開放型ヘッドホン及びオープンイヤー型イヤホンにおける耳との音響接合と3次元音響再生精度の関係*

◎千葉大将，加古達也，渡邊悠希，野口賢一 (NTT)，中村風香，飯田一博 (千葉工大)

1　はじめに

ヘッドホンやイヤホンで用いるバイノーラル技術では，3 次元音響再生精度の劣化を防ぐために，録音系の鼓膜位置の音圧と再生系の鼓膜位置での音圧を等しくする補正フィルタが必要である [1]．特に，録音系にて再生系と異なる受聴者もしくはダミーヘッドで測定する場合，頭部や耳介形状の個人性が問題となる．この個人性を軽減するため，外耳道入口をブロックして測定する方法がある [2]．この時，補正フィルタにはヘッドホンやイヤホンの装着による音響インピーダンスの変化を表す，PDR (Pressure Division Ratio) と呼ばれる項が含まれる．この PDR は装着位置の影響や個人差があるため，補正フィルタの PDR 項の補正を省略できるように，PDR≈1 である FEC (Free-air Equivalent Coupling) ヘッドホンの利用が望ましい．先行研究として開放型ヘッドホンでの PDR の調査はある [3] が，耳との音響接合の関連性は明らかではない．特に，耳を塞がないオープンイヤー型の機種では未調査である．そこで本研究では，オープンイヤー型の機種を対象とした PDR の測定と評価を行う．

2　バイノーラル再生系における補正

以降では，外耳道入口をブロックした状態でバイノーラル録音を行うと仮定する．再生系において，受聴者の片方の耳への入力信号 $Y(f)$ は原音場のバイノーラル信号 $X(f)$ を用いて次の式で表される．

$$Y(f)=G(f)H_{\mathrm{hp}}(f)X(f) \tag{1}$$

ここで，f は周波数，$H_{\mathrm{hp}}(f)$ はヘッドホンから受聴者の外耳道入口までの伝達関数（ヘッドホン伝達関数），$G(f)$ は補正フィルタである．以降，f を省略する．Fig. 1 と Table 1 より，補正フィルタは録音系と再生系の音圧を用いて次の式で表される [1, 2, 4].

$$G=\frac{\left[P^{\mathrm{b}}/P_{\mathrm{c}}\right]_{lis}}{\left[P^{\mathrm{b}}/P_{\mathrm{c}}\right]_{rec}}\frac{1}{\left[P^{\mathrm{b}}_{\mathrm{hp}}/E_{\mathrm{hp}}\right]_{lis}}\frac{\left[P^{\mathrm{o}}/P^{\mathrm{b}}\right]_{rec}}{\left[P^{\mathrm{o}}_{\mathrm{hp}}/P^{\mathrm{b}}_{\mathrm{hp}}\right]_{lis}} \tag{2}$$

ここで，第 1 項は録音参加者と再生系受聴者の頭部伝達関数を補正する項である．第 2 項はヘッドホン伝達関数の逆フィルタに相当する．第 3 項は PDR であり，3 次元音響再生精度の劣化を防ぐために $PDR\approx1$ であるデバイスが望ましい．そこで，オープンイヤー型のヘッドホンやイヤホンが $PDR\approx1$ か検証する．

3　PDR の測定と評価

武蔵野研究開発センタの無響室で Table 2 の機種を測定した．なお，nwm ONE は筐体を傾けた場合を別機種として扱い，nwm ONE (offset) と表記する．ダミーヘッドは KEMAR を用いた．測定では，プローブマイクである ER-7C Series B の先端を右耳の外耳道入口に設置した．なお，外耳道入口をブロックする条件では粘着ゴムで塞いだ．オーディオアナライザ APx517B からチャープ信号を出力し，各周波数の音圧を測定した．式 (2) の P^{o}, P^{b} の測定では，頭部の水平面で，頭部中心から 1 m 離れた位置にスピーカを設置した．正面を 0 度として時計回りを正の角度とし，$0, 30, \cdots, 180$ 度で外耳道入口を開放およびブロックした状態で各 1 回測定した．式 (2) の $P^{\mathrm{o}}_{\mathrm{hp}}$, $P^{\mathrm{b}}_{\mathrm{hp}}$ の測定では，ヘッドホンやイヤホンの装着位置のずれを考慮し，測定ごとにデバイスを再装着した．外耳道入口の状態ごとに各 5 回測定し，平均値を算出した．

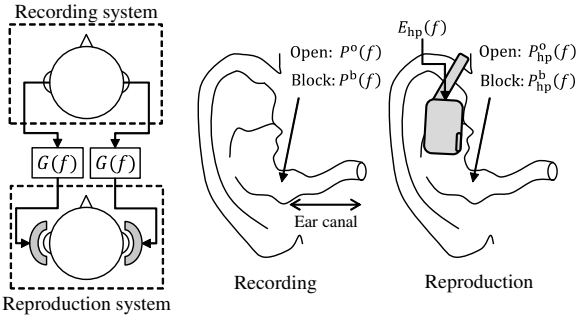

Fig. 1　Overview and parameters.

Table 1　Parameter notation and description.

P_{c}	録音系での頭部中心相当位置の音圧
P^{o}	録音系での開放された外耳道入口の音圧
P^{b}	録音系での閉塞された外耳道入口の音圧
$P^{\mathrm{o}}_{\mathrm{hp}}$	再生系での開放された外耳道入口の音圧
$P^{\mathrm{b}}_{\mathrm{hp}}$	再生系での閉塞された外耳道入口の音圧
E_{hp}	ヘッドホンの端子電圧
$[\cdot]_{rec}$	録音系の参加者
$[\cdot]_{lis}$	再生系の受聴者

評価では，各音圧から PDR のレベル L [dB] を算出した．L が 0 dB に近いほど PDR≈1 といえる．ただし，装着位置のずれによる音響特性の変動によって，L の低周波成分が 0 dB とならない機種がある．そこで，音響インピーダンスの観点から低周波では L は 0 dB に近いと仮定し，次の式で修正した．

$$L_{\mathrm{PDR}}(\phi,\omega)=L(\phi,\omega)-\frac{\sum_{\omega=\omega_{\mathrm{low}}}^{\omega_{\mathrm{high}}}L(\phi,\omega)}{\Omega(\omega_{\mathrm{low}},\omega_{\mathrm{high}})} \tag{3}$$

ここで，ϕ は音源方向，ω は周波数ビン番号，ω_{low}, ω_{high} は下限・上限周波数のビン番号，Ω は下限・上限周波数内のビン数である．下限・上限周波数は 100 Hz, 1 kHz とした．また，L_{PDR} の評価指標として 100 Hz から 10 kHz までの RMS を次式で算出した．

$$RMS(\phi)=\sqrt{\frac{\sum_{n=n_{\mathrm{low}}}^{n_{\mathrm{high}}}L^2_{\mathrm{oct}}(\phi,n)}{N(n_{\mathrm{low}},n_{\mathrm{high}})}} \tag{4}$$

*Relationship between acoustic coupling to the ear and 3D sound reproduction accuracy in open headphones and open-ear earphones. by CHIBA, Hironobu, KAKO, Tatsuya, WATANABE, Yuki, NOGUCHI, Kenichi (NTT), NAKAMURA, Fuka and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

Table 2　Headphones and earphones.

Brand and product name	Type
NTT sonority, nwm MWE001	Open-ear
Sony, STH40D	Open-ear
Shokz, OpenFit	Open-ear
Cleer, ARC2	Open-ear
Bose, Ultra Open Earbuds	Open-ear
ambie, sound earcuffs AM-01	Open-ear
audio-technica, ATH-CM707	Intra-concha
audio-technica, ATH-EW9	Supra-concha
NTT sonority, nwm ONE	Open-ear circumaural
beyerdynamic, DT 990 PRO	Circumaural (open)
AKG, K712 PRO	Circumaural (open)
Sony, MDR-MV1	Circumaural (open)
Sony, MDR-M1ST	Circumaural (closed)

ここで，n は周波数帯域番号，n_{low},n_{high} は下限・上限となる帯域番号，N は帯域数である．なお，L_{PDR} の各周波数ビンを 1/3 オクターブバンドの各帯域に割り当て，平均値を L_{oct} としている．

まず，PDR の音源方向依存性を検証する．代表機種として nwm ONE の $L_{\mathrm{PDR}}(\phi,\omega)$ を Fig. 2 に示す．どの機種も 約 10 kHz までは音源方向への依存性が小さいことを確認した．一方で，10 kHz より高周波では方向依存性がある．また，鋭いピークやノッチが確認できる．高周波では測定誤差やデバイスの装着位置，耳介形状の個人差の影響が大きいことを考慮し，以降では 10 kHz 付近までの特性に注目する．

各機種の PDR を Fig. 3，4 に示す．これらの図では，$L_{\mathrm{PDR}}(\phi,\omega)$ を音源方向 ϕ について平均した値を表示している．また，各機種において $L_{\mathrm{PDR}}(\phi,\omega)$ から算出した $RMS(\phi)$ を Fig. 5 に示す．この $RMS(\phi)$ が小さいほど PDR≈1 といえる．イヤホンでは，外耳道入口や耳甲介腔に筐体が入り込む機種ほど，2 - 10 kHz で PDR が 0 dB から乖離し，RMS が大きくなる．特に，イントラコンカ型のような外耳道入口近くに筐体がある機種において顕著である．一方で，筐体が小さく，筐体が外耳道入口から離れている MWE001 や AM-01 の RMS は小さい．ヘッドホンはイヤホンよりも 2 - 10 kHz の PDR が 0 dB に近く，また，ヘッドホン間での RMS の差は小さい．特に，DT 990 PRO と nwm ONE の RMS は小さい．なお，nwm ONE と比べると nwm ONE (offset) は RMS が大きいことから，筐体を傾けることで音響インピーダンスが変化したと考えられる．

4　結論

耳を塞がないオープンイヤー型のヘッドホンやイヤホンにおける 3 次元立体音響再生精度を評価するために，14 機種の PDR を評価した．100 - 10 kHz では，耳甲介腔や外耳道入口に筐体が深く入り込まない機種で PDR が 1 に近い傾向を確認した．なお，本稿で評価したオープンイヤー型の機種で，比較的 PDR が 1 に近い nwm ONE は DT 990 Pro と同等の定位精度が得られることを確認している [5].

参考文献

[1] 飯田，コロナ社，978-4-339-01133-3, 2017.
[2] H. Møller, Appl. Acoust. 36, 171-218, 1992.
[3] H. Møller et al., J.of the AES 43(4), 203-217, 1995
[4] 岩谷, 日本音響学会誌, 61(5), 289-294, 2005.
[5] 中村 他，音講論集 (秋), 2-7-2, 2024.

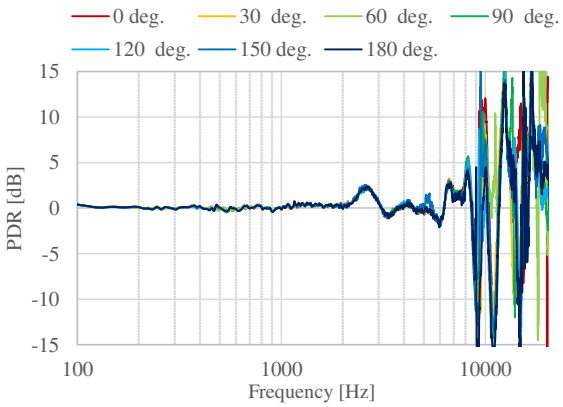

Fig. 2　PDRs for each direction for nwm ONE.

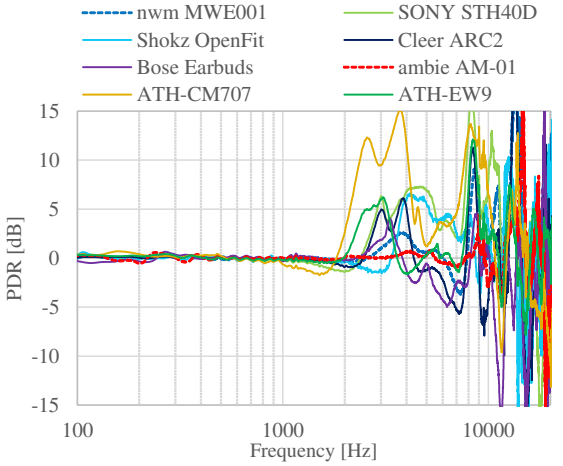

Fig. 3　PDRs for each earphone.

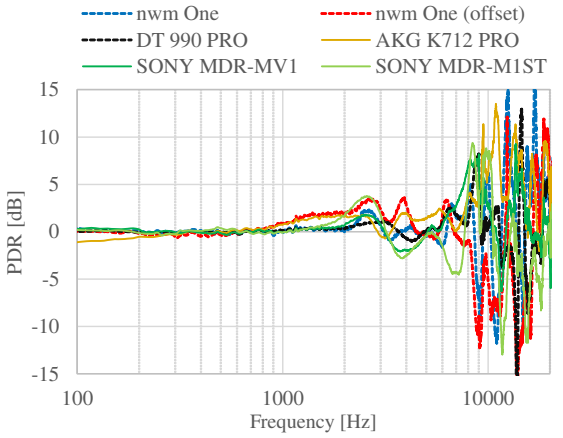

Fig. 4　PDRs for each headphone.

Devices | ϕ (deg.)	0	30	60	90	120	150	180	Mean
nwm MWE001	1.8	0.8	1.9	1.1	0.9	0.9	0.9	**1.2**
Sony STH40D	4.2	3.4	4.2	3.7	3.4	3.5	3.2	3.6
Shokz OpenFit	2.2	1.9	2.2	1.9	2.0	1.9	2.0	2.0
Cleer ARC2	1.7	1.7	1.6	1.7	1.9	1.6	2.2	1.8
Bose Earbuds	1.2	1.6	1.2	1.3	1.7	1.4	2.0	1.5
ambie AM-01	0.8	0.6	1.0	0.4	0.8	0.4	1.2	**0.7**
ATH-CM707	5.3	4.9	5.3	5.1	4.9	4.9	4.8	5.0
ATH-EW9	2.5	1.9	2.5	2.1	2.0	1.8	1.9	2.1
nwm ONE	0.6	1.2	0.6	0.9	1.4	0.9	1.7	**1.1**
nwm ONE (offset)	1.5	2.4	1.5	2.1	2.5	2.3	2.9	2.2
DT990 pro	1.6	0.8	1.7	1.0	1.0	0.7	1.0	**1.1**
AKG K712	3.0	1.8	3.1	2.2	1.7	2.0	1.4	2.2
Sony MDR-MV1	2.2	1.4	2.2	1.7	1.6	1.4	1.5	1.7
Sony MDR-M1ST	2.2	1.4	2.2	1.6	1.4	1.4	1.4	1.7

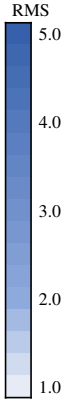

Fig. 5　RMS value of PDR for each device.