

13. Akeroyd MA. The across frequency independence of equalization of interaural time delay in the equalization cancellation model of binaural unmasking. J Acoust Soc Am. 2004;116;1135-48.
14. Edmonds BA, Culling JF. The spatial unmasking of speech: evidence for within-channel processing of interaural time delay. J Acoust Soc Am. 2005;117;3069-78.
15. Shinn-Cunningham B, Ihlefeld A, Satyavarta, Larson E. Bottom-up and Top-down Influences on Spatial Unmasking. Acta Acustica united with Acustica. 2005;91;967-79.
16. Simon H, Levitt H. Effect of dual sensory loss on auditory localization: Implications for intervention. Trends Amplif. 2007;11; 259-72.
17. Jespersen CT. Independent study identifies a method for evaluating hearing instrument sound quality. Hear Rev. 2014; 21(3); 36-40.
18. Groth J, Laureyns M, Piskosz M. Double-blind study indicates sound quality preference for surround sound processor. Hearing Review. 2010; 17(3);36-41.
19. Bentler RA. Effectiveness of directional microphones and noise reduction schemes in hearing aids: a systematic review of the evidence. Journal of the American Academy of Audiology. 2005; 16:473-484.
20. Kryter K. Methods of calculation and use of the articulation index. J Acoust Soc Am. 1962; 34:1689-1697.
21. Moeller K, Jespersen C. The Effect of Bandsplit Directionality on Speech Recognition and Noise Perception. Hearing Review Products. June 2013;8-10.
22. Magnusson L, Claesson A, Persson M, Tengstrand T. Speech recognition in noise using bilateral open fit hearing aids: the limited benefit of directional microphones and noise reduction. International Journal of Audiology. 2013; 52(1): 29-36.
23. Valente M, Mispagel KM. Unaided and aided performance with a directional open-fit hearing aid. International Journal of Audiology. 2008; 47:329-336.
24. Bentler RA, Wu Y, Jeon J. Effectiveness of directional technology in open canal hearing instruments. The Hearing Journal. 2006; 59(11): 40,42, 44, 46-47.
25. Dittberner A, Ma C, Gran F. Binaural directivity patterns of binaural hearing and implications on hearing prosthetic design. Presentation at American Auditory Society Scientific & Technology Meeting, Scottsdale, AZ, March 5-7, 2015.
26. Shinn-Cunningham BG, Best V. Selective attention in normal and impaired hearing. Trends Amplif. 2008; 12(4): 283-299.
27. Orton JF, Preves D. Localization as a function of hearing aid microphone placement. Hearing Instruments. 1979; 30(1); 18-21.
28. Westerman S, Topholm J. Comparing BTEs and ITEs for localizing speech. Hearing Instruments. 1985; 36(2); 20-24.
29. Udesen J, Piechowiak T, Gran F, Dittberner A. Degradation of spatial sound by the hearing aid. Proceedings of ISAAR 2013: Auditory Plasticity – Listening with the Brain. 4th symposium on auditory and Audiological Research. August 2013, Nyborg, Denmark. Dau T, Santurette S, Dalsgaard JC, Tanebjerg L, Andersen T, Poulsen T eds.
30. Kollmeier B, Peissig J, Hovmann V. Real-time multi-band dynamic range compression and noise reduction for binaural hearing aids. Journal of Rehabilitation Research and Development. 1993; 30(1): 82-94.

GNヒアリングジャパン株式会社

〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-6-3 MMパークビル8F

☎0120-921-310 www.resound.com

CVR no. 55082715

© 2017 GN Hearing A/S. 無断複写・転載禁止。Apple、Apple ロゴ、iPhone、iPad、iPod、iPod touch は、米国および他の国々で登録された Apple Inc. の商標です。iPhone商標は、アイホン株式会社のライセンスに基づき使用されています。Android は Google Inc. の商標です。Bluetooth は Bluetooth SIG, Inc. の登録商標です。



MKD0985 LT 11 1705A-17055500

ReSound GN

両耳連動指向性Ⅲ： 自然な聴覚処理を支える指向性

ジェニファー グロス, MA

概要

私たちは、左右それぞれの耳に届く様々な音の相違点と類似点を使って、環境音を自在に増強または抑制し、音の間で、自身の注意を容易に移動させることができる。特定の瞬間に関心のある音が何であるかに応じて、人間は生来、様々な聴取方法を使用して、環境認識に依存する方法と耳に依存する方法の間で無意識に切り替えを行い、聞きたい音が最も聞き取りやすくなるようにしている。両耳連動指向性Ⅲは、より自然なきこえをサポートするように設計されている。つまり、信号対雑音比 (SN比) は両耳指向性マイクと同程度に改善され、聞き取りの容易さの面では他の指向性マイクよりも大きなメリットが得られる。本論文では、両耳連動指向性Ⅲの原理と、どのようにしてこのバランスを取るのかについて概説する。

スーパーコンピュータはチェスで人間を負かすことができるが、人間がランチに何を食べたいと思っているかがわかるだろうか。ある人が好む食事パターンを長期的にわたって追跡したコンピュータであれば恐らくいい線までいけるだろうが、それでも、ほとんどの場合推測は間違っているだろう。知性がどのようにコンピュータに組み込まれ、高性能デバイスが人間のルーティンを学習し生活をスムーズにしているかを示した例は、数多くある。補聴器も例外ではない。補聴器の処理能力の大半は音の増幅と処理を対象にしているが、音響入力の観察に基づいて音処理をコントロールするアルゴリズムもある。しかし、まさにスーパーコンピュータと食事パターンのように、補聴器も、装用者がどの信号を聞きたいと思っているのかを誤って推測することがある。こういった誤った推測により、補聴器装用者は聞きたい音がきこえにくくなる場合がある。そのため、技術を使って補聴器装用者が雑音の中でもよく聞こえるようにしながらも、健聴者が聞いているのと同じように周りのすべての音も聞こえるにはどうすればいいかという点に重点を置いてきた。

すべての最新型の補聴器が備えている自動コントロールの種類のひとつに、指向性処理に対するものがある。これは、補聴器のマイクモードを無指向性または指向性に変える補聴器システムによる意思決定である。マイクモードの自動コントロールにより、補聴器装用者は、いつ役立つのかを意識したり指向性モードを手動で選択したりする必要がなく、指向性処理から潜在的に利益を得ることができる。しかし、コンピュータが、ランチに何を食べたいかを知ることができないのと同様に、補聴器も、ある状況において、必ずしも指向性処理が最良なのか無指向性処理が最良なのかを判断することはできない。補聴器の情報では、装用者の意図を知ることができないからである。ある瞬間に、その人にとってどの音が重要なのかは個人的なものであり、音環境のみに基づ

いて予測することはできない。状況によっては、指向性を適用すると、装用者は実際に聞きたい音を聞くことができなくなる可能性もある。

補聴器装用者の意図を尊重した指向性と指向性のコントロールは、どのようにして行うことができるのだろうか。指向性が、欠点なく利点を発揮する滑らかで自然なきこえを実現するには、以下の3つの因子が重要である。ひとつ目は、意思決定アルゴリズムが非常に重要である。ある特定のマイクモードを選択する論理的根拠は、最終的に装用者に届く情報が何であるかという点に影響を及ぼす。ふたつ目は、音環境の分析が重要である。これは、補聴器の処理をどのように行うかの情報になる。最後に重要なのは、指向性処理そのものである。これにより優れたSN比を実現すべきであるが、可聴性や音質の問題が生じてはならない。

リサウンドの両耳連動指向性Ⅲは、これらの3つの因子の各々に細心の注意を払って開発された。両耳連動指向性Ⅲは、音環境の正確な分析に基づき、指向性マイク技術を独自に用いて様々な聴取方法をサポートすることで、装用者が自分にとって重要な音に集中できるようにする。同時に特定のマイクモードに応じて、専用の技術が最良なきこえを実現する。両耳連動指向性Ⅲの中核を成すのは自然な音質であり、指向性混合率は無指向性と指向性のマイクモード間の移行をスムーズにする。また、空間認識は、空間聴取や最も自然な音質に影響を及ぼす重要な音源定位の手がかりを維持する。そして最後に、様々なマイクモードの指向性パターンは、頭部の音響特性を考慮した細やかなデザインで、装用者が自分の周辺の音に対して容易に意識を集中させたり、外したりすることができる。両耳連動指向性Ⅲは、前方からの音声と空間認識を最適に組み合わせることができるよう指向性処理に用いるパターンを最適化している。

ReSound GN

いつ切り替えるか。その原理の重要性

補聴器の指向性が、SN比、つまり雑音下での音声認識の向上においてある程度効果的な方法であることは、紛れもない事実である^{1,2,3,4,5}。雑音源を音声から空間的に切り離し⁶、音声が届き手の近くにあり前方から来る実験レベルでは、一般的に4~5dBの改善が示されている^{2,5}。しかし、日常の交流では多くの場合、聞き手は様々な位置から来る音に注意を払う必要がある。一日の中での活動的な聞き取り時間の多くは、自分が聞きたいと思っている方に顔を向けてはいない。Cord et al⁷ は、補聴器装用者は、装用時間の30%以上が前方以外の方向から対象音が来ていると判断していることを明らかにした。この実験の被験者は、一部の聞き取り状況では音源の方向は「複数」だったとも指摘している。これは、対象音が移動したか、多くの対象音が存在したか、あるいはその両方であったことを示している。すなわち、騒音下で両耳を指向性に自動的に切り替えるシステムは、このシステムに音声検出が含まれていても、ほとんどの時間、聞きたい音源からの音声の可聴性を低下させることになる。人は常に、対象音の方向に自然に頭を向けるが、実環境では予測不可能で、突発的な音はいついかなる方向からも来る可能性がある。世界の10の異なる言語でのターンテイキング(二者が交互に話すこと)に関する研究からは、文化や言語に関係なく、話者は0.5秒以下で変わることが示されている。聞き手として、このような行動についていくには注意が必要である⁸。人の作業記憶は限られており、探索行動と定位行動に力を費やすと、実際の聞き取りや理解にはほとんど利用できなくなってしまう。これを考慮すると、指向性は、健聴者が自然に経験するのと同じ聞き取りと周辺音の認識を提供できないため、その使用には不利な面もある。

10年近くにわたり、補聴器業界が人為的にコントロールされた環境でSN比の最大の効果を目指し、指向性マイクの技術開発に注力してきた中で、リサウンドは指向性マイク技術の適用において独自の道をたどってきた。リサウンドの研究者は、実生活での利用と無指向性および指向性マイクモードに対する好みを研究した実験をヒントに、外部パートナーと連携し、補聴器装用者が周囲への認識を損なうことなく雑音下でもよりよく聞こえるような別の指向性適用法を研究、検証した⁹。聞き手は、耳を頼りに、雑音下で自分が聞きたいものが最良の形で表れるようにするため、研究した発想のひとつは、一方の耳に指向性を提供し、もう一方の耳に無指向性を提供するというものだった。これによって両耳ともほぼ等しい指向性の利点が得られると同時に¹⁰、片耳を無指向性にする、両耳指向性の場合よりも装用者の周辺音の聞き取りが高まることが明らかになった。驚くべきことに、非対称のマイクをフィットさせた両耳からの様々な情報は、統合されたひとつの聴覚像として認識され、装用者は音に集中し、音を監視し、様々な音に自在に注意を向けることができた。このマイクモードのフィッティングに関する問題は、状況によっては両耳指向性の方が若干有益である可能

性があるということ、装用者にとって対象音声は指向性耳側に生じた場合に十分に聞こえない可能性があるということであった。最終的には、リサウンドの2.4GHzデジタルワイヤレスプラットフォームにより両耳間通信を確立し、2つの補聴器をひとつのシステムとして機能させることで、この問題を解決することができた。

リサウンドは、実際の生活の中でのきこえを考慮した指向性技術の使用について、常にその手法を改良している。補聴器装用者は、2つの耳だけでできているのではない。従って、頭部と外耳の形状と位置の音響効果から脳による両耳処理力に至るまで、ヒトの聴覚系全体を考慮している。最終目標は、制限された状況において「通常よりも良い」聴覚を補聴器装用者に提供することではない。補聴器装用者も健聴者と同じように聴覚的な社会行動に問題なく参加できるようにすることで、自然でクリアなきこえを実現することである。

両耳連動指向性Ⅲは、その名前が示すように、自然なきこえの実現という目的を叶える第3世代のマイクモードコントロール方法である。両耳連動指向性Ⅱ¹¹と同様に、2つの補聴器のマイクの構成を、脳による両耳の音処理をサポートすることができるようにする。これは、音響効果と聴覚的空間認識を組み込んだ、科学的に証明された聴取方法を利用した唯一の真の両耳聴取方法である^{12,13,14,15,16}。

両耳連動指向性Ⅲは、2.4GHzワイヤレステクノロジーを用いて、最適な両耳設定が得られるように両耳間のマイクモードを調整する。各補聴器の前後にある音声検出器が、装用者に対する音声の位置を推測する。また、雑音の有無について環境の分析も行われる。無線通信を通して、補聴器の片耳または両耳のマイクモードの切り替えの決定は、両耳合わせて4つの音声検出器が受信した情報によって行われる。設定可能なマイクモードは、空間認識付き両耳無指向性、両耳指向性、または非対称指向性である。この結果は、様々な音環境における2つの補聴器の最適なマイクモードに関する外部研究から得られたものである。

環境分析：雑音下における最良の音声認識

補聴器は、その使用下での音環境を考慮した増幅を行うという驚嘆すべきものになっている。このような補聴器はすべて、メーカーを問わず、ある音が装用者にとって重要か重要ではないかを認識しようとするものである。その手法はメーカーがそれぞれ定めている。ただし、どのシステムも最低限、静かな環境、音声を含む環境、および雑音を含む環境の同定を試みている。雑音の種類をさらに特徴付けようとするシステムや、音楽を同定しようとするシステムもある。補聴器の設定をどのようにするかという判断は、環境分類システムが様々な音をどのように同定するのかに依存するため、分類が特定の環境にどの程度うまく一致するのかを検討することは非常に興味深い。これによって、システムがどの程度適切に対応できるのかが分かる。

リサウンドの環境認識システムは、入力レベル、周波数成分、スペクトルバランスおよび受信する音の時間的特性に基づいた高性能の音声・雑音検出アルゴリズムを使用し、音環境の性質を判断する。さらに、分類は、所定の厳密な基準に従うのではなく、確率的モデルに基づいて行う。他の補聴器の環境分類システムに対するこのシステムの精度を調査するため、補聴器メーカー6社の最新の補聴器をOtometrics Auricalに設置し、特定の様々な音に2~22時間曝露した。入力の一貫性を確保するため、音声の記録は曝露時間中に繰り返し行った。各曝露時間後、補聴器をメーカーのフィッティングソフトウェアに接続し、環境分類の結果をデータロギング画面に出力した。

音環境は以下で構成されていた。「静寂」以外のすべての録音は、Otometrics OtoSuiteソフトウェアのサウンドライブラリの一部である。

- 静寂:入力なし
- 雑音:75dB SPLのハンドミキサー
- 雑音:75dB SPLのホワイトノイズ
- 雑音:75dB SPLのスピーチバブル
- 雑音下の音声:75dB SPLの背景雑音のカフェでの会話
- 雑音下の音声:75dB SPLの背景雑音の列車の駅での会話
- 雑音下の音声:75dB SPLの背景雑音のパーティでの会話
- 雑音下の音声:75dB SPLの背景雑音のスーパーマーケットでの会話
- 65dB SPLのポップミュージック
- 65dB SPLのクラシックミュージック

全システムとも、静寂、音声、およびホワイトノイズを非常に高い精度で同定した。全メーカーとも、このような環境に曝露された時間の少なくとも96%を正確に分類した。図1に示すように、スピーチバブルとハンドミキサーの雑音ではある

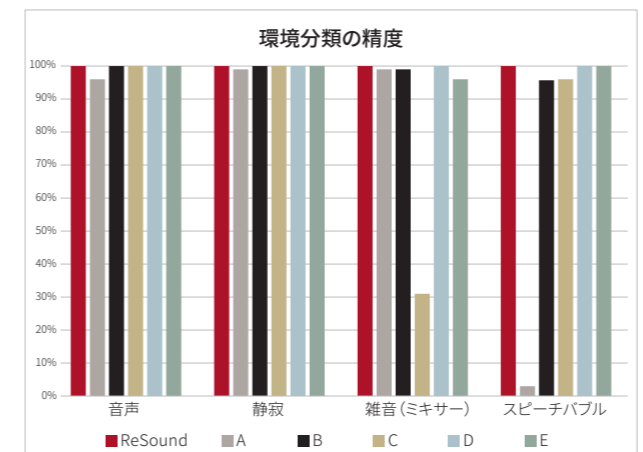


図1. 試験した環境分類システムは、静寂と静寂時の音声を正確に同定することができた。幾つかの重大な同定エラーが認められたものの、大半のシステムは、様々な雑音とスピーチバブルも同定することができた。

程度の違いが認められた。あるシステムはハンドミキサーの雑音に曝露された時間の60%を「雑音下の音声」と同定し、別のシステムは、スピーチバブルに曝露された時間の96%を音楽と分類した。

補聴器装用者にとって最も困難な音環境は、背景雑音が存在する環境である。指向性をコントロールするアルゴリズムの目的は、特に雑音環境中に音声が存在する状況で効果を発揮することである。実環境は、あらゆる種類の様々な背景雑音で構成されており、音声は多くの場合、対象音と競合雑音の両方である。従って、本試験では4種類の背景雑音環境を使用した。各例の「音声」は、会話している同じ男女の声である。図2に、全4種類の雑音下の音声環境をまとめた結果を示す。リサウンドのシステムでは雑音下の音声同定の98%が正確であったが、これは、試験した全システムの中で最も高い精度であった。別のあるシステムも高い精度を示し、曝露時間の91%を正確に分類した。その他のシステムは精度が劣り、正確に分類したのは曝露時間の60%以下であった。

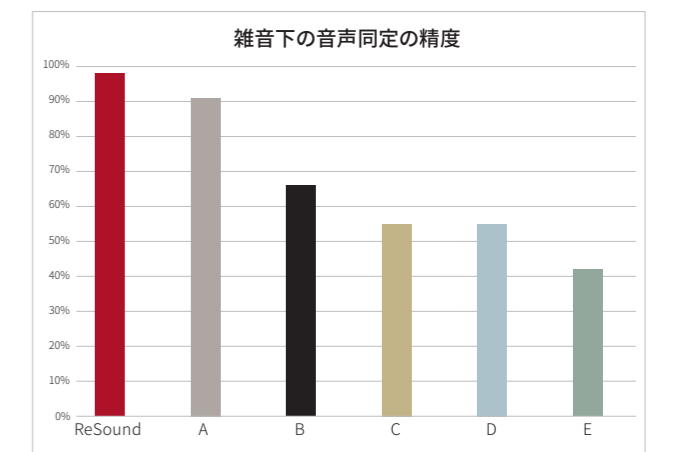


図2. リサウンドは、様々な背景雑音の中で、雑音下の音声同定の98%が正確であった。これ程の精度のシステムは他になく、音楽がある環境や非常に変調された雑音は最も困難だった。雑音などの環境下の音声の正確な同定は、環境依存性パラメータを正確に調整するのに重要である。

興味深い所見は、どの背景雑音によって分類が不正確になるのかという点で、システムによって大きな差があったことである。どのシステムも、「パーティ」と「列車の駅」の背景雑音では、雑音下の音声の同定の75%以上が正確であったが、「カフェ」と「スーパーマーケット」では困難だった。「カフェ」と「パーティ」も、競合雑音は周囲で話す人々の会話である。しかし、「カフェ」には、この環境に典型的だと思われるカップと受け皿がぶつかる音もある。この環境での分類ミスは、多くの時間が「音声」カテゴリーに指定されたことだった。システムは、カップと受け皿による一時的な変調する音に惑わされ、これを競合雑音のない音声と誤って同定した可能性がある。

「スーパーマーケット」の環境認識の結果は、分類システムに音楽がある4つのシステムではかなり不正確であった。この環境認識には、他の典型的なスーパーマーケットの音と共に穏やかな音楽が含まれている。音楽の分類がある4つのシステムのうちの2つは、曝露された時間の100%を音楽カテゴリーに指定し、ひとつは84%を、もうひとつは37%を音楽に指定した。これらの補聴器を音楽に曝露した時の分類の不正確さを総合すると、そもそも補聴器の音楽同定の妥当性が疑われる(図3)。例えば、システムEはクラシックミュージックとポップミュージックのどちらの時間も100%正確に同定したが、スーパーマーケットの背景雑音下の音声も100%音楽と同定した。これは、補聴器の情報では、いかに正確に装用者の意図を予測することができないかを示す示唆に富んだ結果である。環境中の音楽の存在は、装用者が特にそれを聞きたいということではなく、実際には、状況によっては競合雑音と考えられる可能性がある。

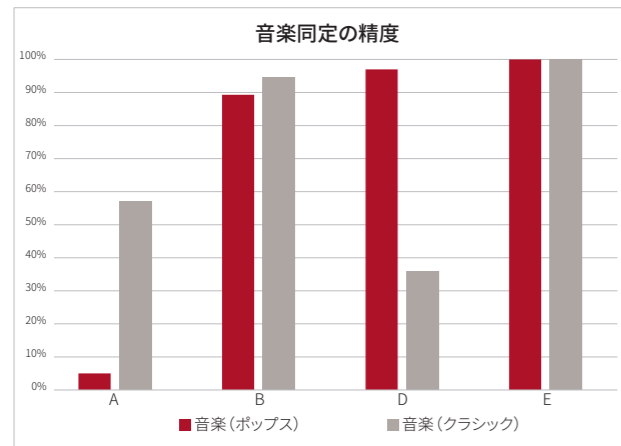


図3. 試験したシステムのうちの4つは音楽同定があり、恐らく音楽鑑賞用に設定を自動調整する。システムBとEは、2種類の音楽の同定において最もよい結果を示した。システムEは、クラシックミュージックとポップミュージックの両方を正しく同定したが、スーパーマーケットのバックグラウンドの音声も100%音楽と分類した。これは恐らく、装用者の意図に反し、スーパーマーケットの環境で音楽鑑賞の設定に変更されることになる。

指向性のメリットと自然なきこえのバランス

1組の補聴器パラメータでは、あらゆる条件におけるきこえのニーズを満たせないことは、広く受け入れられている。この事実が、マルチメモリ補聴器や補聴器の機能の自動適合の原理である。フィッティング処方目標は、大きな音に対しても快適さを確保しつつ最適な音声理解が得られるように増幅を行うことであるが、補聴器装用者には、状況に応じて、増幅された音の様々な側面を強調または抑制したいというニーズがある。簡単な例として、補聴器装用者は、仕事上の重要な会議では処方よりも大きなボリュームを望むが、数時間後の帰宅中の電車で新聞を読むリラックスした時には抑えたボリュームを望むという場合がある。補聴器の設定の自動移行は、装用者への負担なく状況に応じた優先性を把握する方法である。これは、理論上は理想的に聞こえるが、実際にはそうはいかないと思われる。音処理の移

行を突然または顕著に行う補聴器は、気が散り煩わしくなる可能性がある。顕著な自動変化はデバイスの誤動作であると考えられる。このため、リサウンドは、装用者が意識しない自動機能のデザインに尽力している。装用者は、補聴器がいつどのモードにあるのかを知る必要はない。単に、聞くことができ、自分が聞きたいものに集中できれば良いのである。この基本理念は、リサウンドの補聴器が音質で最高位にランクされている理由のひとつである¹⁷。

指向性処理の重要性

クリアなきこえを実現するという目標は、補聴器の音処理に影響を及ぼす。デュアルマイク指向性は、自動的に有効化・無効化した際にそれ自体に注意を向けさせることができる音処理の一例である。低周波音の波長に比べて補聴器のマイク間距離は狭いため、指向性は音が届く方向に関わらず低周波数をキャンセルする傾向がある。指向性で生じた低周波数ロールオフ(減衰)は、無指向性の音質とは異なる金属的な音質を作り出すとはいえ、低周波数のゲインを増加させてロールオフ(減衰)をカバーしようとすると、補聴器から発する雑音も増加してしまう。このため、指向性モードの音は無指向性モードの音よりもうるさくなる可能性がある。すなわち、どの方法を取ろうとも、指向性は無指向性とは異なる音質になる。装用者は、この違いに気づき、煩わしく思うことさえあるかもしれない。この音質問題を回避するひとつの方法は、入力の高周波部分にのみ指向性を適用することである。これこそが指向性混合率機能が行っていることであり、指向性マイクモードと無指向性マイクモードの間で同等の音質が得られる¹⁸。

指向性が雑音下の音声理解を改善する唯一の実証済み技術であることを考えると¹⁹、周波数全体の指向性を最大化する「多ければ多いほどよい」という方法は、完全指向性の方が指向性混合率機能よりも雑音特性下の音声認識が向上するという期待に繋がる可能性がある。一方で、音声明瞭度指数の理論からは、低周波数での可聴性が向上しても、認識レベルへの影響はあまりないため、2つのタイプの処理の差はごくわずかであると予測されるであろう²⁰。図4に、後者の見解を裏付ける臨床試験の結果を示す²¹。本試験では、被験者にオープンフィッティングまたはクローズドフィッティングの補聴器を装着させ、指向性混合率を様々な設定で使用した。全条件について、雑音下の音声認識を評価した。指向性混合率の設定やオープンフィッティング、クローズドフィッティングに関わらず、指向性のメリットは無指向性と比べて顕著であった(図4)。オープンフィッティングを使用した被験者では、無指向性と比較したSN比の改善はどの指向性混合率の設定についても同じであった。オープンフィッティングでは低周波音が補聴器を介さずに耳に入ることができ、低周波数の聴力レベルが軽度の被験者には聞こえるため、予想される所見だった。これは当然、低周波数で得られる指向性のメリットの可能性を制限するものであり、オー

ブンフィッティング補聴器における指向性のメリットを示した他の報告と一致している^{22,23,24}。クローズドフィッティングを使用した被験者では、指向性混合率の設定を上げると、指向性混合率の増加につれて雑音下の音声認識スコアが徐々に増加した。そのため、指向性のメリットの最大化とマイクモード間のクリアな音質とのバランスを最適にするため、指向性混合率の設定は、難聴の程度に基づいて処方される。このような所見は、最も重要な音声情報がある周波数領域に指向性を与えると、SN比の改善に最大の効果が得られることを裏付けるものである。

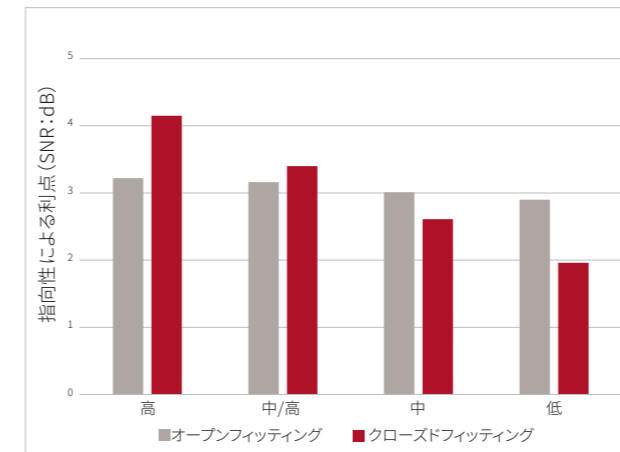


図4. 雑音検査での音声認識によって測定される指向性のメリットは、高周波数の増幅から最も影響を受ける。難聴が重度でクローズドフィッティングを装着した被験者では、指向性混合率の増加につれてメリットが徐々に増すことが観察される。そのため、指向性混合率が処方される。

無指向性も一種の指向性

指向性マイクと無指向性マイクを、まるで正反対のものであるかのように話すことは珍しいことではない。しかし、実際にはそうではない。これらの用語は、各タイプのマイクの空間指向性パターンを示したものである。指向性マイクは、特定の方向からの音をそれ以外の方向からの音よりも増幅するが、無指向性マイクは、方向に関わらず等しく音を増幅する。最新のデジタル補聴器の指向性マイクシステムは通常、デュアルマイクシステムであり、2つの無指向性マイクが配置されており、デジタル遅延をマイクのひとつに適用して所望の空間指向性パターンを作り出す。実質的にはどんなタイプの指向性パターンもこの技術で作成することができる。望むなら、無指向性パターンも作り出せる。

しかし、補聴器の装着時、空間での指向性パターンに何が起きているのだろうか。図5に、頭部で測定した無指向性マイクの空間での指向性パターンを示す。低周波数はヒトの頭のような障害物の周囲を容易に移動し、減衰はほとんどない。右耳に補聴器を装着しても無指向性であり、音が届く方向に関わらず、低周波数の減衰はほとんどない。しかし、左側からの高周波数については、頭部遮蔽効果によってか

りの減衰が生じる。頭部遮蔽効果は、静寂環境における位置特定にも、雑音下でのきこえの改善にも役立つ一方で、両耳連動指向性Ⅲは、良好なSN比へのアクセスと環境中の音へのアクセスのバランスを取ろうとする。つまり、両耳に取り付けられた補聴器のマイクモードが非対称(片耳指向性、片耳無指向性)に切り替わった場合、頭部遮蔽効果はある意味逆効果になる。これにより、特定の方向からの一部の音の可聴性が低下する(ブラインドスポット)に至る。頭部遮蔽効果は、指向性を適応した耳にはSN比を最大化するため非常に望ましい一方で、逆の耳には、周辺の音へのアクセスを最大化する完全に無指向性の応答が望ましいと思われる。

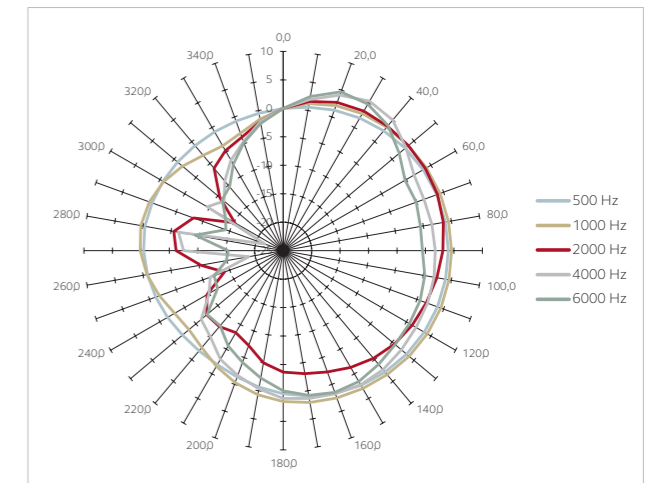


図5. KEMARの右耳で測定した無指向性マイクの空間での指向性パターン。高周波数では、応答が無指向性にはならず頭部遮蔽効果の影響を大きく受ける。

頭部遮蔽効果は補聴器の処理では変えることができない音響効果であるため、リサウンドの技術者は、雑音下のきこえの改善と環境認識のバランスが最も自然になるよう、指向性と無指向性の空間での指向性パターンの方向特性の調整にインスピレーションを得ようと、自然な耳を再度調査した。

システムを最適化する新たな方法

前述したとおり、ヒトの聴覚システムは2つの耳からの情報に依存しており、両耳のメリットは、2つの耳からの異なる情報を比較、統合することによって得られる。従って、自然な聞き取り過程をサポートする指向性システムのデザインでは、まず、両耳の複合音響効果と頭部における位置を調査することが道理にかなっている。この情報は、その後システムデザインのベンチマーク評価の目安にできる。聴覚ケアの専門家は、指向性指数(DI)に精通している。これは、0°方位から生じた音と別の方位から生じた音の相対的な増幅を定量する測定基準である。DIは一般的に、補聴器の指向性処理の効果を表すために使用される。しかし、DIはひとつの補聴器の特徴しか示さないため、両耳効果がSN比の改善に寄

与するのかわるには不十分な指標である。さらに、DIは、装用者の前方からの音に対して、どのようにSN比が改善されるかを示すのみである。両耳連動指向性Ⅲの原理は、装用者が良く聞こえる方の耳または良く聞こえるようにする手法を使えるようにするものであるため、システムデザインを評価する際には、認識の尺度も含めることが非常に重要である。

リサウンドの研究者は、最適なデザインの実現のため、左右の耳の空間パターンを音響的に作成し、両耳の指向性パターンに基づき、システムによるSN比や状況認識の改善の程度を定量化する方法を提案した²⁵。基本的に2つの新しいDI概念を導入した。ひとつは、片耳だけでなく両耳の効果をDI計算に含めることである。もうひとつは、同様に両耳を含む一種の「逆」DIを計算して環境認識を示すことである。図6に、裸耳に対するこのような概念を示す。両耳で計算したDIである「より良い耳指数 (Better ear index)」が、いかに片耳のDIよりもSN比が改善するかに留意されたい。同様に、「状況認識指数」は片耳のDIよりもはるかに低い。これは、音が届く方向に関わらず、両耳聴がいかに可聴性を高めることができるかを示している。このふたつの指標を、両耳連動指向性Ⅲの空間での指向性パターンデザインのベンチマークとして使用した。デザインの目標は、裸耳と同程度の状況認識指数を維持しつつ、より良い耳指数を最大化することであった。これによって、難聴者は、前方以外からの環境音へのアクセスを維持しつつ、良好なSN比も手に入るようになる。

ヒトを聞き手とした社内検証からは、この基準が知覚と強く相関していることが立証された。すなわち、より良い耳指数が高いと聞き手の前方からの信号に対する雑音下の音声認識が良好で、状況認識指数が低いと前方以外からの音の可聴性が良好である。

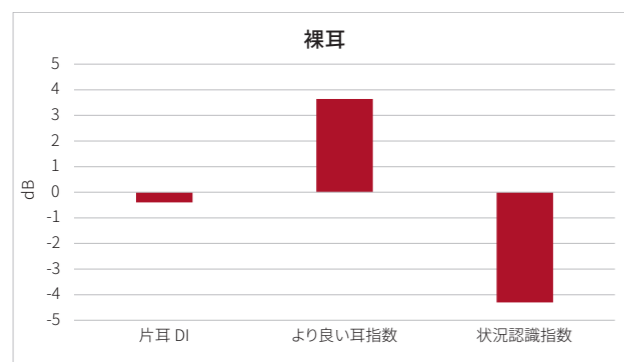


図6. より良い耳指数と状況認識指数は、両耳の音響空間指向性パターンを捉えている。従来のDIで把握できるのは片耳のみの効果である。より良い耳指数と状況認識指数を組み合わせると、システムデザイン評価のベンチマークとしての機能を果たす。

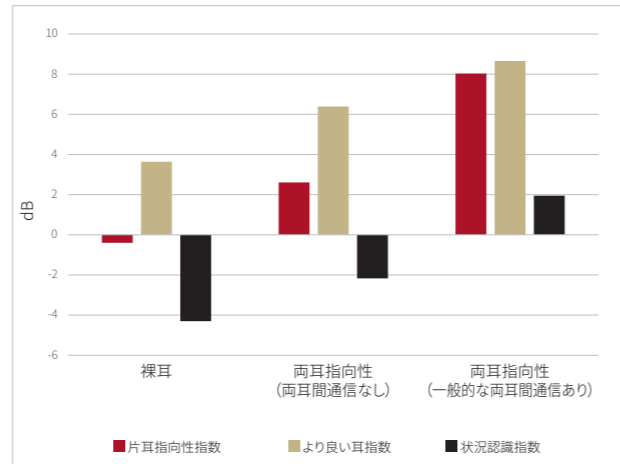


図7. 一般的な両耳間通信を用いた両耳指向性ではより狭い指向性を可能とし、最も高い片耳指向性指数を提供するが、両耳効果は大きく変化せず、さらには指向性範囲以外からの可聴性を悪化させる。両耳連動指向性Ⅲでは裸耳よりもSN比を改善させるとともに周囲の環境音の可聴性が維持され、自然なきこえを提供する。

空間聴取のサポート

空間聴取とは、装用者の耳に届く音の流れを聴覚対象に分離する能力のことであり、これによって空間の広がりなどの聴覚認識が内的に表される。聴覚対象は、外界の識別可能な物理的要素から得た感覚情報の知覚評価である²⁶。例えば、台所では、冷蔵庫の扉を開く音、流しに水が流れる音、また玉ねぎをみじん切りにする音などがある。このような聴覚対象を形成し、それを空間に配置する能力によって、聞き手は、迅速かつスムーズに対象の中から注意を選択したり注意を移動したりすることができる。さらに、聴覚シーンの形成により、自然なきこえが得られる。

聴覚システムは、音響入力からの複数の手がかりを組み合わせることで、このような空間表現を構築する必要がある。これには、それぞれの耳に音が到達する時間の違い(両耳間時間差 - ITD)、それぞれの耳に達する音のレベルの違い(両耳間レベル差 - ILD)、そして耳介による手がかりなどがある。頭の動きも、聴覚システムがこれらの手がかりの関係がどのように変化するかをすばやく分析するため重要である。これら手がかりのいずれかが阻害されると、空間聴取への干渉が発生する。補聴器がこれらの手がかりの一部またはすべてを混乱させることはよく知られている。空間認識は、空間的手がかりに干渉する可能性のある次の3つの補聴器関連の問題を考慮した独自のサラウンド・サウンド by リサウンド音声処理である。

1. 耳かけ型 (BTE) や外耳道内レシーバ耳かけ型 (RIE) はマイクが耳介より上に位置するため、耳介による手がかりが失われる^{27,28}。
2. BTEとRIEはマイクが耳介より上に位置するため、両耳間レベル差 (ILD) が歪む²⁹。
3. 個別に機能するワイド・ダイナミックレンジ・コンプレッションでは、ILDが歪む可能性がある³⁰。

空間認識は、ILDを正確に推定するための耳介修復、両耳間の信号の交差を模倣するための無線情報交換、さらには聴覚遠心性を阻害する信号の欠如を自然な耳に基づいて修正する。位置特定の手がかりが維持されると、空間認識は、サラウンド・サウンド by リサウンド音声処理によって実現する自然なきこえと優れた音質を増強する。

まとめ

自然なきこえは、識別可能な信号を受信する脳に依存する。信号は比較対照され、音響情報の流れは音環境の意味のある像に分離される。両耳に届く様々な音の相違点と類似点を使って、環境音を自在に増強または抑制し、このような音の間で、自身の注意を容易に移動させることができる。特定の瞬間に対象音が何であるかに応じて、人間は生来、異なる聴取方法を使用して、無意識のうちに環境認識に依存する方法と耳に依存する方法の間で切り替えを行い、対象音が最良の形で現れるようにする。人間は、聞きたい音に近づくと、片方の耳を音に近づけ、あるいは耳に手を当てて、「認識」から「より良い耳」に聴取方法を変える。最近の補聴器は、それぞれのアルゴリズムによって特定された音を最も重要なものとするために、自然な聴取感覚を「ショートカット」する技術が使われている。それとは対照的に、両耳連動指向性Ⅲは指向性マイク技術を独自に適用し、周辺認識とより良い耳で聞く両面からのサポートをしている。両耳間の無線通信により環境分析が容易になり、これを使用して、4つの両耳マイクモードから最適なモードを自動的に選択することで、どちらの聴取方法もサポートする。特定のマイクモードに応じて、専用の技術が最良のきこえを実現する。両耳連動指向性Ⅲの中核を成すのは自然な音質であり、指向性混合率はマイクモード間のスムーズな移行を確保する。また、空間認識は、空間聴取や最も自然な音質に影響を及ぼす重要な音源定位の手がかりを維持する。そして最後に、様々なマイクモードの指向性パターンは、頭部の音響特性を考慮した細やかなデザインで、装用者は自分の周辺の音に簡単に調整を合わせたり外したりすることができる。両耳連動指向性Ⅲは、前方からの音声と空間認識を最適に組み合わせることができるよう感受性パターンを最適化している。両耳連動指向性Ⅲは、自然なきこえをサポートする究極のバランスを実現する。つまり、信号対雑音比の改善は両耳指向性マイクと同程度で、聞き取りの容易さの面で他の指向性マイクよりも大きなメリットが得られるのである。

参考文献

1. Amlani AM. Efficacy of Directional Microphone Hearing Aids: A Meta-Analytic Perspective. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2001; 12: 202-214.
2. Best V, Mejia J, Freeston K, van Hoesel RJ, Dillon H. An evaluation of the performance of two binaural beamformers in complex and dynamic multitalker environments. *International Journal of Audiology*. 2015; 54(10): 727-735.
3. Desjardins JL. The effects of hearing aid directional microphone and noise reduction processing on listening efforts in older adults with hearing loss. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2016; 27(1): 29-41.
4. Magnusson L, Claesson A, Persson M, Tengstrand T. Speech recognition in noise using bilateral open fit hearing aids: the limited benefit of directional microphones and noise reduction. *International Journal of Audiology*. 2013; 52(1): 29-36.
5. Ricketts TA, Picou EM. Speech recognition for bilaterally asymmetric and symmetric hearing aid microphone modes in simulated classroom environments. *Ear and Hearing*. 2013; 34(5): 601-609.
6. Cord MT, Surr RK, Walden BE, Olson L. Performance of directional microphone hearing aids in everyday life. *Journal of American Academy of Audiology*. 2002; 13:295-307.
7. Cord MT, Surr RK, Walden BE, Ditterberner A. Ear asymmetries and asymmetric directional microphone hearing aid fittings. *American Journal of Audiology*. 2011. 20: 111-122.
8. Stivers T, Enfield NJ, Brown P, Englert C, Hayashi M, Heinemann T, Hoymann G, Rossano F, de Ruyter JP, Yoon K, Levinson SC. Universals and cultural variation in turn-taking in conversation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009; 106(26): 10587- 10592.
9. Groth J. ReSound Azure: The audiological background. ReSound white paper. 2007
10. Bentler RA, Egge JLM, Tubbs JL, Dittberner AB, Flamme GA. Quantification of directional benefit across different polar response patterns. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2004; 15:649-659.
11. Groth J. Binaural Directionality II with Spatial Sense. ReSound white paper. 2014.
12. Zurek PM. Binaural advantages and directional effects in speech intelligibility. In G. Studebaker & I. Hochberg (Eds.), *Acoustical Factors Affecting Hearing Aid Performance*. Boston: College-Hill, 1993.