

# 受聴者の頭部形状による両耳間レベル差の推定 —前後左右の非対称性に対応した頭部モデルの導入—\*

☆高橋和太, 石井要次, 飯田一博 (千葉工大)

## 1 はじめに

ヒトの方向知覚の手掛かりは、頭部伝達関数(HRTF)に含まれており、前後上下方向はスペクトラルキュー、左右方向は両耳間時間差(ITD)と両耳間レベル差(ILD)であることが広く知られている。しかし、スペクトラルキューと同様、ITDやILDには個人差が存在する。これらの個人差により、他人のHRTFを用いた場合では、誤った方向に知覚する現象がしばしば発生する。

著者らは各受聴者の頭部形状から方向知覚の手掛かりを推定することで、HRTFを個人化する方法について研究を進めている。これまでに、各受聴者のスペクトラルキューおよびITDを推定する方法を提案している[1,2]。

本研究では、ILDの個人化方法について取り上げる。従来、頭部形状から各受聴者のILDを推定する方法として、Watanabe *et al.*[3]が提案した方法があるが、推定誤差は1 kHz以下では約1–3 dB、それ以上の帯域では2–8 dBであり、ILDの弁別閾(約1 dB[4])を超えている。彼らの方法では、頭部の前後左右非対称性を考慮していなかった。

本研究では、受聴者の前後左右の非対称性を反映できる頭部モデルを導入した重回帰分析を用いて、各方向のILDを推定する方法を提案する。

## 2 両耳間レベル差の算出

### 2.1 頭部インパルス応答の測定

ILDは、無響室において測定した被験者本人のhrirから算出した。hrirの測定方向は水平面内12方向(30°間隔)、スピーカから頭部中心位置までの距離は1.2 m、測定信号および録音のサンプリング周波数は48 kHzである。被験者は20代の33名(男性27名、女性6名)である。

### 2.2 両耳間レベル差の算出

2.1節で求めたhrirを用いて、ILDを算出し

た。ILDの算出方法は以下の通りである。

- 1) 512サンプルのhrirの後ろに0を付加し、48000サンプルでFFTする(周波数分解能1Hz)。
- 2) 中心周波数が250–16000 Hzの1/3オクターブバンドのエネルギー $E$ を求める。
- 3) 左右の耳の $E$ の差をILDとする(式1)。

$$ILD = 10\log_{10}(E_r/E_l) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

ここで、添え字の $l, r$ はそれぞれ左右の耳を表す。

### 2.3 両耳間レベル差の算出結果

33名の中心周波数250, 1000, 4000 Hzの1/3オクターブバンドのILDをFig. 1に示す。音源の方位角は正面方向を0°として時計回りに表した。正の値は右耳への到達音圧レベルが大きいことを表す。

周波数が高くなるにつれてILDが大きくなる傾向がある。250 HzではILDは最大で5 dB程度であるが、500 Hzでは10 dB、4000 Hzでは20 dBとなった。また、ILDの個人差も周

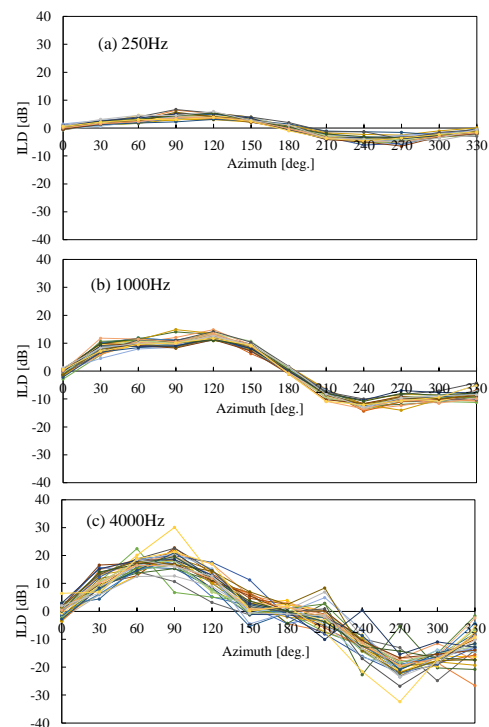


Fig.1 33名のILD

\* Estimation of interaural level difference based on the anthropometry of the listener's head – introduction of front-back and left-right asymmetry head model –, by TAKAHASHI, Kazuhiro, ISHII, Yohji, and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

波数が高くなるにつれて大きくなる傾向がある。4000 Hz ではいずれの方向においても 20–30 dB の個人差がある。

### 3 頭部形状

#### 3.1 頭部形状の計測方法

頭部表面を通る音波の伝播経路の個人差が ILD の個人差に対応すると考え、ILD を求めた 33 名の頭部形状を計測した。

従来、頭部モデルとして Watanabe *et al.*[3] は、頭部の幅、長さ、奥行、鼻の高さ、長さ、奥行、耳介の幅、長さ、肩幅、頭耳長、頭耳高の 11 箇所を用いている。ただし、頭部の前後・左右非対称性は考慮されていない。

本研究で用いる頭部モデルを Fig.2 に示す。[3]の鼻および耳介に関する部位を除き、全ての部位を含めている。このうち、 $p_{4l,r}$ ,  $p_{5l,r}$  および  $p_{6l,r}$  は、[3]の頭耳長および頭耳高に相当する部位であるが、頭部の前後・左右非対称性に対応させた。なお、 $p_{4l,r}$ ,  $p_{5l,r}$  および  $p_{6l,r}$  は外耳道入口の中心位置を始点もしくは終点として計測した。頭部形状の計測には触角計と巻尺を用いた。 $p_1, p_2, p_3, p_7$  は触角計、 $p_4, p_5, p_6$  は巻尺により計測した。最小読取値は触覚計、巻尺ともに 1mm である。

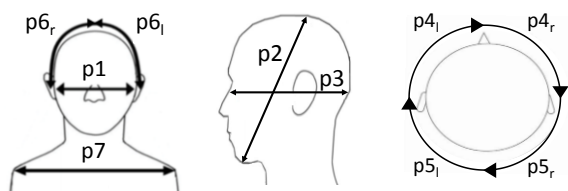


Fig.2 計測箇所

#### 3.2 頭部形状の計測結果

Table 1 に頭部形状の測定結果を示す。Max-Min(個人差の範囲)は、 $p_7$ (肩幅)が最も大きく 102 mm であった。一方、 $p_1$ (頭の幅)が最も小さく 18 mm であった。その他の部位は 26–56 mm となった。RSD(Relative Standard Deviation)は標準偏差を平均値で割ったもの

Table 1 頭部形状の計測結果

	Ave.	Max	Min	Max-Min	Std	RSD
$p_1$	143	152	134	18	5.6	0.039
$p_2$	246	266	227	39	9.9	0.040
$p_3$	185	201	170	31	7.9	0.043
$p_{4l}$	152	167	136	31	7.4	0.049
$p_{4r}$	159	185	148	37	8.1	0.051
$p_{5l}$	144	163	130	33	8.1	0.056
$p_{5r}$	145	176	120	56	12.0	0.083
$p_{6l}$	195	217	176	41	8.2	0.042
$p_{6r}$	197	211	185	26	7.2	0.036
$p_7$	393	439	337	102	23.9	0.061

であり、相対的なばらつきを表す指標である。Max-Min と同様に、 $p_{4l,r}$ ,  $p_{5l,r}$ (頭周)と  $p_7$ (肩幅)が大きく、 $p_1$ (頭の幅)が小さい。したがって、頭部形状の個人差が大きい部位は、 $p_{4l,r}$ ,  $p_{5l,r}$ (頭周)と  $p_7$ (肩幅) であると言える。

### 4 頭部形状による ILD の推定

#### 4.1 単回帰分析

頭部形状と各方向における ILD(250, 1000, 4000 Hz)の単相関係数を Table 2–4 に示す。表中の網掛けは有意水準 10%で相関関係が認められることを表す( $0.29 \leq |r|$ )。

250 Hz(Table 2)では、 $p_7$  では 3 方向、 $p_3, p_{4l,r}$ ,  $p_7$  では 2 方向、 $p_1, p_2, p_{5r}$  では 1 方向で有意な相関が認められた。最大の相関係数は  $0^\circ$  の  $p_7$ (肩幅)で -0.40 であった。ただし、12 方向中 6 方向で有意な相関が認められる部位が存在しなかった。

1000 Hz(Table 3)では、 $p_1$  は後方、 $p_2$  は側方、 $p_3$  は右側方で有意な相関が認められる傾

Table 2 単相関係数 : 250 Hz.  $0.29 \leq |r|$

Azm.	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_{4l}$	$p_{4r}$	$p_{5l}$	$p_{5r}$	$p_{6l}$	$p_{6r}$	$p_7$
0	-0.14	-0.30	-0.02	-0.18	-0.29	0.03	0.28	-0.23	0.18	-0.40
30	-0.01	-0.20	0.14	-0.22	-0.15	0.09	0.33	-0.20	0.07	-0.29
60	0.25	-0.10	0.26	0.07	0.26	0.07	0.18	0.05	0.17	-0.24
90	0.06	0.11	0.16	-0.04	0.01	0.00	0.20	0.02	0.11	0.06
120	0.30	-0.02	0.32	0.08	0.27	-0.01	0.27	-0.03	0.25	0.03
150	0.19	-0.04	0.15	0.09	0.17	-0.22	0.00	0.07	0.19	-0.16
180	0.09	-0.01	-0.06	-0.23	0.03	-0.25	-0.08	0.20	-0.05	-0.19
210	-0.16	-0.03	-0.08	-0.28	-0.13	-0.15	0.01	0.08	-0.15	-0.22
240	-0.07	-0.17	-0.12	-0.34	-0.12	-0.01	0.04	0.09	-0.22	-0.22
270	0.04	-0.19	-0.21	-0.32	-0.04	-0.04	-0.04	0.16	0.09	-0.29
300	-0.18	-0.03	-0.33	-0.27	-0.38	0.15	-0.18	0.13	-0.12	-0.28
330	0.07	-0.08	0.06	-0.05	-0.03	0.25	0.08	-0.08	0.15	-0.04

Table 3 単相関係数 : 1000 Hz.  $0.29 \leq |r|$

Azm.	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_{4l}$	$p_{4r}$	$p_{5l}$	$p_{5r}$	$p_{6l}$	$p_{6r}$	$p_7$
0	0.09	-0.18	0.18	-0.01	0.01	0.42	0.19	-0.05	0.13	-0.15
30	0.21	0.38	0.32	0.21	0.25	0.10	0.11	-0.02	0.23	0.57
60	0.20	0.47	0.44	0.29	0.37	0.18	0.23	-0.08	0.24	0.58
90	0.18	0.36	0.24	0.25	0.25	0.04	-0.05	0.05	0.02	0.14
120	0.31	0.61	0.42	0.47	0.51	-0.04	0.01	0.13	0.38	0.38
150	0.04	0.08	0.39	0.05	-0.05	0.49	0.32	-0.08	0.26	0.02
180	0.36	0.10	0.23	0.15	0.32	-0.17	0.11	0.10	0.19	0.04
210	0.35	0.19	0.05	0.23	0.33	-0.26	-0.03	0.24	0.14	0.08
240	-0.15	-0.50	-0.24	-0.55	-0.33	0.15	-0.10	-0.14	-0.34	-0.49
270	-0.07	-0.29	-0.01	-0.24	-0.01	0.08	0.04	-0.17	0.04	-0.08
300	0.05	-0.36	-0.20	-0.24	0.01	-0.13	-0.08	-0.07	-0.01	-0.31
330	-0.19	-0.36	-0.27	-0.34	-0.31	0.26	-0.09	0.02	-0.08	-0.62

Table 4 単相関係数 : 4000 Hz.  $0.29 \leq |r|$

Azm.	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_{4l}$	$p_{4r}$	$p_{5l}$	$p_{5r}$	$p_{6l}$	$p_{6r}$	$p_7$
0	-0.19	-0.24	0.01	-0.11	-0.09	0.14	-0.07	-0.41	0.00	-0.16
30	0.20	0.23	0.02	0.10	-0.16	-0.06	0.16	0.19	-0.19	0.13
60	0.29	0.46	0.34	0.38	0.32	0.06	0.12	0.03	0.35	0.37
90	0.07	-0.09	-0.08	0.00	0.12	-0.08	-0.32	0.23	0.05	-0.28
120	0.14	-0.04	0.03	0.15	-0.04	-0.01	-0.08	0.17	0.17	-0.16
150	0.19	0.24	0.17	0.18	0.09	-0.23	-0.08	0.13	-0.12	0.09
180	0.01	-0.26	-0.05	-0.04	0.10	0.15	-0.18	-0.17	0.03	-0.08
210	0.05	-0.19	0.16	-0.12	0.12	0.15	0.16	-0.04	-0.09	-0.13
240	0.05	-0.28	-0.11	-0.17	-0.09	0.01	0.22	0.05	0.03	-0.03
270	0.29	0.23	0.22	0.17	0.19	-0.02	0.27	0.01	0.08	0.26
300	0.09	-0.24	-0.04	0.12	-0.07	0.11	0.29	-0.08	-0.06	0.03
330	-0.07	-0.11	0.03	-0.06	0.16	0.08	-0.10	-0.24	0.19	0.04

向にある。p<sub>4,r</sub>は、120, 240°(側方から 30°後方)で比較的高い相関が得られた。P<sub>5,r</sub>は、0°もしくは150°で有意な相関が認められた。P<sub>6</sub>は、有意な相関は認められなかった。P<sub>6,r</sub>は、120, 240°(側方から 30°後方)で相関が認められた。p<sub>7</sub>は 0,180°(前後), 90, 270°(側方)および150, 210°(後方±30°)を除き、有意な相関が認められ、いずれも比較的高い相関であった。特に、p<sub>2</sub>(頭の高さ)の120°およびp<sub>7</sub>(肩幅)の330°で強い相関(0.6≤|r|)がみられる。ただし、270°では有意な相関が認められる部位が存在しなかった。

4000 Hz(Table 4)では、p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>, p<sub>4,r</sub>, p<sub>6,r</sub>, p<sub>7</sub>は60°方向でのみ有意な相関が認められた。P<sub>1</sub>は60, 270°, p<sub>6</sub>は0°, p<sub>5,r</sub>は90, 300°で相関が認められた。最大の相関係数は60°のp<sub>2</sub>(頭の高さ)で0.46であった。ただし、12方向中8方向で有意な相関が認められる部位が存在しなかった。

以上より、各帯域において、有意な相関となる部位が存在しない方向があることから、単回帰分析ではILDを精度良く推定することは困難であると考えられる。

#### 4.2 重回帰分析

10箇所(10)の頭部形状を説明変数、各方向のILDを目的変数とした重回帰分析を行った(式2)。

$$ILD(s, \phi, f) = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_7 p_7 + b \text{ [dB]} \quad (2)$$

ここで、sは被験者、φは方位角、fは周波数である。

なお、全ての説明変数のVIF (Variance Inflation Factor)が10未満となったことから、説明変数間の多重共線性はないとみなせる。

Table 5に重相関係数rを示す。重相関係数rは、0.31–0.80であり、いずれも有意水準10%で相関関係が認められた(0.29≤|r|)。また、250 Hzの90°, 1250 Hzの30°, 10000 Hzの210°を除き、有意水準5%で相関関係が認められた(0.34≤|r|)。全体の平均値は0.58、各方向における平均値(右端のAve.)は0.53–0.63であり、30, 60°で僅かに高いが、方向間の差は小さい。各周波数帯域における平均値(下段のAve.)は、0.49–0.66であり、1250 Hzでやや低い。

Table 5に残差Eを示す。残差E(Table 6)は、0.21–5.44 dBであり、1000 Hz以下の帯域においては、いずれの方向においてもILDの弁別閾(約1 dB[4])以内となった。全体の平均値は1.73 dB、各方向における平均値は1.21–1.94 dBであり、0, 180°で小さい。各周波数帯域における平均値は、0.29–4.13 dBであり、周波数が高くなるにつれて残差が大きくなる傾向がある。

Table 5 重回帰分析の結果：重相関係数 r

Azm.	center frequencies of 1/3 octave bands [Hz]																			Ave.
[deg.]	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	
0	0.78	0.64	0.52	0.45	0.50	0.62	0.59	0.52	0.54	0.72	0.74	0.52	0.57	0.53	0.78	0.54	0.65	0.53	0.39	0.59
30	0.68	0.67	0.62	0.68	0.55	0.80	0.59	0.31	0.53	0.76	0.37	0.65	0.70	0.69	0.42	0.63	0.50	0.74	0.67	0.61
60	0.67	0.71	0.80	0.75	0.59	0.75	0.66	0.47	0.56	0.52	0.59	0.54	0.54	0.61	0.77	0.53	0.61	0.65	0.74	0.63
90	0.32	0.63	0.75	0.66	0.59	0.62	0.48	0.55	0.44	0.51	0.48	0.66	0.54	0.67	0.57	0.62	0.69	0.62	0.74	0.59
120	0.57	0.71	0.73	0.68	0.74	0.75	0.72	0.41	0.50	0.64	0.40	0.48	0.55	0.45	0.41	0.61	0.54	0.74	0.60	0.59
150	0.57	0.65	0.68	0.64	0.65	0.63	0.68	0.49	0.61	0.67	0.44	0.55	0.59	0.59	0.70	0.72	0.45	0.51	0.53	0.60
180	0.64	0.66	0.65	0.61	0.57	0.55	0.52	0.53	0.60	0.61	0.53	0.55	0.49	0.51	0.51	0.52	0.49	0.44	0.68	0.56
210	0.54	0.58	0.67	0.56	0.35	0.40	0.52	0.42	0.63	0.70	0.53	0.56	0.54	0.62	0.46	0.62	0.32	0.50	0.54	0.53
240	0.53	0.68	0.70	0.63	0.53	0.58	0.72	0.51	0.58	0.57	0.66	0.50	0.52	0.51	0.49	0.72	0.59	0.54	0.45	0.58
270	0.63	0.73	0.73	0.67	0.49	0.52	0.46	0.53	0.61	0.56	0.69	0.65	0.42	0.78	0.55	0.40	0.36	0.74	0.77	0.59
300	0.65	0.57	0.55	0.67	0.55	0.48	0.52	0.64	0.53	0.71	0.57	0.58	0.62	0.45	0.46	0.59	0.52	0.63	0.80	0.58
330	0.34	0.36	0.49	0.61	0.71	0.57	0.78	0.50	0.47	0.60	0.39	0.34	0.51	0.46	0.43	0.71	0.49	0.71	0.64	0.53
Ave.	0.58	0.63	0.66	0.63	0.57	0.61	0.60	0.49	0.55	0.63	0.53	0.55	0.55	0.57	0.55	0.60	0.52	0.61	0.63	0.58

Table 6 重回帰分析の結果：残差の絶対値 E (dB)

Azm.	center frequencies of 1/3 octave bands [Hz]																			Ave.
[deg.]	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	
0	0.23	0.21	0.24	0.28	0.33	0.47	0.58	0.62	0.57	1.32	1.47	1.09	1.48	1.06	1.20	3.03	2.94	3.62	4.39	1.32
30	0.34	0.29	0.32	0.38	0.53	0.65	1.00	0.73	1.28	2.09	3.20	1.96	1.99	1.62	1.61	2.55	3.79	3.72	4.35	1.71
60	0.43	0.26	0.29	0.33	0.45	0.52	0.66	1.53	1.39	2.26	2.35	1.97	1.57	2.11	1.47	3.07	3.16	4.06	4.93	1.73
90	0.67	0.33	0.27	0.30	0.43	0.49	0.89	1.92	3.10	1.45	2.02	1.88	2.51	2.09	2.73	3.27	3.04	4.69	3.71	1.88
120	0.53	0.24	0.25	0.35	0.38	0.46	0.50	0.81	2.10	2.49	2.89	2.38	2.27	3.40	4.03	2.97	2.72	2.92	5.16	1.94
150	0.37	0.26	0.30	0.34	0.35	0.52	0.52	1.01	2.78	3.25	2.00	2.66	2.29	1.95	2.02	2.28	3.11	3.54	5.44	1.84
180	0.34	0.31	0.36	0.44	0.48	0.52	0.50	1.01	0.88	0.70	0.94	0.74	1.27	0.94	0.97	2.73	3.32	3.55	2.94	1.21
210	0.48	0.38	0.35	0.36	0.47	0.68	0.83	0.96	2.68	2.08	2.33	3.06	2.60	2.45	2.85	2.92	3.25	3.63	3.85	1.91
240	0.68	0.33	0.26	0.29	0.44	0.51	0.53	0.94	1.47	3.58	1.82	1.89	2.66	3.31	2.87	2.92	2.88	4.15	4.31	1.88
270	0.58	0.27	0.28	0.38	0.46	0.47	0.92	1.79	2.61	2.08	1.33	2.28	2.68	2.12	3.15	3.02	3.60	3.50	3.26	1.83
300	0.39	0.31	0.38	0.37	0.41	0.53	0.67	0.93	1.18	1.80	2.44	2.24	1.42	2.41	2.81	2.38	5.19	3.93	3.69	1.76
330	0.45	0.32	0.39	0.41	0.33	0.54	0.74	0.90	1.23	2.28	2.91	2.52	3.63	2.33	1.77	3.07	3.72	2.95	3.60	1.79
Ave.	0.46	0.29	0.31	0.35	0.42	0.53	0.70	1.10	1.77	2.12	2.14	2.05	2.20	2.15	2.29	2.85	3.39	3.69	4.13	1.73

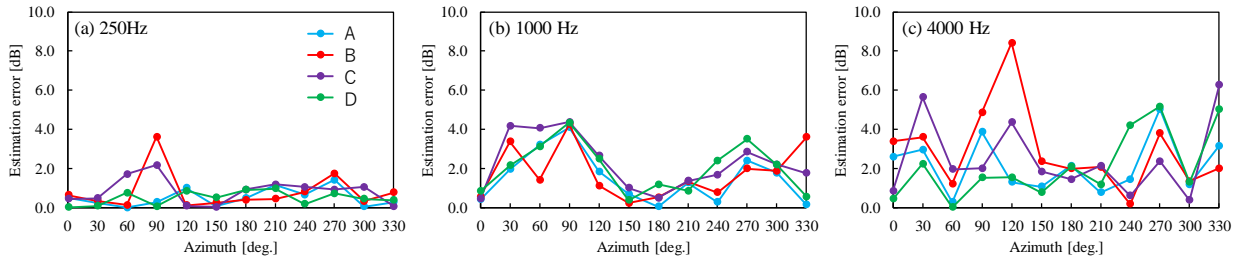


Fig. 3 各方向の平均推定誤差

## 5 ナイーブな被験者の推定精度

4.2 節で求めた重回帰モデルの推定精度を重回帰分析に含めていない被験者を用いて検証した。被験者は 20 代の女性 2 名(A, B) と男性 2 名(C, D)の 4 名である。この 4 名の ILD と頭部形状を 2, 3 章と同じ方法で求めた。

さらに、重回帰式を用いて頭部形状から 12 方向の ILD を推定した。Fig. 3 に各方向の推定誤差の絶対値の平均値(250, 1000, 4000 Hz)を示す。250 Hz(Fig.3(a))では、被験者 B の 90°, 被験者 C の 60, 90°を除き、1 dB 程度となった。

1000 Hz(Fig.3(b))では、0, 150, 180, 210°では、小さい傾向にある。ただし、30–90°で大きくなる傾向がある。4000 Hz(Fig.3(c))では、60, 150–210, 330°では小さい傾向にある。ただし、30, 90, 120, 270, 330°ではやや大きくなる傾向にある。

Fig.4 に 12 方向を平均した推定誤差を示す。図中の黒線は、重回帰分析の平均残差(Table 6 の下段 Ave.)である。いずれの被験者においても、周波数が高くなるにつれて推定誤差が大きくなる傾向がある。1000 Hz 以下では、いずれの被験者においても 1–2 dB 程度となった。1250–2000 Hz 付近では誤差が大きくなる傾向がある(2–5 dB)。10000 Hz 以上の帯域では、被験者 A, B において推定誤差が大きい(6–9 dB)。重回帰分析の残差の平均値(黒線)と比較すると、いずれの被験者においても 1000 Hz 以下では同等であるが、1000 Hz よりも高い周波数帯域で推定誤差の方が 2–5 dB 程度大きくなる場合がある。

以上より、1000 Hz 以下においては、提案法はナイーブな被験者に対しても同等の精度で ILD を推定できると考えられる。しかし、それ以上の帯域では、ナイーブな被験者の推定誤差が大きくなる傾向があった。

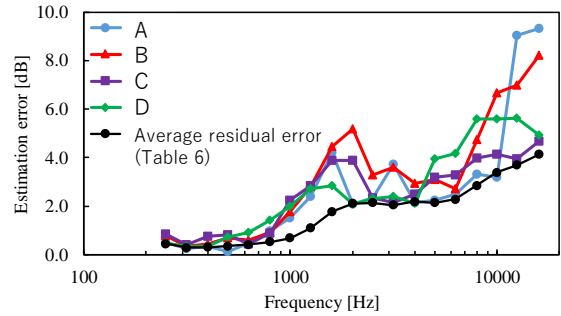


Fig. 4 各周波数帯域の平均推定誤差

## 6 おわりに

本研究では、受聴者の頭部形状から両耳間レベル差の推定するため、前後左右の非対称性に対応した頭部モデルを導入した。

- 1) 10 箇所 of 頭部形状を説明変数、12 方向における 1/3 オクターブバンド(250–16000 Hz)の ILD を目的変数とした重回帰分析を行った。その結果、重相関係数の平均値は 0.58 であり、残差の絶対値の平均値は 1.73 dB であった。
- 2) 4 名のナイーブな被験者を用いて重回帰式の推定精度を検証した結果、各被験者の推定誤差は 1000 Hz 以下では 1–2 dB 程度、それ以上の帯域では 2–9 dB 程度となった。

## 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。千葉工業大学学生の下坊謙介氏、堀江諒氏には実験データの算出に協力頂いた。

## 参考文献

- [1] Iida *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 136(1), pp.317-333, 2014
- [2] 石井ら, 音講論(春), pp.877-880, 2016
- [3] Watanabe *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 122(5), pp.317-333, 2014
- [4] Hartmann and Constan., *J. Acoust. Soc. Am.*, 112(3), pp. 1037-1045, 2002