

Thomas Janssen ENT-Department, Technische Universität München, München, Germany.
T.Janssen@LRZ.tum.de

Abstract

OBJECTIVES: The purpose of this study was to give a brief review of the effectiveness of otoacoustic emissions for getting frequency-specific information about a hearing-loss problem in newborns after hearing screening. Especially, the advantages of distortion-product otoacoustic emissions (DPOAE) over transiently evoked otoacoustic emissions (TEOAEs) are described.

DATA SOURCES: Approximately 186 ears of 104 children aged between 76 days and 15 years and 436 ears of adults with normal hearing and sensory hearing loss.

METHODS: Extrapolated DPOAE I/O-functions at frequencies between 1.5 and 6 kHz were obtained in the children for assessing the hearing loss and for differentiating between a transitory sound-conductive hearing loss and a persisting cochlear hearing loss. For getting information on the test time needed, measurements were performed in the adult patients.

RESULTS: DPOAE thresholds derived from extrapolated DPOAE I/O-functions (DPOAE audiograms) are closely related to behavior audiometric thresholds and can be used for determining characteristic quantities of the cochlear-impaired ear. A DPOAE audiogram can be obtained in a couple of minutes. DPOAE audiograms are able to reveal a transitory sound-conductive hearing loss because of Eustachian tube dysfunction and/or amniotic fluid in the tympanic cavity or to confirm a persisting cochlear hearing loss because of outer hair cell impairment in babies with a reference result in newborn hearing screening.

CONCLUSION: DPOAE audiograms provide a tool for a fast automated frequency-specific and quantitative evaluation of a mild or moderate hearing in follow-up diagnosis.

新生児聴覚スクリーニング後の精査での OAE において周波数毎の情報を得られるかについてのレビューである。TEOAE に比した DPOAE の有用性について考察する。生後 76 日から 15 歳までの 104 人 186 耳と成人 436 耳において、正常・難聴例両方を対象とした。DPOAE において 1.5kHz から 6kHz において I/O function を外挿して求め(DPOAE オーディオグラム)、小児において一時的な伝音難聴か感音難聴かを判断した。更に詳細なテストについては成人において行った。DPOAE オーディオグラムから求められた閾値は通常の聴力検査閾値とほぼ同等で、感音難聴を判断するのに有用であった。DPOAE オーディオグラムは数分で計測できた。耳管機能異常や中耳の羊水等の貯留や外有毛細胞等の異常による感音難聴を判断するのに DPOAE オーディオグラムが有用である。以上のことから、DPOAE オーディオグラムは、軽度から中等度難聴のフォロー・診断において迅速に周波数毎の定量的な評価を行える方法と考えられる。

新生児聴覚スクリーニングにおいて要精査となった場合、実際に聴覚障害があるかどうかを判断し、障害がある場合はその程度を評価することが重要となる。主観的検査は、全体としての評価ができるだけであり、ティンパノメトリ、OAE、ABR を組み合わせることで、伝音難聴・感音難聴・より中枢の難聴等を評価できる。ティンパノメトリと同様、OAE は迅速な検査の一つである。TEOAE は、フォロー・診断の一つとして使われ、難聴が疑われるときは、DPOAE も施行されることが多い。特に閾値レベルでの DPOAE が重要となる。以下のレビューでは、DPOAE I/O function の外挿による評価を含め、難聴の評価にどれだけ有用かを考察する。

TEOAE がパルスに対する蝸牛外有毛細胞の反応を評価するのに対し、DPOAE は外有毛細胞の周波数

特異的な入力に対する非線形的な圧縮特性を評価するものである。どちらの OAE も難聴における周波数特異的な情報を得ることができる。パルス(いわゆるクリック音)で刺激した場合、蝸牛全周波数にわたる有毛細胞が刺激され、トーンバーストで刺激した場合、ある程度制限された周波数帯域のみの有毛細胞が刺激される。蝸牛の周波数分離の特性により、TEOAE の出力から、それぞれの周波数帯域での有毛細胞の機能がわかることになる。基底回転は高周波帯域を受け持ち、頂回転は低周波帯域を受け持つので、TEOAE の帰ってくる時間差等でもある程度分離できる。TEOAE において、高周波帯域は低周波帯域より早く帰ってくるので、刺激音と重なってしまい、基本的には 4kHz より高い周波数帯域での評価はできないことになっている。これに対し、DPOAE は 2 音($f_1 < f_2$)間の混変調歪($2f_1 - f_2$, 高い方の $2f_2 - f_1$ もあるがここでは扱わない)なので、刺激音に重なってしまうことはなく、周波数特異的な外有毛細胞の機能を評価できる。OAE を計測する際の限界は、マイクのノイズ、息や脈拍音といった生体ノイズ、外部からの音のノイズが原因となり、1kHz 以下における評価は難しい。また、6kHz 以上では特別な設計の機械でないと難しい。図 1 に DPOAE、TEOAE について簡単に示す。

OAE を広い周波数帯域にわたって評価できれば中耳や内耳の素早い機能評価として有用である。OAE が認められない時は、中耳か内耳の問題が考えられティンパノメトリを施行する。ティンパノメトリが問題ならおそらく中耳の問題だろうし、そうでなければ、内耳の問題と考えられる。ティンパノグラムも OAE も問題なければ、ABR を施行し、内有毛細胞かより中枢の問題があるかを判断する。たとえば、Auditory Neuropathy の場合、神経の働きに問題があるので、OAE が正常であっても ABR は正常でない。

小児において補聴器適合を行う場合、難聴の定量的な評価が重要となる。通常の刺激レベルでの場合、TEOAE は 20 dB HL 以上の難聴で反応がなくなるのに対し、DPOAE では、40~50 dB HL 以上の難聴で反応がなくなる。そのため、だいたい難聴のレベルが両者の比較でわかることになる。例えば、TEOAE の反応がなく、DPOAE の反応だけがある場合、だいたい 30 dB HL 程度かそれ以上の難聴と推測される。DPOAE のレベルと聴力閾値との関係については様々な議論がある。以前は、DPOAE の出力レベル自体を持って正常か異常かを判断するのは信頼性が乏しく、DPOAE のレベルがノイズ以下になる刺激レベルをもって DPOAE 閾値とすることもあったが、聴力検査の閾値とは合致せず、あまり評価されることはなかった。DPOAE の I/O function を外挿し、刺激音のうち f_2 のレベルとの交点を計算する方法が提唱されており、図 2 に示すとおりである。DPOAE の出力レベルは、 f_2 のレベル L_2 を dB SPL に対して Pa でプロットするとほぼ線形回帰直線を描くことができ、外挿して 0 Pa になる所の f_2 のレベル L_2 を閾値と考えられる。この閾値はノイズには関係なく求められる上、通常の聴力検査閾値とかなり近い値が出る。

以上に述べた線形性は、以下の scissor の方法によってのみ得られる。DPOAE において基本的には f_2 が主な役割を占めており、 f_2/f_1 は 1.2、 f_1 のレベル $L_1 = 0.4 * L_2 + 39$ dB SPL が scissor の方法で、dB SPL を dB HL に変換するとオーディオグラムが描ける。

DPOAE オーディオグラムは、新生児聴覚スクリーニングで要精査となった場合に、中耳の問題かどうかでフォローする場合に役に立つ。図 3 では、一時的な伝音難聴における DPOAE オーディオグラムの例を示す。

この例は、自動 TEOAE スクリーニングで要精査となり、DPOAE オーディオグラムでは 4k で 40dB、そのほかで 50dB 程度の難聴を認める。12 日後の再検では問題なく、中耳の液体貯留等が原因と考えられた。

図 4 の 3 つの症例は、DPOAE オーディオグラムが役に立った例である。図 4A では、5 歳男児の純音聴力検査と DPOAE との関係を示しており、かなり似ているが、図 4BCD は、高音域で DPOAE オーディオグラムの結果が純音聴力検査と違っている。図 4B は純音聴力検査の全帯域で 50dB の難聴を認めるが、DPOAE オーディオグラムでは低音・中音のみで難聴がある。図 4C は、三ヶ月の症例での自由音場での閾値と左右の DPOAE オーディオグラムを示す。右耳では DPOAE がなくおそらく 50dB 以上が予想されるが、左耳は DPOAE では問題ないと思われる。

図 5 は純音聴力検査と DPOAE の閾値についての関係を示した物で 104 人の小児 186 耳(76 日齢～15 歳)を対象とした。四角が自由音場、丸がヘッドホンでの聴力検査である。乳幼児では 32～68dB 程度の差を認めるが、3 歳以上ではほぼ 10dB 以内にとどまっている。DPOAE の方が 10dB ほど閾値が低いのは、検査の時の反応に要する音圧が本来の閾値よりやや高いせいと思われる。

DPOAE は図 6 に示すような時間で計測することができ、これは成人 436 耳での結果である。一般的な聴力の人では、DPOAE オーディオグラムの検査に 2～3 分かかるが、中等度難聴になるとやや時間がかかる。さらに難聴になると、DPOAE が計測できず、計測時間は短くなる。

まとめ

新生児聴覚スクリーニングで要精査となった症例については、ティンパノメトリや ABR や OAE 等様々な検査を行う必要がある。TEOAE は定性的な評価に使えるし、DPOAE も DPOAE オーディオグラムとしてであればさらに定量的な評価としても使える。

DPOAE オーディオグラムは、新生児等において、自由音場の閾値が実際の値を反映しない場合において有効である。乳幼児においても、tone-burst ABR や chirp-ABR や ASSR に加えて DPOAE オーディオグラムが有用と考えられる。DPOAE オーディオグラムの検査時間は数分で、ABR や ASSR より早い。ただ、50 dB HL 以上の難聴では DPOAE が検出されないの、ASSR 等も必要になる。

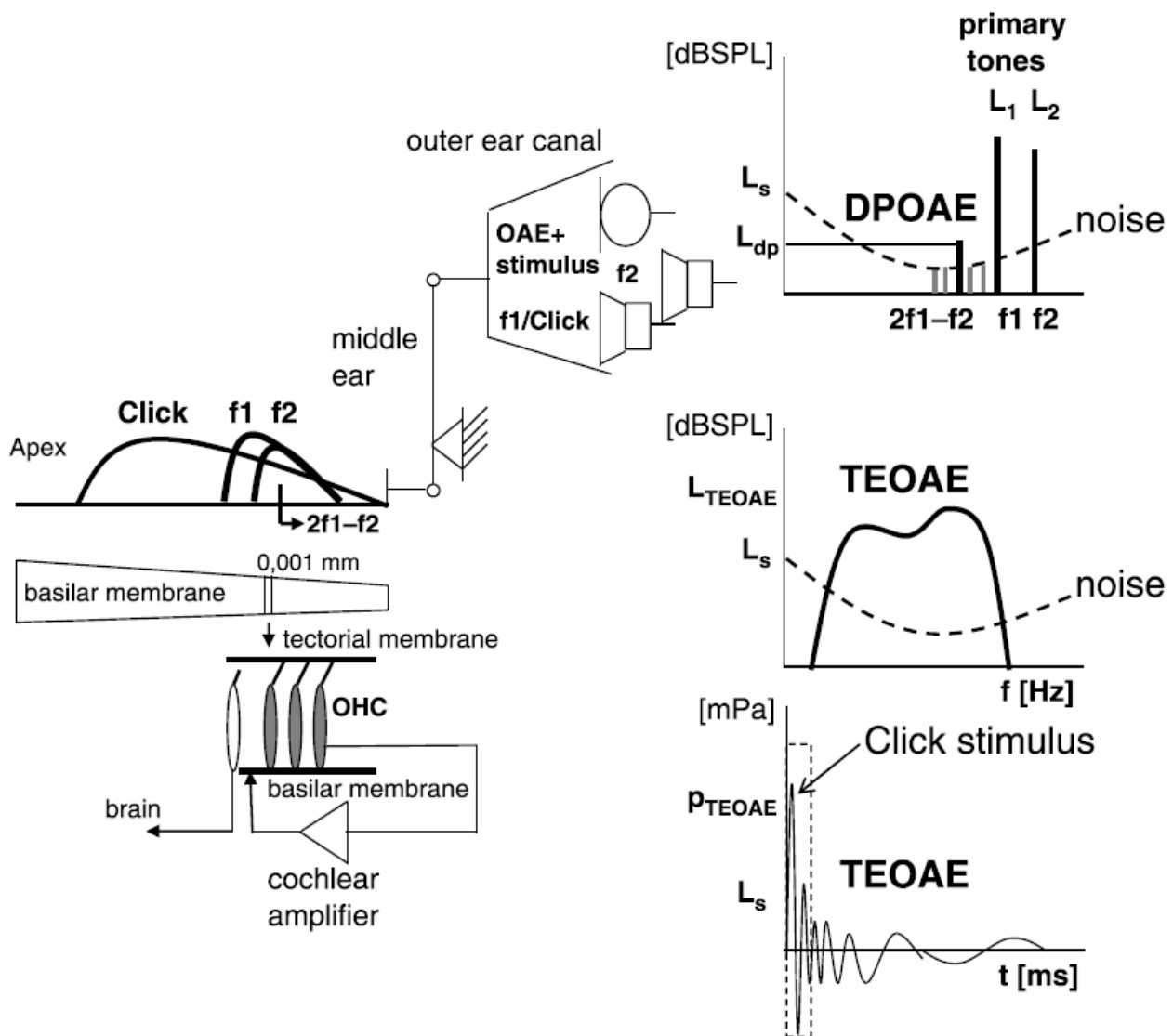


FIG. 1. Schematic drawing to show how TEOAEs and DPOAEs are evoked within the cochlea and subsequently measured in the outer ear canal. The sound probe consists of a microphone for measuring the acoustic response signal and either one loudspeaker for applying a click stimulus (TEOAE) or of 2 loudspeakers for applying 2 independently generated primary tones with frequencies f_1 and f_2 and levels L_1 and L_2 . OAEs are a by-product of nonlinear sound amplification within the cochlea because of outer hair cell (OHC) motility. TEOAEs represent OHC pulse responses along the basilar membrane. Basal high-frequency responses appear at the beginning, and apical low-frequency responses appear at the end of the TEOAE time function. Stimulus and high-frequency TEOAE responses superimpose and are therefore removed from the microphone signal. Noise is lowest at mid frequencies. Therefore, TEOAEs fail to obtain information on cochlear function at high and low frequencies. DPOAEs are generated within the region of overlap of the traveling waves of the 2 primary tones close to the f_2 place. Thus, DPOAE provide information on cochlear function at a distinct place.

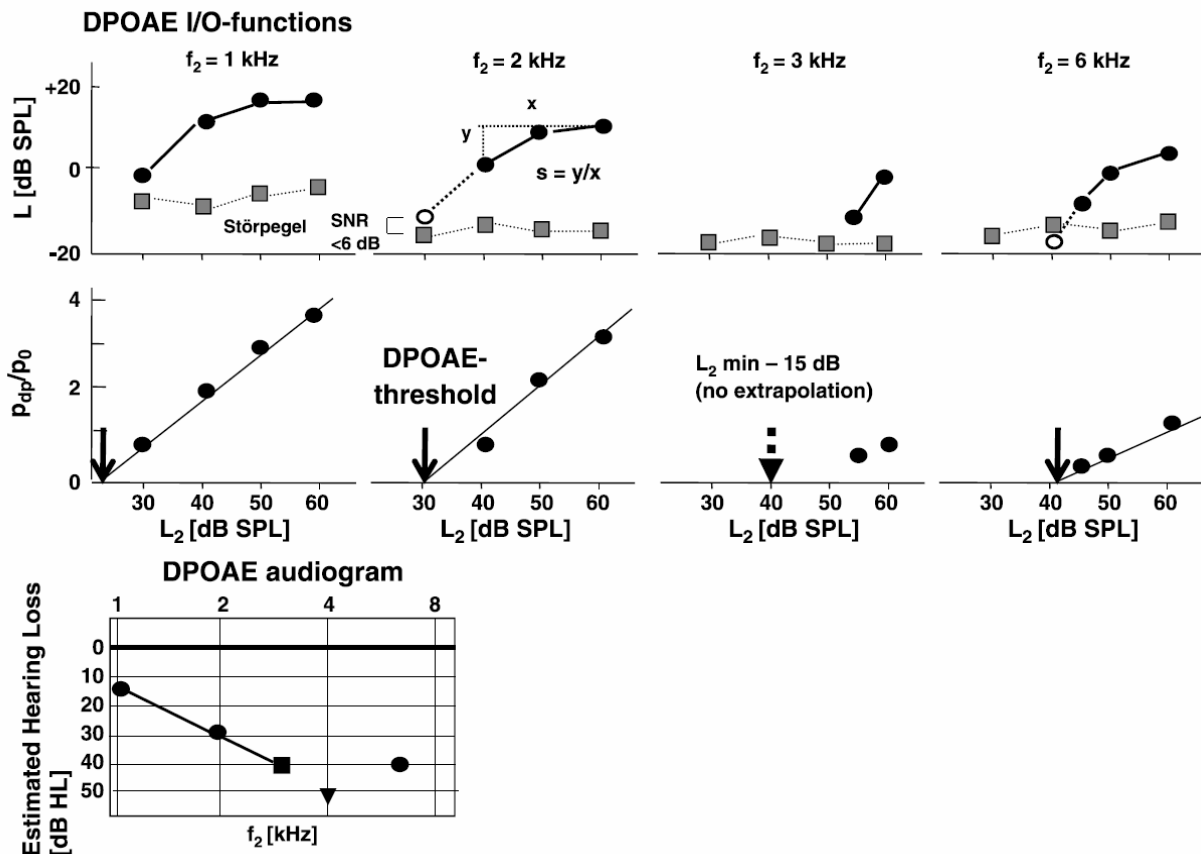


FIG. 2. Schematic drawing of how to determine DPOAE thresholds and to estimate hearing loss at different test frequencies when eliciting DPOAEs using “scissor” stimulus setting ($L_1 = 65|L_2 = 65$, $L_1 = 63|L_2 = 60$, $L_1 = 61|L_2 = 55$, $L_1 = 59|L_2 = 50$, $L_1 = 57|L_2 = 45$, $L_1 = 55|L_2 = 40$, $L_1 = 53|L_2 = 35$, $L_1 = 51|L_2 = 30$). DPOAEs are plotted in double-logarithmic (L across L_2) and semi-logarithmic (p across L_2) scales. Intersection of the linear regression line with L_2 axis serves as an estimate of DPOAE threshold. At test frequencies where DPOAEs are only present at 2 L_2 levels or 1 L_2 level, no extrapolation is performed. In this case, the estimated threshold is calculated by the lowest L_2 ($L_{2\min}$) at which a valid DPOAE could be achieved minus 15 dB. After converting SPL in HL, a DPOAE audiogram is constructed. Circle means threshold estimation by means of extrapolated DPOAE I/O functions; square means simplified estimation $L_{2\min}-15\text{dB}$; arrow symbol means no DPOAE are measurable, and thus, the hearing loss is estimated to be higher than 50 dB HL.

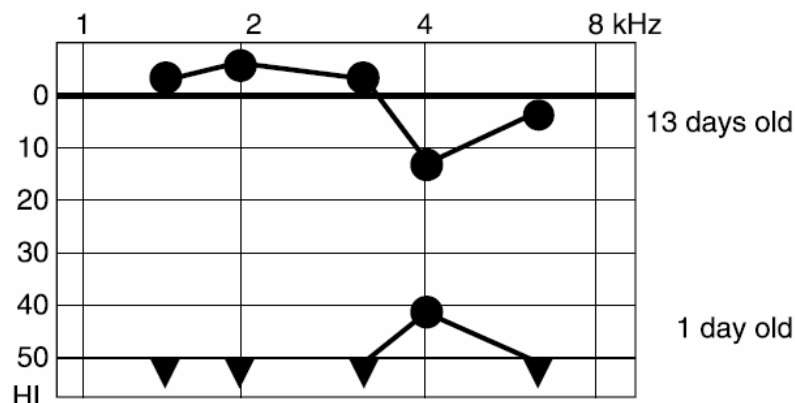


FIG. 3. DPOAE audiograms in 2 newborns (A and B) with temporary sound-conductive hearing loss. Newborn “a” with a “pass” ATEOAE screening response exhibits a low-frequency hearing loss in the first measurement (3 d after birth). In the second measurement (86 d after birth), the DPOAE audiogram indicates normal hearing. In newborn “b” with a “refer” ATEOAE screening response, no DPOAE could be measured (except at 4 kHz) in the first measurement (1 d after birth). DPOAE audiogram obtained in the second measurement (13 d after birth) indicates normal hearing.

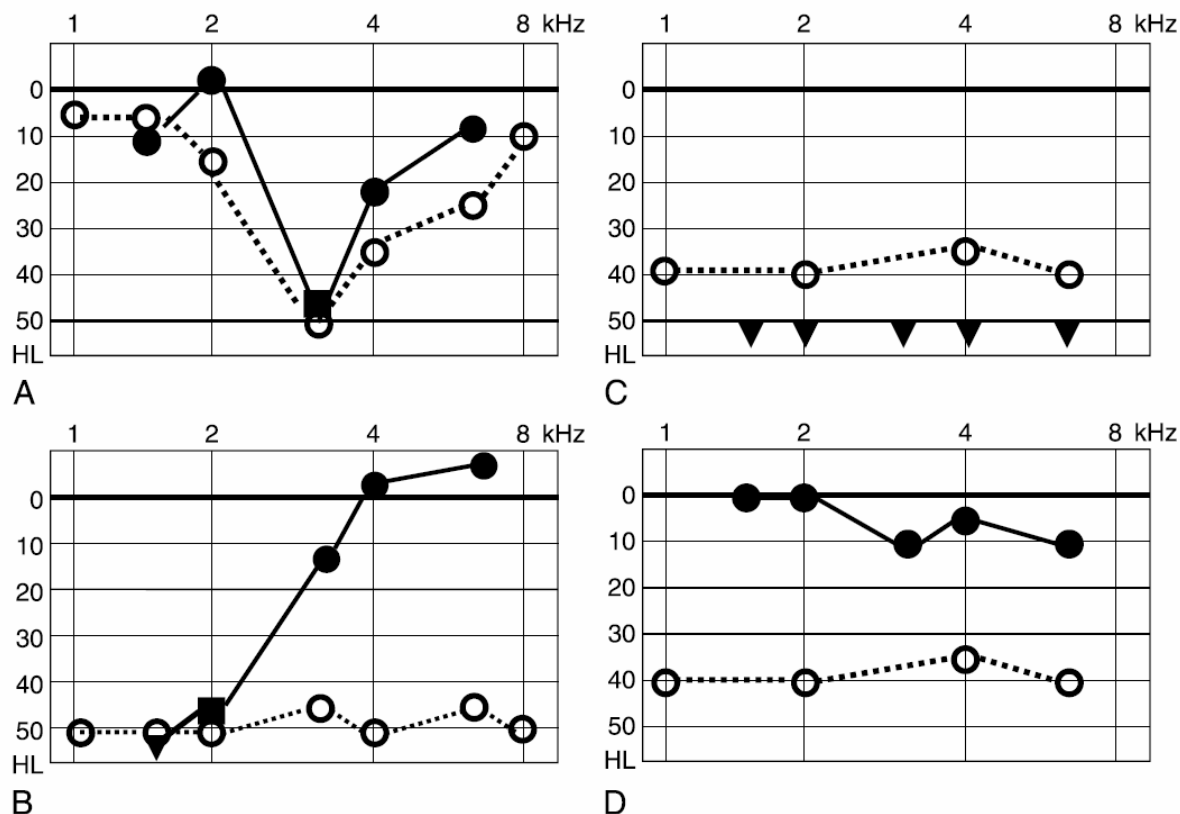


FIG. 4. Pure-tone audiograms (open circles) and DPOAE audiograms (black symbols) –6 years old boy, left ear (A); 5 month old girl, left ear (B); 3 months old girl, right (C) and left ear (D). Pure-tone audiogram and DPOAE audiogram are closely related in the 6-year-old boy. The free-field audiogram (dotted lines) of the 5-month-old girl indicates a hearing loss of 50 dB HL in the entire frequency range. However, the DPOAE audiogram reveals a hearing loss only in the mid and low frequency range. The free-field audiogram of the 3-month-old girl indicates a hearing loss of 40 dB HL. In the right ear, DPOAEs are not present, indicating that the hearing loss must be higher than 50 dB (red arrows in Fig. 4C). In the left ear, DPOAE audiogram indicates normal hearing.

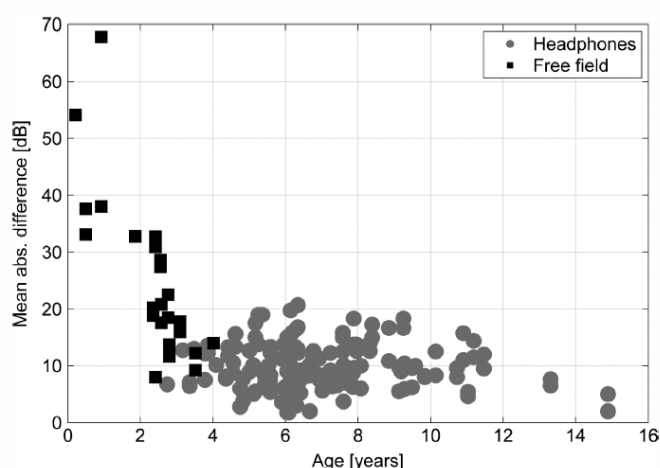


FIG. 5. Scatter plot of the difference between behavioral and estimated threshold from DPOAE I/O-functions across age obtained in 186 ears of 104 children aged between 76 days and 15 years. Squares represent free-field, and circles represent head-phone thresholds. Difference between behavioral and estimated thresholds decreases with increasing age.

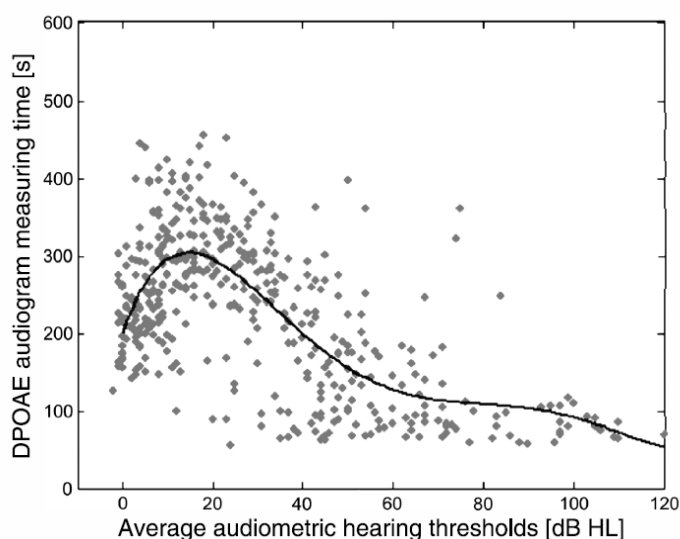


FIG. 6. Scatter plot of measuring time for getting a DPOAE audiogram at frequencies $f_2 = 1.5, 2, 3, 4,$ and 6 kHz across average audiometric hearing thresholds. Data are from 436 ears of patients with cochlear hearing loss.