

『自らの耳でのきこえ』 に近づく、革新的な補聴器 ～リサウンド・ワンマリー：外耳道内マイク型 RIE～

Jennifer Groth, MA, GN Hearing A/S

概要

外耳道内レシーバ耳かけ型補聴器（RIE）は、現在補聴器市場を席巻している。2019年の米国のデータによると、販売された補聴器の約79%はこのタイプの補聴器である。RIE が人気を博しているのには最もな理由がある。丈夫で使い心地が良く、装用しても目立たず、最も包括的な機能を利用できる。RIE の大きなデメリットは、音声を耳に伝えるマイクが不自然な位置にあることである。人工的な耳介補正アルゴリズムでこの欠点がある程度は軽減できるものの、最も自然な音は、本来の自然の形で備わっている器官、つまり耳介によって集められた音である。リサウンドのオーガニックヒアリングという理念は、本来人がもつ聞き取りのプロセスを模倣し維持することであり、それを革新的な製品の形としたものが、リサウンド・ワンマリーである。それは、全く新しい RIE 用レシーバを利用している。この革新的なレシーバモジュールは、マイクが装用者の外耳道内に位置するため、人がもつ固有の解剖学的特徴を活かした自然な音が形成される。装用者は RIE のメリットを全て享受できると同時に、最も自然な音質で聞くことができる。

米国では、50～59歳の10%強をわずかに上回る割合の人が軽度の難聴者であると推定されており、この割合は60代で19%、それ以上の高齢者では35%にまで上がる。¹ これは米国において50歳以上の2200万人以上に相当し、難聴の程度にもよるが、補聴器を必要とする可能性が高い人達である。しかし、この集団に含まれる軽度の難聴者が補聴器を装用しているとは考えられない。これには色々な原因があるが、考えられる理由として、それら潜在的な装用者は、補聴器に掛る費用、補聴器の入手方法、そして使用の煩わしさを懸念し、それを上回るメリットがあることを単に知らない。あるいは、補聴器を試聴した人たちは、それを実感していないことが挙げられる。多くの場合、補聴器を装用または試聴する人たちにとって外耳道内レシーバ型補聴器(RIE)が適している。2019年に米国において RIE は販売されている補聴器の78.9%を占めた。² RIE は人気を博するだけの十分な理由がある。聴覚ケア専門家(HCP)は顧客に補聴器を手にとってもらい、デモして見せたり、既成のドーム型耳せんを使ってすぐにフィッティングしたりすることもできる。また、RIE は使い心地が良く、大抵の耳では殆ど目立たなく、他のタイプの補聴器と比べて雑音抑制機能やワイヤレス接続機能が優れていることが多い。さらに、オーダーメイド耳あな型補聴器と比べてワイヤレス接続の安定性や信頼性が高い。最後に、装用者は全体的に RIE に非常に満足するという検証結果があり、このことが継続的に RIE をフィッティングする大きな理由となっている。MarkeTrak 10の報告では、耳あな型オーダーメイド補聴器の満足度が79%であったのに対し、耳かけ型（そ

の多くは RIE と考えられる）補聴器の満足度は84%であった。³

RIE には問題があるか？

軽度難聴者が RIE 補聴器を装用しながらない根本的な原因は、不自然な音質で調整が難しく、ひどい場合には聞き取りの妨げにさえなり得るという点である。RIE のデザインの根本的なデメリットは、音を拾うマイクが耳介の上側、またはひどい場合は後ろ側に装着されてしまう点にある。本来ここでは音声を拾ったり、鼓膜に音声を伝達したりはしないため、音質面では決して有利な場所ではない。脳は、その人の身体、頭部、および耳の解剖学的特徴によって形成された音が聴取されることを予測している。補聴器が不適切な解剖学的位置で拾った音を聞くということは、おそらく脳の自然な聴覚プロセスを妨げ、聞こえない音を聞こえるようにするプラスの効果に反する可能性がある。これは特に軽度難聴者に当てはまり、こうした人たちは、日常の会話や音声が聞こえないというよりも、雑音下で聞き取りが困難であるために助けを必要としている。軽度難聴者は大抵の場合、日常生活の多くの場面で十分に聞き取れると報告する。ここから、きこえに最低限期待される改善点は、1)騒音下での聞き取りを助けること、2)どういった方法であっても、きこえの質を低下させないことといえる。マイクが耳介の上側に来てしまう RIE 補聴器の場合、1つ目の要望にはある程度応えられるかもしれないが、2つ目の点は現実的に達成が難しいと考えられる。

耳の内側にマイクを配置するメリット

数十年前に耳あな型(ITE)補聴器を導入する際、補聴器のマイクを耳の中へ配置する利点を明確にするため、非常に多くの研究が行われた。耳かけ型(BTE)のマイク配置よりも耳介の内側にマイクを配置する方が優れている理由として、音響の観点、⁴⁶ 騒音下での言葉の認識が優れている点、⁶⁻⁸ さらに音源定位が優れている点⁹ が報告された。最近の研究でもこれらの利点が確認され、さらにいくつかの方法による研究で利点が追加された。

Cubick ら¹⁰ は、マイクを耳介の上側の不自然な位置に取り付けた補聴器を介して聞いたときに、空間認識や音声の認識がどのように低下するかを示した。この実験では、健聴者が参加して音声の処理ではなく、マイクの位置による影響を見分けるため、高品質のリニア増幅で行われた。健聴者において競合する音の存在下で言葉の認識テストの結果が低下したことから、補聴器装用者が異なる音声(複数の話し手がいる場合など)を区別する能力にも影響が生じることが示唆される。言い換えると、軽度難聴者が補聴器の使用を考える理由は競合する雑音下での聞き取りが難しいことが考えられるが、マイクの位置によりこの問題がさらに悪化する可能性がある。

難聴者にとって空間聴取は重要か？補聴器の装用者および非装用者を含め、大半の人は空間でのきこえについて問題や要望を明確に訴えることはない。例えば、家族団らんの会話についていくのが大変だ、という人がいるかもしれない。しかし、こうした人たちは、自身が持っている空間聴取という能力が、耳で聞き取った一連の音声を区別して聴覚シーンを形成し、そのシーンの中で効率的に機能しているという役割を恐らく認識していない。Byrne および Noble¹¹ は、現実の環境において聴覚による位置特定が重要であり、生活の中であまりに自然なために当然のものともみなされている点を論じた。現在では、実生活の中で、人は音声を聞いているときに「意思疎通を維持し、周囲とのつながりの感覚を維持するため、複数の音情報の位置を特定し、識別し、注意を向け、注意を切り替え」ていることが知られている。^{12 (p86)} MarkeTrak 10の結果は、補聴器の全体的な満足度に空間聴取が寄与していることを裏付けている。満足度の最も重要な要素は「補聴器の性能と音質」であり、この要素には「音の方向を認識できること」が関係することが分かっている。¹³ 音源定位の手がかりが日常のダイナミックな動きの中できこえとどのように関係し、補聴器のどんな技術的な側面が空間聴取を改善、または干渉するか注目した膨大な研究が行われている。

前述のとおり、耳介での音声のスペクトル フィルタリングが保存されることから、マイクは耳介の上部よりも耳の中の方が優れていることは十分に実証されており、近年の多数の研究でも確認されている。¹⁴⁻¹⁶ さらに、市販されている補聴器は、マイクの位置に加えて環境適応型指向性などの音声処理機能のため、標準プログラムが空間認識の手がかりを干渉することが示された。^{17,18}

補聴器メーカーはマイクが耳介上部に配置される短所を補うため、耳介補正アルゴリズムを使用し、音源定位能力および音質を低下させる影響を補正しようとしてい

る。この種の処理では、補聴器の2つのマイクシステムにより、人の標準的なモデルの頭・胴体において、標準的に作られた耳でのパターンに似せた空間指向性パターンを作り出している。耳介補正アルゴリズムによる前後音源定位の改善が報告されている。¹⁹⁻²¹ これは RIE 装用者にとっては良い知らせであるが、耳介補正アルゴリズムには2つの弱点がある。1つ目は、既に述べたとおり、耳介補正アルゴリズムは標準的な耳に合わせて作製され、人のマネキンに合わせるよう設定されている。耳の特徴には大きな個人差があるため効果にはばらつきがあるだけでなく、音源定位の評価を考えたときに、マネキンは人の代役としては不十分であることが示されている。¹⁶

耳介補正アルゴリズムのもう一つの問題は、四方および上下からの音声を認識できない点である。それは、水平前方からの音声に対応するよう設定されている。このように、周囲空間のあらゆる方向からの入力音について、音を独自に形成する人の耳とは異なる。この点は、片耳のスペクトルの手がかりという観点で重要性は明らかだが、音声を拾う位置は両耳間レベル差(ILD)の手がかりにも非常に大きく影響する。Udesen ら¹⁴ は耳介周囲の様々な位置で ILD を測定したところ、位置によって最大30 dB の誤差があることを示した。耳介補正が各個人に合わせて調整できないことに加え、耳介補正は実験室の設定より現実の世界では有用性が低い可能性があるというメタ分析の結論になるかもしれない。²²

空間聴取の手がかりを維持する補聴器

リサウンドの「オーガニックヒアリング」の哲学は、蝸牛の周波数に依存した非線形圧縮を模倣する WDRC を始めとして、人本来の自然なきこえに着目して革新的な補聴器を作り出してきた功績で示される。リサウンドはまた、生の自然な音声と忠実度の高い高度な技術によって増幅された補聴器の音声とを融合させて自然なきこえにする、快適で目立たない形状のオープンフィット型の補聴器を商品化してきた。実際、こうした著しい革新により、今日人気を集めている RIE の登場に至った。リサウンド・ワン でも同様に本来の性能を活用し、各装用者の耳で音声を自身に合わせて最適化する能力が利用されており、この方法は他のテクノロジーでは未だ達成できていない。新しいマリー専用レシーバは、RIE のすべての利点に加えて外耳道内に配置されたマイクにより各装用者の耳の構造を利用して音声を耳に伝達することができる。それは、外耳道内にある小型レシーバにマイクが内挿され、それによってユーザーの外耳道入口付近で音を拾う。その音は、耳の上にある本体部分で演算処理をした上で、外耳道内のレシーバから音を送り出す。マイクは耳の上にある本体にもこれまで通り設置されており、SN 比をさらに高める必要がある場合に耳介の内側で拾った音と指向性技術を組み合わせることが出来ることを意味する。装用者はマリー専用レシーバのおかげで脳による両耳処理のメリットを十分に享受できる。空間情報が想定される形で脳に提示されることで、SN 比の改善、音の到来方向の予測の向上、奥行きや距離の知覚の向上、および視覚系と聴覚系の相乗効果などのメリットが得られる。こうした要素はすべて、より自然なきこえを目指すことに寄与する。

リサウンド・ワンマリーを支持する証拠

新しいマリー専用レシーバの技術的評価により、マイクを外耳道入口に設置した場合のフィルタリング特性は裸耳の状態とほぼ同等であることが示されている。図1は耳にマリー専用レシーバを装着したときの状態を示し、黄色の点はマイクの位置を示している。耳介上部に置かれる補聴器本体にマイクが2つあり、さらに、外耳道内のレシーバモジュールの外側に面する部分にマイクが1つ付いている。3次元プロットは、裸耳、マリー専用レシーバおよび耳介の上部に配置されたマイクと耳介補正アルゴリズムを使用したときの、0~360°の角度から発せられた様々な周波数の音の強さを示している。耳介補正アルゴリズムを使用した場合、裸耳の状態と概ね類似しているが、マリー専用レシーバでは非常によく一致している。

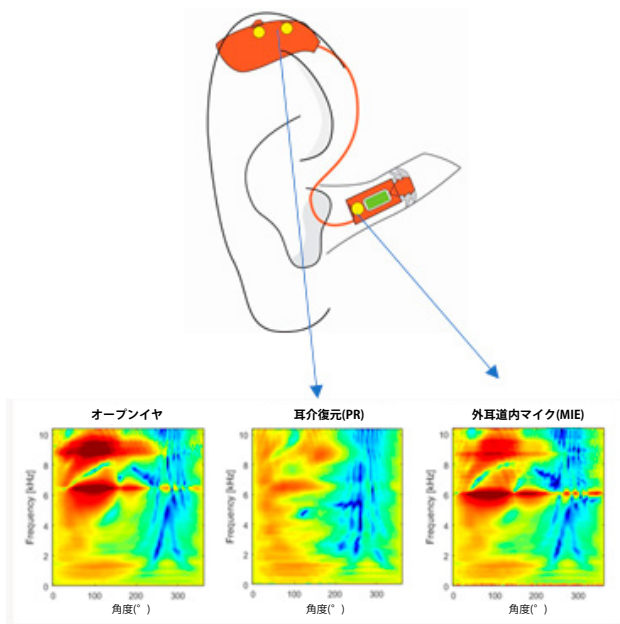


図1 マリー専用レシーバはマイクとレシーバを含む。3次元プロットは、裸耳の状態、耳介補正アルゴリズムおよびマリー専用レシーバを使用したときの外耳道で測定される音の強さを周波数および音の到来角度ごとに示している。青色は弱く、赤色は強いことを示す。マリー専用レシーバのマイク位置における頭部および外耳のスペクトルフィルタリングは、外耳道がオープンなときとほぼ一致する。耳介上部のマイク2つを使用した耳介補正アルゴリズムはよく近似した結果だが、これは標準的なデータに基づく。

当然、マリー専用レシーバのマイク位置によりもたらされる感覚的なメリットが音響測定の結果と一致するかどうかにより大きな関心となる。空間聴取への影響の認知について評価する方法の一つは、音源定位のタスクを用いる方法である。前述のとおり、無指向性マイクと比べて耳介補正アルゴリズムでは前後音源定位が向上することが報告されている。無指向性マイクおよび耳介補正と比べてマリー専用レシーバにより音源定位が改善されることを検証するため、健聴者の成人5名と標準的な N1、N2 および N3 型と類似する聴力型の成人10名を含めて社内でテストを実施した。²³

参加者を30°の間隔をあけて配列された12台のスピーカーの中央に座らせ、参加者の耳とスピーカーの中心が同じ水平面上になるよう調整した。実験中、参加者は頭部を動かさないよう指示された。各スピーカーからランダムに音が発せられ、それぞれの角度につき4回、合計48回音を出した。音が提示されたと思われるスピーカーを特定し、スピーカーに割り振られた番号を答える

ことがタスクであった。参加者にはスピーカーの設置図の紙を渡され参照することができた。実験は2回繰り返された。

健聴である参加者5名の結果から、マリー専用レシーバの性能が示された。図2に示すとおり、これら参加者は耳介補正により、前後および全体的な音源定位で著しい効果を示した。これらの参加者では、無指向性マイクと比べてマリー専用レシーバ使用時では、前後方向について認識不能率は平均29%改善した。全体的な音源定位の誤りは、無指向性マイクと比べてマリー専用レシーバ使用時に17%改善した。さらに、マリー専用レシーバと耳介補正の効果は同程度であることが示され、音源定位において各人の耳の固有特性が重要であることが示された。予想されたとおり、条件に関わりなく、健聴者と比べて難聴者10名の音源定位タスクの結果はすべて劣っていた。この分野で難聴者の成績は低く、マイクの位置による音響効果の感度が低いことは十分知られている。^{24,25} この社内試験では、健聴者と比べてそれほど顕著ではないものの、軽度難聴者において耳介補正およびマリー専用レシーバによって平均的に改善が示され、マリー専用レシーバのみで顕著な改善がみられた。無指向性の条件と比べて、前後音源定位の誤りは平均10%、全体的な音源定位の誤りは平均9%改善した。注目できる点として、非常に大きな個人差がみられた。このことから、聴覚感度が同程度であっても、従来の方法では音源定位の手がかりを十分利用できる人とそうでない人がいることが示唆された。

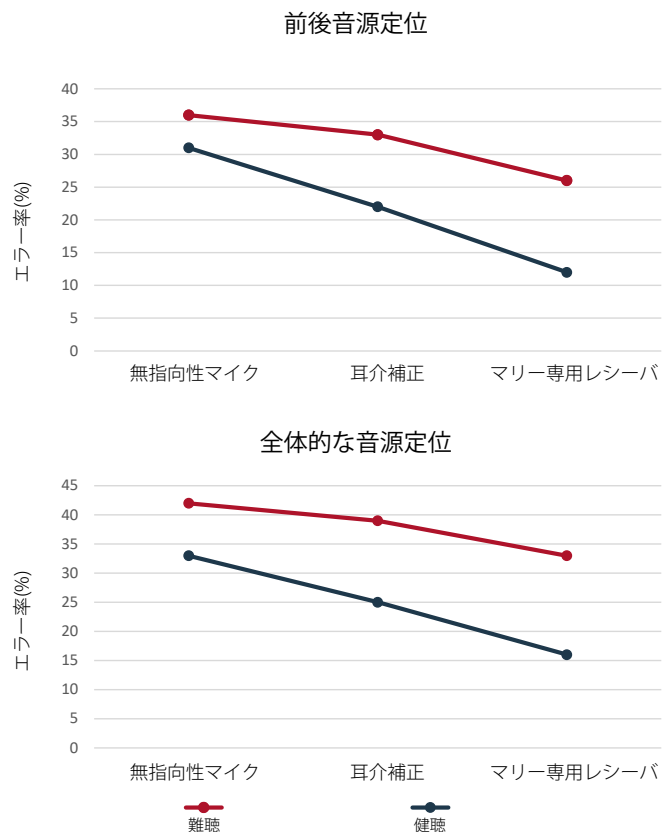


図2 上図は前後音源定位タスクの過誤率を、下図は全体的な音源定位の過誤率を示す。健聴者および軽度難聴者のいずれにおいても、無指向性マイクと比べて耳介補正を行ったときの方が音源定位の誤りは少ない。マリー専用レシーバではさらに高い効果が示された。

良好な空間聴取は音の自然さを感じることに寄与する。空間聴取は、空間内において頭の外側で発生した音声として知覚するための一助となる。したがって、マイクの位置が果たす効果として、音質の好みを質問することも興味深い。社内リスニングテストを拡大して実施し、参加者に屋外の歩行時および混雑した食堂での3つのマイク条件について評価してもらった。補聴器は無指向性、耳介補正、そしてマリー専用レシーバをランダムな順番でプログラムし、参加者と評価者には条件は知らせなかった。参加者に音声の自然さについて好みを質問した。健聴者では、5名中3名がマリー専用レシーバ、1名が耳介補正、1名が無指向性条件を好んだ。難聴者では、9名がマリー専用レシーバ、1名のみが無指向性条件を好んだ。

Legarth らは²⁶、MUSHRA 法^{27,28} に基づくより体系的な補聴器の音質評価を開発した。^{27,28} この方法は、二重盲検法を用いて実施し信頼性が高く、聴覚的な記憶の制限をカバーできる点が優れている。補聴器の全体的な音質の好みと、音質の程度の両方を定量化するために頻繁に使用されている。参加者にヘッドホンから音刺激を聞かせて「高い」～「低い」までの範囲内で相対的に採点してもらう。この方法を、耳介補正とマリー専用レシーバの音質の比較評価にも使用した。

マイクの位置によりもたらされる音質を評価するため、マイクに音声が届いたとき、あたかも固有の解剖学的特性により形作られた音声のようであるかどうかを各人が評価できる必要がある。これをヘッドホンによる聞き取りで評価するには、発せられる距離や方向が異なる音声で、各人の解剖学的特性によりどのようにフィルタリングされるかを測定したデータを基に、それぞれの聞き取り条件での音刺激を調整する必要があった。このため、マリー専用レシーバのマイク位置、および RIE 本体のマイク位置(耳介上部)に合わせた参加者5名の左右の耳のフィルタ係数を測定し、ヘッドホンでの応答のための補正に加えて、音刺激からヘッドホンまでの信号経路の間にフィルタを設置した。その結果、いずれの条件でも、耳で自然に生じる音圧を正確に再現できる。

リスニングテストでは、健聴者5名が全体的な音質および立体音の音質を評価した。全体的な音質では、明瞭性、音色および自然さを聞いてもらった。空間的な音質評価のため、音源定位、音源の判断、部屋の広さや空間的感覚の観点で聞いてもらった。音刺激は刺激発生装置で生成し、²⁹ オフィスおよび喫茶店のシーン、さらにジャズ音楽などとした。

結果はマリー専用レシーバの全体的な音質評価の平均、および空間的な音質の評価の平均が、耳介補正の評価に比べて2倍高いスコアであった。最も驚かされた点は、耳介補正と比べてマリー専用レシーバのスコアにばらつきが少なかった点である。耳介補正の全体的な音質および立体音の音質についての各人の評価は、低い～概ねマリー専用レシーバと同じくらい良いの範囲であった。耳介補正は標準的な成人に合わせているため、これは予想された結果であった。この標準から大きく異なる耳介の特性を持つ人たちにとって、耳介補正を介して伝達され

た音は、マリー専用レシーバの音と比べて自然さや音質が劣る傾向にある。標準に近い特性の人たちにとっては、耳介補正を行った音声は非常に高品質となる。

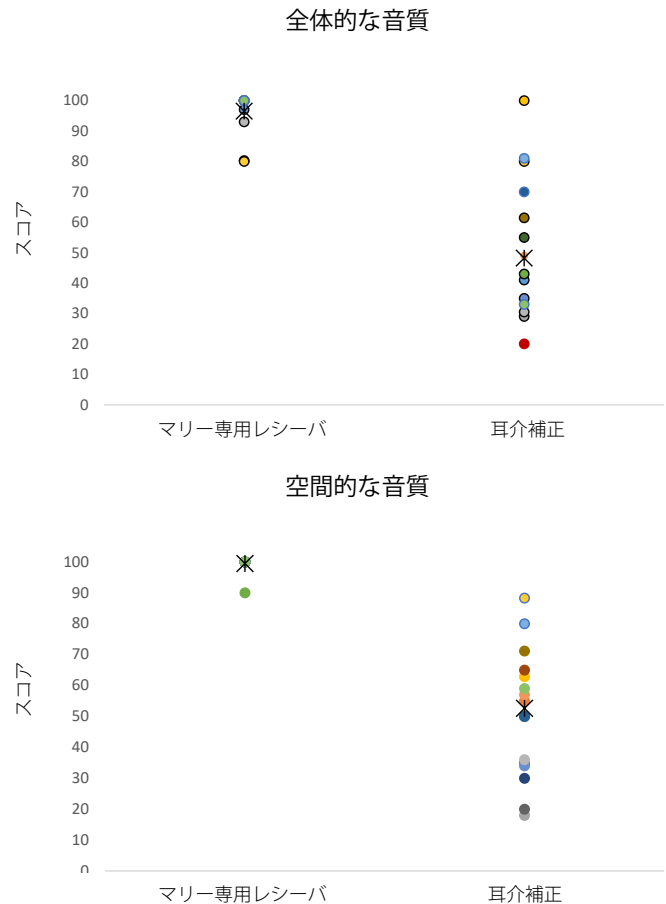


図3 マリー専用レシーバおよび耳介補正使用時の全体的な音質および立体音の音質の各人のスコア。「X」は各条件の平均スコアを意味する。マリー専用レシーバでは一貫して高スコアでばらつきが少ない。耳介補正の結果にばらつきが大きいことは、各参加者の耳介による音のフィルタ特性に個人差があり、ばらついていることを反映している。

マイクの位置により聞き取りの快適性は変わるか？

補聴器装着者にとって、現実的な問題は風切り音による影響が大きい。装着者が日常活動で移動する際、補聴器が風やその他の気流に当たると風切り音が発生し聞き取りの際の障害となる。こうした気流は、歩行のような毎日の生活の中で自然に発生しうるものである。装着者が屋外の活動に参加する場合、より大きな風切り音に継続してさらされ障害となる可能性が高い。風切り音はマイク部分での乱気流により発生し、これがマイクで集音され、増幅されてしまう。マイクが乱気流の発生源となる障害物(耳介など)の付近にあると、さらに悪くなる。したがって、風切り音に関しては、耳介の上側または裏側はマイクの装着部位としては実は最も不適切な場所なのである。RIE が小型で耳介に十分隠れるとしても、このマイクの位置には問題がある。³⁰ 補聴器メーカーは風切り音を識別して利得を下げるのが可能な信号処理アルゴリズムを開発してきたが、音質および可聴性の維持という点において、補聴器で風切り音が聴取されない場合と比べて非常に劣ってしまう。補聴器のマイクが外耳道内にある場合、気流の方向にもよるが、風切り音は劇的に減少することが示された。³¹

風洞を用いてマリー専用レシーバと外耳道外のマイクの位置を比較評価したところ、他の試験と一致して風切り音を抑制することが、マリー専用レシーバのメリットとして確認された。リサウンド・ワン マリーを KEMAR に取り付けた。様々な角度から風速2 m/s、4 m/s および 8 m/s の風を発生させ、3つすべてのマイク(2つは耳の上側に装着した補聴器のマイク、1つは外耳道内のマイク)の出力を測定した。外耳道内のマイク位置と前方のマイク位置での全方向からの風切り音の抑制程度(平均)を図4に示す。補聴器の後方マイクと比較したところ差はなかった。外耳道内にマイクがある場合では、風切り音は14~19 dB 抑制された。低木を揺らすさわやかなそよ風は風速 5 m/s に相当するが、このとき無指向性マイクと比べてマリー専用レシーバでは風切り音が15 dB 低減した。

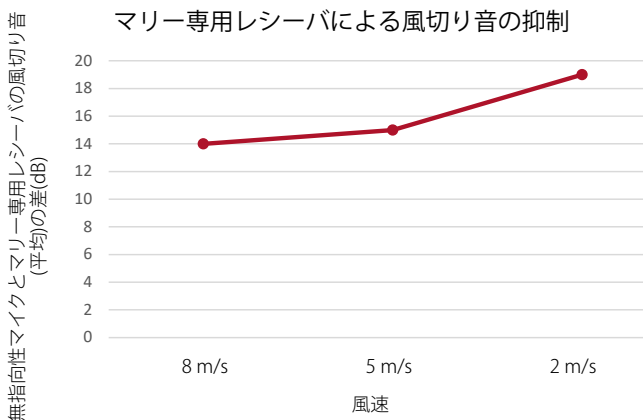


図4 風速の違いによる RIE の無指向性マイクとマリー専用レシーバの風切り音の抑制の比較

リサウンド・ワン マリーはどのようにフィットするか?

リサウンド・ワン マリーは、軽度から中等度の難聴が対象である。こうしたユーザーは保存された高周波数の空間聴取の手がかりを利用できるため、大きなメリットがあると考えられる。前後音源定位の解決と垂直方向の音源定位に重要なスペクトル情報は、5000 Hz 以上の周波帯にコード化されている。³² 高周波数帯まで拡張されたリサウンド・ワン マリーは、多くの軽度難聴者がこうした重要な手がかりを利用する価値が発揮される。聴覚システムは補聴器のマイクが異なる位置による作用に、音源定位をある程度適応させることができるため、^{33,34} リサウンド・ワン マリーを新規ユーザーにフィッティングしたとき、直ちに「自らの耳でのきこえ」に近づけることができ、最も自然な音の入力と増幅が可能になる。

聴覚の状態に関わりなく、人は音を聞く時は、聞く意図と音環境との相互作用に基づき、様々な聞き取りの戦略を直感的に適用する。状況によっては、環境の中の音を区別するため、自然な音質であることと、空間聴取の手がかりを頼りにできるかが非常に重要になる。干渉雑音が多い他の場所では、SN 比の向上が聞き取りの目標を達成するために重要となる。

「オールアクセス指向性」はリサウンドの新たな両耳聴取戦略である。それは臨床的なエビデンスに基づき、脳の両耳による聴覚プロセスをサポートし、活用するために適用される。³⁵ この方式に沿って、マリー専用レシーバを組み入れた状態でフィッティングすると、静かな環境、会話みの場合、および障害となる雑音が少なく比較的複雑ではない聞き取り環境では外耳道内のマイクがオンになる。別の環境では、リサウンド・ワン マリーの本体内のマイクを使い、環境音へのアクセスを維持しつつ SN 比を高める。専用の別プログラムで外耳道内のマイクの機能をオンにすることもできる。例えば、風切り音をしっかり低減し優れた自然な音質であるため、屋外プログラムの標準設定では外耳道内のマイク機能がオンになる。

まとめ

現在および潜在的な補聴器ユーザーの多くは軽度から中等度の難聴者であり、フィッティングの可能性が最も高い RIE 補聴器のマイクの位置による、不正確な音源定位および音質の低下は特に気になる点となる可能性がある。この問題を解決するため、リサウンドの「オーガニックヒアリング」の哲学に基づいた RIE の新しい形として、リサウンド・ワン マリーが開発された。リサウンド・ワン マリーは軽度から中程度の難聴を対象として、レシーバとマイクを同じモジュール内に收容し、外耳道内に挿入する。音が外耳道内で集音されるため、ユーザーの耳介の解剖学的特徴による固有のフィルタリング特性が保持され、補聴器の音が本来の音に近い形で脳に伝達される。リサウンド・ワン マリーのメリットは、良好な音源定位、空間聴取および音質の改善であり、耳介補正アルゴリズムと比較しても優れている。オールアクセス指向性はリサウンド・ワン マリーで使用することでより効果を発揮する。これは、リスニング環境に応じてマイク設定を最適化する、リサウンド両耳聴取戦略の最新バージョンである。カスタマイズされたリスニングプログラムとしてリサウンド・ワン マリーを選択することもできる。

参考文献

1. Goman AM, Lin FR. Prevalence of hearing loss by severity in the United States. *American Journal of Public Health*. 2016 Oct;106(10):1820-2.
2. Strom K. Hearing aid unit sales increase by 6.5% in 2019. *Hearing Review*. 2020;27(2):6,34.
3. Carr, K. (2020). 20Q: Consumer insights on hearing aids, PSAPs, OTC devices, and more from MarkeTrak 10. *AudiologyOnline*. Retrieved from www.audiologyonline.com.
4. Griffing T, Preves D. In-The-Ear aids: Part 1. *Hearing Instruments*. 1976; 3:23-24.
5. Griffing T, Preves D. In-The-Ear aids: Part 2. *Hearing Instruments*. 1976; 5:12-14,56.
6. Risberg DM, Cox RM. Comparison of In-The-Ear and Over-The-Ear hearing aid fittings. *Journal of Speech and Hearing Disorders*. 1986 Nov;51(4):362-9.
7. Festen JM, Plomp R. Speech-reception threshold in noise with one and two hearing aids. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1986; 79(2):465-471.
8. Pumford JM, Seewald RC, Scollie SD, Jenstad LM. Speech recognition with In-The-Ear and Behind-The-Ear dual-microphone hearing instruments. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2000 Jan 1;11(1):23-35.
9. Westerman S, Topholm J. Comparing BTEs and ITEs for localizing speech. *Hearing Instruments*. 1985; 36(2): 20-24.
10. Cubick J, Buchholz JM, Best V, Lavandier M, Dau T. Listening through hearing aids affects spatial perception and speech intelligibility in normal-hearing listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018 Nov 20;144(5):2896-905.
11. Byrne D, Noble W. Optimizing sound localization with hearing aids. *Trends in Amplification*. 1998 Jun;3(2):51-73.
12. Gatehouse S, Noble W. The speech, spatial and qualities of hearing scale (SSQ). *International Journal of Audiology*. 2004 Jan 1;43(2):85-99.
13. Picou EM. MarkeTrak 10 (MT10) Survey Results Demonstrate High Satisfaction with and Benefits from Hearing Aids. *Seminars in Hearing*. 2020; 41(1):21-36.
14. Udesen J, Piechowiak T, Gran F, Dittberner AB. Degradation of spatial sound by the hearing aid. In *Proceedings of the International Symposium on Auditory and Audiological Research 2013 Dec 15* (Vol. 4, pp. 271-278).
15. Van den Bogaert T, Carette E, Wouters J. Sound source localization using hearing aids with microphones placed Behind-The-Ear, In-The-Canal, and In-The-Pinna. *International Journal of Audiology*. 2011 Mar 1;50(3):164-76.
16. Denk F, Ewert SD, Kollmeier B. Spectral directional cues captured by hearing device microphones in individual human ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018 Oct 11;144(4):2072-87.
17. Keidser G, Rohrseitz K, Dillon H, Hamacher V, Carter L, Rass U, Convery E. The effect of multi-channel wide dynamic range compression, noise reduction, and the directional microphone on horizontal localization performance in hearing aid wearers. *International Journal of Audiology*. 2006 Jan 1;45(10):563-79.
18. Gran F, Bønnelykke JR, Haastrup A, Udesen J, Fortune T, Piechowiak T, Dittberner A. Spatial cue reproduction in modern Receiver-In-Ear hearing instruments. In *Proceedings of the International Symposium on Auditory and Audiological Research*. 2011 Dec 15;3:441-448.
19. Keidser G, O'Brien A, Hain JU, McLelland M, Yeend I. The effect of frequency-dependent microphone directionality on horizontal localization performance in hearing-aid users. *International Journal of Audiology*. 2009 Jan 1;48(11):789-803.
20. Kuk F, Korhonen P, Lau C, Keenan D, Norgaard M. Evaluation of a pinna compensation algorithm for sound localization and speech perception in noise. *American Journal of Audiology*. 2013.
21. Groth, J. Hearing aid directionality with binaural processing. *AudiologyOnline*. 2016 May. Available from www.audiologyonline.com.
22. Xu J, Han W. Improvement of Adult BTE Hearing Aid Wearers' Front/Back Localization Performance Using Digital Pinna-Cue Preserving Technologies: An Evidence-Based Review. *Korean Journal of Audiology*. 2014; 18(3): 97.

23. Bisgaard N, Vlaming M, Dahlquist M. Standard audiograms for the IEC 60118-15 measurement procedure. *Trends in Amplification*. 2010; 14:113-120.
24. Akeroyd MA. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014 Dec 8;18:1-7.
25. Best V, Kalluri S, McLachlan S, Valentine S, Edwards B, Carlile S. A comparison of CIC and BTE hearing aids for three-dimensional localization of speech. *International Journal of Audiology*. 2010 Oct 1;49(10):723-32.
26. Legarath SV, Simonsen CS, Dyrland O, Bramsloev L, Jespersen C. Establishing and qualifying a hearing impaired expert listening panel. Poster presentation at ICHON. 2012, Lake Tahoe.
27. Mason AJ. The MUSHRA audio subjective test method. *BBC R&D White Paper WHP*. 2002 Sep;38.
28. Liebetrau J, Nagel F, Zacharov N, Watanabe K, Colomes C, Crum P, Sporer T, Mason A. Revision of Rec. ITU-R BS. 1534. In *Audio Engineering Society Convention 137* 2014 Oct 8. Audio Engineering Society.
29. A.Wabnitz, N. Epain, C. Jin, and A. van Schaik. Room acoustics simulation for multichannel microphone arrays. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, 2010.
30. Zakis JA, Hawkins DJ. Wind noise within and across Behind-The-Ear and miniature Behind-The-Ear hearing aids. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015 Oct 21;138(4):2291-300.
31. Zakis JA. Wind noise at microphones within and across hearing aids at wind speeds below and above microphone saturation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2011 Jun;129(6):3897-907.
32. Langendijk EH, Bronkhorst AW. The contribution of spectral cues to human sound localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1999 Feb;105(2):1036.
33. Byrne D, Dirks D. Effects of acclimatization and deprivation on non-speech auditory abilities. *Ear and Hearing*. 1996 Jun;17(3 Suppl):29S-37S.
34. Whitmer WM, Schinkel-Bielefeld N, McShefferty D, Wilson C, Naylor G. Adaptation to hearing-aid microphone modes in a dynamic localisation task. In *Proceedings of the International Symposium on Auditory and Audiological Research 2019* (Vol. 7, pp. 197-204).
35. Groth J. The evolution of the ReSound binaural hearing strategy: All Access Directionality and Ultra Focus. *ReSound white paper*. 2020.

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.resoundpro.com

第二種医療機器製造販売業許可番号 14B2X00044

CVR no. 55082715