物理量と「聴き取りやすさ」を比較し、拡声設備の使用による心理量の変化に対応する物理指標が本報の範囲では存在しないことを示した。単一指向性スピーカと拡声設備の受聴点に

図8 各ホールの拡声システムと単一指向性スピーカのオクターブバンド毎の音圧レベル差

おける音圧レベルの周波数特性を比較し、中音域の音圧レベルの増減が「聴き取りやすさ」に影響を及ぼすことを示した。音圧分布の均一化だけでなく、聴感印象も向上させる拡声系の検討を今後の課題とする。

<謝辞>

本研究を行うにあたり、ホールの測定の際に関係各位にご協力いただいた。また、本研究の一部は(財)サウンド技術振興財団の助成を受け行った。ここに記して深く感謝の意を表す。

<参考文献>

- 1) H.J.M. Steeneken and T. Houtgast, A physical method for measuring speech transmission quality, J.A.S.A. 67(1), pp. 318-326, 1980
- 2) 橋ほか, 実物及び模型ホールのインパルス応答の測定, 日本音響学会誌, Vol. 48, pp. 244-249, 1984
- 3) 佐藤ほか, 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, No. 484, pp. 1-8, 1996.6
- 4) 佐藤史明, 室内音響評価のためのバイノーラルシミュレーションシステムに関する研究, 博士学位請求論文, 東京大学, 1992.125)
- 佐藤ほか, トランスオーラルシステムの明瞭度評価への適用に関する検討その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 89-92, 1995.8

[2001年10月19日原稿受理 2002年2月18日採用決定]