心身障害学研究
1979, 3, 27—34

補聴器がもたらす音の大きさの感覚特性

——高調波歪との関係——

高　橋　信　雄

I　はじめに

現在では，ほとんどの難聴者が補聴器を装用するようになってきた。しかし一方では，補聴器が「うるさすぎる」と訴える者がいる。筆者は，難聴学級などで，補聴器を装用している難聴児の中に，音がきこえた時に痛そうな様子をするのを観察したことがあった。補聴器の装用をいやがる一因として，不快感や痛覚が関係していることは明らかである[5]。一方，健聴者が補聴器を装用した時ですら，ほとんどの人が低レベルの増幅音に対しても煩わしさや不快感や時には痛覚を訴えることが観測された。それゆえ，不快感が感音性難聴に特徴的な「補充現象」のみによって生ずるとはいいがたいと考えた。すなわち，補聴器装用時の不快感が耳の病理学的特性によって助長されるのかを検討する以前に，補聴器自体の持つ特性による影響を検討する必要があると考えた。こうすることによって，不快感という側面から補聴器の装用の研究に対するアプローチの１つの方法を明示し得ると考えた。

上記の観察に基づき，ここでは不快感は，補聴器を装用した時の音の大きさの感覚によるものと仮定した。そして，この感覚特性を明らかにすることにより，不快感をもたらす１つの要因を求め得ると仮定した。そこで，この研究では補聴器を装用した時に，不快感を派生するような音の大きさに関連する特異な特性が補聴器に存在するか否かを明らかにするために，音の大きさに関連する特性を実験的に求めることを試みた。また，もし，特異な音の大きさの感覚が補聴器装用時に存在するならば，何らかの物理的因子が関与しているものと考え，補聴器の物理的特性を検討した。こうした物理的特性としては，周波数特性や非直線歪*や雑音が考えられる。このうち，周波数特性に関して Wallenfels, H.[12] らが，ダイナミックレンジとの関連から論じている。また，雑音に関しては，音の大きさとの関連について寺西[10][7] らが報告している。彼らによれば，雑音レベル以上では音の大きさは雑音のない状態の音の大きさに対応するとされている。一方，非直線歪については，補聴器や Hi-Fi 音響機器で問題とされているにもかかわらず，歪の持つ心理学的影響を含めて，ほとんど研究されていない。わずかに Kasten, R. らの，補聴器の発生する高調波歪と周波数および使用年数と関係を検討した研究[4] や，子音の同定に及ぼす影響についての研究[1] にとどまっている。また，Victoreen, J.[11] は歪が予期しない聴覚的疲労を引き起こすかもしれないと推測しているが，その原因を明確にしていない。

以上のように，補聴器装用時の基本的な特性に関しては不明な点が多い。特に，高調波歪が音の大きさに及ぼす影響については明らかでない。そこで，一定条件下で高調波歪を測定した後，音の大きさの感覚特性と高調波歪の関連を実験的に求めることにより補聴器装用時の音の大きさとの対応について考察を加えることを試みた。

* ここでは，高調波歪を中心に取り上げた。

II　目　的

この研究は

(1)補聴器装用時の音の大きさの感覚特性が裸耳の場合とは異なり，音の大きさの増大が認められるであろうということを実験的に明らかにし，

(2)そうした現象を生ずる物理的一要因として高調波歪をみなすことができるか否かを検討すること

を目的とした。

III　研究方法

1.　音の大きさの感覚特性

(a)　検査音

250 Hz と 1 kHz の純音を用いた。検査音の持続時間は１秒で，0.5秒の休止間隔をおいて右耳と左耳に交互に呈示された。検査音の歪率は，ヘッドホンでは使用した音圧の上限（130 dB SPL）まで0.9%以下，補聴器では入力音の歪率は 100 dB まで１%以下であった。

（b） 手続き

同一側耳に同時に二音源（ヘッドホンと補聴器用小型イヤホン）を装着できないため，検査音は一側耳にヘッドホンからの音（これは裸耳での音の大きさと一致することを検討済みである。以下，標準音と呼ぶ）を一定のレベルで呈示し，他側耳に別のヘッドホンないしは補聴器からの音（以下，比較音と呼ぶ）を任意のレベルで呈示した。実験は継時比較法で行なわれた。被験者は，交互に呈示される標準音と比較音のどちらが，より大きいかを比較判断し，大きくきこえる側のボタンを押すよう教示された。なお，難聴児の中には，視覚教材（丸の大きさ）を用いて検査内容を理解させてから実験を行なったものがいた。検査音は3回まで左右交互に呈示され，その間に判断が求められた。測定は，事前に“同じ位”と判断された値を中心に±5 dB の範囲の刺激音が1dB 単位で各5回ずつ示される恒常法によってなされた。したがって，1標準音圧当り50試行からなる反応が求められた。「大きい」という判断が50％以上になる直前の刺激音の音圧をもって「等しい音の大きさ」の音圧とした。反応があいまいな場合には，さらに数試行実施した。難聴児群において「同じ」という判断をした場合には，上限と下限の中点の音圧とした。上記の手続きは，各被験者の域値から10dB ステップで標準音の音圧を変え，最大出力か被験者が耐えうる範囲までの音圧で繰返しなされた。実験に先立ち，ヘッドホンと補聴器用小型イヤホンで最小可聴域値が測定された。

なお，これらの実験は全て簡易防音室内で行なわれた。

（c） 実験装置

Fig. 1 に実験のブロックダイヤグラムを示した。音源 (Rion AA-34 Audiometer) から出された純音は音源の減衰器で標準音の音圧に設定された後，手製の電子スイッチで整形された。電子スイッチの一方のチャンネル端子からの出力は増幅器を介してヘッドホン(TDH-49) で一側耳に呈示された。もう一方のチャンネル端子は，可変減衰器（菊水 984 B）で出力レベルが制御されてから，他側耳のヘッドホンか防音箱（トリオSM-5000）と接続された。防音箱内におかれた補聴器（D社製）に付属の小型イヤホン (N 68-162) を接続した。使用した補聴器のボリウムは固定し，1 kHz で音響利得が 30 dB になるように設定した。音質特性はN (Fig. 2 周波数特性参照）とし，自動音量調整（AVC）は off とした。

（c） 被験者

両耳の気導聴力損失が 10 dB 以下で，両耳間の差が 10 dB 以内の成人大学生10名と，この条件に適する小学校3年5名を健聴者群および健聴児群とした。さらに，平均聴力損失 60 dB 以上で，1 kHz, 250 Hz での両耳の聴力損失の差が 10 dB 以内で，かつ補聴器を装用している感音性難聴児（小学3年生から6年生）9名を難聴児群とした。

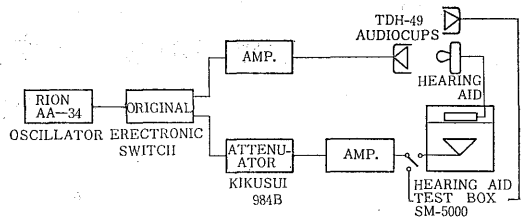

Fig. 1 BLOCK DIAGRAM OF EXPERIMENT

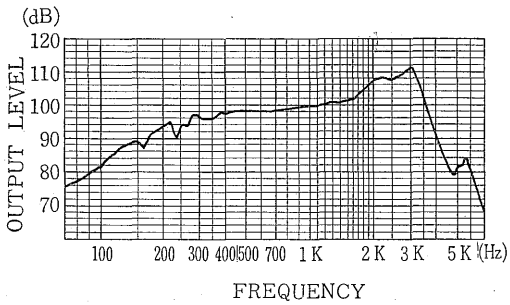

Fig. 2 FREQUENCY RESPONSE CURVE IN HEARING AID; VOLUME 3, TONE N, AVC OFF, NOISE LEVEL 56 dB (SPL).

2. 補聴器の物理的特性

高調波歪が入出力音圧によってどの程度変化するかを測定した。さらに，利得を一定にした時の歪率の変動を求めた。これにより高調波歪の派生と関係する条件を明らかにすることを試みた。

（a） 測定項目

ア）補聴器の入力音圧を一定にした時の出力音の歪率

イ）補聴器の出力音圧を一定にした時の歪率

ウ）補聴器の利得を聴取実験のレベルに設定した時の出力音の歪率

（b） 測定機器および手続

防音箱内に置かれた補聴器のイヤホンに 2cc カプラを結合し，カプラ内のコンデンサマイク (Rion UC-12) を騒音計 (Rion NA-09) と接続して出力音圧が測定された。さらに騒音計の出力端子に歪率計（Hewlett・Packard 334A）を接続し，歪率を測定した。

Tab. 1 THE MEAN AND STANDARD DEVIATION (IN PARENTHESIS) OF EQUAL LOUDNESS LEVEL IN RELATIVE TONE. (N=10 NORMAL ADULTS; 250Hz)

Sensation level	10	20	30	40	50	60	70 (dB)
TDH-49 Headphone (A)	9.93	20.52	31.12	40.27	49.43	59.40	70.61(dB)
	(1.43)	(1.42)	(1.43)	(1.50)	(0.89)	(1.59)	(2.13)
Hearing aid (B)	7.03	16.03	25.03	32.59	40.25	47.47	54.03
	(1.73)	(2.00)	(2.21)	(3.06)	(3.82)	(4.86)	(4.32)
(B−A)	−2.90	−4.49	−6.09	−7.68	−9.18	−11.93	−16.58

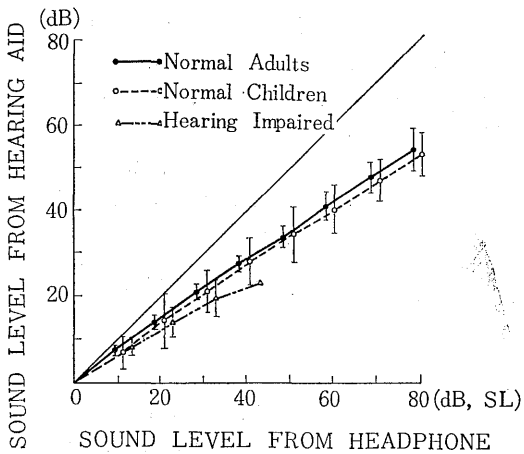

Fig. 3 THE RELATION OF LOUDNESS BETWEEN FROM HEADPHONE AND FROM HEARING AID IN 1kHz PURE TONE.

Tab. 2 LINEAR REGRESSION IN SUBJECTS GROUP.

Subjects	Frequency	Linear regression
Normal Adults	1kHz	$y=0.70x+2.96$
	250Hz	$y=0.78x+4.50$
Normal Children	1kHz	$y=0.68x+2.70$
	250Hz	$y=0.75x-1.71$
Hearing Impaired	1kHz	$y=0.55x+3.00$
	250Hz	$y=0.68x+2.05$

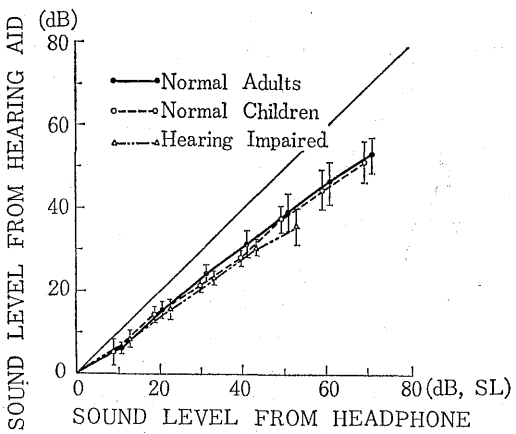

Fig. 4 THE RELATION OF LOUDNESS BETWEEN FROM HEADPHONE AND FROM HEARING AID IN 250Hz PURE TONE.

Ⅳ 結　果

1. 音の大きさの感覚特性

測定値は標準音の各音圧について，ヘッドホンを通した比較音の音圧と補聴器を通した比較音の音圧の差で表わされた (Tab. 1)。こうすることにより，補聴器装用時の音の大きさの感覚特性を同一側耳で測定できた。

聴取実験の結果を Fig. 3 と Fig. 4 に周波数別に示した。図中の横軸はヘッドホンから呈示された標準音と等しい大きさの比較音の域値上の音圧であり，縦軸は標準音と等しい大きさとみなされた補聴器の出力音圧を感覚レベルで示したものである。

標準音と，ヘッドホンや補聴器による比較音の出力音の大きさが同じ場合には $y=x$ の直線で回帰できるはずであるが，実験の結果，ヘッドホン受聴では，回帰直線の傾きが 1±0.15 の範囲にあり標準音の音圧と対応していた。しかし，補聴器を通した場合には，ヘッドホン受聴時とは著しく異っていた。すなわち，1 kHz, 250 Hz いずれの場合にも補聴器ではヘッドホンと等しい音の大きさのレベルは，標準音の音圧をパラメータとして一定の割合で低くなっており，単調減少傾向を示した (Tab. 1)。このように，ヘッドホンからの音の大きさと補聴器からの音の大きさには明らかな差が認められた。

補聴器装用時の音の大きさの感覚特性は Tab. 2 のように近似された。

また，被験者のグループ間には音の大きさの感覚に有意な差は認め得なかった (1 kHz 80dB　健聴者群対健

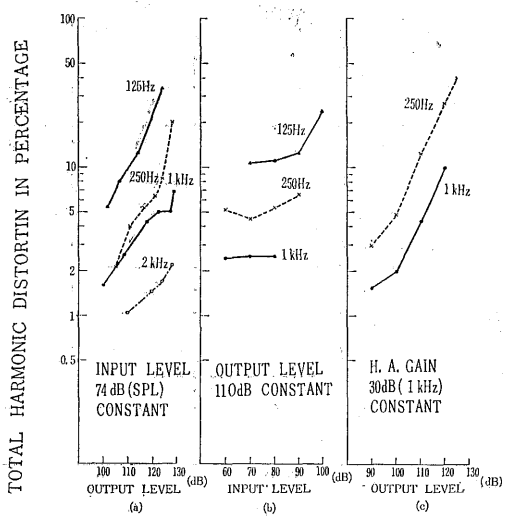

Fig. 5 THE RELATION BETWEEN THE SOUND LEVEL OF THE HEARING AID AND THE HARMONIC DISTORTION.

聴児群 $t=-1.53$, $df=13$, $p>0.05$; 健聴者群対難聴児群 30 dB で $t=0.80$, $df=12$, $p>0.05$; 250 Hz 50 dB で健聴者群対難聴児群 $t=1.08$, $df=12$, $p>0.05$)。

一方，周波数が 1 kHz の時には3群とも 250 Hz の時より音の大きさの増加が大きかった。しかし，健聴者群のみに 30 dB 以上で有意な差 ($t=-3.64$, $df=14$, $p<0.01$) を認めたのみで他は有意ではなかった（難聴児群 20 dB で $t=-1.44$, $df=14$, $p>0.1$)。

2. 補聴器の物理的特性

入力音圧を一定にして，利得を可変にした時の出力音圧と歪率の関係は，出力音圧の増大に伴って，即ち，利得が大きい時程，歪率は大きかった (Fig. 5-a)。出力音圧を一定にして，入力音圧を 60～90 dB (SPL) まで可変にした時には，歪率の変動は，±1 dB の範囲内であり，ほぼ一定であった (Fig. 5-b)。

補聴器の利得を一定にした時の出力音圧と歪率の関係を Fig. 5-c に示した。歪率は，出力音圧の増加と共に，即ち 10 dB の出力音圧の増加に対し 8 dB 程度の割合で増大した。

以上のことから，出力音圧と利得が歪率と関係していることが明らかであった。

また，周波数が高い程，歪率が小さかった。

V 考　察

1. 挿入音の大きさの感覚特性について

実験結果から明らかなように，$y=x$ の直線から下への隔りは，裸耳での音の大きさに相当する補聴器からの出力音圧がヘッドホンの出力音圧よりも小さいことを意味している。すなわち，補聴器からの音の大きさは呈示音圧の強さに比例して増大した。これは「補充現象」に相当する感覚特性を示していると考えられる。一方，この現象は，ヘッドホンを通して比較音を呈示した時には観察されないので，ヘッドホンによっては音の大きさの増加はもたらされていないと考えられる。よって，この現象は，補聴器の側に裸耳（ないしはヘッドホン）の場合に比べて音の大きさの感覚を著しく増大させるような特性が存在しているために生じた現象と解釈できた。このように補聴器を通してきく日常会話は，我々が裸耳で感ずる音の大きさの感覚と異なり，急激に音の大きさが増大することが示された。

以下，音の大きさの感覚特性の派生原因に関与すると考えられる補聴器の物理的特性について考察を加える。

2. 補聴器の物理的特性

実験の開始に先立って，入出力音圧特性を測定した結果，出力音圧はヘッドホンで 130 dB (SPL)，イヤホン（補聴器）で 125 dB (SPL) まで，±0.5 dB の範囲で入力音圧とリニアに対応していた。

補聴器の歪率（高調波歪成分）は，出力音圧に比例して増大することが確かめられ，Kasten, R. N.[4] らの結果と一致した。また，周波数が低い程，歪率が大きいことも明らかとなった。歪率は，補聴器の音響利得を変化させた時が一番大きかったこと，および，出力音圧に比例することから，利得と出力音圧によって規定し得ると考えられた。

一般的には，補聴器の利得は固定して使用するので，問題を項目(3)の出力音圧の観点からのみに限定した。結果は既に述べた通りであるが，補聴器の出力音の歪率は，通常のオーディオ増幅器に比較すると大きく，出力音圧が増大するにつれて，ヘッドホンと補聴器の出力音の歪率の差が大きくなっていった（ヘッドホンから呈示された標準音の歪率は，130 dB (SPL) まで 1 %以下であった)。

歪率と音の大きさの増加の相互関係を検討するために，難聴児群の測定値を全て音圧レベル (SPL) で測定し直し，横軸に音の大きさの増大分を，縦軸にその時の出力音の歪率をとり，Fig. 6 に示した。測定した二周波数とも音の大きさの増加と歪率の比は，ほぼ一定であった。Fig. 6 の視察により，歪率と音の大きさの増大の間には相関があるとみなし得た。上記のことは，高調波歪が音の大きさの増加に関与している可能性を示唆する。しか

Tab. 3 THE RELATION BETWEEN HARMONIC DISTORTION AND LOUDNESS ENHANCEMENT IN EACH FREQUENCY.

	1kHz		250Hz
Harmonic distortion	low	<	high
Loudness enhancement	great	>	small

し，Tab. 3 に示したように，補聴器の歪は 1 kHz の方が 250 Hz に比べてその絶対値が小さいにもかかわらず，音の大きさの増加は 1 kHz の方が大きいという矛盾が起こる。したがって，補聴器装用時の音の大きさの増大が高調波歪のみによって派生しているとはいいがたい。高調波歪以外に音の大きさの増大をもたらす要因としては，ノイズが考えられる。今回用いた補聴器のノイズレベルは 56 dB (SPL) であるので，それ以下のレベルでの大きさの増大は認められるが，ノイズレベル以上では，ほぼ裸耳に対応してくるといわれている (Richards, A. M.[7])。したがって 60 dB (ノイズレベル) 以上では音の大きさの感覚特性の直線の傾きが 1 になってくることが予想される。実際には標準音の音圧が強い程音の大きさの増加が著しく，上述の従来の知見とは一致しなかった。

他に，音の大きさをもたらす要因として，伝達の様式の違いという問題が考えられる。つまり，ヘッドホンは耳介に密着して音を伝えるが，補聴器のイヤホンは外耳道に挿入して音を伝えるというように，伝達の様式にも違いがある。測定に先立ち，イヤホンの電気音響的特性を検討したところ，1 kHz, 250 Hz とも 125 dB (SPL) まで入出力特性はリニアであり，また低出力インピーダンスの手製の増幅器と補聴器用小型イヤホンを直結した時のイヤホンの出力音の歪率は 125dB (SPL) で 1 % 以下であった。よって，イヤホン自体には問題はないと考えた。

そこで，次に伝達様式上の問題の有無について検討を加えた。すなわち，もしイヤホンによる音の伝達様式とヘッドホンによるそれとの間に，音の大きさの感覚の増大を生ずるような問題がないならば，両者の出力音の歪率を同程度にした時には，音の大きさの感覚は対応するはずである。逆に歪率が異っている場合には，音の大きさの感覚にも差が生ずるはずである。そこで Fig. 1 の (防音箱—補聴器) の代わりに低歪率のダイナミックレンジの大きい増幅器にイヤホンを直結することにより，歪率を 1 % 以下におさえ，聴取実験の測定系の一部を変更して音の大きさの平衡検査を行なった。ここでの音響

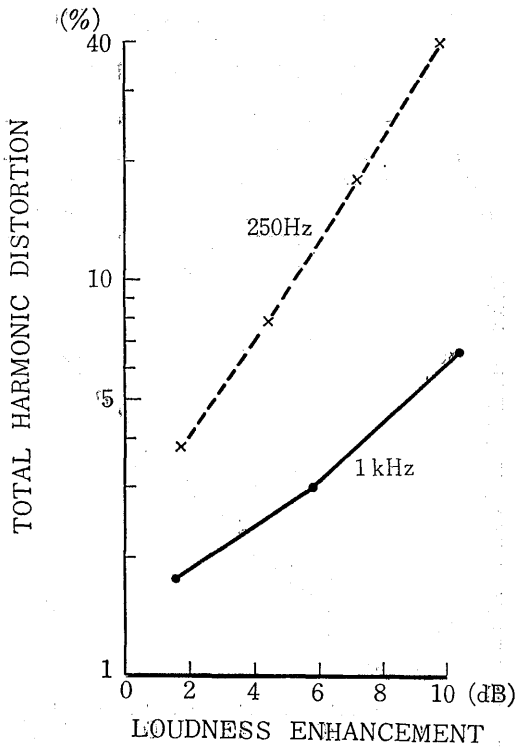

Fig. 6 THE RELATION BETWEEN THE DISTORTION AND THE LOUDNESS ENHANCEMENT IN HEARING IMPAIRED CHILDREN.
•——•; 1kHz ×……×; 250Hz

物理的変化は歪率が 1 % 以下であることとノイズが域値以下になったことである。実験の結果は Fig. 7 に示された。明らかにヘッドホンの音の大きさとイヤホンの音の大きさは一致していた。これは難聴児でも全く同じであった。

次に，ヘッドホンとイヤホンでは，音響変換の精度に差があることを利用して，矩型波を入力として用いることによって，イヤホンの歪率が Tab. 4 のようになる測定系で音の大きさの平衡検査をした結果を Fig. 8 に示した。図より，歪率の大きな音は，歪率の小さな音よりも音の大きさが増大することが明らかとなった。以上のことから，伝達様式上の問題点はないものと推察された。

さらに，上述の結果から，同じイヤホンでも歪率の違いによって音の大きさが変わることも実証された。したがって，補聴器が発生する高調波歪も，実質的に音の大きさに影響を及ぼしていることが検証できた。

よって，補聴器装用時の音の大きさの感覚特性の一部は，補聴器の出力音に派生する高調波歪によって左右さ

Tab. 4 HARMONIC DISTORTION ON H. A. EARPHONE AND HEADPHONE IN SQUARE WAVE INPUT.

	1kHz	250Hz
H. A. earphone	38%	20%
Headphone	44%	26%

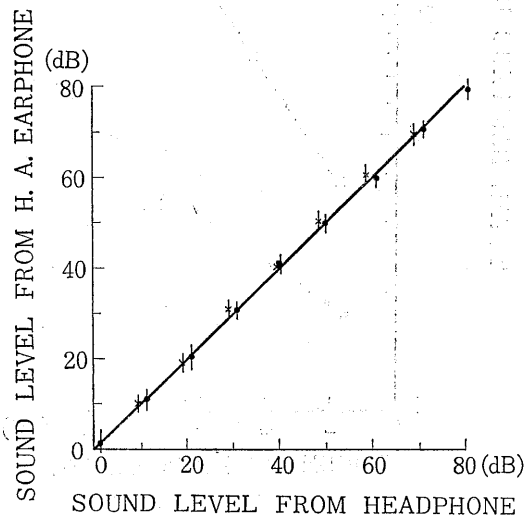

Fig. 7 THE LOUDNESS OF THE LOW DISTORTED TONE BETWEEN THE HEADPHONE AND THE EARPHONE IN NORMAL ADULTS.
•; 1kHz x; 250Hz

れると考え得た。

しかし，周波数による差や，被験者から内省報告のあった音質の違いなどの要因については，今後さらに検討する必要がある。

VI 終わりに

補聴器を装用している時の不快感に関連する音の大きさの側面から，補聴器装用にアプローチした。この研究では，補聴器のもたらす感覚特性と物理的特性との対応を検討することにより，補聴器に音の大きさの感覚を特異なものにする特性が存在するか否かを明らかにした。そのため，一側耳に標準音を他側耳にヘッドホンか補聴器からの比較音を呈示する両耳の音の大きさの平衡検査を行ない，両比較音の音圧を比較検討した。その結果補聴器では，裸耳の場合の音の大きさの感覚よりも大きな音の大きさの感覚を生ずることが判明した。このことから，補聴器装用時の音の大きさの感覚量の増加は，耳の

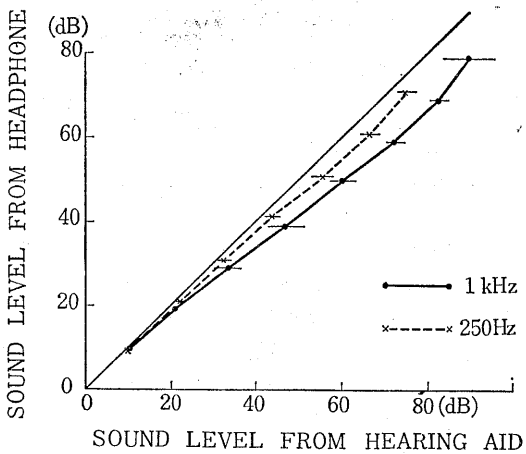

Fig. 8 THE LOUDNESS BETWEEN THE H. A. WITH HIGH DISTORTED TONE AND THE HEADPHONE WITH HIGHER DISTORTED TONE.

有する病理学的特性とは別に，一部は補聴器自体の特性によるとみなし得た。検査音を語音にした場合や実験に使用した以外の他の二機種の補聴器（R社製，S社製）でも同様の結果が得られたことから，現在の補聴器の一般的特性と見なし得よう。よって補聴器装用時には「補充現象」に似た音の大きさの感覚特性がもたらされることが実験的に証明された。それゆえ，補聴器の装用に際しては，独特な音の大きさの感覚特性によって不快感が助長される可能性があることを留意する必要があろう。

一方，補聴器の高調波歪が出力音圧の増加に比例して増大することより，音の大きさとの間に相関関係を見い出し得た。また，低歪率の増幅器にヘッドホンとイヤホンを各々結合し，入力として歪率の大きな矩型波を入れて音の大きさの平衡検査をした結果，既に述べた結果と同じく歪率の大きい音に大きさの感覚量の増加が認められた。しかも，純音を入力とした時には，両者の音の大きさは一致した。このことから，伝達様式上の問題によって音の大きさがもたらされたのではなく，むしろ高調波歪が音の大きさに関与していると考えられた。

こうした一連の実験結果から，補聴器には出力音圧が増大しても歪率を小さく押えることのできる性能を備えることが，今後，必要となろう。

なお，今回の実験では高調波歪の派生原因は明らかにできなかった。

今後，音の大きさに影響すると考えられる音の立ち上がりや音質の違いや，混変調歪などを厳密に統制した上で，さらに検討を要するであろう。

謝　辞

この研究を進めるにあたり，貴重な時間を都合つけて下さいました東京都北区赤羽小学校難聴学級の諸先生方，神奈川県平塚市立崇善小学校の諸先生方，および，被験者の皆さんに感謝します。

文　献

1) Bode, D. L. & Kasten, R. N.: Hearing aid distortion and consonant identification. J. Speech & Hearing Reseach 14, 323-331 (1971)
2) Castle, W. E. (ed.): A conference on hearing aid evaluation procedure. ASHA Reports 2. Washington, D. C. American Speech and Hearing Association (1967)
3) Chial, M. R. & Hayes, C. S.: Hearing aid evaluation methods; some underlying assumption. J. Speech & Hearing Disorder 39, 270-279 (1974)
4) Kasten, R. N. & Lotterman, S. H.: A longitudinal examination of harmonic distortion in hearing aids. J. S. H. R. 10, 777-781 (1967)
5) 切替一郎：聴覚検査法　医学書院 (1974)
6) Lotterman, S. H. & Kasten, R. N.: Nonlinear distortion in modern hearing aids. J. S. H. R. 10, 586-592 (1967)
7) Richards, A. M.: Loudness growth under masking; relation to true sensorineural impairment. J. S. H. R. 16, 597-607 (1973)
8) 須藤貢明：聴能訓練器の特性に関する研究(I) ―語音の物理的要素とイントネーションの知覚―　特殊教育学研究 11, 43-49 (1973)
9) 高橋信雄：補聴器適合に関する実験的研究　東京教育大学修士論文 (1975)
10) 寺西立年：音の大きさに関する研究―最小可聴値について―　電子総合研究所報告　685号 (1965)
11) Victoreen, J.: Hearing enhancement. Thomas, 66-70, 70-103 (1964)
12) Wallenfels, H.: Hearing aids on prescription. Thomas (1972)

Summary

Loudness Enhancement in Hearing Aids; Relation to Harmonic Distortion

Nobuo Takahashi

Many audiologists and clinicans have reported that they had a number of cases who came to reject the use of their hearing aids. It may be assumed that loudness of the tone amplified by a hearing aid should be increase radically. However, there was few experimental study on enhancement in loudness that was produced by hearing aids. This study attempted to investigate the loudness of sounds increased by portable amplification, in relation to electro-acoustic characteristics, harmonic distortion.

Ten normal adults, five normal children and nine sensorineural hearing impaired children were employed as subjects. They were required to balance the variable tone presented by an earphone (TDH-49) or a small earphone for the hearing aids against a reference tone by TDH-49 earphone. Stimulus tone was 1kHz and 250Hz pure tone. Additionally, under three conditions (constant input, constant output and constant gain in the hearing aid), harmonic distortion was measured.

Result; (1) Loudness in aided ear had been more increased lineally than in the ear amounted to TDH-49 earphone according to the output sound level.

(2) It was found that harmonic distortion were increased under everyday setting of aid.

Therefore, the loudness enhancement in hearing aids was thouht to be attributed not to pathological charactristics, but to amplification itself. Then, wearing a hearing aid, we should keep a fact in mind that loudness growth was partially introduced by harmonic distortion, and so the hearing impaired came to easily reach to uncomfortable loudness level.