

## 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響

### - 無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較 -\*

飯田一博, 野村宗弘, 石井要次(千葉工大), 大島俊也, 内藤大介(リオン)

#### 1 はじめに

屋外拡声システムの了解度の向上が防災や減災のための重要な研究課題であることは論を俟たない。従来, この研究課題に対して,

- 1) ロングパスエコー環境での了解度[1]
- 2) 気象が音声伝搬に及ぼす影響[2]
- 3) 音場の可聴化方法[3]
- 4) 放射タイミングを制御した拡声方法[4]

などが検討されている。

これらのうち, 2) については気象条件による伝搬特性の物理的な変化が報告されているが, それが音声了解度に及ぼす影響は明らかではない。3) については可聴化手法が提案されているが, それによる現場の音声了解度の再現精度は明らかでない。

本稿では, 2) および 3) に関して, 以下の目的で実施した実験の概要を報告する。

目的 1) 同一地点で測定した様々な気象条件における音場を無響室内に再現し, それ単語了解度および聞き取りにくさに及ぼす影響を明らかにする。

目的 2) バイノーラル再生による防災放送の了解度評価の可能性を上記無響室実験との比較により検証する。

#### 2 気象条件が音声了解度に及ぼす影響

##### 2.1 実験方法

###### A. 音場

大島らは, 7ヶ月に亘り定時放送音(ピアノ曲「小さな世界」)を1本の無指向性マイクロホンで収録し, クロススペクトル法で入射音の時間的構造を求めている[2]。その中から, 観測点 M03(小金井市)における気象条件の異なる3日分の音場を選んだ(音場 1-3)。入射方向は到達時間に対応するスピーカ(子局)を地図から読み取ることにより求めた。受聴者の向きは, バイノーラルマスキングリリース

(BMR) [5]が小さくなる, すなわち入射音の側方角[6]の絶対値の和が小さくなる方向とした(北を0°として時計廻りに22°)。さらに, 音場 3 と時間的構造は同じで受聴者の向きが異なる(BMR が大きくなる)音場 4 を加えた。Table 1 に各音場の入射音構造を示す。なお, 入射音の方位角は受聴者からみた値である。

Table 1 4音場の入射音構造。

入射音	音場番号/受聴者の向き/測定日/気象			
	1	2	3	4
	22°	22°	22°	71°
	2013.9.7	2013.12.19	2013.9.10	
	曇り	雨	曇り	
	北東	北西	南東	
	1.6m/s	1.1m/s	1.9m/s	
相対遅れ時間(ms)	0	0	0	0
1 相対振幅	1.0	1.0	0.60	0.60
方位角(°)	11	11	11	322
相対遅れ時間	-	941	443	443
2 相対振幅	-	0.81	1.0	1.0
方位角	-	345	178	129
相対遅れ時間	-	-	564	564
3 相対振幅	-	-	0.98	0.98
方位角	-	-	101	52
相対遅れ時間	-	-	745	745
4 相対振幅	-	-	0.81	0.81
方位角	-	-	322	273

入射音の振幅周波数特性については, 暗騒音などの影響でクロススペクトル法では正確に求められないため, 子局と同タイプのスピーカ(ロングホーン: UNI-PEX H510L, レフレクスホーン: 同 H510A)の特性を付加した。これらのスピーカの方向別インパルス応答(水平面 2.5°間隔)を無響室で測定し, 子局ではロングホーンとレフレクスホーンを計4台組合せてスピーカ群を構成しているため, 各スピーカの向きと位置を考慮してスピーカ群の方向別インパルス応答を合成した。さらに, 100 Hz 以上の 1/3 オクターブバンドにおいて, 観測時の気温, 相対湿度および伝搬距離より求めた空気吸収による減衰量[7]を反映した。

\* Effects of climate condition on the intelligibility of outdoor emergency sound system – comparison between sound fields reproduced in an anechoic chamber and those reproduced by binaural simulation –, by IIDA, Kazuhiro, NOMURA, Kazuhiro, ISHII, Yohji (Chiba Inst. Tech.), OHSHIMA, Toshiya, and NAITO, Taisuke (RION).

## B. 実験システム

音場 1-4 を無響室内で再現した。Table 1 に示した各方位角にスピーカ(FOSTEX FE83E)を設置した(Fig.1)。被験者の頭部中心からスピーカまでの距離は 1850 mm である。さらに、暗騒音呈示用として  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 135^\circ$  にスピーカを設置した。各スピーカはグラフィックイコライザで 200-16 kHz の 1/3 オクターブバンドレベルが  $\pm 1$  dB で平坦となるよう調整した。

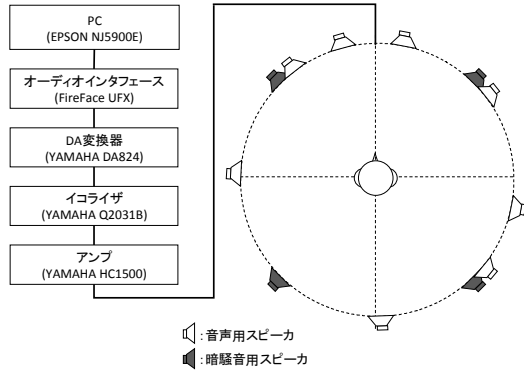


Fig. 1 無響室実験のシステム構成

## C. 刺激

刺激は 4 連単語と暗騒音により構成した 4 連単語は、親密度別単語理解度試験用音声データセット(FW03)[8]に収録されている女性話者 fto の親密度 7.0-5.5 に属する 4 モーラの単語を 1.5 モーラ(281.25 ms)間隔で 4 つ繋げて作成した。この 4 連単語に前述のスピーカ群のインパルス応答を畳込み、空気吸収による減衰を施し、Table 1 の相対遅れ時間と相対振幅を反映させて呈示した。

暗騒音は各音場観測時のものを使用し、無相関となるように  $-45^\circ$  の遅延を 0 として時計回りに 150, 450, 300 ms の遅延を与えた。

各音場の頭部中心位置での(音声 + 暗騒音)レベル、および暗騒音レベルは、現場での観測値(Table 2)を再現した。

Table 2 音声および暗騒音のレベル (dB)

音場	音声 + 暗騒音	暗騒音	(音声 + 暗騒音) / 暗騒音
1	54.8	47.9	6.9
2	58.2	54.6	3.6
3,4	56.5	48.9	7.6

## 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示す印に向けて着席した。その後消灯し、回答に必要な手元の灯りだけにして実験を実施した。

各刺激では、まず暗騒音を呈示し、2 s 後に 4 連単語を呈示した(Fig. 2)。刺激の呈示時間は 8 s である。被験者のタスクは、刺激の呈示が終了してから 20 s 間に、聞き取れた全ての単語を回答用紙に記入し、聞き取りにくさを 4 段階(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)で回答することである。

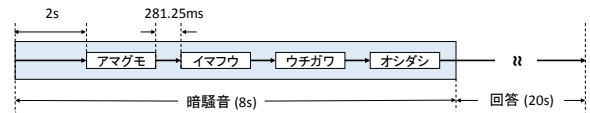


Fig. 2 刺激呈示の時間的構成

被験者は各音場について 12 回ずつ回答した。48 刺激(4 音場  $\times$  12 回)を 2 試行に分けて実験を行い、各試行の最初の 4 刺激は練習として、その回答は結果から除外した。なお、各試行において最初の 4 刺激は異なる音場とし、この 4 刺激も残りの 20 刺激もそれぞれランダムな順で呈示した。被験者は、20 代の学生 8 名(男性 7 名, 女性 1 名)である。

## 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 Fig. 3 に示す。正答率は音場 1 で最大(0.77)、音場 2 で最小(0.46)であった。音場 3 と 4 はほぼ同じ値であった。これらの差異についてカイ二乗検定を行った結果、音場 3-4 間を除く全ての音場間に有意な差( $p < 0.01$ )があるとみなせた(Table 3)。

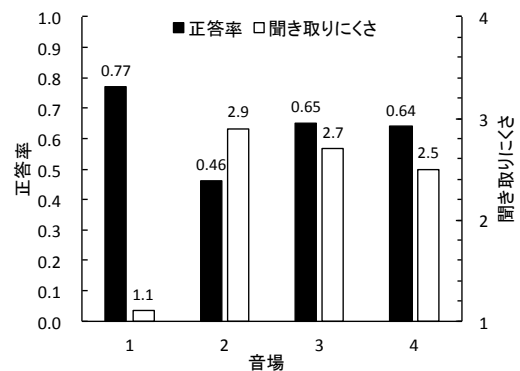


Fig. 3 各音場の正答率と聞き取りにくさ

Table 3 カイ二乗検定結果. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

	音場 1	音場 2	音場 3	音場 4
音場 1	—			
音場 2	**	—		
音場 3	**	**	—	
音場 4	**	**		—

## B. 聞き取りにくさ

聞き取りにくさ(Fig. 3)についても、音場1で最小(1.1)、音場2で最大(2.9)となり、「聞き取りにくくはない」と「かなり聞き取りにくい」に相当する違いがあった。音場3と4は、それぞれ2.7と2.5であり、入射方向による影響は大きいとは言えない。

## C. まとめ

以上より、同一観測点であっても気象条件により正答率に統計的有意な差が生じ、聞き取りにくさも著しく変化すると言える。

一方、音場3と4の間には、正答率においても聞き取りにくさにおいても顕著な差はみられなかった。従来のBMRの知見からすれば、複数の入射音がある場合、正答率や聞き取りにくさに入射方向の影響が現れると考えられる。しかし、今回の実験結果のように入射方向の影響が小さいのであれば、音声了解度の予測を目的とする可聴化においては、3次元再生をする必要はない。この点については、よりシンプルな音場を用いた追加実験を計画している。

## 3 バイノーラル方式による音声了解度のシミュレーション精度

バイノーラル再生で音場を精度よく再現できれば、無響室などの特別な設備なしで、あるスピーカ配置のある気象条件における現場の音声了解度を耳で聴いて評価することができる。

このようなシステムの確立をめざして、バイノーラル再生による単語了解度と聞き取りにくさの評価実験を行い、無響室実験の結果と比較した。

### 3.1 実験方法

#### A. 音場

無響室実験の音場1-4をシミュレートした。

#### B. 実験システム

Fig. 4に示す2種類のシステムを用いた。システムAは耳入力信号の厳密な再現を目的としたもので、ノートPC(Lenovo T420)、オーディオI/F(Fireface 400)、アンプ(Marantz PM 4001)、FECヘッドホン[9](AKG K1000)、A/Dコンバータ(Roland M-10MX)、イヤーマイクロホン[10]で構成した。再生系伝達関数を補正するため、実験前にヘッドホンからイヤーマイクまでの伝達関数を測定し、その逆特性

(200-17000 Hz)を刺激に置込んだ。

一方、システムBは厳密性よりも汎用性を重視し、再生系伝達関数の補正は行わず、ヘッドホンもオープンタイプの市販品(オーディオテクニカ ATH-AD700)を用いた。このシステムではヘッドトラックも検討したが、被験者が意識的に頭を回転させないと却って音像定位精度が劣化することが予備実験で判明したため、採用しなかった。

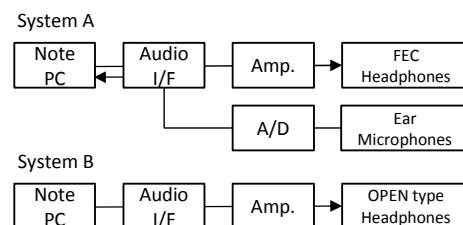


Fig. 4 バイノーラル方式のシステム構成

## C. 頭部伝達関数

バイノーラル方式の最大の問題は、受聴者本人の、あるいは受聴者に適した頭部伝達関数(HRTF)を必要とすることである。この条件が満たされない場合、音像方向の前後誤判定や頭内定位が発生し、音色も変化するため、音声了解度の再現精度が低下する可能性がある。自らのHRTFデータを持たない一般の住民や地方自治体の防災担当者を念頭におくと、受聴者に適合するHRTFを提供する方策が課題となる。

本実験ではbest-matching HRTFを用いた。best-matching HRTFは受聴者の耳介寸法を基にデータベースから求められ、本人のHRTFと同等の前後方向の定位精度が得られることが報告されている[10]。

さらに、比較用として本人およびHATS(B&K Type 4128C)のHRTFを加えた。

#### D. 刺激

無響室実験で作成した刺激に頭部インパルス応答(HRIR)を時間軸上で置込んで呈示した。ただし、各入射音方向に対応するHRIRを用いるのではなく、正面および真後ろのHRIRに両耳間時間差(ITD)を付加する方法を用いた[11]。ITDは式(1)で与えた[6]。

$$ITD = \frac{D}{2c}(\phi + \sin \phi) \quad (1)$$

ここでcは音速、Dは両耳間距離であり、日本人成人23名(男性12名、女性11名)のITDから逆算した平均値(210 mm)を用いた。

## E. 刺激の呈示方法および回答方法

消灯した防音室で回答に必要な手元の灯りだけにして実験を行った。再生方法(ヘッドホンと HRTF の組み合わせ)を Table 4 に示す。刺激の呈示方法および回答方法は無響室実験と同様である。ただし、無響室実験とは異なる音声セットを用いた。被験者は無響室実験と同一の 8 名である。

Table 4 バイノーラル再生方法

ヘッドホン	HRTF	伝達関数補正	システム
FEC	本人(own)	あり	A
OPEN	本人(own)	なし	B
OPEN	best-matching(bm)	なし	B
OPEN	HATS	なし	B

## 3.2 実験結果

### A. 正答率

正答率を Table 5 に示す。無響室の実音源の結果も併せて示す。いずれのバイノーラル再生においても正答率は無響室実音源より高く、危険側の結果となった。音場間の差異については、音場 2 < 音場 3 ≒ 音場 4 < 音場 1 となり、無響室実音源と同様の傾向であった。カイ二乗検定の結果、FEC\_own と OPEN\_bm においては無響室実音源と有意な差は認められなかった(Table 6)。

Table 5 各再生方法における正答率

音場	無響室実音源	FEC_own	OPEN_own	OPEN_bm	OPEN_HATS
1	0.77	0.80	0.83	0.81	0.84
2	0.46	0.51	0.54	0.47	0.50
3	0.65	0.66	0.70	0.70	0.71
4	0.64	0.65	0.71	0.70	0.74

Table 6 無響室実音源-バイノーラル再生間の正答率のカイ二乗検定結果. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

音場	FEC_own	OPEN_own	OPEN_bm	OPEN_HATS
1				*
2		*		
3				
4				**

### B. 聞き取りにくさ

聞き取りにくさを Table 7 に示す。いずれのバイノーラル再生においても、無響室実音源との差はほぼ同じで  $\pm 0.3$  の範囲であった。音場間の差異については、音場 1 < 音場 3 ≒ 音場 4 < 音場 2 となり、無響室実音源と同様の傾向であった。

Table 7 各再生方法における聞き取りにくさ

音場	無響室実音源	FEC_own	OPEN_own	OPEN_bm	OPEN_HATS
1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
2	2.9	3.2	3.1	3.2	3.2
3	2.7	2.5	2.6	2.5	2.4
4	2.5	2.6	2.7	2.4	2.3

## C. まとめ

正答率については、やや高めになる傾向があるものの、FEC ヘッドホン + 本人 HRTF、もしくはオープンタイプヘッドホン + best-matching HRTF により無響室実音源と有意差が認められない精度で再現された。また、聞き取りにくさの誤差は  $\pm 0.3$  程度であった。

## 4 おわりに

本稿では、現場で測定した音場を無響室内に再現し、同一観測点であっても気象条件により正答率に有意な差が生じ、聞き取りにくさも著しく変化することを示した。

さらに、バイノーラル再生による可聴化を試みた。その結果、受聴者の耳介形状を基にデータベースから選定した best-matching HRTF とオープンタイプヘッドホンにより、無響室実音源と有意な差が認められない精度で音声了解度を再現できることを示した。

ただし、音声了解度の再現における 3 次元音像再生の必要性については検討の余地が残っており、検証を継続する。

## 謝辞

本研究の一部は文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S1311003)により実施した。

## 参考文献

- [1] 宮下他, 信学技報, EA2014-21, 2014.
- [2] 大島他, 騒音研資料, N-2014-25, 2014.
- [3] 森他, 騒音制御, 38 (2), 123-131, 2014.
- [4] 小野口他, 信学技報, EA2014-12, 2014.
- [5] ムーア, 聴覚心理概論, 誠信書房, 1994.
- [6] 飯田と森本, 空間音響学, コロナ社, 2010.
- [7] ISO 9613-1:1993.
- [8] NII 音声資源コンソーシアム, 2006.
- [9] Møller *et al.*, J. Audio Eng. Soc. 43, 203-217, 1995.
- [10] Iida *et al.*, J. Acoust. Soc. Am. 136 (1), 317-333, 2014.
- [11] Morimoto *et al.*, Acoust. Sci. Tech., 24 (5), 267-275, 2003.