正常耳における DISTORTION-PRODUCT OTOACOUSTIC EMISSIONS の計測*

和田 仁^{*1}, 大山 健二^{*2}, 野口 周一^{*3}

Measurement of Distortion-Product Otoacoustic Emissions (DPOAE) in Normal Human Subjects

Hiroshi WADA, Kenji OHYAMA and Syu-ichi NOGUCHI

When two-tone stimulation with different frequencies ($f_1 < f_2$) is delivered to the ear canal, a response including new frequencies related to the frequencies of the two primary stimuli by a simple algebraic expression is generated. This response is called "Distortion-Product Otoacoustic Emissions (DPOAE)". In this study, for the purpose of understanding the general tendency of DPOAE and the middle ear effect on DPOAE, the DPOAE level of the $2f_1 - f_2$ frequency component and middle ear dynamic characteristics of normal human subjects were measured. The results revealed that the DPOAE level was largely dependent on the condition of primary stimuli, and was large in the region of middle ear resonance frequency.

Key Words: Sound, Nonlinear Vibration, Distortion-Product Otoacoustic Emissions (DPOAE), Middle Ear Dynamic Characteristics, Normal Human Subject, Measurement

1. 緒 言

内耳蝸牛は音による機械振動を受動的に電気信号に変換するだけでなく、能動的に音響エネルギーを放射することが明らかになってきた⁽¹⁾。この現象は耳音響放射 (Otoacoustic Emissions: OAE) とよばれている。

周波数の異なる二つの音を耳に入力すると、その周波数 $f_1, f_2 (f_1 < f_2)$ とは異なるが、 $2f_1 - f_2, 3f_1 - 2f_2 \dots$ のような規則的な周波数を有する信号が生じることが知られている⁽²⁾。この信号成分は Distortion-Product Otoacoustic Emissions (DPOAE) とよばれ、蝸牛動特性の非線形に起因する OAE と考えられている。

DPOAE はヒトおよび実験動物で検出され、その出力レベルは入力音の音圧レベルおよび周波数比に大きく依存することが知られている⁽³⁾、DPOAE は内耳機能を反映し、聴力図とよく一致する場合が多い⁽⁴⁾。したがって、現在有用な他覚的検査法の少ない内耳機能を評価する手段として、DPOAE による内耳診断装

置を開発し、これを臨床応用に発展させることが期待できる。

DPOAE による内耳診断装置の開発の前段階として、正常耳における DPOAE の基本的傾向を十分に把握することが必要である。特に、DPOAE は入力音・出力音がいずれも中耳を経由して生じる現象のため、中耳動特性の影響が大きいことが予想されるので、DPOAE に及ぼす中耳の影響を調べておく必要がある。そこで本研究では、正常聴力を有するヒトの耳を対象に、 $2f_1 - f_2$ なる周波数の DPOAE と中耳動特性を計測した。そして、二つの入力音に対する DPOAE 出力レベルの変化や、DPOAE を計測する場合の入力音の最適条件など、DPOAE の基本的な傾向を調べ、次に、DPOAE に及ぼす中耳動特性の影響について検討した。

2. 計 測 方 法

DPOAE の測定システムのブロック図を図 1 に示す。DPOAE の測定システムは、耳に挿入する 2 個のイヤホンおよび 1 個のマイクロホンからなるプローブ (Etymotic Research) と、イヤホンからの入力音の発生およびマイクロホンからの信号の処理を行う、ディジタル信号処理用ボード (Ariel) を備えた、パーソナ

* 平成 4 年 7 月 7 日 D&D Conference において講演、原稿受付 平成 4 年 8 月 11 日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 東北大学医学部 (〒980 仙台市青葉区星陵町 1-1)。

^{*3} 学生員、東北大学工学部。

ルコンピュータ (IBM) で構成されている。また、プローブは図2のように外耳道に挿入した。

周波数 $f_1, f_2 (f_1 < f_2)$, 音圧レベル P_1, P_2 なる二つの刺激音をプローブの2個のイヤホンから外耳道に放射した。この時の外耳道内の音響信号をプローブ内のマイクロホンで検出した。音響信号をアンプで増幅後FFT分析し、 $2f_1 - f_2$ なる周波数におけるスペクトルレベルを DPOAE の出力レベルとして計測した。図3は周波数分析結果の一例である。計測は入力音周波数 f_2 を 0.5~10 kHz の間の数十点に設定し、入力音の周波数比 f_2/f_1 および音圧レベル P_1, P_2 を一定にして行った。実験内容に応じて、入力音の周波数比 f_2/f_1 および音圧レベル P_1, P_2 を数とおりに変えた。また、DPOAE に及ぼす中耳の影響を調べるため、中耳動特性測定装置 (Middle Ear Analyser : MEA) を用い、中耳動特性、すなわち、中耳の共振周波数および鼓膜の可動性を計測した⁽⁵⁾。計測はすべて防音室で行い、被験者には計測中、雑音を出さないように静かに座ってもらった。

図1 DPOAE 計測システムのブロック図

図2 ヒトの耳の構造および DPOAE 計測用プローブの挿入例

1: 外耳道 2: 鼓膜 3: ツチ骨 4: キヌタ骨
5: アブミ骨 6: 蝸牛

3. 計測結果

3.1 キャビティとの比較 図4は正常聴力を有する耳と、外耳道を模した直径約8mm, 長さ約35mm, 体積約2ccの片側が閉じられたプラスチック製円筒容器 (キャビティ) で DPOAE を計測した結果の一例である。入力音周波数比 f_2/f_1 を 1.25, 音圧レベル P_1, P_2 をそれぞれ, 65, 55 dB SPL に設定した。入力音周波数 f_2 に対する DPOAE およびノイズレベルを、それぞれ太線および細線で示す。なお、ノイズレベル

図3 入力音および DPOAE の周波数分析結果
 $f_1 = 1125$ Hz, $f_2 = 1435$ Hz, $P_1 = 70$ dB SPL, $P_2 = 70$ dB SPL

(a) 正常耳

(b) キャビティ

$f_2/f_1 = 1.25$, $P_1 = 65$ dB SPL, $P_2 = 55$ dB SPL

図4 DPOAE の計測結果

図 5 入力音周波数比 (f_2/f_1) と DPOAE レベルの関係
 $f_2=1171, 3125, 6152$ Hz, $P_1=65$ dB SPL,
 $P_2=55$ dB SPL

図 6 入力音圧レベル P_1 と DPOAE レベルの関係
 $f_2=1171$ Hz, $f_2/f_1=1.25$, $P_2=50, 55, 60, 65,$
 70 dB SPL

図 7 入力音圧レベル P_2 と DPOAE レベルの関係
 $f_2=1171$ Hz, $f_2/f_1=1.25$, $P_1=50, 55, 60, 65,$
 70 dB SPL

DPOAE はすべての計測点について明りょうに検出され、特に 1 kHz, 6 kHz 付近にピークが認められた。これに対して、キャビティでの計測では、 $2f_1-f_2$ なる周波数を持つ信号はどの周波数についてもほとんど検出されず、ノイズレベル程度であった。

3.2 入力音の条件と DPOAE レベルの関係 図 4 (a) の結果を得た耳で、二つの入力音の条件を変え、DPOAE レベルの変化を調べてみた。入力音周波数 f_2 はそれぞれ、MEA によって計測された中耳共振周波数に近い 1171 Hz, DPOAE レベルが比較的低い 3125 Hz, および比較的高い 6125 Hz である。

図 5 に入力音周波数比 f_2/f_1 と DPOAE レベルの関係を示す。入力音圧レベルは P_1 を 65, P_2 を 55 dB SPL とした。DPOAE レベルは f_2/f_1 の増加とともに増大し、 $f_2/f_1=1.25$ 付近で最大となり、やがて減少した。DPOAE レベルは周波数比が大きくても小さくても低く、計測点によってはノイズレベルとなった。

図 6 は入力音圧レベル P_2 を一定にして、 P_1 を変えたときの DPOAE レベルの変化である。 P_1 の増加とともに DPOAE レベルは増加し、その変化率は 1~1.2 であった。しかし、 P_1 がさらに増加し、 P_2 との差が大きくなると DPOAE レベルは減少した。

図 7 に入力音圧レベル P_1 を一定にしたときの、 P_2 と DPOAE レベルの関係を示す。DPOAE レベルは、 P_2 が増加するにしたがってゆるやかに増加して最大となり、その後ゆるやかに減少した。DPOAE レベルが最大となる P_2 のレベルは、 P_1 のレベルによって異なり、 P_2 が P_1 より 5~15 dB SPL ほど低いときであった。図 5~7 より DPOAE レベルが最大となる入力音の条件は、 $f_2/f_1=1.25$, $P_1=70$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL であった。

3.3 DPOAE の一般的傾向および中耳の影響

正常聴力を有する 10~20 代の被験者 17 名の 34 耳に対して、DPOAE および、中耳動特性を計測した。DPOAE の計測は、二つの入力音の条件を、 $f_2/f_1=1.25$, $P_1=70$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL に設定して行った。DPOAE は計測したすべての耳で検出された。また、計測したほぼすべての周波数で、ノイズレベル上 10~35 dB SPL と明りょうなレベルであったが、個人差も大きかった。計測した 34 耳のうち 3 名の 3 耳に刺激音を与えなくても検出される、自発耳音響放射 (Spontaneous OAE : SOAE) が認められた⁽⁶⁾。DPOAE に及ぼす SOAE の影響が予想されるため⁽⁶⁾、その 3 耳を除いた 31 耳について結果をまとめた。図 8 は 31 耳の DPOAE レベルとノイズレベルの平均 (太線) および標準偏差 (細線) を入力音周波数 f_2 につい

は FFT 分析で得られた周波数 $2f_1-f_2$ に近接する 6 個のスペクトルレベルを加算平均したものである。

てまとめたものである。また、図中に MEA によって計測した中耳共振周波数の平均 (1 188 Hz) と標準偏差 (139 Hz) もあわせて表示した。DPOAE レベルは 1.2 kHz を中心に最も大きくなり、この周波数は中耳共振領域にほぼ一致した。また、DPOAE レベルは 2~5 kHz で比較的低くなり、6~8 kHz でやや高くなった。

31 耳のうち 5 名の 5 耳では、中耳共振領域と大きく

図 8 正常耳における DPOAE の一般的傾向
 $f_2/f_1=1.25$, $P_1=70$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL

(a) 中耳共振周波数と DPOAE レベルが最大となる入力音周波数の関係

(b) Δ SPL と中耳共振周波数における DPOAE レベルの関係

図 9 DPOAE に及ぼす中耳動特性の影響

異なる 3~7 kHz で DPOAE レベルが最大となった。しかし、中耳共振領域においても比較的高いレベルの DPOAE が計測された。図 9 (a) は中耳共振周波数と DPOAE レベルが最大となる入力音周波数 f_2 の関係を、中耳共振領域近傍で DPOAE レベルが最大となった 26 耳についてまとめたものである。DPOAE レベルが最大となる f_2 は中耳共振領域に集中していた。図 9 (b) に MEA 計測結果の最大音圧と最小音圧の差、すなわち Δ SPL と、入力音周波数 f_2 が中耳共振周波数に一致したときの DPOAE レベルの関係を示す。 Δ SPL は鼓膜体積変位の大きさを表す指標であり、値が大きいほど中耳の可動性がよい。 Δ SPL は 0~10 dB SPL に分布していた。しかし、 Δ SPL と DPOAE レベルの相関係数は -0.09 であり、明りょうな相関は認められなかった。

4. 考 察

4.1 DPOAE の基本的傾向 DPOAE はキャビティとヒトの耳で計測した結果を比較することにより、生体信号であることが確認された。また、この比較によって、マイクロホンなどの測定システムの非線形性に起因する $2f_1-f_2$ の出力レベルは無視できると考えられた。

図 5~7 に示した DPOAE の傾向は、図示した以外の周波数およびほかの被験者でもほぼ同様であり、DPOAE の基本的な性質であると考えられた。また、DPOAE の出力レベルが最大となる入力音の条件は、これまで報告されている条件、すなわち、入力音周波数比 $f_2/f_1=1.225$ 、音圧レベル $P_1=65$ dB SPL, $P_2=60$ dB SPL⁽⁷⁾、 $f_2/f_1=1.23$, $P_1=75$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL⁽⁸⁾ に対して、 $f_2/f_1=1.25$, $P_1=70$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL とほぼ同様の結果となった。これらより、DPOAE はこの条件を用いて計測するのが適当であると思われた。

4.2 DPOAE に及ぼす中耳の影響 DPOAE の周波数特性には図 8 にみられるように、低域と高域にピークを持つ特徴があった。低域のピークは、それが中耳共振領域に位置していること、および図 9 (a) より、計測した 31 耳中 26 耳で、入力音周波数 f_2 が中耳共振領域近傍にあるとき、DPOAE のレベルが最大となったことから、中耳動特性の影響であると考えられた。また、図 8 の高域のピーク、および中耳共振領域とは異なる高周波数領域で DPOAE のレベルが最大となった 5 耳については、外耳道の共振による鼓膜面での入力音圧の増加⁽⁹⁾ によって DPOAE のレベルが増加したと推測された。なお、その 5 耳についても中耳

共振領域において比較的高いレベルの DPOAE が計測された。したがって、中耳の周波数特性は DPOAE レベルに影響を及ぼすと考えられた。しかし、図 9 (b) より中耳の可動性と DPOAE の絶対的な出力レベルには、明りょうな関連はないと思われた。

5. 結 言

正常聴力を有するヒトを対象に DPOAE と中耳動特性を計測した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) DPOAE は生体信号であり、その出現率は極めて高く、広い周波数範囲でノイズレベル上 10~35 dB SPL のレベルで明りょうに検出された。

(2) DPOAE レベルは二つの入力音の周波数比および音圧レベルによって大きく変化し、入力音の最適条件は周波数比 f_2/f_1 が 1.25、音圧レベルが $P_1=70$ dB SPL, $P_2=65$ dB SPL であった。

(3) 入力音周波数 f_2 が中耳共振領域付近 (1.2 kHz 前後) にあるとき、DPOAE レベルは高くなった。したがって、中耳の周波数特性は DPOAE レベルに影響を及ぼすと言える。しかし、中耳の可動性と DPOAE レベルには、明りょうな関連はみられなかつ

た。

(4) DPOAE による内耳診断装置を開発する際には、正常耳で DPOAE とノイズをはっきり区別できる、上述(2)の入力音条件を用いればよい。

終わりに臨み、ご検閲をいただいた東北大学工学部・長南征二教授、東北大学医学部・高坂知節教授に深く感謝するとともに、本研究は平成 3, 4 年度文部省科学研究費 (03670806, 04237204) を受けたことを付し、謝意を表する。

文 献

- (1) Kemp, D. T., *J. Acoust. Soc. Am.*, **64**(1978), 1386.
- (2) Probst, R., Lonsbury-Martin, B. L. and Martin, G. K., *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991), 2027.
- (3) Brown, A. A. and Gaskill, S. A., *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990), 840.
- (4) 大山・和田・高坂, *Audiology Japan*, **35**(1992), 46.
- (5) Wada, H. and Kobayashi, T., *J. Acoust. Soc. Am.* **87**(1990), 237.
- (6) 和田・大山・須長, 機論, **57-541**, C(1991), 2877.
- (7) Brown, A. A. and Gaskill, S. A., *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990), 821.
- (8) Hauser, R. and Probst, R., *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991) 280.
- (9) 切替・野村, 新耳鼻咽喉科学, (1982), 24, 南山堂.