

高速横浜環状北線におけるトンネル内拡声放送 設備の検討

STUDY OF PUBLIC ADDRESS SYSTEM FOR EMERGENCY EVACUATION IN TUNNEL OF YOKOHAMA CIRCULAR NORTHERN ROUTE METROPOLITAN EXPRESSWAY

西岡 友樹^{1*}・吉尾 泰輝²・後藤 秀典³

Tomoki NISHIOKA^{1*}, Hiroki YOSHIO², Hidenori GOTO³

In The Metropolitan Expressway, public address system for emergency evacuation in the tunnel of AA grade has been installed. This system is the equipment for evacuation guidance to inform drivers as soon as possible by the road administrator, in case of fire or other accident in the tunnel. On this system, it has been studied for the introduction of voice time delay technology that takes into account the reverberation in the tunnel; experiments in place of a large sound source like a jet fan; speaker improvements in the curved portion such as Ohashi JCT; and additional sign sounds considering the area which is expected difficult to ensure the clarity. In addition, to encourage a more rapid evacuation duaring a accident, study of effective messages in consideration of ergonomics has been underway. In this paper, We report on the study including improvements about public address system to adopt in Yokohama Circular Northern Route, which is scheduled to open at the end of this fiscal year.

Key Words : tunnel disaster prevention, public address system for emergency evacuation, time delay technology, sign sounds

1. はじめに

首都高速道路は、総延長310.7kmの12%にあたる37.3kmがトンネル構造となっている。平成29年3月に開通予定である横浜北線においても、全長約8.2kmのうち、約5.9kmがトンネル構造となる。

首都高速道路では、これまで多くの都市内トンネルの建設及び運用の経験があるが、現在供用中の山手トンネル(全長18.2km)は、これまでに無い規模の都市内長大トンネルであったことから、より安全性を考慮したトンネル防災対策が必要であった。この検討を重ねる中で、防災シナリオの一つである火災時にお客様が車から降りて安全空間である非常口へ避難する際の避難誘導手法が課題となった。火災時に発生する煙によって、避難する方向が判断しにくくなるのが過去の教訓からわかっており、その対策として非常口への避難誘導表示板や非常口を目立たせる非常口強調灯などは設置しているが、更

なる強化のため、音声による情報提供を採用することとした。

車両から離れたドライバー等に音声情報を伝えるものとしては拡声器が考えられるが、トンネル内は、音の残響が非常に長いことや音の距離減衰が小さいことから小出力、小ピッチで拡声器を取り付ける方法が有効である。しかし、トンネル内の自動車騒音や換気音の反響に打ち勝ってドライバー等に明瞭な音声を到達させることは、コスト的にも困難な場合が多かった。

本稿は、このような背景のもとで避難誘導用の拡声放送設備に関してこれまで検討してきた内容を整理し、今年度末に横浜北線で採用予定の拡声放送設備についての検討状況について報告するものである。

キーワード：トンネル防災、拡声放送、時間遅延技術、サイン音

¹非会員 首都高速道路株式会社 Metropolitan Expressway Company Limited, (E-mail:t.nishioka801@shutoko.jp)

²非会員 首都高速道路株式会社 Metropolitan Expressway Company Limited

³非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ Oriental Consultants Company Limited

2. 拡声放送設備のこれまでの検討経緯

表-1 これまでの検討経緯

| 検討年次 | 検討課題 | 検討内容 |
|-------------------|--|---|
| 平成15年度～ 平成16年度 | ・トンネル内音場は、残響が非常に長く、距離減衰が小さいという特徴があり、スピーカを分散配置して拡声放送を流した場合、明瞭性の確保が難しい | ・トンネル内において拡声放送の明瞭性を向上させるため、時間遅延技術の検討 |
| 平成18年度～ 平成19年度 | ・実トンネルへ導入するにあたり、拡声放送に最適なアナウンス音について、より詳細な条件が必要 | ・拡声放送として最適なスピーチレートに関する検討 ・アナウンス音の周波数帯域に関する検討 ・トンネル内部の吸音処理を想定し、残響時間が短くなった場合の効果に関する検討 |
| 平成20年度～ 平成21年度 | ・特殊なループ状の線形条件を持つ大橋JCTでは、音の反響が複雑になる | ・時間遅延技術の有効性確認 ・指向性向上のための改良型スピーカに関する検討 |
| 平成22年度～ 平成26年度 | ・中央環状品川線、横浜環状北線で採用する縦流換気方式では、ジェットファン稼働音により拡声放送メッセージが聞き取りづらくなる可能性がある | ・拡声放送に対する気づきを高めるためのサイン音の検討 |
| 平成27年度 | ・現在のメッセージでは危険性が伝わらず、避難してもらえない可能性がある | ・避難行動の確実性を高めるため、危機感や不安感を煽るアナウンス音の検討 |

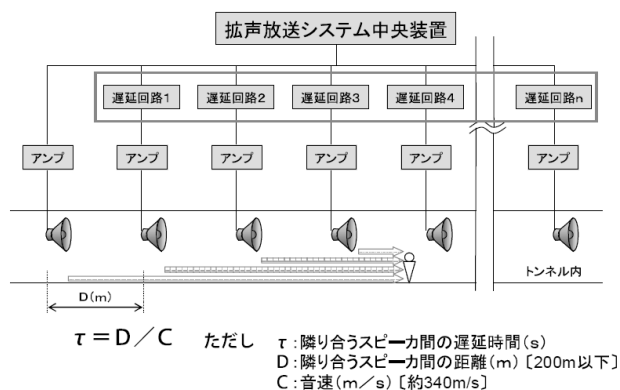


図-1 時間遅延技術の原理

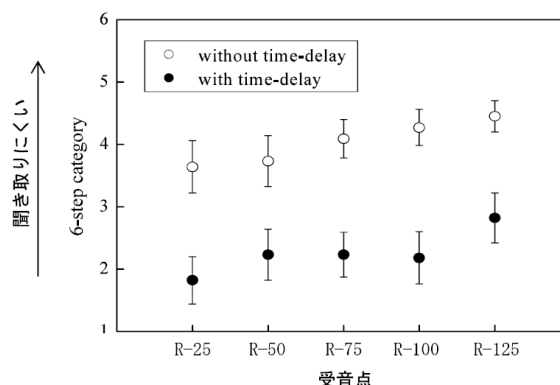


図-2 「聞き取りにくさ」に関する実験結果

首都高速道路における避難誘導用の拡声放送設備に関する検討の経緯を表-1に示し、各検討の概要を以下に示す。

(1) 平成15年度～平成16年度の検討

トンネル内での拡声放送の明瞭性向上のため、図-1に示す時間遅延技術のトンネルへの適用を検討した^{1) 2)}。時間遅延技術とは、コンサート会場やスタジアム等に用いられている技術であり、スピーカを分散配置した場合にすべてのスピーカから一斉に拡声放送を流すのではなく、上流側から順に拡声放送を流していく手法である。

この時間遅延技術の有効性確認を目的として、埼玉新都心線の未供用トンネル区間において、5台の音源スピーカから同時に音響信号を放射した場合（時間遅延をかけない場合）と隣接スピーカ間の距離と音速から計算される時間遅延をかけた場合の2種類について收音を行った。5台のスピーカは150m間隔で設置し、受音点は3台目と4台目の間に25m間隔で5点（R-25, 50, 75, 100, 125）設けた。

ここで收音した音を無響室内に構築した3次元音

場シミュレーション手法で再現し、時間遅延技術を適用した場合と適用しない場合のメッセージの「聞き取りにくさ」に関して、一般被験者11名を対象に主観評価実験を行った(図-2)。この結果を見ると、時間遅延技術を適用した場合には、全ての受音点において「聞き取りにくさ」が改善され、受音点 R-25～R-100 では“それほど聞き取りにくい”程度となっており、下流側のスピーカの影響を最も受けやすい受音点 R-125でも“多少聞き取りにくい”程度の評価となっている。

(2) 平成18年度～平成19年度の検討

首都高速道路で初めて拡声放送を導入するにあたり、詳細な条件整理のため、スピーチレート、拡声器から出力する周波数帯域、壁面吸音処理の効果について検討を行った。

a) スピーチレートの影響³⁾

拡声放送のアナウンス音を「トンネル内で火災が発生しました。すみやかに車を降りて、近くの非常口から避難して下さい。」と設定し、スピーチレートを①7.0秒、②9.0秒、③12.0秒、④15.0秒、⑤20.0

| | |
|---|-------------|
| 6 | 全く聞き取れない |
| 5 | 非常に聞き取りにくい |
| 4 | だいぶ聞き取りにくい |
| 3 | 多少聞き取りにくい |
| 2 | それほど聞き取りにくい |
| 1 | 全く聞き取りにくい |

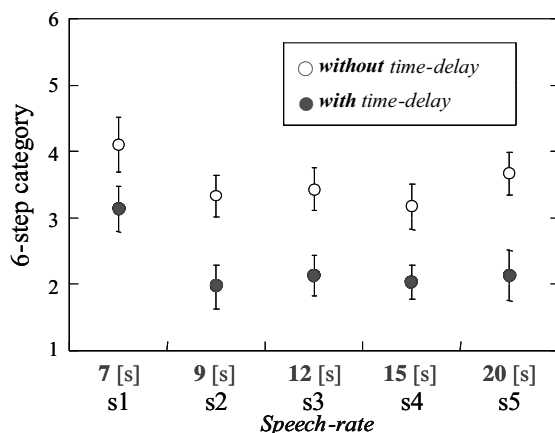


図-3 スピーチレート別「聞き取りにくさ」に関する実験結果

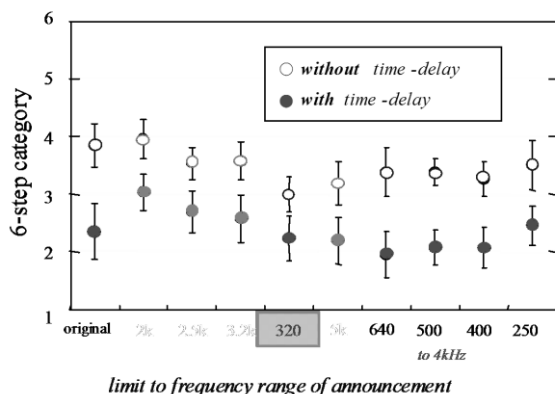


図-5 周波数帯域制限別「聞き取りにくさ」に関する実験結果 (上限周波数4kHzに制限)

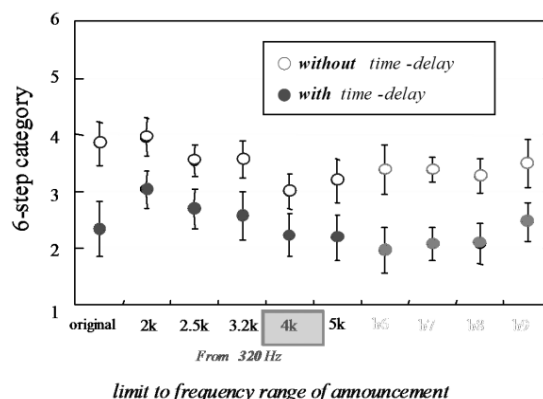


図-4 周波数帯域制限別「聞き取りにくさ」に関する実験結果 (下限周波数320Hzに制限)

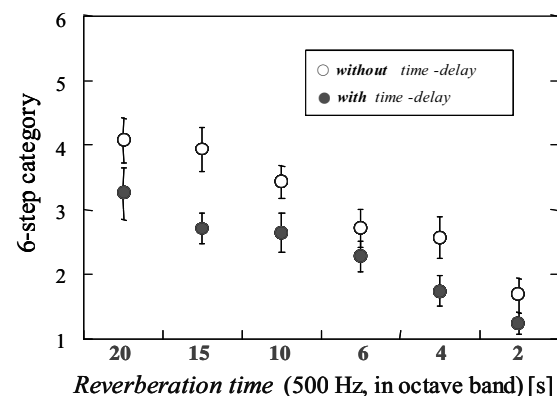


図-6 残響時間別「聞き取りにくさ」に関する実験結果

秒とし、時間遅延技術を適用しない場合と、時間遅延技術を適用した場合の条件について無響室において一般被験者15名を対象とした主観評価実験を行った。実験結果を図-3に示す。

図-3を見ると、時間遅延技術を適用することで、スピーチレートに関わらず、「聞き取りにくさ」が改善されていることがわかる。また、時間遅延技術の適用あり、なしに関わらず、スピーチレートが最も速い条件①が最も聞き取りにくい評価となっている。時間遅延技術を適用した場合には、最も速い条件①のスピーチレートを除く4つ（条件②～⑤）で評価に違いは見られない。いずれのスピーチレートでも聞き取りに問題は生じないと言える。また、時間遅延技術を適用しない場合の結果を見ると、スピーチレートが最もゆっくりな条件⑤では、聞き取りにくさが悪化する結果となった。これは、言葉一語ずつの間が空き過ぎて残響の影響が大きくなったことが一因と考えられる。

b) 周波数帯域の制限による影響⁴⁾

アナウンス音の周波数帯域の下限周波数を320Hzに固定して、上限周波数を①2kHz、②2.5kHz、③3.2kHz、④4kHz、⑤5kHzとした条件と、上限周波数を4kに固定して、下限周波数を⑥320Hz、⑦640Hz、⑧500Hz、⑨400Hz、⑩250Hzにした条件で無響室において一般被験者13名を対象とした主観評価実験を行った。ここでのアナウンス音のスピーチレートは継続時間9.0秒とし、時間遅延技術を適用しない場合と、時間遅延技術を適用した場合の条件について実験を行った。実験結果を図-4、図-5に示す。

図-4、図-5を見ると、時間遅延技術を適用することで、周波数帯域に関わらず、「聞き取りにくさ」が改善されていることがわかる。また、下限周波数を320Hzとした結果を見ると、時間遅延技術を適用した場合には、上限周波数が高い条件ほど聞き取りにくさが低減している傾向が見られる。また、上限

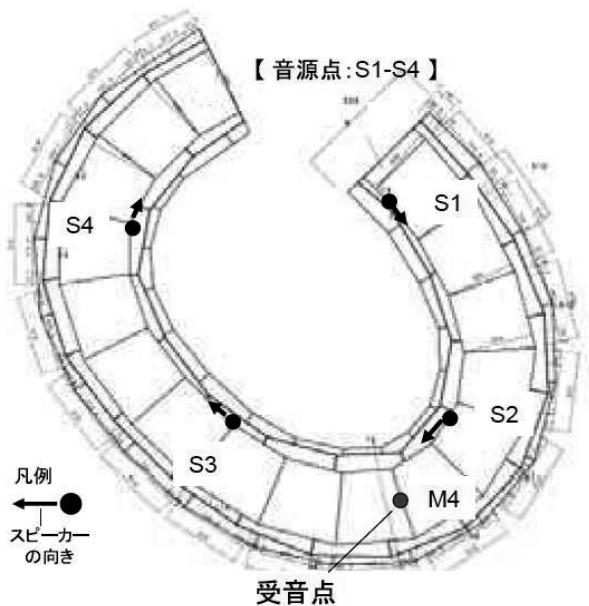


図-7 音源点及び受音点の位置

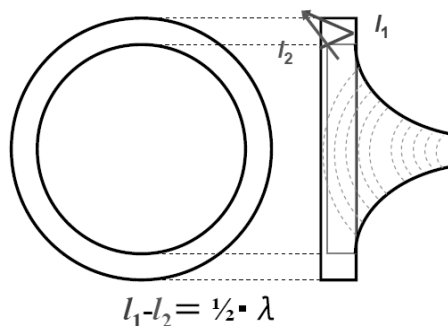


図-9 改良型スピーカの原理（イメージ）

周波数を4kHzとした結果を見ると、下限周波数が高い条件ほど聞き取りにくさが低減している傾向が見られる。

c) 壁面吸音処理の効果⁴⁾

道路トンネル内で測定した方向別インパルス応答の残響時間がそれぞれ①20.0秒（信号処理なし）、②15.0秒、③10.0秒、④6.0秒、⑤4.0秒、⑥2.0秒となるよう信号処理により減衰性状を一様に変化させた条件で無響室において一般被験者14名を対象とした主観評価実験を行った。ここでのアナウンス音のスピーチレートは継続時間9.0秒とし、時間遅延技術を適用しない場合と、時間遅延技術を適用した場合の条件について実験を行った。実験結果を図-6に示す。

図-6を見ると、時間遅延技術を適用することで、トンネル内の残響時間に関わらず「聞き取りにくさ」が改善されていることがわかる。また、残響時間が短くなるほど「聞き取りにくさ」が大幅に改善されている傾向が見られる。

(3) 平成20年度～平成21年度の検討

特殊なループ状の線形条件である大橋JCTにおいて、時間遅延技術の有効性検証のための実験を行った。なお、音響実験は、大橋JCTの1/30縮尺木製模

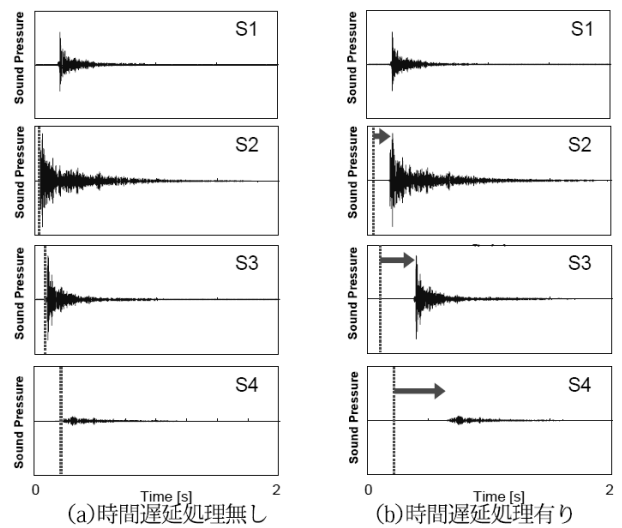


図-8 受音点M4でのインパルス応答波形



図-10 最も効果が確認された改良型スピーカ

型を作成し、模型内で小型スピーカから発するパルス音を小型マイクで確認することにより行った。図-7の通り音源点を4箇所(S1～S4)に配置し、それぞれの音源点からインパルスを発信し、受音点M4で測定したインパルス応答波形を図-8に示す。このグラフは横軸が時間、縦軸が音圧レベルを表している。

(a)時間遅延処理無しのグラフを見ると、S1のほうがS2よりインパルスの到達時間が遅れていることから、2つの音が同時に発信された場合にエコーがかかり聞き取りにくい状態となることがわかる。また、S3のスピーカは受音点に対し反対方向の向きに設置されているのだが、比較的大きな音圧レベルが確認されている。この背面方向に音がよく伝わる現象は、トンネルがループ状となっているための独特な影響と思われる。

次に(b)時間遅延処理有りのグラフを見ると、S1とS2の音圧レベルは時間遅延処理の影響で音の到達時間がピタリと合致するが、問題はスピーカの向きが反対を向いている音圧レベルの大きいS3のスピーカからの音が時間遅れで伝わる事によりエコーがかかり聞き取りにくい状態になってしまうことである。

前述の実験により、特殊なループ構造である大橋JCTでも拡声放送の明瞭性確保のためには時間遅延技術は有効であるが、スピーカ背面方向に伝わる音

表-2 収集したサイン音

| | |
|-------------------|---------------|
| 1. 第1シグナル | 非常警報設備の基準 |
| 2. 第2シグナル | 〃 |
| 3. NHK緊急地震速報 | NHK |
| 3. サイレン | 防犯施設協会 |
| 4. Docomo緊急地震速報 | Docomo |
| 5. Docomo避難情報 | 〃 |
| 6. Yelp | アメリカ合衆国 |
| 7. リモートサイレン | |
| 8. 国民保護に係る警報のサイレン | 日本政府(平成17年7月) |

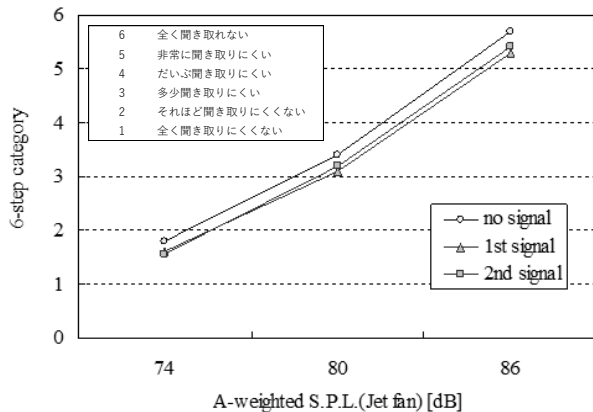


図-11 サイン音別「聞き取りにくさ」に関する実験結果

圧レベルが大きいことにより、スピーカの指向性を上げる必要があることがわかった。スピーカの改良は図-9の様な、通常のスピーカの周りに干渉装置を設置することを考えた。これはスピーカの背面に回り込もうとする音のうち、スピーカの周りにある溝の中に入り込み反射する音(l₁)と溝に入り込まない音(l₂)が半波長(1/2λ)の相違を持つことにより音が打ち消しあう、いわゆる干渉型の原理である。

この改良型スピーカについては、溝を付ける位置、形状等いろいろなタイプのものを作成し実験を行い、最も効果のある形状を確認した。その結果、図-10の形状が最も効果が確認された。

(4) 平成22年度～平成26年度の検討

中央環状品川線、横浜北線で採用する縦流換気方式では、ジェットファン稼働音によりアナウンス音が聞き取りづらくなる可能性がある。この課題を解決する方策として、サイン音の導入について検討を行った⁵⁾。

a) サイン音の選定

長大トンネル内で用いるサイン音を選ぶ際、通常用いられるサイン音と同様の考え方が適用できるかどうか検討するために、現在、警報音として用いられている様々なサイン音データを収集した。NHK緊急速報やDocomo緊急地震速報など東日本大震災以来、身近となったサイン音も収集した(表-2)。

収集したサイン音データに長大トンネル内での音環境特性を踏まえた加工を行い、ジェットファン音と合わせて聴くことで、トンネル内における響きや周囲の音環境を無響室内に再現して試聴実験を行った。試聴した結果、メロディをもつ音、広域帯を含む音は目立ちにくい上に、緊急事態であることが伝

表-3 試聴ポイントにおける拡声放送とジェットファン稼働音のA特性音圧レベル差

| 測定点 | 測定位置[m] | 拡声放送 [dB] | ジェットファン [dB] | S/N [dB] |
|-----|---------|--------------|-----------------|-------------|
| M1 | 250 | 86.6 | 85.2 | 1.4 |
| M2 | 100 | 86.6 | 82.8 | 3.8 |
| M3 | 0 | 83.9 | 78.5 | 5.4 |
| M4 | -50 | 83.8 | 73.3 | 10.5 |
| M5 | -50(車内) | - | - | - |

※S/N：拡声放送－ジェットファン

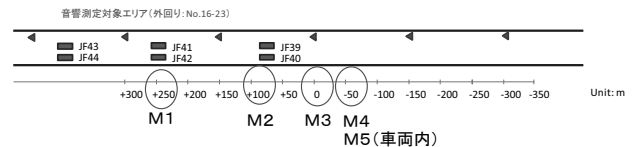


図-12 試聴ポイントの位置

1. 放送の「聞きにくさ」はどの程度でしたか？
 全く聞きにくい | それほど聞きにくい | 多少聞きにくい | だいぶ聞きにくい | 非常に聞きにくい

2. 緊急性を感じましたか？
 全く感じない | それほど感じない | 多少感じる | だいぶ感じる | 非常に感じる

緊急性が感じられた場合、下記のうち、想起される状況として当てはまるものをすべて○で囲んでください。
 事故の発生、火災の発生、地震の発生、車外避難の必要性
 その他()

3. 不安を感じましたか？
 全く感じない | それほど感じない | 多少感じる | だいぶ感じる | 非常に感じる

4. 不快を感じましたか？
 全く感じない | それほど感じない | 多少感じる | だいぶ感じる | 非常に感じる

5. 放送内容について、下記の2つの空欄を埋めてください。
 ()が発生 ()して下さい

図-13 回答用紙

わりにくく、繰り返しの早い音は残響によって不明瞭になりやすい印象であった。試聴した中では、第1、第2シグナルが目立ちやすく、緊急性も感じられ、長大トンネル内における緊急時のサイン音として有用であると思われた。

次に、第1、第2シグナルにアナウンス音を加えて試験音を作成し、無響室にて試聴実験を行った。アナウンス音は「トンネル内で火災が発生しました。近くの非常口から避難して下さい。」と設定した。実験結果を図-11に示す。これを見ると、サイン音がある場合のほうが若干「聞き取りにくくない」という傾向があることがわかる。サイン音2種について顕著な違いは見られなかったが、「第1シグナルのほうがノイズに埋もれにくい」という意見が多かった。「緊急性」については、サイン音がある場合に、顕著に増加していたが、「不安感」については、サイン音の有り無しで顕著な違いは見られなかった。

以上の結果から、今後は比較的评价の高かった第1シグナルを用いることとした。

b) 現場での効果確認実験

有用性が確認されたサイン音を付加した拡声放送メッセージについて、供用直前の中央環状品川線内において一般被験者23名を対象とした効果確認実験を行った。

図-12に試聴ポイントの位置、表-3に試聴ポイントにおける拡声放送とジェットファン稼働音のA特

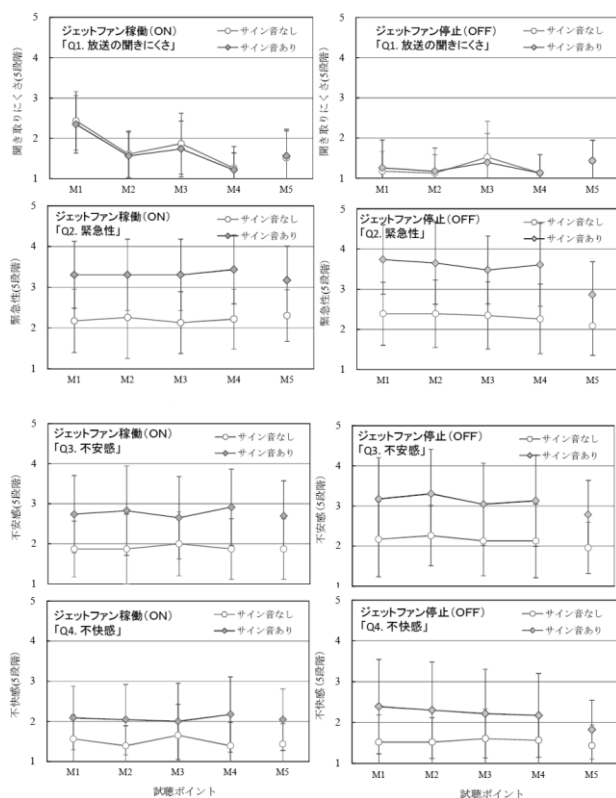


図-14 一般被験者 実験結果

表-4 検討した拡声放送メッセージ

| | |
|-------------|---|
| 文言1 (現状) | トンネル内で火災が発生しました.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言2 | トンネル内で火災が発生しました.とても危険です.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言3 | トンネル内で火災が発生しました.燃え広がっております.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言4 | トンネル内で火災が発生しました.すぐに煙が発生します.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言5 | トンネル内で火災が発生しました.煙が発生し,危険です.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言6 | トンネル内で火災が発生しました.間もなく視界が失われます.近くの非常口から避難して下さい. |

性音圧レベル差を示す. 300mのエリア内で, S/Nは10dB程度変化しており, 「聞き取りにくさ」などの聴感印象も変化すると考えられる. 回答は図-13に示す用紙に従い, 全ての項目に回答してもらうように依頼した. 実験結果を図-14に示す.

「放送の聞きにくさ」の項目については, いずれの試聴ポイントについても, ジェットファン稼働の条件に関わらず, サイン音有り無しの条件間にほとんど差は見られない. また, 稼働状態でも, S/Nの悪いM1で「それほど聞きにくくない」, ないし, 「多少聞きにくい」程度となっている.

「緊急性, 不安感, 不快感」の項目については, いずれの試聴ポイントについても, ジェットファン稼働条件に関わらず, サイン音有りの条件で緊急性, 不安感が感じられる傾向となっている. また, 不快感についても, サイン音有りの条件でやや強く感じる傾向となっているが, 「それほど感じられない」程度であり, 不快感が生じている可能性は低い.

「放送内容」について空欄を埋める設問について

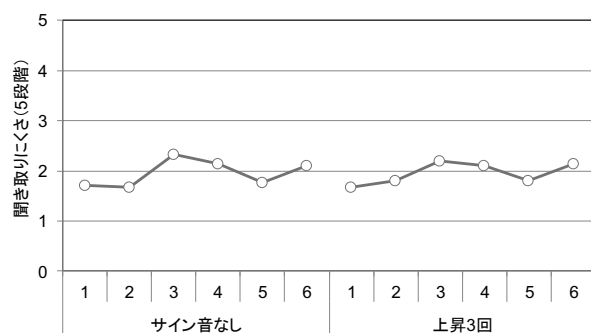


図-15 メッセージの違いによる聞き取りにくさの評価

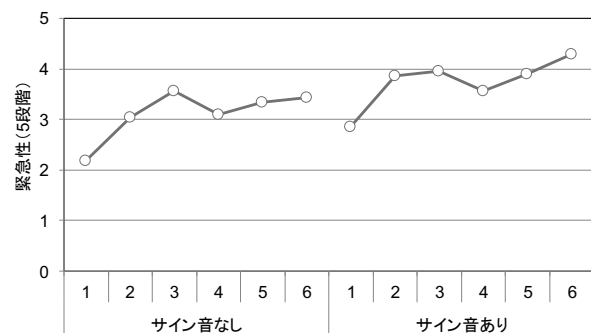


図-16 メッセージの違いによる緊急性の評価

は, 概ね, 「火災」, 「避難」が記入されており, 「放送の聞きにくさ」の設問結果と整合が取れている結果といえる.

(5) 平成27年度の検討

山手トンネルで導入されている拡声放送のメッセージ「トンネル内で火災が発生しました. 近くの非常口から避難してください」に対して, より確実にお客様を非常口へ避難誘導するために, 危険性を強調した文言を追加したメッセージを検討し(表-4), 無響室において一般被験者21名を対象とした主観評価実験を行った. なお, 実験はサイン音のあり, なしで実施した. 実験結果を図-15, 図-16に示す.

図-15, 図-16を見ると, メッセージの聞き取りにくさにおいては, 文言3, 4, 6が現状の文言1よりもやや聞き取りにくい印象となっている. 一方, 緊急性については, 危険性を強調する文言を追加することで, 現状よりも緊急性が上昇することがわかる. また, サイン音については, サイン音があることで聞き取りにくさの評価は変わらないが, 緊急性の評価は改善されていることがわかる.

ただし, メッセージの違いによるサイン音有無の有意な差はない.

3. 横浜北線の拡声放送設備についての検討状況

平成27年度の検討では, 危険性を強調した文言により緊急性が高まることが明らかとなった. しかし, メッセージ間に有意な差が存在しなかった. そこで, 交通心理学や行動科学等の観点から新たにメッセー

表-5 追加検討した拡声放送メッセージ

| | |
|-------------|--|
| 文言1 (現状) | トンネル内で火災が発生しました.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言1' | トンネル内で火災が発生しました.近くの非常口から避難して下さい. (早い口調) |
| 文言2 | トンネル内で火災が発生しました.燃え広がっており,危険です.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言3 | トンネル内で火災が発生.爆発の危険性があります.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言4 | トンネル内,火災発生.トンネル内,火災発生.近くの非常口から避難して下さい. |
| 文言4' | トンネル内,火災発生.トンネル内,火災発生.近くの非常口から避難して下さい. (早い口調) |

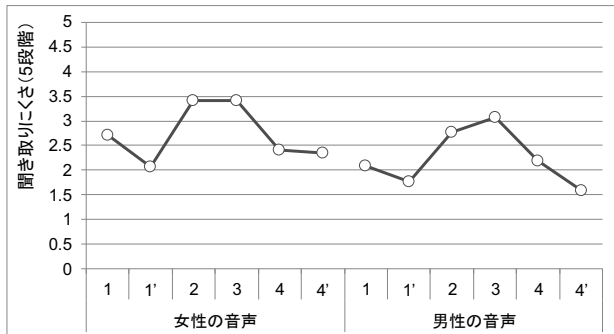


図-17 メッセージの違いによる聞き取りにくさの評価

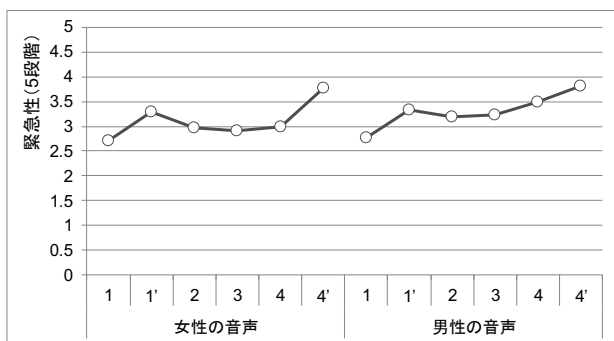


図-18 メッセージの違いによる緊急性の評価

ジを検討し、横浜北線で採用する拡声放送メッセージの選定実験を実施した。

交通心理学や行動科学等の観点で考えると、平成27年度に検討したメッセージには、以下の2点に改善点(課題)がある。

- ①「とても危険です」「煙が発生し、危険です」のように被災者全員に同様の意図が伝わらない曖昧なメッセージ(何が危険か不明な表現)は好ましくない。
- ②「間もなく」や「すぐに」という情報は、現在は危険でないとのことを示してしまうため好ましくない。

上記を踏まえて新たにメッセージを作成し、無響室において一般被験者31名を対象とした主観評価の実験を行った(表-5)。なお、メッセージは女性の音声、男性の音声をそれぞれ作成し、現状の文言(文言1)と文言4については、スピーチレートを早めたケースでも評価を行った。実験結果を図-17、図-18、

【どちらの音声で避難しようと思うか？】

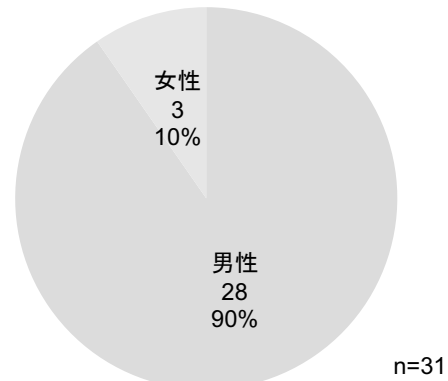


図-19 音声の性別による評価

【どのメッセージで避難しようと思うか？】

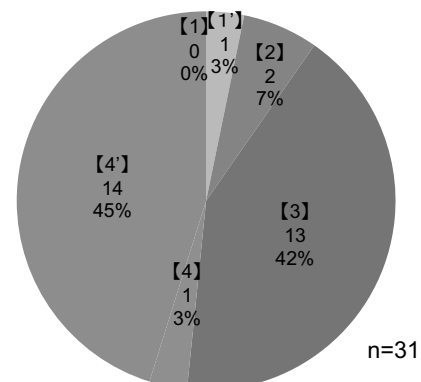


図-20 メッセージ別による評価

図-19、図-20に示す。

図-17、図-18を見ると、メッセージの聞き取りにくさについては、文言2、3が現状の文言に比べて劣ることが分かる。

緊急性については、危険を強調する文言を入れることやスピーチレートを早めることで、緊急性が上昇することがわかる。

また、図-18、図-19を見ると、男性の音声の方が緊急性が相対的に伝わりやすく、男性の音声の方が「避難しようと思う」と回答した人が多い。図-20を見ると、メッセージとしては、文言4の評価が最も高く、次いで文言3の評価が高い結果となった。

4. おわりに

本稿は、首都高速道路の長大トンネルにおける避難誘導用の拡声放送設備に関するこれまでの検討内容を整理し、横浜北線へ導入する拡声放送メッセージの検討状況を報告したものである。

無響室の実験では、山手トンネルで導入している拡声放送メッセージ「トンネル内で火災が発生しました。近くの非常口から避難して下さい。(女性の音声)」よりも、「トンネル内、火災発生。トンネル内、火災発生。近くの非常口から避難して下さい。(早い口調、男性の声)」というメッセージの方が聞き取りやすく、緊急性が高くなることがわかった。

今後は、横浜北線の現地のトンネルにおいて確認実験を行い、開通に合わせて新たな拡声放送メッセージを導入していくことを予定している。

参考文献

- 1) 川田成彦，伊藤崇法，岡野孝司：首都高速道路中央環状新宿線のトンネル防災概要，建設の施工企画，pp.54-59，2007.
- 2) 横山栄，坂本慎一，橘秀樹，田沢誠也：トンネル内拡声放送システムへの時間遅延技術の適用可能性に関する実験的検討，日本音響学会講演論文集，pp.841-842，2005.3.
- 3) 横山栄，坂本慎一，橘秀樹，田沢誠也：トンネル内非常放送におけるスピーチレートに関する主観評価実験，日本音響学会講演論文集，pp.1033-1034，2005.9.
- 4) 横山栄，橘秀樹，坂本慎一，岡野孝司：道路トンネル内避難誘導用拡声放送システムの設計，日本音響学会講演論文集，pp.1015-1016，2007.9.
- 5) 伊藤裕貴：山手トンネルにおける避難時拡声放送の拡充，第31回日本道路会議，2015.