補聴器の明瞭度とうるささ

涌井 慎哉・久保 富隆*・斎藤 等*

The Clarity and Noisiness of Sound with a Hearing Aid

Shinya Wakui

(Wakui ENT Clinic)

Tomitaka Kubo and Hitoshi Saito

(Fukui Medical School)

It is often said that with a hearing aid, sound is noisy and unclear but the cause of this is uncertain. Examinations of hearing aids are performed using continuous sine wave, i.e. pure tone. Daily sounds are, however, full of transient changes and quite different from pure tone. In this study, we used some special signals such as impulse, square wave, and single sine wave to examine hearing aids and found that the resonance of the receiver is the main cause of noisiness and lack of clarity. We also found that the higher the resonant frequency, the clearer and less noisy the sound of the hearing aid becomes. The fact that a high-definition hearing aid, which has a receiver with a resonant frequency above the audible range, makes it possible to obtain both clarity and lack of noisiness at high levels suggests that improvement of the receiver is most important in the development and study of hearing aids.

Key words: hearing aid, clarity, noisiness, resonance, high-definition hearing aid

はじめに

補聴器のフィッティングの基本は、補聴器装用により言葉が明瞭に聴き取れるように十分な利得を各周波数に対して持たせることである。しかしながら難聴者ではリクルートメント現象に見られるように聴覚のダイナミックレンジが狭くなっていることが多いため、先ほどの方針に従って利得を充分大きくするとレベルの高い雑音などが狭くなったダイナミックレンジの上限（不快閾値）を越えてやかましくなってしまう。そこで明瞭度とやかましさを両立させるた

めに種々の対策が講じられてきた。これらの対策の基本的な考え方は難聴者の狭くなったダイナミックレンジを越えるような大きな出力を補聴器から出さないようにするというものである。そしてそのようなことを可能にすべくさまざまな信号処理の試みがなされてきた。それらの動作の理論からは確かにほとんどの音が難聴者のダイナミックレンジ内に収まるはずであるように思える。しかしながら現実には思ったほどの効果は得られていない。これは補聴器の現実の動作が期待されたようにはなっていないため

わくい耳鼻科（箕面市）

* 福井医科大学耳鼻咽喉科学教室

はないかと考えられる。従来、補聴器の出力の波形については入力と相似となっているはずであるという楽観的な前提があり、この前提をもとに多くの研究、開発が進められてきた。今回この前提が妥当なものであるかどうかを検討し、補聴器の不明瞭さやうるささの原因について考察を加えた。

実験1：補聴器の応答波形

補聴器に入力した信号の波形がイヤホンから出力されるときに、どのような波形になっているかを調べるために以下の実験を行った。

〈方 法〉

1. 入力信号として、400 Hz 方波形、5000 Hz 半波（極性交互、1 msec 毎）、1 kHz 単発サイン波¹⁾²⁾を用いた。

2. 上記の信号をオシレータから発生させ、増幅器を通して全帯域静電型スピーカーから出力させた。

3. 実験に用いた補聴器は、通常補聴器として RION の HA-33（イヤホンは RK-63B）および静電型イヤホンを使用してわれわれが試作した、高品位補聴器^{3)~6)}と名付けたものを使用した。

4. それぞれの補聴器はそのマイクロホンがスピーカー正面軸上 10 cm に位置するようにした。その位置におけるスピーカーからの音圧の較正は各信号の波形のピーク値が 70 dB 純音のピーク値と等しくなるようにした。較正をピーク値で行った理由は、通常の実効レベルで較正を行うと信号によってはピーク値が大きくなりすぎて実験に用いた静電型スピーカーを破損させるためである。

5. カプラーの波形に対する影響を除外するため、補聴器の出力はカプラーなしで測定用マイクロホンに入力した。

〈結 果〉(図1)

出力波形の図における横軸（時間軸）は波形観察がしやすいように信号の種類ごとに変えている。通常補聴器の場合、一見して入力に対する出力の波形は大きく崩れて元の波形とは決して同じような形にはなっていないことがわかる。このことから先ほどの前提、すなわち「補聴器から出力される信号は入力された信号と波形的に同等のものであろう」という考えは決して正しいものではなく、補聴器の入出力の波形が実は相似になっていないことが明らかになった。

図1 入力信号と出力信号の比較

一方、高品位補聴器では若干の波形の乱れはあるものの入力された波形とほぼ相似形の出力波形となっており、通常の補聴器と忠実度において大きな差異があることがわかった。

実験 2：共振現象

実験 1 における補聴器の応答波形の乱れの原

因を、より詳細に調べるために次の実験を行った。

〈方 法〉

1. 1 kHz から 20 kHz までの各周波数の連続サイン波(純音)および単発サイン波をスピーカーから出力させた(原波形)。連続サイン波

図 2 連続サイン波と単発サイン波に対する応答

の出力レベルは正面軸上 10 cm の位置で 70 dBSPL になるようにし、単発サイン波のレベルはそのピーク値が連続サイン波のものと同一になるようにした。

2. 補聴器 (RION HB-90AO) のマイクロホンをスピーカー正面軸上 10 cm に置いた。補聴器の出力は 2 cc カプラーを介して測定用マイクロホンに入力し (応答波形)、利得調整器の位置については 1 kHz において 20 dB の利得となる位置に固定した。

〈結果および考察〉 (図 2)

定常的な波形である連続サイン波に対しては波形の乱れはほとんどない。このような測定結果をみて補聴器の入力に対する反応は何ら問題がないとメーカーも研究者も考えていたのである。しかしながら単発サイン波のような過渡的变化を持つ波形に対しては、実験 1 の結果と同様に、応答波形が乱れていることがわかった。ここで単発サイン波に対する応答を検討すると、次のような問題点が明らかになった。すなわち入力なくなった後も出力が尾を引いて長く残るといふ点、ある周波数 (この例では 3 kHz) 以上の入力に対しては出力の周波数は変化せず一定の周波数となる点、連続サイン波では応答のないような高い周波数の単発サイン波の入力に対して大きな出力がみられる点などであった。これらの現象から補聴器にとって単発サイン波はインパルス様信号として作用していると推測され、これらの応答は音響的な自由振動 (共振) を起こした結果であると考えられた。

一般的に共振があると次のような現象を生ずる。

- 1) 出力には共振周波数以上の周波数の成分がほとんど生じないため共振周波数以上の成分を多く持つような複雑な入力信号には正確に応答できない。
- 2) インパルスの入力信号は共振周波数の強い出力を引き起こすことにより入力信号の周波数スペクトルを共振周波数に鋭い山を持つ形に変化させる。

1) から補聴器が正確に応答できる (有用な) 周波数範囲は、たかだかその共振周波数までであることが推測される。補聴器の明瞭度を向上させるためには複雑な信号に対する応答の正確さが重要であるので、より良い明瞭度を得るためには有用な周波数範囲を広げることすなわち共振周波数を高くする必要があると考えられる。

2) からはさまざまな音が補聴器を通すことによりその音の周波数スペクトルが変化して補聴器独特の音色となることがわかる。そして周波数スペクトル上の鋭い山を生ずることは、それが可聴帯域にある場合その周波数のエネルギーが強くなるため、補聴器の音のやかましさを生ずる原因の一つになり得ると考えられる。この山の位置は共振周波数によって変化するので、共振周波数の違いによって補聴器の音のやかましさも変わってくると考えられる。

実験 3 : 聴感との相関

ここで実際に、イヤホンの共振周波数の違いが明瞭度ややかましさにどのように影響しているかを調べてみた。

〈方 法〉

1. 被験者は正常聴力者 10 名、感音難聴者 14 名 (老人性、高音漸傾型、平均聴力レベルが 4 分法で 55.1 dBHL) である。

2. 検査音として、語音 (67 式語音テープ) および DAT に自己録音した現実音 (紙を丸める音など) を使用した。

3. 実験に用いた補聴器は①RION HA-33 (RK-61B), ②RION HA-33 (RK-63B), ③SONY TE-ST7, ④高品位補聴器^{3)~6)}である。

4. それぞれの補聴器の共振周波数は単発サイン波応答¹⁾²⁾の波形分析およびインパルス応答の周波数分析により測定した。周波数分析には高速フーリエ変換 (FFT : fast fourier transform) を用いた。

5. 防音室内で検査音をスピーカー (STAX ELS-83X limited) より出し、スピーカー正面軸上 10 cm の位置に補聴器のマイクロホンを設置して防音室外の被験者に聴取させた。

6. 検査音は増幅器と抵抗組み合わせ型パッシブアッテネータを組み合わせるレベルを細かく調整できるようにし、現実音についてはその平均のレベルが語音テープの 0 dB 基準レベル信号のレベルと揃えるように調整した。

7. 補聴器の利得調整器は 1 kHz において 20 dB の利得となるように固定し、スピーカーからの出力レベルを変化させることにより被験者の聴取レベルを調整した。

8. スピーカーの入出力特性については正面軸上 10 cm において 0 dBSPL から 110 dBSPL の出力まで直線性が保たれていることを確認した。

9. 補聴器の入出力特性についても入力 0 dBSPL から 110 dBSPL まで出力の直線性が保たれていることを確認した。

10. 語音明瞭度試験に準じて語音明瞭度曲線を得た。そしてその明瞭度曲線において最大語音明瞭度にいたるスピーカー出力の最低レベルを L_{min} とした。このレベルは語音についてはほぼ満足できる明瞭度を得られる最小入力レベルであるので、実用最小入力レベルと考えられる。

11. 現実音についても同様にレベルを変化(上昇法)させ、やかましくて我慢できなくなるスピーカーからの出力レベル (L) を求めた。 L 以上のレベルの入力に対する出力の音はやかましくて聴いていられないので、 L は実用最大入力レベルと考えられる。

12. 補聴器を使用した場合、入力が L_{min} 以下のレベルでは明瞭度が不足し、 L 以上のレベルではやかましくて聴いていられない。したがって、実用となる入力の音圧レベルの範囲は実用最小レベルから実用最大レベルまで、すなわち L_{min} から L までとなる。ここで ($L-L_{min}$) の値を実用ダイナミックレンジと呼ぶことにする。この値はその補聴器を使用して会話音を満足な明瞭度で聴取できる利得にしたときに、どのくらい大きな入力レベルの雑音まで我慢できるかを示している。すなわちその補聴器の実使用時におけるやかましさを指標となり得ると考

えられる。

13. 補聴器による明瞭度の比較の指標として、それぞれの補聴器で得られた最大語音明瞭度(%)を使用した。これはその補聴器がもたらし得る最大の語音明瞭度と考えられる。

14. 補聴器によるやかましさを比較の指標として、それぞれの補聴器で求められた実用ダイナミックレンジを使用した。

〈結果〉(図3)

明瞭度についてみると、予想したように共振周波数の高いものの方が明瞭度が上がる傾向があることが示された。それぞれの補聴器で最大語音明瞭度を得た出力音圧については、補聴器の周波数特性がそれぞれ異なるため正確に比較することはできないが、1 kHz の利得でみる限り補聴器によってほとんど差は認められなかった。

次に実用ダイナミックレンジについてみてみると、明らかに共振周波数が高いものの方が良好な結果を示した。中でも共振周波数が 3.8 kHz と 8 kHz との間には有意な差がみられた。これは難聴者群では高音漸減型のため、3.8 kHz と 8 kHz の間で閾値差が大きく、8 kHz の聴力がほとんどないような被験者では、③や④の補聴器において、やかましくて我慢できないレベル (L) が非常に高くなったことによると

図3 共振周波数の違いによる明瞭度とやかましさを比べる

考えられる。補聴器の出力のスペクトルが共振周波数の山を持つことから、共振周波数がある人の可聴帯域外にあればやかましさをほとんど感じないのではないかと予想されたが、今回の実験の結果はそのことの一つの実証となったといえる。

補聴器の明瞭度とやかましさをいかに両立の程度を示す指標は種々のものが考えられる。補聴器の実使用時のことを考えると、補聴器を使用できる最大レベルであるL（我慢の限界）と十分な語音明瞭度が得られる最低レベルLmin との間がどれほどとれるかということが重要である。これは今回使用した実用ダイナミックレンジそのものであり、この指標が明瞭度とやかましくないこととの両立の程度を良く示していると考えられる。

考 按

以前より補聴器の明瞭度改善、うるささ軽減をめざした種々の対策が考案されている。不明瞭さに対しては信号処理による音圧的、時間的コントラストの強調の試みがされているが十分な効果はでていない。またやかましさについては種々の出力コントロールの試みがされている⁴⁾⁷⁾。これらの対策の基本的な考え方は難聴者の狭くなったダイナミックレンジを越えるような大きな出力を補聴器から出さないようにするというものである。そのほとんどは電気的な信号処理を主体にしたものであって、なかにはデジタル技術を駆使して非常に細かく周波数帯域を分割してそれぞれのダイナミックレンジを難聴者のダイナミックレンジに合わせてコントロールするといったものまで現れている^{8)~10)}。しかしながらやはり思ったほどの効果は得られていないのが現状である。このように従来の音質対策がうまくいっていない原因の一つは、このねらいを実現させるための手段が信号処理でしかなかったということであろう。機械的な問題点を解決しないままいくら信号処理に力を注いでも、作り出された信号自体が実際に出力されるときには波形的にも周波数スベ

クトル的にも期待された信号とは全く異なったものとなっていたのである。これでは何のために帯域毎のきめ細かなコントロールをしたのかわからない。

このような現象を起こす大きな原因の一つに機械的共振があげられる。これを解決することが重要な課題である。この機械的な共振を電気的に補正することは可能であろうか。結論的には現実的には非常に困難であると言わざるを得ない。まずインパルスに対して共振周波数以上の出力スペクトルを持たせることは物理的に不可能である。また共振の鋭さをコントロールすることも困難である。本格的に対策を行うとすると、イヤホンの振動板に対する駆動能力を上げて共振を抑え込むことになるだろうが、方法としてはアンプの電源インピーダンスを低くし、位相特性を優秀なものにし¹¹⁾、内部抵抗を低くし（あるいは負性インピーダンス駆動）、あるいは振動板をフィードバック回路に取り入れるなどコストのかかる大がかりなものになってしまう。しかもそれが成功するかどうかは保証されていない。一方簡単な電気的処理で共振のうるさを抑えようとするとイヤホンの共振周波数付近から上の帯域を鋭くカットする必要がある。例えば共振周波数が 2.5 kHz の場合では 2 kHz あたりより上は出さないというようなことになる。このようにすれば共振周波数の出力はほとんど出てこなくなるのでうるさはかなり抑えられるであろう。しかしそのようなことをすれば明瞭度が悪くなってしまうのは明らかである。補聴器の音のうるさを解決しようとする場合、もし補聴器の共振周波数が低いままであると、たとえうるさは減少したとしても明瞭度との両立は非常に困難であるということである。現実問題としてこれらの問題を解決する道としては補聴器の共振周波数自体を上げるしかない。実際、共振周波数を上げた（可聴帯域外）イヤホン（静電型）を使用して試作された高品位補聴器（図 2, 3）では、特殊な信号処理を全くしていないにもかかわらず明瞭度とやかまし

のないこととの両立がかなりのレベルで実現できた^{3)~5)}。イヤホンの改良だけでそのような成果をあげられることを考えると、複雑な信号処理に頼る前にまだまだ基本的になすべきことがありそうである。具体的に今後の補聴器の性能向上を考えると、確かにマイクロホン、アンプにも問題はある。しかしながら何にもましてイヤホンが最大の問題である。それはいまだに前時代的なマグネチック型が主流であって、その性能的限界は非常に低い。これを何とかしない限り今後のあらゆる研究開発の努力が砂上の楼閣となる恐れがある。今後の課題として、より正確な波形再現の可能な上質のイヤホンの開発を期待するものである。

まとめ

1. 補聴器の入出力波形を検討し、出力の波形がイヤホンの周波数特性の問題により決して入力と相似にはならないことを確認した。

2. 単発サイン波による測定を行い従来の連続サイン波による測定では明らかにすることのできなかった補聴器の共振の問題を指摘した。

3. 補聴器の共振が補聴器の音の不明瞭さとやかましさの原因になっていると考え、その共振の周波数が実際の音の不明瞭さとやかましさにどのような関係を持っているかを検討した。

4. 明瞭度については共振周波数が高いものほど明瞭度が改善される傾向を認めた。これは補聴器の出力信号が入力の情報により正確になるためであると考えられた。

5. やかましさについては共振周波数が高いものほどやかましさが減少することが認められた。これは補聴器の出力の周波数スペクトルが共振周波数中心のピークを持つものになるためピークの周波数が聴覚の感度の低い周波数に移動するためであると考えられた。

6. 機械的共振は電気処理によっては解決困難であり、補聴器の音質上の問題点を解決する手段としては共振周波数を上げることが最も有効であると思われた。

7. 共振を解決しないままではさまざまな信

号処理の研究が無意味なものになる危惧があり、現在使用されているイヤホンの早急の改良が望まれる。

なお、本論文の要旨は、第36回日本オーディオロジー学会、第21回国際オーディオロジー学会で口演した。

文 献

- 1) 久保富隆, 涌井慎哉, 斎藤 等: 補聴器の単発サイン波応答 —補聴器の重大な問題点—. *Audiology Japan* **34**: 357~358, 1991.
- 2) 涌井慎哉, 久保富隆, 斎藤 等: 補聴器の単発サイン波応答 —聴感との相関—. *Audiology Japan* **34**: 359~360, 1991.
- 3) 涌井慎哉, 斎藤武久, 斎藤 等: 高品位補聴器の臨床的有用性に関する検討. *Audiology Japan* **31**: 291~292, 1988.
- 4) 涌井慎哉, 久保富隆, 鹿野佳子, 他: 高品位補聴器の臨床的有用性に関する検討 (第2報) —歪率の実測および周波数特性の適合に関する実験—. *Audiology Japan* **32**: 309~310, 1989.
- 5) 涌井慎哉, 久保富隆, 斎藤 等: 低歪補聴器による快適な補聴効果. *Otology Japan* **1**: 173, 1991.
- 6) 涌井慎哉, 久保富隆, 斎藤 等: 高品位補聴器の臨床的有用性に関する検討 (第3報) —ダイナミックレンジコンプレッションの効果についての検討—. *Audiology Japan* **33**: 673~674, 1990.
- 7) 大和田健次郎: エキスパンダ増幅補聴器の試作. *Audiology Japan* **34**: 343~344, 1991.
- 8) 浅野 太, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 他: ラウドネス写像型デジタル補聴器の試作 (その1). *Audiology Japan* **33**: 164~165, 1990.
- 9) 大山健二, 矢畑誠治, 佐竹充章, 他: ラウドネス写像型デジタル補聴器の臨床応用 (第一報). *Audiology Japan* **33**: 166~167, 1990.
- 10) 矢畑誠治, 浅野 太, 大山健二, 他: ラウドネス写像型デジタル補聴器の臨床応用 (第二報). *Audiology Japan* **34**: 339~340, 1991.
- 11) 小関芳宏: 補聴器の高品位化への試み. *Audiology Japan* **34**: 341~342, 1991.

別刷請求先: 涌井慎哉
〒562 箕面市小野原東5-8-6
パーキー K 1 階
わくい耳鼻科