

単一エコーの入射方向が単語理解度に及ぼす影響 Effects of the incident direction of a single echo on the word intelligibility

向井玄典, 石井要次, 大竹隼人, 矢野修平, 飯田一博
Gensuke MUKAI, Yohji ISHII, Hayato OTAKE, Shuhei YANO, and Kazuhiro IIDA

千葉工業大学
Chiba Institute of Technology

内容概要 屋外防災放送では, 複数の音声为重なり合うことにより理解度が低下することが課題となっている. 本研究では, 正面方向から呈示される直接音と, 水平面もしくは正中面の1方向から呈示される単一エコーで構成した音場を用いて, 単語理解度を求めた. その結果, 水平面では全4単語の理解度に関して 0° のエコーと 90° のエコーの間で $p<0.01$ で有意な差が認められた. 第2単語の理解度については, 0° に対して $90, 120, 180^\circ$ では $p<0.01$ で, $60, 150^\circ$ では $p<0.05$ で有意な差が認められた. 一方, 正中面では 0° のエコーに対して 90° では単語理解度は低く, 180° で高い傾向となったが, 有意な差は認められなかった.

1. はじめに

屋外防災放送は, 数百メートル間隔で設置された複数のスピーカから同時に音声が発せられるため, 複数の音声为重なり合って理解度が低下する[1]. 理解度の向上は防災や減災のための重要な研究課題である.

従来, 単一エコーの検知限[2,3]およびエコーディスタバンスが明らかになっている. エコーディスタバンスは, 先行音に対する後続音の遅れ時間が50ms以内であれば先行音と同等の音圧レベルで到来しても, 先行音の聴取の妨害とはならないことが報告されている[4]. しかし, 屋外防災放送における後続音の遅れ時間は数百ms以上となることが多く, 先行音の聴取を妨害する.

先行音と後続音の到来方向の影響について, 森本らは先行音を正面, 後続音を水平面から呈示する実験を行った. 後続音の到来方向はエコー検知限に有意に影響を及ぼし, エコーディスタバンスに有意な影響を及ぼさないことを示した[5].

Saberi *et al.* [6]は, 水平面および正中面においてMLD(Masking Level Difference)を求めた. 水平面内においては, 前後に比べ側方のMLDが大きくなり, 正中面においては, $60-150^\circ$ が大きくなることを示した.

しかし, 後続音の入射方向が単語理解度に及ぼす影響については明らかにされていない.

本稿では, 正面方向から呈示される先行音と水平面もしくは正中面から呈示される後続音(単一エコー)で構成される音場で実験を行い, 単一エコーの入射方向が単語理解度に及ぼす影響について検証した.

2. 実験1(単一エコーが水平面から到来する場合)

2.1. 実験方法

A. 実験システム

実験システムは, スピーカ(FOSTEX FE83E), イコライザ(YAMAHA Q2013B), アンプ(YAMAHA HC1500), PC(EPSON NJ5900E), オーディオインターフェイス(FireFace UFX)で構築した. 被験者の頭部中心からスピーカまでの距離は1850mmである. イコライザによって, 頭部中心位置で200Hz-16kHzの1/3オクターブバンドレベルで $\pm 1\text{dB}$ で平坦となるようにスピーカの特性を調整した.

B. 音場

先行音を正面に固定し, 単一エコー(以降, 後続音)を右水平面 $0-180^\circ(30^\circ$ 間隔)のいずれかから呈示する7つの音場を設定した(図1). 暗騒音は付加していない.

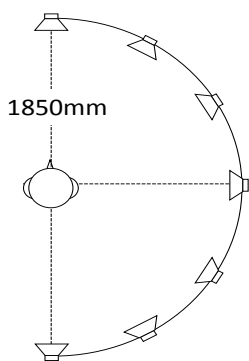


図1 スピーカ配置

C. 刺激

刺激は4連単語により構成した。4連単語は、親密度別単語了解度試験用音声データセット(FW03) [7]に収録されている女性話者 fto の親密度 5.5-7.0 に属する4モーラの単語を4つ繋げて作成した(図2)。単語の間隔は1sとした。ただし、単語間の無音時間が短くなりすぎないように850ms以上の単語は除外した。先行音、後続音とも頭部中心位置で60dBで呈示した。



図2 先行音と後続音の時間構造

D. 刺激の呈示方法および回答方法

被験者は点灯した無響室で正面方向を向いて着席した。その後消灯し、回答に必要な灯りだけにして実験を行った。被験者のタスクは、刺激の呈示が終了してから、聴き取れたすべての単語を回答用紙に記入し、聴き取りにくさを4段階(1:聴き取りにくくはない, 2:やや聴き取りにくい, 3:かなり聴き取りにくい, 4:非常に聴き取りにくい)で回答することである。回答時間は20sとした。

各音場について10回ずつ呈示した。70刺激(7音場×10回)を2試行に分けて実験を行った。刺激はランダムな順で呈示した。被験者は、20代の学生4名(男性4名)であり、4名とも実験者である。被験者は、スピーカの配置、および先行音が正面方向に固定されていることは知っているが、呈示する単語の後続音の到来方向の順序に関しては知らない。

2.2. 実験結果

A. 正答率

音場ごとに求めた4連単語の正答率を図3に示す。正答率は、90°で最大(0.83)となり、0°で最小(0.71)となった。後続音が側方に近づくほど正答率が高くなる傾向があった。カイ二乗検定を行った結果、0°に対して90°で、 $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。

次に、4連単語の呈示順ごとの正答率を図4に示す。相対的に、第1単語および第4単語の正答率が高く、第2単語および第3単語の正答率が低い。第2単語と第3単語は、先行音と後続音が時間的に重なっているため、正答率が低くなったと考えられる。カイ二乗検定を行った結果、第1単語と第4単語の間、および第2単語と第3単語の間を除くすべての単語間で、 $p<0.01$ で統計的に有意な差が認められた。

次に、単語の呈示順ごとに、各音場の正答率を求めた(図5-8)。第1単語では、0-60°で最大(0.90)となり180°で最小(0.78)となった。第2単語では、0°の正答率が最小(0.48)となり、他の方向に比べて低く、90-180°で高くなる。第3単語では、90°で最大(0.75)、0, 30, 180°で最小(0.58)となり、側方になるにつれて正答率が高くなる。第4単語では、90°で最大(0.93)となり、120°で最小(0.80)となった。カイ二乗検定を行った結果、第2単語において、0°に対して90, 120, 180°では $p<0.01$ で、60, 150°, 30°に対して180°では $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。その他の単語では、方向間での統計的に有意な差は認められなかった。

さらに、先行音と後続音が時間的に重なる第2単語と第3単語の平均正答率を図9に示す。正答率は90°で最大(0.76)となり、0°で最小(0.53)となった。カイ二乗検定を行った結果、0°に対して90, 120°では、 $p<0.01$ で、150, 180°, 30°に対して90°では、 $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。この結果について Saberi *et al.* と比較する。Saberi *et al.* は、信号(クリック音)を水平面内30°間隔、妨害音(ピンクノイズ)を正面から呈示して水平面内のMLDを求めた。その結果、前後に比べて側方のMLDが大きくなることを示した。今回の実験では、0°に対して90-180°で単語了解度が統計的に有意に高く

なった. このうち 90°の正答率が高くなったことについてはMLD と同様の傾向であった. しかし, 180°の正答率が高くなったことについては MLD と異なる傾向になった.

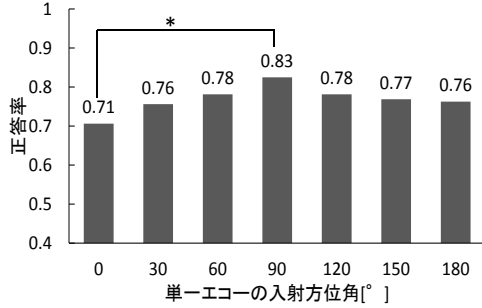


図3 単一エコーの入射方向ごとの正答率

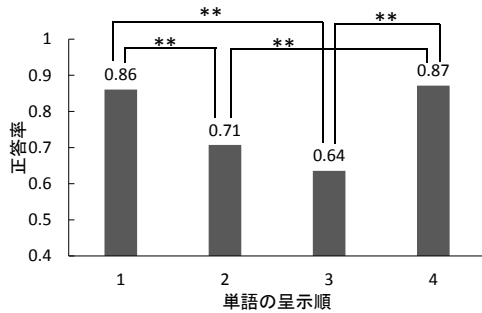


図4 提示順ごとの正答率

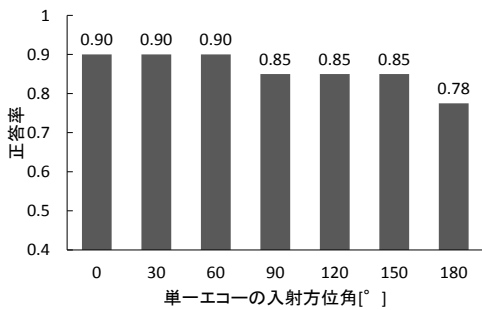


図5 第1単語の正答率

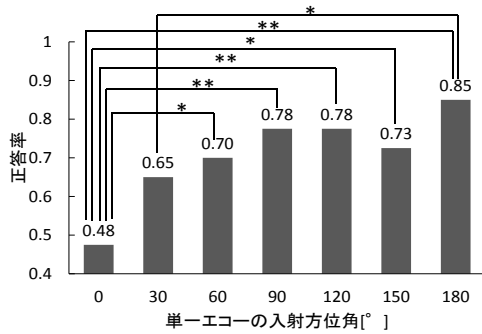


図6 第2単語の正答率

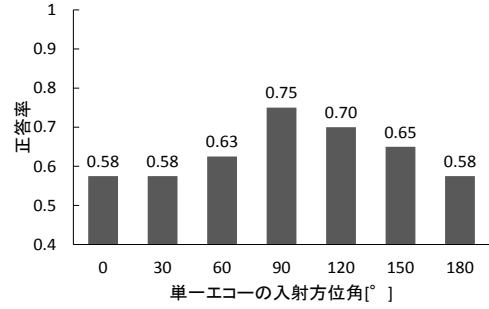


図7 第3単語の正答率

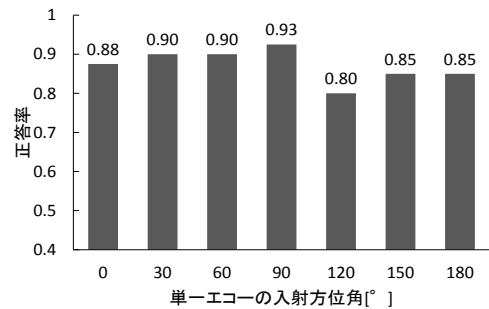


図8 第4単語の正答率

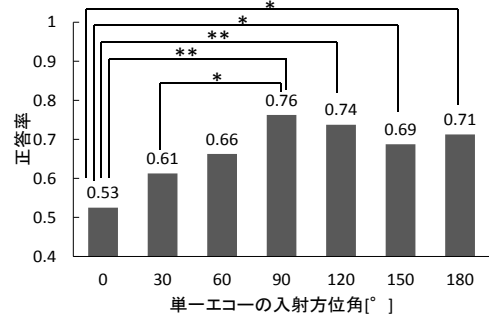


図9 単一エコーの入射方向ごとの第2単語と第3単語の平均正答率

B. 聞き取りにくさ

各音場の聞き取りにくさの平均値を図 10 に示す. 60°で最小(1.8)となり, 0°で最大(2.3)となった. いずれの音場においても, 「やや聞き取りにくい」に相当する値であり, 音場間の顕著な差はみられなかった.

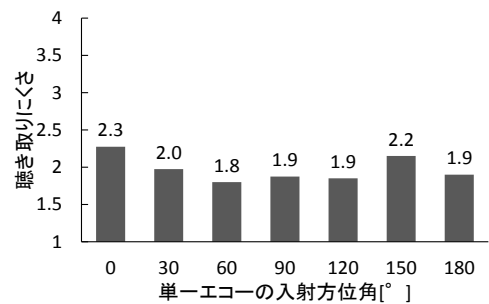


図10 聞き取りにくさ

3. 実験2(単一エコーが正中面から到来する場合)

正中面において、後続音の入射方向が単語理解度に影響を及ぼす影響について検証した。

3.1. 実験方法

先行音を正面に固定し、後続音を正中面0-180°の30°間隔の7方向のいずれかから呈示した(図11)。被験者の頭部中心からスピーカまでの距離は1200mmである。それ以外の条件はすべて実験1と同様である。

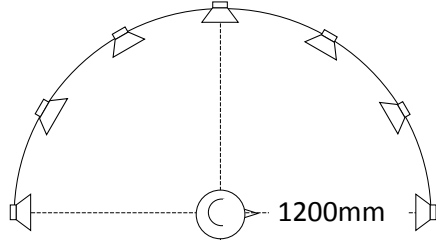


図11 スピーカ配置(正中面)

3.2. 実験結果

A. 正答率

音場ごとに求めた4連単語の正答率を図12に示す。正答率は、120, 180°で最大(0.83)となり、150°で最小(0.74)となった。カイ二乗検定を行った結果、方向間の正答率に統計的に有意な差は認められなかった。

次に、4連単語の呈示順ごとの正答率を図13に示す。実験1と同様に、相対的に第1単語および第4単語の正答率が高く、第2単語および第3単語の正答率が低い。カイ二乗検定を行った結果、第2単語と第3単語の間で統計的に有意な差が認められず、第1単語と第4単語の間で $p<0.05$ で、それ以外のすべての単語間で、 $p<0.01$ で統計的に有意な差が認められた。

次に、単語の呈示順ごとに、各音場の正答率を求めた(図14-17)。第2単語および第3単語では、正面0°に比べて90°が低く、180°が高い傾向がある。カイ二乗検定を行った結果、第4単語の120°に対して150°で、 $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。その他の単語では方向間での統計的に有意な差は認められなかった。

さらに、先行音と後続音が時間的に重なる第2単語と第3単語の平均正答率を図18に示す。正答率は180°で最大(0.74)となり、90°で最小(0.59)となった。0°と比較して60, 90, 150°の正答率が低くなる傾向があり、120,

180°の正答率が高くなる傾向があった。カイ二乗検定を行った結果、カイ二乗検定を行った結果、180°に対して90, 150°では、 $p<0.01$ で120°に対して90, 150°では、 $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。この結果についてSaberietal.と比較する。Saberietal.は、信号(クリック音)を正中面内30°間隔、妨害音(ピンクノイズ)を正面から呈示して正中面内のMLDを求めた。その結果、0°と比較して60-150°において、MLDの値が大きくなることを示した。今回の実験では0°に対して60, 90, 150°の正答率が低く、120, 180°の正答率が高くなる傾向があった。このうち120°の正答率が高くなったことについてはMLDと同様の傾向であった。しかし、60, 90, 150°の正答率が低くなり、180°の正答率が高くなったことについてはMLDと異なる傾向になった。

ここで、実験1と実験2において同じ入射音構造である0°と180°の正答率を比較する(図19)。0°, 180°ともに実験2の正答率が0.07高くなった。カイ二乗を行った結果、180°において実験1と実験2の間で、 $p<0.05$ で統計的に有意な差が認められた。実験2の正答率が高くなった理由として、被験者の慣れやスピーカの距離の違いなどが考えられる。

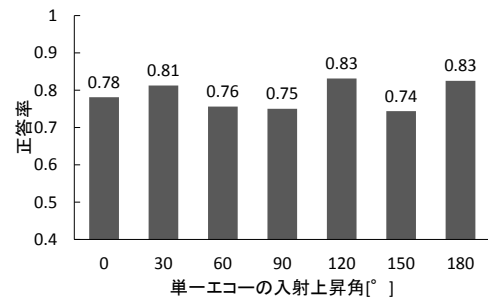


図12 単一エコーの入射方向ごとの正答率

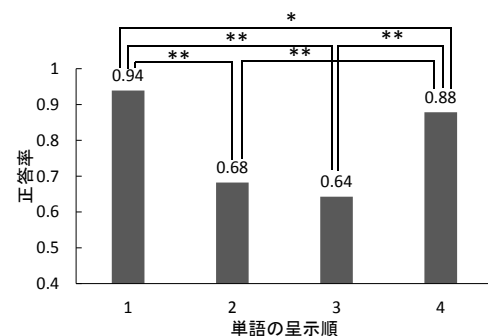


図13 呈示順ごとの正答率

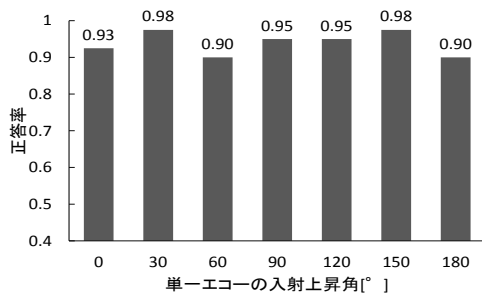


図14 第1単語の正答率

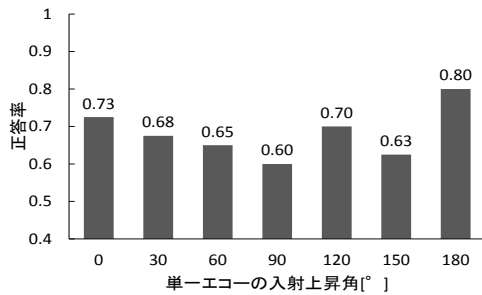


図15 第2単語の正答率

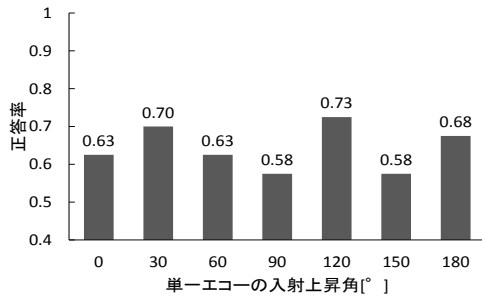


図16 第3単語の正答率

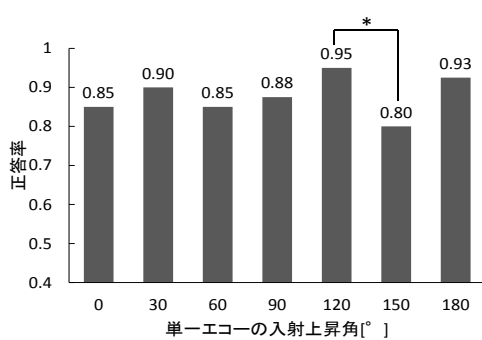


図17 第4単語の正答率

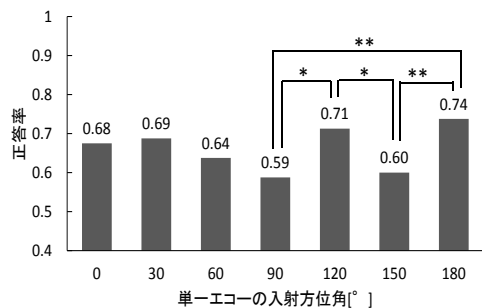


図18 単一エコーの入射方向ごとの第2単語と第3単語の平均正答率

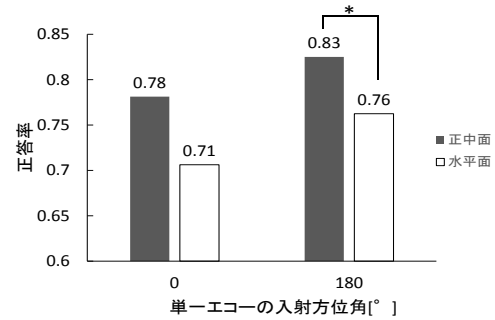


図19 実験1と実験2の比較

B. 聞き取りにくさ

各音場の聞き取りにくさの平均値を図20に示す。120°で最小(2.0), 0°で最大(2.6)となった。前方から後方になるにつれ聞き取りにくさが減少する傾向があったが、いずれも「やや聞き取りにくい」と「かなり聞き取りにくい」の間に相当する値となった。実験1と実験2で同じ入射構造である0°と180°の聞き取りにくさを比較する。0°における聞き取りにくさは実験1が2.3, 実験2が2.6となり, 180°における聞き取りにくさは実験1が1.9, 実験2が2.2となった。0°, 180°ともに実験2の聞き取りにくさが0.3高くなった。

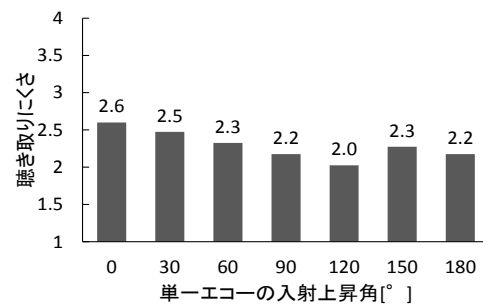


図20 聞き取りにくさ

4. 実験3 (4連単語と3連単語の比較)

実験1および実験2において, 単語の重なりがない第1単語と第4単語の正答率は0.86-0.94であった。単語数が多かったために, 聞き取った単語を記憶しておくことができずに正答率が低下していた可能性がある。4連単語を用いることが妥当であるか否かを3連単語と比較することで検証した。

4.1 実験方法

A. 実験システム

実験システムはノートPC, オーディオインターフェ

イス、オープンタイプのヘッドホン(オーディオテクニカ ATH-AD700)で構成した。

B. 刺激

3連単語および4連単語は実験1, 実験2と同様の条件で構成した。

C. 刺激の呈示方法および回答方法

実験は点灯した有響室で行った。刺激は左右の耳に同相で呈示した(diotic 受聴)。被験者は4連単語と3連単語についてそれぞれ35回ずつ回答した。被験者は、実験1, 実験2とは異なる20代の男子学生5名で、実験者ではない。その他の条件は実験1, 実験2と同様である。

4.2 実験結果

4連単語および3連単語の正答率を図21, 22に示す。4連単語の正答率は、第1単語は0.85, 第4単語は0.89となり、実験1, 実験2と同等の値であった。一方、3連単語の第1単語の正答率は0.98, 第3単語の正答率は0.96となり、ほぼ100%正答している。このような差が生じる要因として、4連単語では聞き取れた単語を記憶できていないことが考えられる。したがって、音場の単語理解度を評価するうえでは、3連単語を用いることが妥当だと考える。

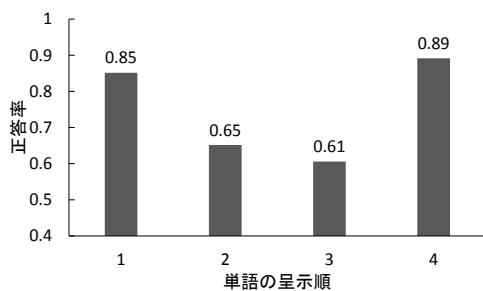


図21 呈示順ごとの正答率：4連単語

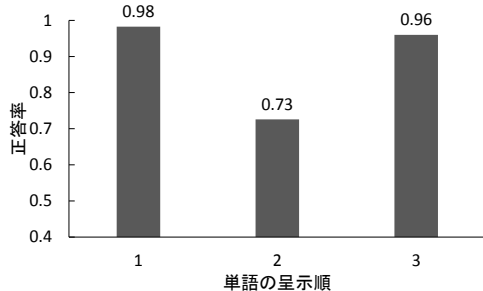


図22 呈示順ごとの正答率：3連単語

5. 実験4(単一エコーが水平面および正中面から到来する場合)

3連単語を用いて、水平面内および正中面内での後続音の入射方向の違いが単語理解度に及ぼす影響について検証した。

5.1 実験方法

A. 音場

先行音を正面に固定し、後続音を水平面および正中面の0-180°の30°間隔、12方向から呈示した。

B. 実験条件

被験者の頭部中心からスピーカまでの距離は1200mmである。刺激は3連単語により構成した。被験者は各音場について10回ずつ回答した。120刺激(12音場×10回)を5試行に分けて実験を行った。刺激は、水平面と正中面をそれぞれ混ぜてランダムな順で呈示した。被験者は、これまでの実験には参加していない10-20代の学生10名(男性5名, 女性5名)である。その他の実験条件は実験1および実験2と同様である。

5.2 実験結果

A. 正答率

まず、後続音が水平面から到来する場合の結果をみる。音場ごとに求めた3連単語の正答率を図23に示す。正答率は、30°および150°で最大(0.94)となり、0°で最小(0.89)となった。カイ二乗検定を行った結果、0°に対して30, 150°で、 $p < 0.05$ で統計的に有意な差が認められた。

次に、単語の呈示順ごとに、各音場の正答率を図24-26に示す。単語の重なりがない第1単語および第3単語では、いずれの方向においても0.9以上の正答率となった。先行音と後続音の単語の重なりがある第2単語では、0°に比べて30-180°で高い傾向となった。カイ二乗検定を行った結果、第1単語の第1単語の90-150°では $p < 0.01$ で、150°に対して0, 60, 120, 180°, 第3単語の90°に対して30, 150°では、 $p < 0.05$ で統計的に有意な差が認められた。

次に、後続音が正中面から到来する場合の結果をみる。音場ごとに求めた3連単語の正答率を図27に示す。正答率は150°で最大(0.92)、120°で最小(0.88)となっ

た. カイ二乗検定を行った結果, 方向間で統計的に有意な差が認められなかった.

次に単語の呈示順ごとに, 各音場の正答率を図 28-30 に示す. 第 1 単語および第 3 単語では, 水平面と同様, いずれの方向においても 0.9 以上となった. 第 2 単語では, 0°と比較して 60, 150, 180°が高い傾向があった. カイ二乗検定を行った結果, 方向間で統計的に有意な差は認められなかった.

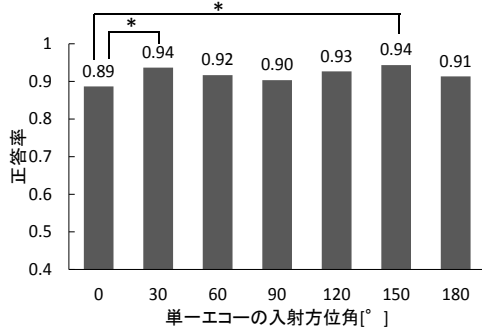


図 23 単一エコーの入射方向ごとの正答率

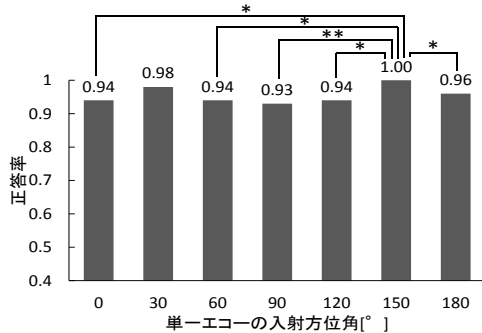


図 24 第 1 単語の正答率

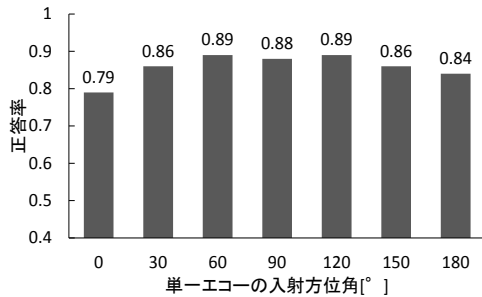


図 25 第 2 単語の正答率

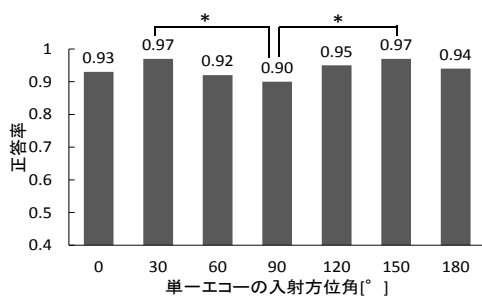


図 26 第 3 単語の正答率

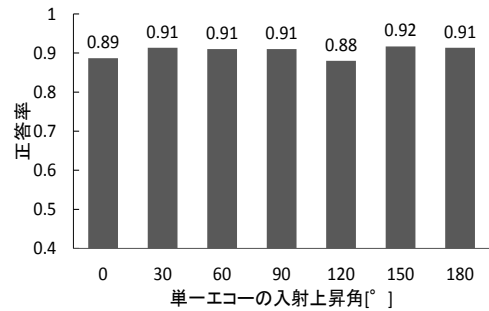


図 27 単一エコーの入射方向ごとの正答率

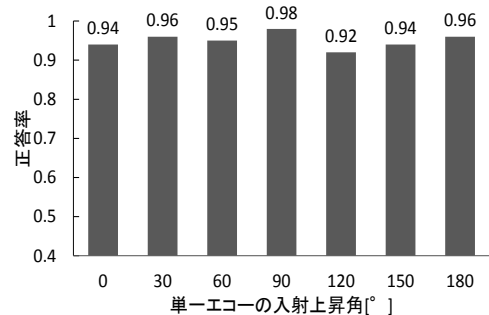


図 28 第 1 単語の正答率

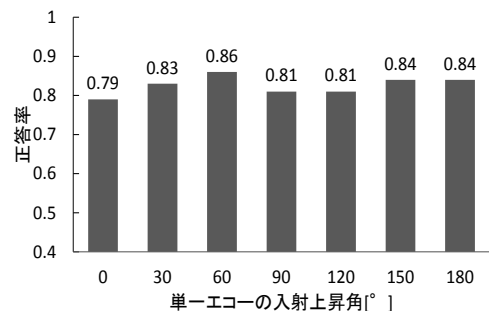


図 29 第 2 単語の正答率

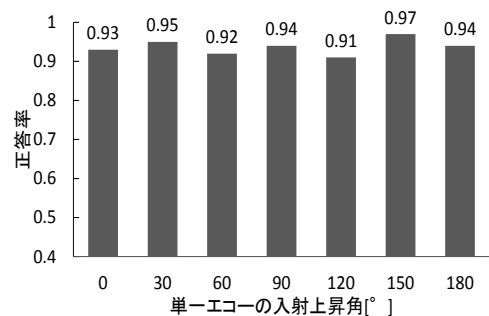


図 30 第 3 単語の正答率

B. 聞き取りにくさ

聞き取りにくさの平均を図 31, 32 に示す. 水平面において 0°で最大(2.2)となり, 「やや聞き取りにくい」に相当する値となった. その他の方向では, 1.6-1.9 となり, 「聞き取りにくくはない」と「やや聞き取りにくい」の間に相当する値であった.

正中面においても0°が最も聞き取りにくく、後方になるにつれて低くなる傾向にあるが、いずれも「やや聞き取りにくい」に相当する値であり、水平面の結果と比べるとやや高い傾向にあった。

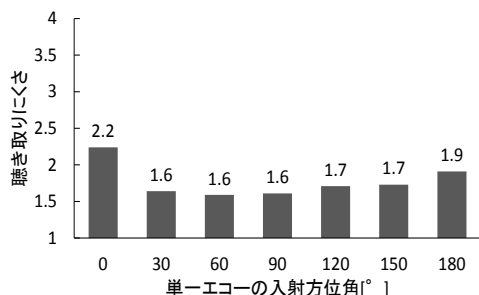


図21 聞き取りにくさ：水平面

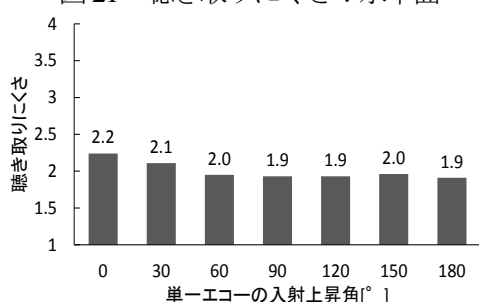


図22 聞き取りにくさ：正中面

6. おわりに

本研究では、正面方向から呈示される直接音と水平面もしくは正中面から呈示される単一エコーで構成される音場で単語理解度実験を行い、以下の結果を得た。

1. 単一エコーが水平面内から到来する場合は、実験1の全4単語で、0°に対して90°で、 $p < 0.01$ で統計的に有意な差が認められた。第2単語で、0°に対して90, 120, 180°では $p < 0.01$ で、60, 150°では $p < 0.05$ で統計的に有意な差が認められた。実験4の第2単語で、0°に対して、30-180°で高い傾向となったが、統計的に有意な差は認められなかった。
2. 単一エコーが正中面内から到来する場合は、実験2の第2単語と第3単語を併せた正答率は、180°に対して、90, 150°では $p < 0.01$ で、120°に対して90, 150°では $p < 0.05$ で統計的に有意な差が認められた。実験4で0°に対して60, 150, 180°で高い傾向となったが統計的な有意差は認められなかった。

文献

- [1]戸井田義徳, “野外音場における明瞭度”, 日本音響学会誌 Vol43(7), pp.519-525, (1987)
- [2]E. Meyer and G. R. Schodder, “Über den Einfluss von Schallruckwürfen auf Richtungslokalisation und Lautstärke bei Sprache”, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, 6, 31, (1952)
- [3]J. P. A. Lochner and J. F. Burger, “The subjective masking of short time delayed echoes by their primary sounds and their contribution to the intelligibility of speech”, ACUSTICA, 8, pp.1-10, (1958)
- [4]R. H. Bolt and P. E. Doak, “A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums”, J. Acoust. Soc. Am., 22, pp.507-509, (1950)
- [5]森本ら, “反射音の到来方向が話者のエコーディスタランスにおよぼす影響”, 日本建築学会建築環境工学論文集, 4, pp.64-69, (1983)
- [6] Saberi *et al.*, “Free-field release from masking” J. Acoust. Soc. Am., 90(3), 1355-1370, (1991)
- [7] 天野他, NII 音声資源コンソーシアム, (2006)