

複合音を入力音源にしたデジタル補聴器の増幅能評価の試み

富澤晃文

(Akifumi TOMIZAWA)

【要約】

本研究はデジタル補聴器の音響カプラ内における増幅能の評価法を検討することを目的に、従来の補聴器特性測定装置を使用した無響箱内での純音掃引による特性測定法に加え、防音室内音場に補聴器を垂直に固定した状態での特性測定を試みた。入力音源にはANSI（米国規格協会）による雑音（コンポジットノイズ、デジタルスピーチノイズ）および実音声を用いられた。ノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性のDSP（digital signal processing）機能の作動下においては従来の無響箱内の純音掃引による特性測定法では安定した利得／周波数特性の曲線が得られないことが明らかとなった。防音室内音場に補聴器を垂直に固定し、デジタルスピーチノイズまたは実音声を用いることによりデジタル補聴器の増幅能の評価を行える可能性が示唆された。

キーワード：デジタル補聴器、DSP機能、特性測定法、複合音ノイズ、実音声

1. はじめに

補聴器は難聴児・者の聞こえを補う手段として古くから使用されてきた。電氣的に増幅を行う補聴器としては真空管を使用したものが1920年代から使用され始めた¹⁾。1947年の米国ベル研究所のShockleyらによるトランジスタの発明は、補聴器テクノロジーの発展史における大きな転換点といわれる。1950年代以降、トランジスタが増幅回路に用いられるようになると、補聴器は本体部を耳に装着できるようになるまで小型化が可能になった。同時に日常生活での携行性、音響的出力特性、耐用性の面での改良が進められ、補聴器はより多くの難聴児・者に適応すべくレパートリーを広げてきた^{2,3)}。これらの補聴器はマイクロホンで受信した音信号をアナログ方式のアンプによって電氣的に増幅を行い、イヤホンから増幅音を出力する原理が共通しており、アナログ補聴器（analog hearing aids）と総称されるものである。一方で1990年代後半以降、補聴器の増幅回路へのデジタル信号処理技術の導入が急速に進み、補聴器テクノロジーは再び新たな変革期を迎えることとなった。この新世代のデバイスであるデジタル補聴器（digital hearing aids）はすでに現在

の補聴器の主流となっている。

いわゆるデジタル補聴器とは、デジタル信号処理（DSP：digital signal processing）回路を用いたアンプを搭載した補聴器のことをいう。DSP回路はデジタル信号に変換された音信号に対して演算処理を行うため、増幅特性の設定とノイズ抑制などの音信号処理が比較的容易である。その主な機能を大別すると、多チャンネルによる圧縮増幅、ノイズ抑制、音響フィードバック（ハウリング）抑制、音響的指向性、音環境認識の5つにまとめられる⁴⁾。デジタル補聴器の各器種における性能は、DSP回路による演算処理の多様さと速度によって決められ機能の高さも様々であるが、多様な音環境の場面に応じていかにS/N比（信号とノイズの比）を高くターゲットとする音声信号を難聴児・者の耳に増幅するかがデジタル補聴器の目標とされている。

このような技術的進歩の一方、Killion（2004）が指摘するようにデジタル補聴器の増幅効果の音響的測定法が未確立である点は、補聴臨床上の大きな課題となっている⁵⁾。従来、アナログ補聴器の増幅能の測定においては、補聴器特性測定装置による純音を入力音源

表 1. 各補聴器の音響パラメータと設定状態

	メーカー 器種名	多チャンネル (調整バンド数)	ノイズ抑制	音響フィード バック抑制	音響的 指向性	音環境 認識
A	RION RUHQ HBG5-DT	14	オン 3段階中の 2	オン 3段階中の 2	オン 適応型	なし
B	SIEMENS ARTIS 2S	12	オン 4段階中の 2	オン 4段階中の 2	オン 適応型	なし
C	WIDEX FL-19	5	オン	オン	オン	なし
D	STARKEY Destiny1200	12	オン 3段階中の 2	オン 適応型	オン 適応型	あり 4種類

各音響パラメータの名称はメーカーごとに異なったが、ここではSchaubのDSP機能の分類にしたがった³⁾。

にした特性測定法が測定上の精度と再現性が高いことから、本邦においても一般的に用いられてきた。本邦の補聴器のJIS（日本工業規格C5512：2000）も純音掃引による測定法に基づいている。ところがこの純音掃引による方法は、ノイズ抑制や音響的指向性の機能を持ち、周囲の音環境に適応しながら音声信号帯域を増幅する新世代のデジタル補聴器のための特性測定法としては適していない。ノイズ抑制と音響フィードバック抑制のDSP機能に対しては、純音以外の複合音源を入力音源に使用する必要がある^{6,7)}。さらに適応型の指向性などの音響的指向性のDSP機能に対しては、入力波形の位相差が得られるよう補聴器を音源に対し垂直に固定し、複数あるマイクロホン・アレイへの音波の入射角度を統制する必要があるなど⁸⁾、国内製の測定機器にはない技術の導入を視野に入れ、測定方法の改良を試みる必要があると思われる。特に音声の特異的に増幅するDSP機能に対しては、実音声入力時の増幅能の定量的測定を試みる必要があるであろう。

本研究ではデジタル補聴器における音響カプラ内の増幅能の測定法について検討するために、防音室内音場において実音声を含めた複合音源によるデジタル補聴器の特性測定を試みた。この手法と従来の無響箱内音場による純音掃引を用いた測定法との比較から、デジタル補聴器の特性測定上の有用性と課題を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

メーカー 4 社による耳かけ形のデジタル補聴器の 4 器種 (A, B, C, D) を用いた。各補聴器の調整は、デジタル補聴器の調整を統括するソフトウェアである

NOAH3システム上で60dBフラットの水平型オーグロラムを入力し、各メーカー推奨の自動調整、またはNAL-NL1法⁹⁾によって特性を設定した。各補聴器の調整機能の設定状態を表1に示した。以下の実験1～3の条件下で、4器種の利得/周波数特性を測定した。いずれの測定も測定用マイクロホンに音響カプラ(2cc HA-2 coupler)を結合させて行った。

2.1 実験 1

無響箱内音場においてDSP機能が利得/周波数特性の測定に与える影響を知るため、各補聴器のノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性の機能を全てオンにした状態と、全てオフにした状態の2条件で特性測定を行った。オフにした場合、メーカーの調整ソフトウェアにて音響カプラ内の測定用モードに設定できる器種については、音響カプラ内の測定用モードに設定した。補聴器特性測定装置(米国Frye Electronics社FP-35)を使用し、無響箱内(FONIX 6050)に補聴器を横向き(0°)に置いた状態で補聴器の利得/周波数特性の測定を行った。この手順は従来の標準的な補聴器特性測定法に基づくものである。

実験1では従来の音源である純音掃引に加え、複合音源であるコンポジットノイズ、デジタルスピーチノイズの計3種を入力音源に用いた。コンポジットノイズはANSI(米国規格協会S3.42-1992)により規定されたスピーチ加重の広帯域の雑音信号(減衰傾度:-6~-3dB/oct.)を用いた。デジタルスピーチノイズはコンポジットノイズを元にした断続するスピーチ加重の広帯域の雑音信号で、デジタル補聴器のノイズ抑制機能にかかわらず、一定の出力レベルが得られるとされている。コンポジットノイズとデジタルスピーチノイズはDSP機能の処理開始までに一定以上の呈示時

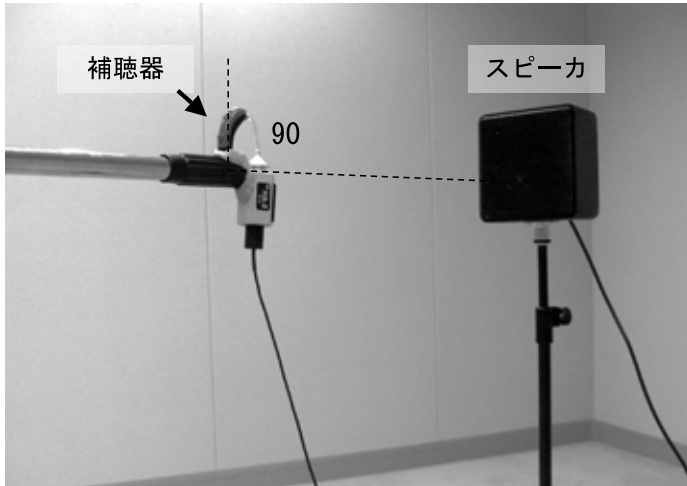


図1 実験2における補聴器とスピーカの配置

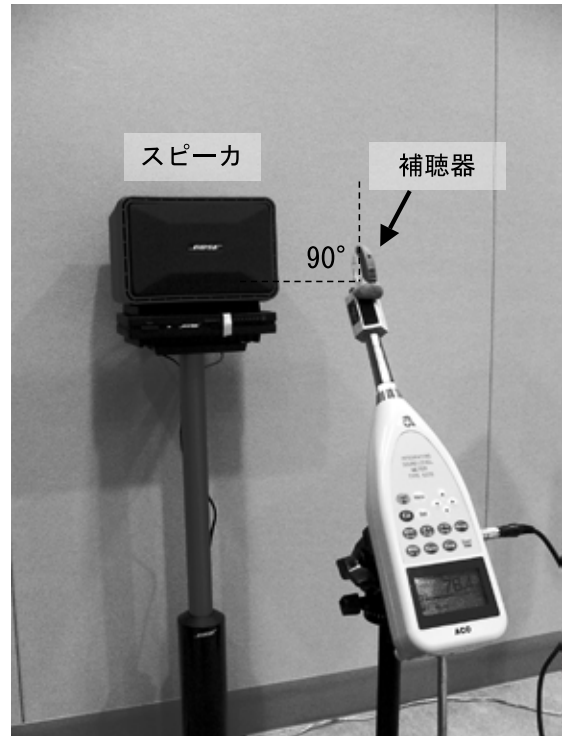


図2 実験3における補聴器・騒音計とスピーカの配置

間が必要な場合があることを考慮し、あらかじめ30秒間、同音源を補聴器に呈示した後に測定を開始した。各入力音源とも呈示レベルは65dB SPLとした。

2.2 実験2

防音室内音場に補聴器を垂直に固定し、利得/周波数特性を測定した。防音室内の背景ノイズレベルは騒音計C特性にて35dB SPL以下であった。補聴器特性測定装置 (FP-35) と実耳測定用外付けスピーカが使用され、補聴器本体がスピーカの正面50cmに垂直になるよう、マイクロホンスタンドに粘着材で固定し、設置した (図1)。スピーカの音場校正は、補聴器の測定位置にリファレンスマイクロホンを設置して行った。各補聴器ともノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性の機能はオンに設定した。実験2では実験1と同じ3種の入力音源を用いた。各入力音源とも呈示レベルは65dB SPLとした。

2.3 実験3

実音声を入力音源として、補聴器の出力特性の測定を行った。入力音源には補聴器適合評価用CD TY-89の男性アナウンサーによる「日常生活文リスト」を用いた^{10, 11)}。リスト1 (計17文) のトラック内の無音区間とトーンマーカをパソコンの波形編集ソフトウェア上で削除し、連続音声による音源 (総録音時間26.05

秒) を編集してオーディオ用のディスク (CD-R) に録音した。CD再生機 (YAMAHA社 CDX-497) から出力した実音声音源はオーヂオメータ (Interacoustics社 AD229e) を経由してアンプおよびスピーカ (Bose社 1705 II, 101VM) から呈示した。実音声音源の等価騒音レベル (Leq) は、補聴器の測定位置で65.3dB (C特性) であった。補聴器本体はスピーカの正面50cmに垂直になるよう、三脚上の普通騒音計 (Aco社 Type6226) に2cc HA-1カプラを介して固定し、設置した (図2)。各補聴器ともノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性の機能はオンに設定した。CD再生機のオートリバース機能を利用し、あらかじめ30秒間以上、補聴器に連続音声を呈示した後に測定を開始した。補聴器からの出力音は、騒音計からのAC (交流信号) 出力にケーブルを接続してパーソナルコンピュータのハードディスクにデジタル録音 (サンプリング周波数44.1kHz) を行った。録音サンプルは音響分析ソフトウェア (SoundScope/16) を用いて、高速フーリエ変換処理 (解析ポイント数4096、量子化bit数16) により、長時間平均スペクトルを表示した。

3. 結果

3.1 実験1

無響箱内で測定された特性の比較について

実験1の無響箱内における利得／周波数特性図（利得表示）を図3と図4に示した。図3はノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性の機能がオフに設定されたときの特性を示す。補聴器の器種C、Dのみ、入力音源の違いによって5～10dBほどの利得差が生じていたが、各器種ともデジタル処理機能をオフにした状態ではどの入力音源の場合においても特性曲線が描出されていた。ただし、各器種とも同じ60dB水平型のオーディオグラムの入力によって設定されたにもかかわらず、利得／周波数特性は器種ごとに異なっていた。

図4は上記の3つの機能がオンに設定されたときの特性を示す。図3と異なり、利得の低下や鋸波状の特性曲線の乱れがみられた。器種A、Dでは、純音による特性曲線は1000Hz以上の周波数帯から利得が大きく低下していた。コンポジットノイズ入力時には、器種A、Bでは20dBほどの著しい利得の低下がみられ、特性曲線も鋸波状になっていた。器種Dでは1000Hz以上の周波数帯域で15dBほどの利得低下がみられた。器種Cはノイズ抑制などの効果が顕著にみられなかった。概して、特性図は器種ごとに異なり多様であった。なお、最も高い利得を保つことができた特性は4器種ともデジタルスピーチノイズ入力時のものであった。

3.2 実験2

防音室内音場における特性について

実験2では防音室内音場において利得／周波数特性を測定した。図5はノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性のDSP機能をオンに設定した状態で防音室内にて補聴器を垂直に固定したときの各器種の特性を示す。器種Dのコンポジットノイズ入力時のみ高音域において顕著な利得低下がみられたが、他はどの入力音源においても特性曲線が描出された。純音入力時については、器種Aは、図4と同様に1000Hz以上の周波数帯域において10dBほどの利得低下がみられたが、器種B、C、Dにおいては顕著な低下はみられなかった。コンポジットノイズ入力時については、器種A、Bは低音域を中心に10dBほどの利得低下がみられ、この結果は無響箱内で得た結果（図4）と大きく異なっていた。器種Cの利得低下は小さかったが、器種Dの利得低下は1000Hz以上の周波数帯域で

は顕著であった。なお、デジタルスピーチノイズ入力時については、図4と同様に4器種とも最も高い利得が得られた。

3.3 実験3

実音声入力時の特性について

実験3の防音室内音場における実音声入力時の高速フーリエ変換による解析結果を図6に示した。今回は実音声入力による音響カプラ内の出力音を元に解析したが、各器種の音声入力時の増幅特性の比較を行うことが可能であった。各器種とも1000Hz以下の出力が大きく、高音域にいくほど減衰していた。出力の強さに関しては、器種Aが最も大きく、器種Dは最も小さかった。

4. 考察

4.1 無響箱内による特性測定法について

今回の一連の実験に使用された補聴器は、すべてノイズ抑制、音響フィードバック抑制、音響的指向性の3つのDSP機能を有していた。実験1の結果からは、4器種ともDSP機能がオフに設定された状態では、無響箱内で特性曲線を得ることが可能であった。また、図4において安定した特性曲線が得られなかったことから、デジタル補聴器の特性測定に問題が生じるのは、DSP機能がオンに設定された状態であるといえる。図4では純音およびコンポジットノイズのような入力音源に対して、それぞれのDSP回路が「音声ではない入力音源」として複合的に信号処理を行ったため、利得の低下が生じたと考えられる。一方で、デジタルスピーチノイズに対しては、DSP回路は音声入力時と同様の信号処理を行ったと思われ、利得の低下が生じなかったと考えられる。図4では純音入力時には1000Hz以上の周波数帯域において利得低下がみられた器種があったが、これは音響フィードバック抑制の効果と考えられる。またコンポジットノイズ入力時には、器種A、B、Dにおいて利得低下がみられた。これはノイズ抑制の効果とも考えられるが、実験2の結果（図5）よりも利得低下が大きかったことを考え合わせると短絡的な結論は出しがたい。器種A、B、Dでは鋸波状の特性が得られており、コンポジットノイズによる本来の周波数特性の特徴が失われていたことから、むしろ各フィルターバンド間で統制された正常なノイズ抑制が作動しなかった可能性が考えられよう。いずれにせよ、無響箱内音場において安定した特

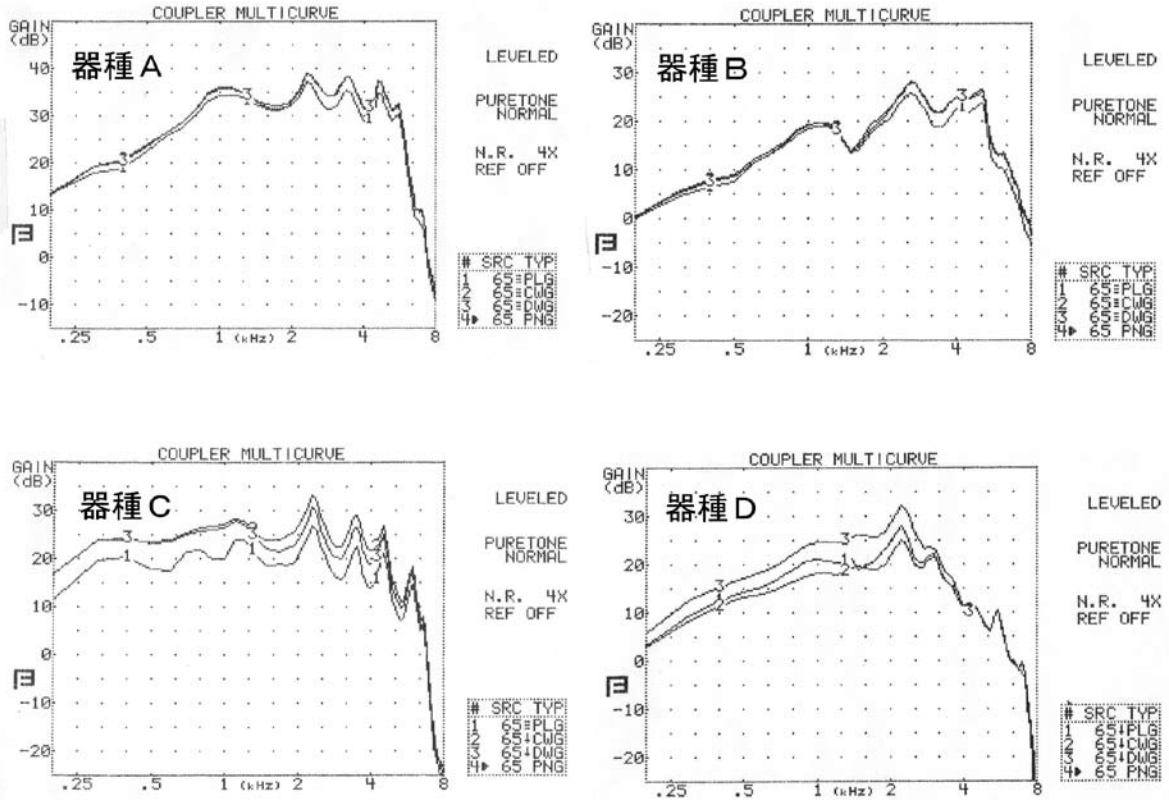


図3 無響箱内にて測定された特性 (DSP機能 設定オフ時)
 図中の1は純音掃引、2はコンジットノイズ、3はデジタルスピーチノイズによる特性を示す。

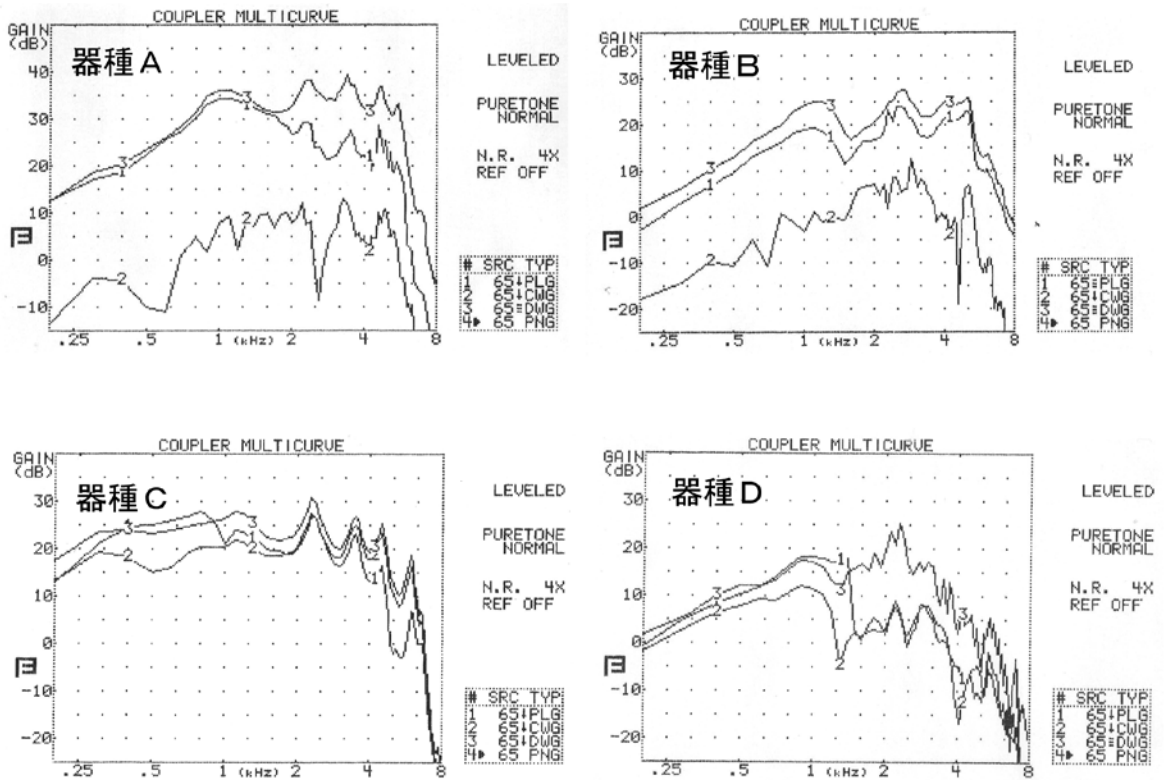


図4 無響箱内にて測定された特性 (DSP機能 設定オン時)
 図中の1は純音掃引、2はコンジットノイズ、3はデジタルスピーチノイズによる特性を示す。

性測定を行うことの困難さが示唆されたと思われる。また今回、どの器種も同じ60dB水平型のオーディオグラムの入力によって設定されたにもかかわらず、利得／周波数特性は器種ごとに異なっており、器種によって利得／周波数特性およびDSP機能の影響が一様の傾向を示さないことが明らかとなった。特に器種Cのようにノイズ抑制の効果がほとんど現れない器種もみられたことから、それぞれの器種についてDSP機能が作動した状態での特性を実測して検証することは、補聴器フィッティング上重要と思われる。

なお、デジタルスピーチノイズ入力時には全器種において最も高い利得が得られたことから、無響箱内におけるデジタル補聴器用の測定用音源としては最も適していると思われる。ただし音響的指向性をもつ補聴器に対し、無響箱内にて横方向から音源を入射させる測定条件が妥当かどうかは疑問の残るところであろう。

4.2 防音室内音場における特性測定法について

実験2の結果(図5)においては、器種Dのコンポジットノイズの入力時の特性を除き、安定した特性曲線が得られた。図4と比較したときに特に着目すべきことは、器種A、Bのコンポジットノイズ入力時の特

性曲線が安定して得られたことである。また器種Cは、図4、図5ともに同様の特性が得られており、入力音源や測定音場の違いによる影響は小さかった。器種Dは無響箱内での結果と同様に、防音室内音場においてもコンポジットノイズ入力時に安定した出力特性が得られなかった。各器種それぞれのDSP機能の違いにより、ノイズ抑制効果に顕著な差があることが示唆されたといえる。

実験2の測定法について音響的指向性の観点からみると、補聴器のマイクロホンへの入力音源の入射角度が適していることから、より本来の性能に近い特性が得られたものと考えられる。特にデジタルスピーチノイズは、すべての器種において最も利得が高かったことから、防音室内音場におけるデジタル補聴器の測定用音源として最も適していると考えられる。補聴器を垂直に固定して、入力音源の入射角度を統制した状態で呈示することにより、より適したデジタル補聴器用の特性測定を行える可能性が示唆された。

4.3 実音声入力時の出力特性の測定法について

実験3では実音声を入力音源に用いて出力音を分析した。実音声による出力特性の測定は、デジタル補聴

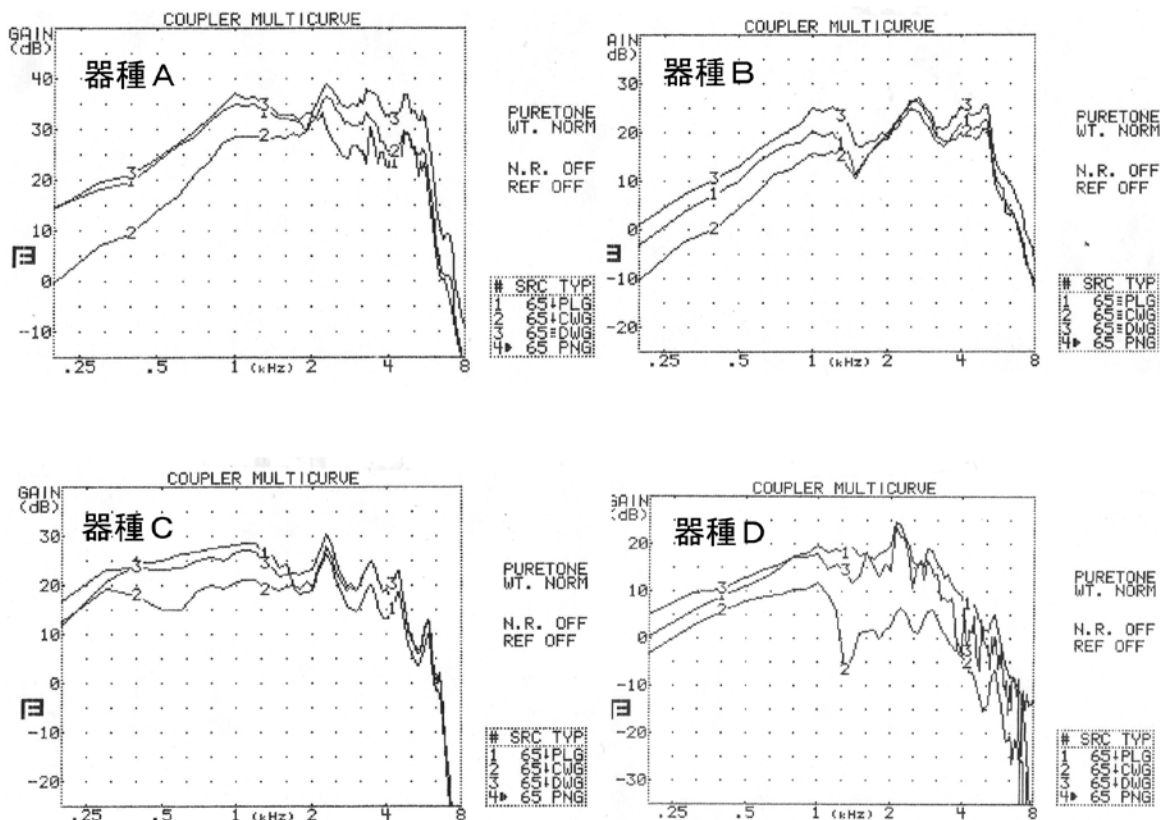


図5 防音室内音場にて測定された特性 (DSP機能 設定オン時)

図中の1は純音掃引、2はコンポジットノイズ、3はデジタルスピーチノイズによる特性を示す。

器の本来の増幅能を最も反映すると期待される。実験1、2のデジタルスピーチノイズ入力時において、高い利得を示した器種Aの利得は実音声入力時においても出力が高く、反対に低い利得を示した器種Dは実音声入力時においても出力が低かった。これらのことから、実験1、2のデジタルスピーチノイズ入力時の特性と整合した結果が得られたと考えられた。ただし、デジタルスピーチノイズがDSP機能に対して適した入力音源であるかどうかは、実音声による入力音と補聴器からの出力音のレベル差（利得）を周波数別に算出して両者の利得の整合性を検証した上で結論付ける必要があるため、今後の課題といえよう。実験3では同一の音声サンプルを音源に用いたため器種間の特性比較は可能であったが、どのような実音声サンプルを用いるべきかは検討すべきことと思われる。図5では、各器種とも2000Hz付近において出力の低下がみ

られたが、これは入力された実音声自体の特性の影響と推察される。実音声サンプルを使用する上では、長時間平均スペクトルがよりなだらかな減衰特性をもつ音声サンプルが適していると考えられる⁶⁾。防音室内音場において補聴器を垂直に固定し、実音声を入力する測定法はまだ試行段階であるが、今後、多様な音源・音環境への応用が想定される手法であるため、音響解析法の検討、聴覚閾値との関連付けも視野に含めて、さらなる検討がなされるべきと思われる。

5. 結論

本研究では、デジタル補聴器の音響カプラ内における増幅能の評価法を検討することを目的に、従来の無響箱内での純音掃引による特性測定法に加え、防音室内音場にて実音声を含めた複合音源による特性測定を試みた。DSP機能の作動下では、従来の測定法では

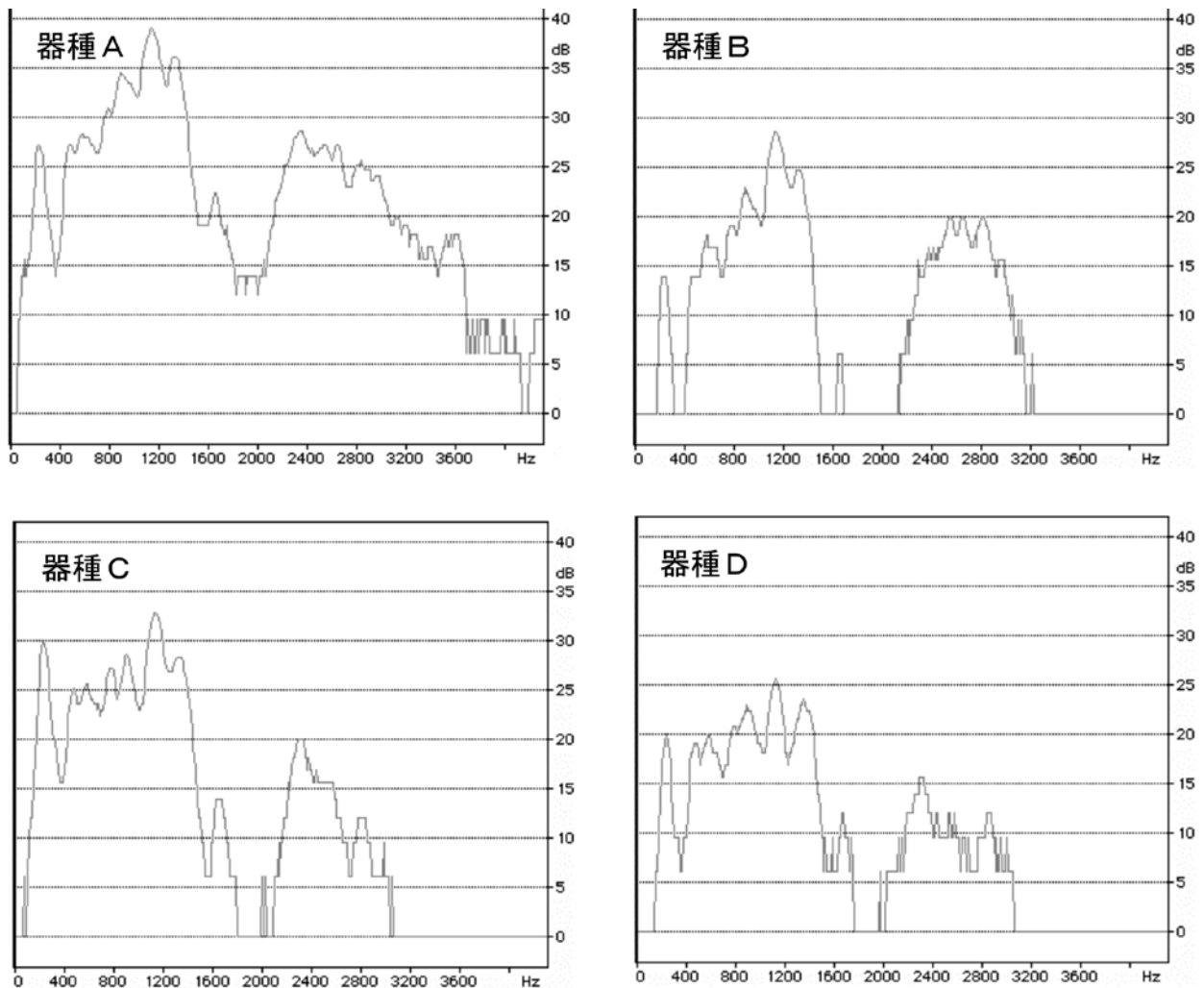


図6 実音声入力時における各デジタル補聴器の出力特性
高速フーリエ変換による各周波数帯における各補聴器の出力特性を示す。DSP機能の設定をオンの状態で測定した。

安定した特性が得られないことが明らかとなった。防音室内音場に補聴器を垂直に固定し、デジタルスピーチノイズまたは実音声を用いることにより、デジタル補聴器の増幅能の評価を行える可能性が示唆された。

本研究は、平成20年度本学特別研究費の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) Ewing, I: Lipreading and hearing aids, Manchester University Press, Great Britain (1946)
- 2) Dillon, H: Historical perspective, Hearing aids, Thieme Press, New York, pp12-16 (2000)
- 3) Bentler, RA, Duve, MR: Comparison of hearing aids over the 20th century. *Ear and Hearing* 21 (6), 623-639 (2000)
- 4) Schaub, A: Digital Hearing aids, Thieme Press, New York (2008)
- 5) Killion, M: Myths about hearing aid benefit and satisfaction, *The Hearing Review* (Aug.), 14-20 (2004)
- 6) Frye, GJ: Electroacoustic Testing of Hearing Aids and Standards, *Hearing aids: standard, options, and limitations 2nd ed.* (edited by Valente M.) Thieme Press, New York, pp1-63 (2002)
- 7) Ricketts, TA, Dittberner AB: Directional Amplification for Improved Signal-to-Noise Ratio: Strategies, measurements, and Limitations, *Hearing aids: standard, options, and limitations 2nd ed.* (edited by Valente M.) Thieme Press, New York, pp274-347 (2002)
- 8) Ricketts, TA, Henry, P: Evaluation of adaptive, directional-microphone hearing aid. *International Journal of Audiology* 41(2), 100-112 (2002)
- 9) Byrne, D, Ching, T, Katsch, Keider, G: NAL-NL1 procedure for fitting nonlinear hearing aids: characteristics and comparisons with other procedures. *Journal of American Academy of Audiology* 12(1), 37-51 (2001)
- 10) 田中美郷: 補聴器適合評価機器の試作に関する研究。昭和63年度科学研究費補助金(試験研究1)研究成果報告書(1989)
- 11) 大沼直紀, 中川辰雄, 今井秀雄: 日常生活文リストを用いた補聴器適用の評価。 *Audiology Japan* 30, 341-432 (1987)