

# 実環境下における音の可聴性に対する 指向性の影響

シャーロット T.ジェスパerson, MA   ブレント カークウッド, PhD   ジェニファー グロス, MA

## 概要

補聴器の指向性マイクは、実験レベルでは、雑音下の音声認識を改善することが十分に証明されている。しかし、現実社会で認識されている指向性のメリットはそれほど劇的なものではない。過去10年間の指向性の技術開発は、実験レベルでのメリットの向上に重点が置かれており、最近では、両耳間のオーディオストリーミングによって両耳ビームフォーミングが可能になった。一方で、リサウンドは、現実世界での最大の効果を目指し、脳の聴覚処理を活用した指向性技術の適用手段を追求してきた。本試験では、リサウンドの両耳連動指向性Ⅲを市販の2つの両耳ビームフォーマーと比較し、両者の大きく異なる指向性適用方法で考えられる利点と欠点を調査した。

## はじめに

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と比べて増幅するものである。これは、騒音下での音声理解を改善することが証明されている唯一の補聴器技術である。しかし、指向性マイクからメリットを得るためには、いくつかの条件を満たさなければならない。ひとつは、対象信号は雑音源から空間的に離れている必要がある。また、対象信号は指向性ビーム内に存在し、装用者からおおよそ2メートル以内である必要がある。補聴器の指向性マイクは、頭部に装用した際に前向きビームとなるようデザインされている。つまり、補聴器装用者は聞きたい方向に顔を向けていなければならない。このような条件を満たした試験環境を構築すれば、補聴器の指向性マイクのメリットを示すことは容易にできる。しかし、現実世界の環境は、人為的な試験環境とはかけ離れている。実際の聞き取り環境は、音響、対象音の種類や位置、干渉する雑音の種類や位置といった点に関して予想不可能である。さらに事態を複雑にしているのが、こういった音はどれも移動する可能性があることや、装用者がある音から別の音に注意を移したいと思う場合があるということである。ある時点での興味の対象は、次の時点では競合する雑音になるかもしれない。

指向性マイクのメリットは、実験室内での試験で示唆するほどには認識されていないことが示されている<sup>1</sup>。この食い違いには、多くの音響因子と装用者固有の因子が関与している。さらなる因子は、対象音が補聴器装用者の顔を向けている方向に無い場合、指向性マイクは対象音の聞き取りを

妨げる可能性があるという単純なものである。指向性補聴器の装用者は、自分が聞きたい方向に頭を向けると仮定されている。しかし、日常生活では、自分が顔を向けていない方向の音を聞くことはごく一般的である。実際、成人の能動的な聞き取り時間の30%以上は、複数の対象音が存在する場合や、音が移動している場合、あるいはこれらの組み合わせの場合など、前方以外からの音に向けられていることが示されている<sup>2</sup>。

リサウンドは、これまでになく方法を用いて、このタイプの技術の利点と欠点の両方を考慮した指向性を適用している。両耳連動指向性Ⅲは左右の耳から入る別々の情報を比較して音環境の聴覚像を形成するという脳の能力を活用している。両耳連動指向性Ⅲは、前方以外からの音に対する可聴性を維持しつつ、前方の音に対して信号対雑音比 (SN比) を改善する。そのために、補聴器装用者が特定の音に集中したとしても、周囲の音のきこえは維持されるので、注意を自在に移すことができる<sup>3,4</sup>。両耳連動指向性Ⅲは、環境の中で音声と雑音の存在を検知し、そして音声が届く方向に応じて、補聴器の左右のマイクモードをコントロールする。可能性がある構成としては、両側空間認識、両側指向性、右側指向性の非対称指向性、左側指向性の非対称指向性がある<sup>5</sup>。両耳連動指向性Ⅲの背後にある原理は、他の高機能補聴器の進歩した指向性技術とは著しく異なっている。それらの技術で重視されているのは、実験レベルのある特定の環境においてSN比を最大限に改善することにある。この分野における最新の進歩は2つのマイクを搭載した補聴器を両

耳に装着することで、4つのマイクを活用して指向性機能を高めている。これは一般的に両耳ビームフォーミングと呼ばれる。両耳ビームフォーマーはモノラル信号をひとつ生成し、これが両耳に届く。これ以外にも音源定位のための手がかりを保持しようとする幾つかの機能があるかもしれないが、このような方法は全体的な効果として両耳聴を有効とする音響信号に含まれる手がかりを除去してしまう。実験レベルでの雑音下の音声試験では、従来の指向性と比べて、前方の音声に対する指向性のメリットは控えめな改善のみ、もしくはほとんど改善が認められていない<sup>6,7</sup>。大きな差が認められなかったことは恐らく、両耳ビームフォーミングにより両耳聴の手がかりが損なわれることに関連すると考えられる。

両耳ビームフォーマーから得られる追加のメリットの実際の価値はどの程度と言えるだろうか。言い換えると、雑音下の前方の音声に対する音声認識のわずかな改善というメリットと、他の方向からの音声の可聴性の低下というデメリットは、いかに天秤にかけられるだろうか。この疑問に答える前に、音声が多様な方向から届く場合に、実験室条件での雑音下の音声認識のパフォーマンスがどの程度影響を受けるのかを調査することは興味深いことである。本論文で報告した調査では、リサウンドの両耳連動指向性Ⅲを搭載した補聴器を装着した被験者と、両耳ビームフォーミング搭載の2種の市販の高機能補聴器を装着した被験者の成績を比較した。

調査課題は以下の通りであった。

- 両耳連動指向性Ⅲと両耳ビームフォーマーでは、前方の音声に対して雑音下の音声認識に差はあるか。ある場合どの程度か。
- 両耳連動指向性Ⅲと両耳ビームフォーマーでは、横または後方からの音声に対して雑音下の音声認識に差はあるか。ある場合どの程度か。

## 実験方法

### 被験者

両耳中等度難聴の聴覚障害者10例(男性6例、女性4例)が実験に参加した。

### 補聴器と装用

実験に使用した補聴器は、両耳連動指向性Ⅲを用いたリサウンドのBTEと、両耳ビームフォーミングを搭載した他の

メーカー2社の高機能BTE補聴器（以後、「補聴器A」、「補聴器B」と呼ぶ）であった。

ゲイン処方の変異を除外するために、3種の補聴器を、各被験者の個々のオーディオグラムに対してNAL-NL2でフィッティングした。他のメーカーの補聴器のゲインを微調整し、リサウンドの補聴器のゲインに適合するようにした。これは、65dB SPLのISTS信号(国際音声検査信号)を用いてテストボックスで行った。可能な限り500~3000Hzの全周波数に対してリサウンドの補聴器の $\pm 2$ dB以内にゲインを適合させた。

リサウンドの補聴器は両耳連動指向性Ⅲ、他の補聴器では両耳ビームフォーミングに設定した。他の設定はすべて、メーカーのデフォルトのままにした。

### テスト素材と設定

被験者は、競合会話テストのためのデンマーク語オープンセット会話集を用いた語音聴取テストを行った。このテストは、以降「DAT」試験と呼ぶ。これは、語音聴取閾値(SRT)でのSN比を得られる適応型試験である。この試験では、信号と競合雑音のどちらも個々の話者である。これは、音声に似せた雑音やスピーチバブルノイズをマスキングとして使用した他の多くの適応型雑音下語音聴取試験とは異なる。情動的マスキング(言語情報などの意味のある情報を含むノイズ。ノイズ音の度合いよりも、聞き手がその意味のある情報に注意を向けた場合、リスニングタスクに影響を与える可能性がある)とエネルギー的マスキング(音響信号などのノイズの割合が大きく、ターゲットとなる発話(発話が妨害されるノイズ)が存在するため、競合信号として個々の話者を使用する試験は非常に難易度が高い。競合音声は明瞭であるため、DAT試験は、一般的な雑音下の音声試験よりも実際の状況をよく表していると思われる。会話集には、独自のデンマーク語の200の文章が3セット含まれる。その文章は、以下に示すように交換可能な2つのターゲット語を含んだ固定された文(キャリアセンテンス)で構成されている。

『[人の名前]は昨日、[○○(名詞)]と[△△(名詞)]について考えた』

「名前」は呼びかけを表し、各空白部分は個別の名詞を表す。名詞は単数形で、各名詞の前にデンマーク語の不定冠詞(enとet)を含む。

文例は以下のようなものである(日本語/デンマーク語)。

- ダグマール(Dagmar)は昨日、救助とスーツケースについて考えた/Dagmar tænkte på en redning og en kuffert i går.
- ダグマール(Dagmar)は昨日、捕食動物とつま先について考えた/Dagmar tænkte på et rovdyr og en tå i går.

200の文章3セットはそれぞれ別の女性話者が話し、特定の名前で開始する。名前はDagmar、Asta、Tineである。この試験名「DAT」は、この名前の頭文字を取ったものである。

本試験の被験者の課題は、「Dagmar」という名前で始まる文章の標的名詞を聞き取り、繰り返すことであった。テスト文章は65dB SPL固定で再生した。「Asta」と「Tine」の文章にはマスキング(雑音)が含まれていた。マスキング文章は、「Dagmar」文章の再生中に同時に他のスピーカーから再生されたが、被験者に対して、マスキング文章に関する説明は一切しなかった。各試験で、200のマスキング文章2セットから2つのマスキング文章が無作為に選ばれた。このマスキング文章も、最初は65dB SPLで再生した。被験者が文章中のテスト名詞の両方を繰り返すことができると、マスキングの音圧レベルを2dBずつ上げた。テスト名詞のひとつまたはどちらも正しく識別できない場合は、マスキングの音圧レベルを2dBずつ下げた。被験者には、解答の正誤について知らせなかった。

録音されたすべての文章の時間は当然ながらわずかに異なるため、テスト文章の長さが正確に適合するよう、各試験では各マスキング文章に時間の拡大または圧縮を行った。時間の拡大と圧縮は、音声分析プログラム(PRAAT)を用いて行った<sup>9)</sup>。文章リストの難易度はすべて等しいわけではないため、被験者全体への影響が少なくなるよう難易度の平衡化を試みた。

実験に用いた補聴器はすべて、環境下の音声と雑音の同定に依存した適応特性を有している。従って、確実に適応特性が作用するよう試みた。DATの会話集に加えて、DantaleII試験<sup>10)</sup>の音声に似せた雑音を45dB SPLで再生した。音声に似せた雑音は、スピーカーから被験者のすぐ左側、真後ろ、すぐ右側に設置し再生した。さらに、ISTS信号を、試験時間中は常に前方のスピーカーから65dB SPLで再生し、テスト文章とマスキング文章を再生している間は短時間のみ休止した。各試験条件に対して、補聴器のアクティブなパラメータをすべて有効に

するため、最初の試験を開始する30秒前にISTS信号とDantaleII試験雑音を提示した。

各補聴器のセットに対して、テスト文章を3つのスピーカーから再生する3つの条件を決定した。第1条件では、標的的文章を被験者のすぐ前方に置かれたスピーカーから再生し、第2条件では被験者の左側やや後方から、第3条件では被験者の後方やや右側から再生した。3つの条件の順番は、被験者間で平衡化した。マスキングは、残りの2つのスピーカーから再生した。3つの試験設定を図1に示す。

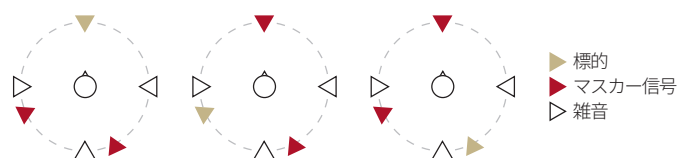


図1. 標的話者の声が前方、横、および後方から届く設定

各補聴器に対して、被験者は続けて3つの全条件を実施した。例えば、リサウンドの補聴器で3つの文章リスト、補聴器Aで3つの文章リスト、補聴器Bで3つの文章リストというように行った。試験した補聴器の順番は、被験者に対して無作為化した。各被験者は、3回練習リストを行ってから本テストのデータ収集を開始した。練習は、被験者が実際のデータ収集時に使用する最初の補聴器を装着している時に行った。

## 結果

3カ所のターゲット音声に対して、デバイス間の統計学的比較を行った。データの有意性は、チューキー検定を用いた。

図2に示すようにターゲット音声を被験者の前方に置くと、2つの両耳ビームフォーミング型補聴器で得られたSRTに有意差はなかった( $p=0.23$ )。また、補聴器Aはリサウンドの補聴器より有意に優れた成績を示した( $p<0.01$ )。リサウンドの補聴器と補聴器Bの間に有意差はなかった。

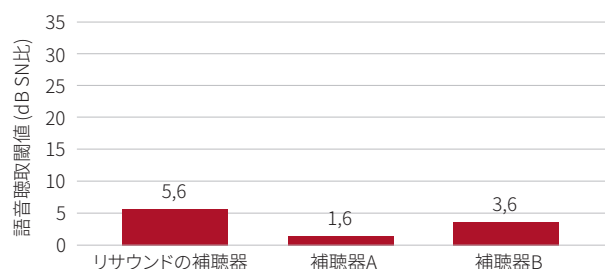


図2. ターゲット音声を前方に置いた時の3組の補聴器の平均SRT値が低い方が優れている。

ターゲット音声を被験者の左に置いた試験設定では、補聴器Aと補聴器Bで得られたSRTに有意差はなかった( $p=0.41$ )。図3に示すように、リサウンドの補聴器で得られたSRTは、補聴器A( $p<0.001$ )および補聴器B( $p<0.001$ )より有意に優れていた。

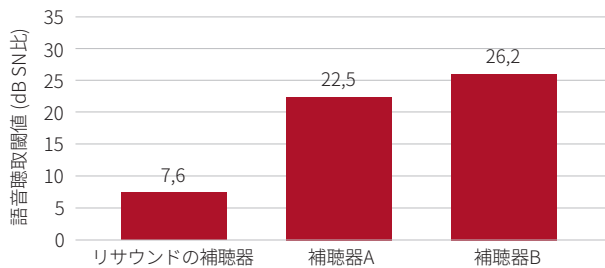


図3. ターゲット音声を左に置いた時の3組の補聴器の平均SRT値が低い方が優れている。

ターゲット音声を被験者の後方に置くと、補聴器Aと補聴器Bで得られたSRTに有意差はなかった( $p=0.44$ )。この条件では、リサウンドの補聴器で測定した語音聴取閾値は他の2つより有意に優れていた。図4に示すように、標的話を被験者の後方に置くと、リサウンドの補聴器の成績は、補聴器B( $p<0.001$ )および補聴器A( $p<0.01$ )より非常に有意に優れていた。

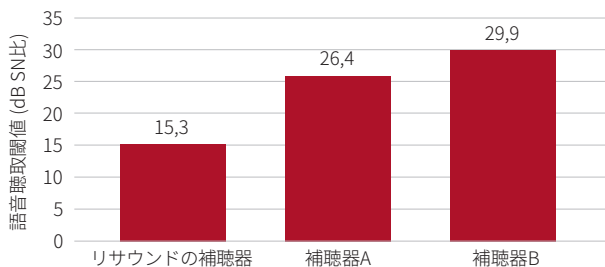


図4. ターゲット音声を後方に置いた時の3組の補聴器の平均SRT値が低い方が優れている。

## 考察

本試験は実験室条件下で行ったが、これは、指向性補聴器の実際の機能がいかに影響を受けるのかを示すのに役立つ。被験者に、自分の周りの音をモニターし、ターゲット音声を識別し、注意をそれに向けるよう求めた。標的とマスクはすべて単一音声であり、ターゲット音声の方向を継続的に変更した。実環境の聞き取り環境では多くの場合、良好なコミュニケーションのため、環境をモニターし、対象音を認識、識別し、その音に注意を向ける能力が必要である。さらに、音声は対象音と競合雑音の両方である場合が多い。単純で日常的な例は、家族の集まりである。家族間で活発な会話が行われている間は、話者があつという間に代わり、時には会話が増えることもある。複数の会話が同時に進行

し、話題も急速に変化する。一方向のみに限定して聞くことは、どうしてもこのような環境に参加する能力を制限するものになってしまう。

本試験では予想通り、3つの補聴器全てで前方からの音声には指向性のメリットを示した。両耳ビームフォーミング搭載補聴器と比較した両耳連動指向性Ⅲを用いたリサウンドの補聴器は、補聴器Aより4dB劣ったが、補聴器Bとの有意差はなかった。この結果は、特定の技術に依存すると思われる両耳ビームフォーミングのメリットを裏付けるものとなった。しかし、ターゲット音声を横または後方から提示すると、リサウンドの補聴器の成績は、いずれの両耳ビームフォーミング型補聴器よりも10~19dB優れていた。従って、前方以外からの標的音に対して可聴性が失われるという両耳ビームフォーミングのデメリットは、両耳連動指向性Ⅲよりも両耳ビームフォーミングの方がSN比が良好であるというメリットをはるかに上回るものであった。言い換えれば、あらゆる日常の聞き取り状況を考慮すると、ごくわずかなメリットのために多くの損害を被っているのであった。

本試験の被験者は、試験期間中前を向くよう指示された。すなわち、特定の試験で標的音声を同定しても、そちらの方を向くことは認められなかった。これは不自然な聞き取り状況であり、現実世界では、人は頭を動かして聞き取り環境の方を向き、自分の聞きたい方に頭を向けるものと異議を唱える人もいるであろう。確かにその通りである。横と後方からのターゲット音声については、被験者がそちらの方向に頭を向けていれば、もっと良好な成績が得られただろう。しかし、自分では検出できない音源方向に自ら頭を向けることは困難である。両耳ビームフォーミングよりも両耳連動指向性Ⅲの方がSN比にはるかに大きなメリットがあるのは、環境音の認識が非常に高い頻度であることと音声認識が優れていることを意味している。言い換えると、両耳連動指向性Ⅲの優れた成績は、被験者が頭を動かすことができたとしても期待できたであろう。なぜなら、そうすればもっと容易に素早くターゲット音声を検出し、そちらの方に頭を向けることができるからである。

指向性は、聞き取り中に音の方向を向こうとする自然な行動を妨げる可能性があるという考えは、Brimijoinら<sup>11</sup>によって裏付けられている。この実験では、被験者はガヤガヤと騒がしい環境で特定の話者の位置を特定するよう求められ、被験者の頭の動きを追跡した。被験者には、状況に応じて

指向性の強弱いずれかの指向性マイクを装備した補聴器を装着させた。その結果、強く指向性のかかった補聴器を装着した被験者は対象の話者の位置を特定するのに長い時間がかかるだけでなく、頭の動きが大きく、対象の位置を特定するまでに、話者とは異なる向きに頭を動かしていることが分かった。長い時間、複雑な探索動作を行うと、騒がしいレストランで複数の話者が会話しているような状況では、ターゲット信号を喪失してしまう可能性が高くなる。

Bestら<sup>12</sup>も、強い指向性は、環境の中で音声を見つけ注意を向けるという装着者の能力を低下させる可能性があることを裏付けている。彼らは、方位角 $0^{\circ}$ 、 $+/-22^{\circ}$ 、 $+/-67.5^{\circ}$ でターゲット音声を提示し、装着者にターゲット音声の場所を特定しそちらの方に頭を向けるように指示した。2つの両耳ビームフォーマーと従来の指向性処理を使用した被験者の結果を比較した。音声は正面または方位角 $22^{\circ}$ の場合、両耳ビームフォーマーでは、従来型の指向性と比べて音声認識の成績が5%未満のわずかな上昇を示した。標的音声をこれより広い角度で提示すると、従来型の指向性も両耳ビームフォーマーも成績が低下したが、後者の方が著しく低下した。従来型の指向性と比べて、両耳ビームフォーマーでは約15%の低下が観察された。この低下は恐らく、音声の場所を特定するためにより労力を要する探索動作が必要であることと、前方を向いていない時には狭い指向性ビームの方向を適切に同定することができないことの両方を反映したものと思われる。雑音状況下の音声理解の改善における両耳ビームフォーマーの有用性は、現実世界のきこえのニーズが予測不可能で複雑であることから込み入ったものになり、実際、装着者や特定の状況によっては有害にもなり得る。

試験は実験レベルで行われたが、本試験の結果は指向性の従来の考えやその適応方法に関連した一長一短の一部を示すものである。前方からの音のSN比の改善を最大化することのみを求めるシステムは、固有に設計されたケースでは若干のメリットを示すかもしれないが、それ以外のケースではパフォーマンスが非常に悪い。実環境で最大限のメリットを得るためには、ひとつの特定の使用ケースで得られるメリットのために、それ以外のケースの場合のデメリットを大きくしてはならない。指向性に対するリサウムのアプローチでは、指向性のメリットと環境音の可聴性のバランスの最適化を目指している。この方法により、補聴器装着者は聞きたいものを最も良い状態で聞くことができ、また聞きたいも

のが出てきた場合は容易に注意を移すことができる。両耳連動指向性Ⅲでは良好なSN比が得られるが、音環境の中で周囲で何が起きているかを判断する能力が制限されることはない。両耳聴のメリットは、右耳と左耳からの様々な音を比較対照する脳の能力から生まれたものであり、両耳連動指向性Ⅲは、両耳聴を可能にする分化した音の流れを脳に供給する。

## 結論

- 実験室で試験した全3種の補聴器の指向性は、装着者の前方からの音声に対して、無指向性よりも指向性のメリットを示した。
- ターゲット音声を装着者の前方に置いた場合、補聴器Bの両耳ビームフォーマーは、両耳連動指向性Ⅲと比べて有意なメリットを示さなかった。補聴器Aの両耳ビームフォーマーは示した。
- ターゲット音声を装着者の前方以外に置いた場合、テストした全3種類の補聴器とも、雑音下の音声を50%認識するには、雑音に比し音声の割合が大きい必要があった。
- 標的音声を装着者の前方以外に置いた場合、両耳連動指向性Ⅲは、両耳ビームフォーマー型補聴器と比べて10dBを超える大きなメリットを示した。

## 参考文献

1. Cord MT, Surr RK, Walden BE, Olson L. Performance of directional microphone hearing aids in everyday life. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2002; 13: 295-307.
2. 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.
3. Groth J. Binaural Directionality II: An evidence-based strategy for hearing aid directionality. 2016; ReSound white paper.
4. Groth J. Binaural Directionality III: Directionality that supports natural auditory processing. 2016; ReSound white paper.
5. Stender T. Binaural Fusion by ReSound: Technology optimized as nature intended. 2012; ReSound white paper.
6. Völker C, Warzybok A, Ernst SMA. Comparing binaural pre-processing strategies III: Speech intelligibility of normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. 2015; 19: 1-18.
7. Picou EM, Aspell E, Ricketts TA. Potential benefits and limitations of three types of directional processing in hearing aids. *Ear & Hearing*. 2014; 35(3): 339-352.
8. Nielsen JB, Dau T, Neher T. A Danish open-set speech corpus for competing-speech studies. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2014; 135(1):407-420.
9. Boersma, P., and Weenink, D. "Praat: Doing phonetics by computer (version 5.1.40) [computer program]," 2011; <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>.
10. Wagener K, Josvassen JL, Ardenkjær R. Design, optimization, and evaluation of a Danish sentence test in noise. *Journal of International Audiology*. 2003; 42: 10-17.
11. Brimijoin WO, Whitmer WM, McShefferty D, Akeroyd MA. The effect of hearing aid microphone mode on performance in an auditory orienting task. *Ear Hear*. 2014; 35(5): e204-e212.
12. 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.

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](http://www.resound.com)

CVR no. 55082715

© 2017 GN Hearing A/S. 無断複写・転載禁止。



MKD0984 LT 11 1705A-17055500

**ReSound GN**  
.....