

環境に応じた駅放送設備の音響改善

中家諒 (TOA 株式会社 グローバル開発本部 基盤技術開発課)

土橋大介 (TOA 株式会社 ソリューション営業本部 インフラ営業部)

岡大介 (TOA 株式会社 エンジニアリング部 システムイノベーション課)

山名一輝 (TOA 株式会社 エンジニアリング部 システムイノベーション課)

■要旨

高齢化社会を背景として、老人性難聴者にとって聴こえ易い音声を調査するための聴取実験を実施した。結果、音声了解度が改善する可能性がある音色が明らかとなり、さらに高齢者の明瞭度を改善する音色は、健聴者が騒音下で音声を聴取する際にも有効であることが分かった。聴取実験を紹介するとともに、実際の駅改札口の音声明瞭化を試みた結果について報告する。

1 はじめに

わが国での高度高齢化社会問題や「障害者差別解消法」の施行を背景として、公共空間へ拡声を行う立場であるTOAは、加齢に伴う聴力低下を含めた難聴者にとって聴きやすい音を調査する必要がある、これまでに難聴者、高齢者および健聴者を対象とした聴き取り実験を実施してきた。高齢者を対象とした聴取実験結果より、音声に対し音色の変化を与えると「はっきり」とした印象が得られる度合いが変化し、さらに音声の了解度(音声の聴き間違いの度合い)が変化することが分かった。また健聴者に対して同様の実験を行った結果では、騒音が大きい環境下での聴取条件で了解度が改善する結果が得られた。[1][2] これら実験結果を踏まえ、実際の駅改札口の音声明瞭化を試みた。本稿では、聴取実験の概要を紹介するとともに、実験条件と異なる音響空間である駅改札口において、了解度改善効果が期待される音響設計及び音響調整を行うための注意点および工夫について紹介する。

2 高齢者聴取実験(印象評価試験と単音節了解度試験の対比)

2.1 聴取者

高齢者向け人材派遣センターに所属する 61 歳～85 歳の補聴器を装着していない高齢者 83 名全員に対し印象評価実験および単音節明瞭

度試験の両方を実施した。全聴取者の両耳の音場閾値(スピーカー受聴での聴力レベルの値、大きいほど聴力が悪い)を、実験実施会場にて測定した。測定結果より平均聴力を求め、平均閾値が 35dB 以上となる聴取者をグループ A(聴力が悪いグループ: n=22)、それ以外をグループ B(聴力が良いグループ: n=61)とした。それぞれの、周波数毎の平均聴力レベルとグループ内年齢分布を図-1 に示す。グループ B と比較しグループ A では平均聴力レベルが 5dB 程度高く、2kHz および 4kHz の分散が大きい特徴があることを確認した。またそれぞれのグループには幅広い年齢層が含まれることに注意していただきたい。

2.2 音声提示スピーカー、信号処理

音声提示用スピーカーおよび音声の音色変化のための信号処理条件として、以下の試験音 a～c を用いた。試験音 a (リファレンス): 聴取者頭部位置において平坦な周波数特性 (125～12kHz、±3dB) となるフィルタで補償したスピーカー(口径 10cm コーンタイプ)。試験音 b: 試験音 a の補償フィルタの後段に、老人性難聴に伴う聴力損失を補償するような処理を行ったもの(図-2)。試験音 c: 試験音 a の補償フィルタの後段に帯域通過フィルタ処理を行ったもの(図-2)。なお試験音 c においては難聴者向けとして市販されているものと同様の周波数特性を信号処理フィルタで再現したものである。

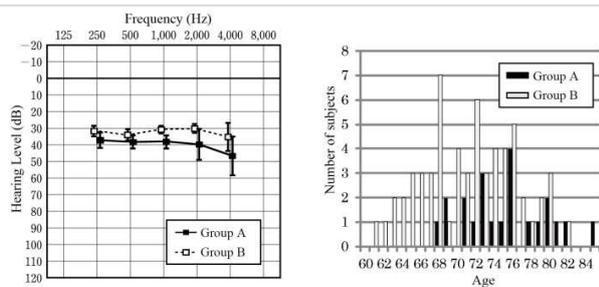


図-1 高齢者聴取者の聴力レベル平均値
と年齢分布
(左:両耳音場聴力レベル、右:年齢分布)

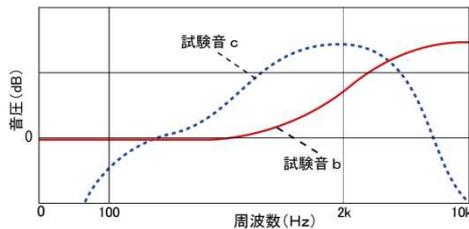


図-2 スピーカー周波数特性の概要
(実線:試験音 b、破線:試験音 c)

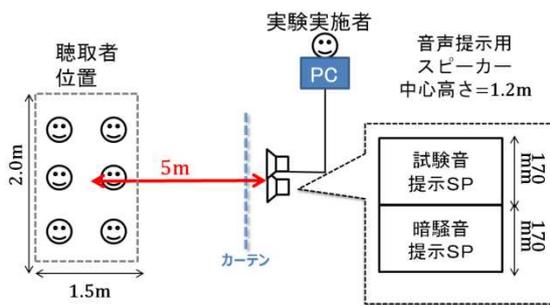


図-3 実験環境および配置

2.3 実験環境

実験実施配置条件を図-3 に示す。また、実験に用いた提示音圧レベルおよび暗騒音レベルを表-1 に示す。暗騒音には病院の待合室内で収録した実環境音を使用した。各音圧は図-3 に示す聴取者位置中心において騒音計を用いて校正を行った。聴取実験は音声提示されるスピーカーが聴取者から見えないように行った。実験会場の暗騒音は 55dB、室内の残響度合いを示す EDT は 0.2s (一般的な会議室の値と同程度) であった。

2.4 印象評価実験

音声資料には、女性の朗読音声(「坊っちゃん」の冒頭部)に対し 2.2 節に示す信号処理を行ったものを用意した。評価手法には一般的な実験手法である Scheffé の一対比較法(浦の変法)を用い

た。表-1 に示す提示音圧と暗騒音の組み合わせ毎に、音声信号処理 3 条件の前後順列も含め 6 対の音声をランダムで提示した。提示された音声の比較対に対し、先に提示された音声と後に提示した音声でどちらが「はっきり」と聞こえたかを聴取者に 5 段階で評定させた (1.先の音声、2.どちらかという先の音声、3.どちらとも言えない、4.どちらかという後の音声、5.後の音声)。表 1 に示す条件それぞれの評定結果に対し、試験音 a (リファレンス)の評定値により正規化した結果と有意差検定結果をグループ毎に図-4 に示す。評定値は「はっきり」の評定を得た結果に対して正の加点となる。

表 -1 提示音圧および暗騒音

| 実験条件 | 提示音圧 | 暗騒音 | S/N |
|----------------------|------|------|------|
| ・印象評価 1 ・単音節明瞭度 1 | 70dB | 55dB | 15dB |
| ・印象評価 2 ・単音節明瞭度 2 | 70dB | 64dB | 6dB |
| ・印象評価 3 | 70dB | 70dB | 0dB |

2.5 単音節明瞭度評価実験

実際の耳鼻科の聴力検査において広く使用されている、補聴器適合検査の指針 (2010) 検査用音源に収録されている 67-S 語表読み上げ音声を用いた。音声提示音圧と暗騒音の組み合わせ 2 条件、音声信号処理条件 3 種類の合計 6 条件に対し、それぞれランダムで語表を選択した。聴取者には提示された単音節(「あ、き、し、…」など)を聞こえたとおり書き取り用紙に記載するよう教示した。2 章に示す聴取者グループ、提示試験音および S/N の実験条件別単語正答率と統計分析 (t 検定) 結果を図-5 に示す。

2.6 実験結果

印象評価の結果より S/N (提示音圧と暗騒音の比率) =15dB のグループ B の結果を除く条件全てにおいて試験音 c の評価が有意に高い結果 ($p < 0.01$) となった。一方の単音節明瞭試験結果としては試験音 b が最も良い正答率となり、グループ A においては試験音 b、c 間に有意差も確認した。以上より、高齢者にとって聴きやすい音を探る中で印象評価結果のみで判断すると、はっきりとした印象を与えるが聴き間違いが起こる音声となってしまう可能性があることが示唆された。[1]

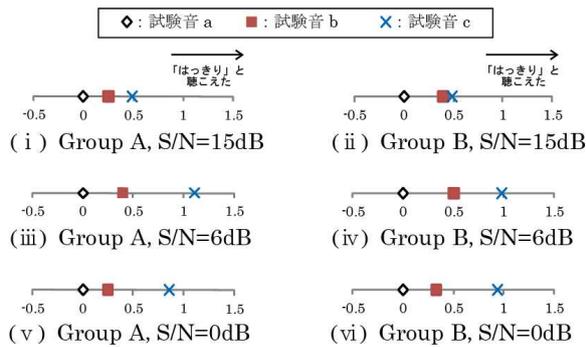


図-4 高齢者印象評価実験結果

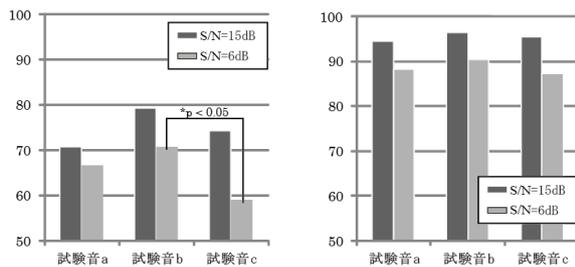


図-5 高齢者単音節正答率

(左:Group A 平均、右:Group B 平均)

3 健聴者聴取実験(単語了解度試験および印象評価)

前章に紹介した実験結果を踏まえ、音声情報を正確に伝えることが重要な場面においては、印象評価よりも音声の了解度が重要であると考える。本節では、公共空間での適用を前提とし、健聴者への影響を調査するための印象評価実験と日本語単語を用いた書き取り試験を行った結果を紹介する。

3.1 印象評価実験

高齢者に対して了解度が向上する音色を健聴者が聞き取る際、印象として悪影響を与えないかを確認するため、28歳~48歳健聴者20名を対象とした印象評価実験を行った。実験条件は2.2節に示す内容、図-3に示す実験実施配置条件と同様で、S/N条件は(S=70/N=64)dB、(S=70/N=70)dBとした。音声試料、評価方法についても2.4節に示す内容と同様としている。さらに評価項目として「どちらがはっきりと聞

こえたか」に加え、「どちらがより不快か」を追加した。評定値は「はっきり」および「不快」の評定を得た結果に対して正の加点となる。

結果から(図-7)、試験音bは健聴者の印象へ悪影響がないことを確認した。

3.2 単語了解度試験

28歳~59歳健聴者9名に対し単語了解度試験を実施した。音声提示用スピーカーおよび音声の信号処理条件として2.2節に示す試験音a,bを用いた。試験音cについては、前節の印象評価実験結果で健聴者への悪影響を確認したため、条件から除外した。実験実施配置条件は図-3と同様とした。高騒音環境を想定し、実験に用いる提示音圧および暗騒音を設計した。(表-2)暗騒音には公共空間における平均的な騒音の特徴を持つHothスペクトル型の定常騒音を使用した。参考として、実際の駅構内で収録した騒音の平均周波数特性とHoth雑音の周波数特性を図-8に示す。

音声試料には、親密度別単語了解度試験用データセット(FW07)に収録されている女声音声データ内の親密度2のリスト(例:ヤマアシ, ハヤガネ, サヤアテなど)を使用した。これは聴きとった音声の一部から推測しづらい単語リストとなっている。音声提示音圧と暗騒音の組み合わせ4条件、音声信号処理条件2種類の合計8条件に対し、提示される単語が重複しないよう語表リストを選択し、条件毎20単語(合計160単語)提示した。聴取者には提示された単語を聞こえたとおり書き取り用紙に記載するよう教示した。

表-2に示すS/N条件別の単語了解度とt検定結果を、S/Nが同一となる条件での結果を合算したものを併せて図-9に示す。S/N=0dB条件において、試験音bの単語了解度が有意に高い結果となった。また実験条件全てにおいて試験音bの了解度が高いことを確認した。

表-2 提示音圧および暗騒音(A特性)

| 条件 | 提示音 | 暗騒音 | S/N |
|----|------|------|------|
| 1 | 65dB | 70dB | -5dB |
| 2 | 70dB | 75dB | -5dB |
| 3 | 70dB | 70dB | 0dB |
| 4 | 75dB | 75dB | 0dB |

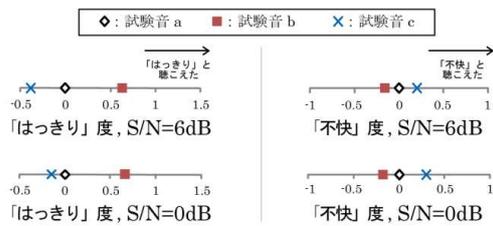


図-7 健聴者印象評価実験結果

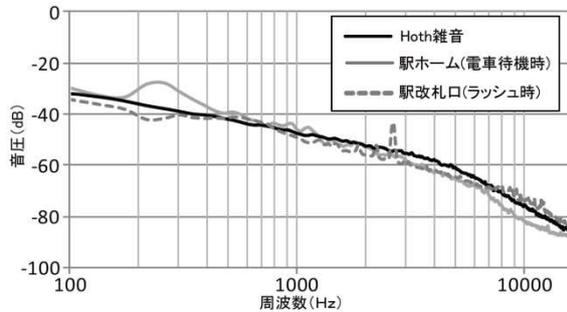


図-8 Hoth 雑音の周波数特性

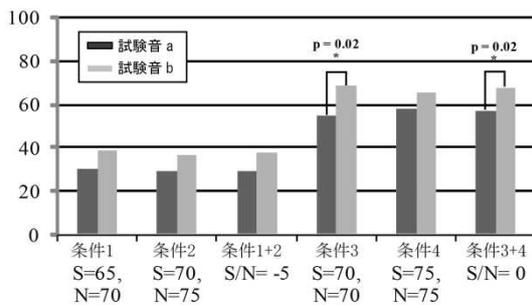


図-9 健聴者単語正答率

3.3 高齢者への単語理解度試験

高齢者向け人材派遣センターに所属する 62 歳～86 歳の補聴器を装着していない高齢者 47 名に対し騒音が大きい環境を想定した単語理解度試験を実施した。実験条件は 3.2 節に示す音声試料、図-3 に示す実験実施配置条件と同様で、S/N 条件は S/N=(-5, 0, 5)dB とした。結果、S/N = 5dB 条件において有意に正答率が改善された。一方で S/N = (-5, 0)dB 条件では、一部正答率の改善が見られたものの、ほぼ全ての条件で正答率が 10%を下回る結果となった。[2]

4 聴取実験のまとめと考察

印象評価試験および理解度試験を高齢者および健聴者に対し様々な S/N 条件下で実施した。結果として、提案する音色(=試験音 b)は高齢者では S/N = 5dB 以上、健聴者では S/N = -5dB 以

上の聴取環境において了解度の向上が期待できることが示唆された。しかしながら S/N=0dB 以下の条件では高齢者の単語正答率が 10%を下回る結果となったことから、高齢者の了解度を補償するにはフィルタ処理による音色の変化に加えて、S/N を確保することの双方が重要であると考えられる。健聴者においては、実験結果より騒音が大きい聴取環境において了解度の向上が期待されるとともに、印象としても悪影響がない結果が得られた。

5 駅改札口の音声明瞭化

本章では、実験室内での聴取実験から得られた音声明瞭度を改善する音声を、実際の音響空間である駅改札口に適用した事例について解説する。

5.1 音声明瞭化の対象となる駅について

都営地下鉄五反田駅改札口を対象とし音声の明瞭化を行った。当駅では対象路線以外にもう一路線が通っており、一日の乗降客数は当路線のみで7万人程度である。また、他線との乗り換え利用が多いため1つの改札に利用客が集中し、特に振替輸送が発生した際は非常に混雑する。これまでスピーカーの増設によりアナウンス放送の明瞭度改善を試みたが必ずしも十分な効果が得られなかった。今回は実験結果をふまえ、「S/N の確保」と「了解度を補償するための音声のフィルタ処理」による明瞭度改善を試みた。

5.2 音響設計における注意点および工夫

音響設計を行う上で、まずは実験結果に基づく「S/N の確保」による効果を得るため、スピーカーを増設することとなった。増設するスピーカーには当社の高効率スピーカーを採用した。本製品はスピーカー1台あたりの消費電力を抑えながら従来通りの音声を再生可能なため、アンプ部の増設を行うことなくスピーカーを増設することができた。駅構内見取り図およびスピーカー位置について図-10 に示す。

次に「了解度を補償するフィルタ処理」の効果を得るための音声の音響調整を行うが、ここで聴取実験の音声聴取環境と駅改札口での環境が異なることに注目したい。表-3 に聴取実験

環境と駅改札口環境の異なる点について示す。「了解度を補償するフィルタ処理」の効果を得るためには、音声信号が音源系から音響伝搬系を通じて、聴取者が音声を聴く最終的な段階において補償フィルタの特性が確保されていることが必要となる。聴取実験の実験室における音響条件とは異なり、実際の拡声システムにおいてはそれぞれの段階で、使用する機器や環境による特性が加わり、望ましい補償フィルタの特性が変化する場合がある。そこで今回の適用事例では、聴取者が音声を聴く最終的な段階で補償フィルタの特性が確保されるために、音の入り口から出口までの音声信号の総合的な伝送特性を考慮した調整を、音響調整機により実施した。

5.3 音声明瞭化の結果

図-10 中の測定点 A (増設スピーカー②直下位置) および測定点 B (既設スピーカー④⑤⑥カバーエリア内における音圧が低い点) において高さ 150cm 位置にマイクを設置し、音声明瞭化処理前と後において音声明瞭度の客観的物理想徴である STI(Speech Transmission Index)を測定した。STI の特徴として 0~1 の値をとり、一般的に測定信号が大きい場合、もしくは測定時の騒音が小さい場合において値が大きくなる。そこで、明瞭化処理前後で測定信号の 1kHz における音圧が変わらないように設定し、さらに駅改札口における音響調整時の騒音を加えたうえで測定した。結果、測定点 A では 0.55 から 0.63、測定点 B では 0.36 から 0.40 と改善したことを確認した。

また明瞭化導入後に対象の駅職員へヒアリングを実施した結果、「聞き取りにくかった駅務員の放送が聞き取れるようになった」「改札窓口での問い合わせ件数が減った」などの意見をいただき、好評を得ている。

高齢者の音声明瞭化を出発点として、駅改札口における音声明瞭化を目的とした音響改善を行った。既存の放送設備に対してスピーカーの増設などの音響設計の見直しと音響調整を実施することにより、音声が明瞭な音空間を実現し、良好な結果が得られた。

本稿で述べた音声明瞭化のための音響調整による改善は、公共空間における S/N が悪い環境において健聴者への効果が期待されるため、騒音が大きい場面だけでなく、住宅地域と近接する地上駅ホームのような、アナウンス音声を大きくできない場面での応用も考えられる。

聴取実験の今後の課題としては、日本語・日本人を対象とした聴取実験のみであるため、外国語・外国人を対象とした聴取実験を行い、外国語での明瞭度改善効果の検証を進めたい。また、実際の音響空間への適応における課題としては、現状の音響調整を行うためには、音響の現場調整技能を持つエンジニアリング従事者による調整時間の確保が必要であることなどがあげられる。一方で当社では、マイク入力の自動調整機、騒音に応じた音量調整機および残響成分の影響を自動的に除去する調整機といった製品をそろえているが、それぞれが独立した製品でありシステム規模が大きくなってしまいうため、現在の鉄道市場においては広く普及するに至っていない。今後は、駅の規模に合わせて、鉄道市場に手軽で明瞭な音声を届けることができるシステムやサービスを考案するためのフィールドテストをさらに進めていきたい。

参考文献：

- [1] 中家他, 音講論秋季, 2-5-3, 2017
- [2] 中家他, 音講論春季, 1-3-8, 2018

6 今後の展望と課題

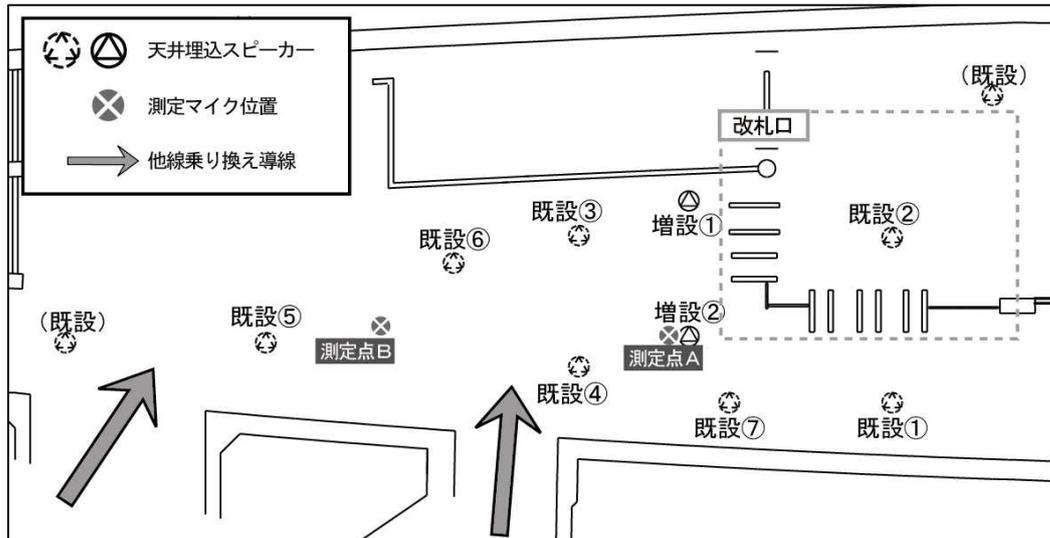


図-10 駅改札口付近のスピーカー配置図

表 -3 聴取実験環境と駅改札口環境の違い

| | 音源系 | 信号伝送系 | 音響出力系 | 音響伝搬系 |
|------------|---|---|--|--|
| 聴取実験 | <ul style="list-style-type: none"> 実験用音源を PC から再生 | <ul style="list-style-type: none"> オーディオインターフェース | <ul style="list-style-type: none"> 実験が十分に実施可能な品質のアンプ、スピーカー 音響調整機 | <ul style="list-style-type: none"> 実験室 |
| 駅 | <ul style="list-style-type: none"> 自動放送システム 業務放送用マイク | <ul style="list-style-type: none"> 主要駅からローカル駅へ 業務放送ラック設置場所からリモコン操作卓へ 信号変調器 | <ul style="list-style-type: none"> アンプ、スピーカー 信号復調器 | <ul style="list-style-type: none"> 駅構内コンコース、ホーム、改札口など |
| 駅と聴取実験との違い | (業務放送マイク使用時) <ul style="list-style-type: none"> 話者が変わる 声の大きさ、マイクとの距離によりマイク入力音圧が変化する | <ul style="list-style-type: none"> 接続機器が多岐にわたる | <ul style="list-style-type: none"> アンプ、スピーカーの機材や台数、設置位置が異なる | <ul style="list-style-type: none"> 騒音が大きい 残響音が大きい スピーカー位置に対する聴取者の位置が不定である |