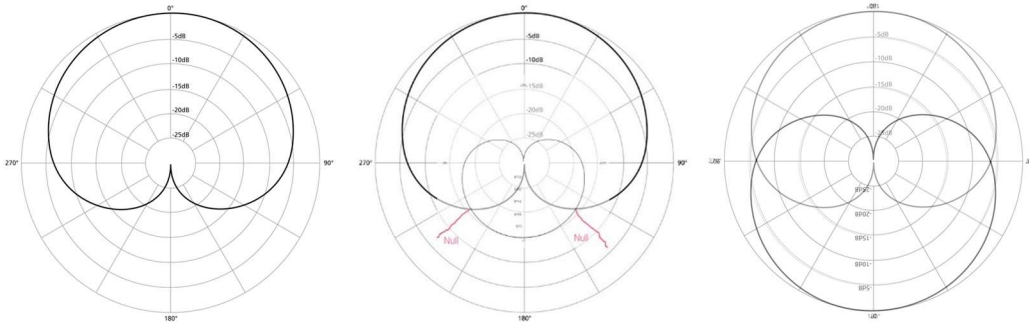


シリコンマイク技術

によるマルチチャンネルアダプティブ指向性システムの進化

John Ellison, M.S.



現代の補聴器技術では、複数マイクを持つ指向性システムが音響環境に応じてさまざまなレスポンスパターンを変えることができるようになっています。例えば、ノイズ源を特定し、音響ヌルあるいは指向性マイクによるヌルをノイズ源に向けようとするシステムです。この技術は、言葉の明瞭さやノイズのある環境下での快適さを向上させる実力を持っています。これまでの実用化が現実の世界で常に有益というわけではありませんでした (Bentler et al., 2004)。この現実世界での有益さを欠く原因の一部には、マイクの「ドリフト」と、これに続くマイクの不マッチがあります。この不マッチは、指向性マイクの性能にネガティブな影響をもたらすものです。この度、スターキー・ヒアリング・テクノロジーズの新製品では、マイクのドリフトを最小限にし、その結果として、時間を経ても安定し変わらない性能を持つ複数マイク指向性システムを実現しました。本書では、アダプティブ指向性マイクと、その特性をわかりやすく説明し、マイクのドリフトに対するスターキーの解決策を紹介します。さらに実験データに基づき実証された、スターキーの新しい「マルチチャンネル - アダプティブ - 指向性 - ビーム形成 システム」の利点をご紹介します。

アダプティブ指向性の動作

補聴器の場合、すべての指向性マイクは既知の間隔で配置された2つ以上のポートを持っています。

最もシンプルな指向性マイクでは、各ポートから単一のマイク振動板に音響エネルギーを送りこみ、各ポートに音が到達する固定タイミング差を利用して動作します。各ポートでの到着時間の差、または遅延が、指向性システムのポーラレスポンスを決定します。単一の振動板を持つシステムではポーラパターンは固定で変化しませんが、複数マイクを持つシステムでは遅延をデジタル処理して、ポーラレスポンスを変更することができます。ポート間の物理的距離を変えるかのように、デュアルマイクシステムにおけるマイク間のデジタル遅延を利用することで、指向性パターンを変えることができます。また、マルチチャンネル補聴器において、この遅延を変化させると周波数域ごとに異なる指向性パターンを作ることができます。

今日の指向性、あるいはビーム形成マイクシステムの動作は、補聴器メーカーごとに異なります。例えば、何を基に単純なアダプティブ指向性システムと見なすか、完全に「アダプティブな」指向性システムと見なすかについて違いがあります。後者については Elko と Pong (1995) が解説しています。完全アダプティブ指向性システムにおいては、補聴器ごとにユーザーの周囲にある音のタイプや位置を音響的に評価し、これには複数マイク間の遅延特性が利用されています。補聴器はこの遅延に基づいて音響エネルギーの発生場所をマッピングし、レスポンスヌルあるいはマイクレスポンスの感度が最も低い箇所を優勢なノイズ源に向けながら、レスポンスを継続的に変化させます。

こうすることで、聞き手の周りのノイズを最大限に減少させる効果があります。このレスポンスが最適化されるのは、補聴器の各周波数チャンネルでこの機能が動作し、マイクレスポンスが連続的に変化してすべての周波数域でノイズが最小となるときのことです。完全アダプティブ指向性システムの真の利点は、ヌルを聞き手の周りのあらゆる軸外方向に向けることができることです。対照的に、従来のアダプティブ指向性マイクは既定の組の中からポーラレスポンスを個々に切り替えており、ノイズ源がヌル領域から外れた時にはノイズの圧縮量が制限されることが考えられます。このため、完全アダプティブ指向性システムは、少なくとも固定指向性システムやポーラレスポンスの組の間を個々に切り替える指向性システムと同等、もしくはそれ以上に機能することになります。

完全アダプティブ指向性システムの予測できない注意点として、成人と小児ともに、補聴器装用によって価値があるかもしれない音源を抑制してしまう危険性があげられます (Kuk, Keenan, Lau & Ludvigsen, 2005; Ricketts, Galster & Tharpe, 2007)。スターキーの新しい完全アダプティブ指向性システム、アキューイティ指向性™では、このような点をスピーチ ID、つまり「軸外ノイズ追跡・抑制」で対処します。軸外ノイズ追跡・抑制とは、意味がある音（聞き手の後ろ半球からの音声等）からヌルを遠ざけることによって、ノイズの多い環境下で音声を維持する機能を意味しています。具体的にいうと、システムが不確定な軸外ノイズに対して滑らかに抑制しつつ、次の論理層が、ノイズと同じ場所に存在する優勢な音声を探し出します。聞き手の側面、あるいは背後に話者がいると認識すると、補聴器はヌルをアダプティブ(適応的)に話者から遠ざけ、ポーラレスポンスの感度の高い領域、またはレスポンスロープを話者に向けます。話者が聞き手の周りを移動すると、ヌルは連続して滑らかに話者から離れ、レスポンスロープは話者の位置を追跡します。軸外のノイズを抑制して軸外の話者を追跡するという完全にアダプティブな動作が、補聴器の各チャンネルで行われます。

指向性動作の敵 “ドリフト”

今日のほとんどの補聴器に使われている従来型のエレクトレットマイクは、ポリエステルの振動板を使用しており、この振動板は電荷を持ったメタルバックプレートから数ミクロン離れた位置に設置されています。吊り下げられた振動板に音が当たると振動板が動き、音波のエネルギーに同調してメタルプレートに近づいたり離れたりします。2枚の表面が帯電しているため、この動きが変動電圧を誘導します。この電圧変化は元の音に電気的に同等なものであるとして、補聴器で検出、増幅、処理することができます。

エレクトレットマイクでは、振動板と縁取りが緩くつながっています。縁取りの素材を選択する際に妥協しなければならないことがたくさんあり、これには、強度、厚み、柔軟性、水蒸気の透過性、マイクの部品を互いに接続するた

めに必要な接着剤への適合性が含まれ、その他にも検討することがあります。優れた設計の部品であっても、湿度、温度変化、環境汚染物質の影響を受けます。時間の経過とともにこれらの要因がエレクトレットマイクの感度に予測できない変化をもたらします。これが「ドリフト」として知られる現象です。指向性システムでは、指向性入力口に経年変化がないと仮定すると、従来の単一振動板がドリフトから受ける影響は無視できる程度です。しかしながら、複数マイクを持つ指向性システムでは、ドリフトは大変にネガティブな結果をもたらします。そして完全アダプティブ指向性システムが依存しているのはまさにこのシステムです。工場出荷時には、複数マイクを持つ指向性補聴器のマイク同士の感度はマッチしていますが、時間の経過とともにドリフトはマイクに感度のミスマッチを起こし、指向性レスポンスを損ないます。図1はデュアルマイク指向性システムの500Hzにおいて、ポーラパターンへ0.8dBのマイク感度ミスマッチの影響を示しています。この例では、青のポーラレスポンスは聞き手後方のおよそ115°と255°のノイズを抑制する、はっきりとしたレスポンスヌルを示しています。赤のレスポンスでは、マイクの感度ミスマッチの結果として、このヌルがほとんど消失しています。

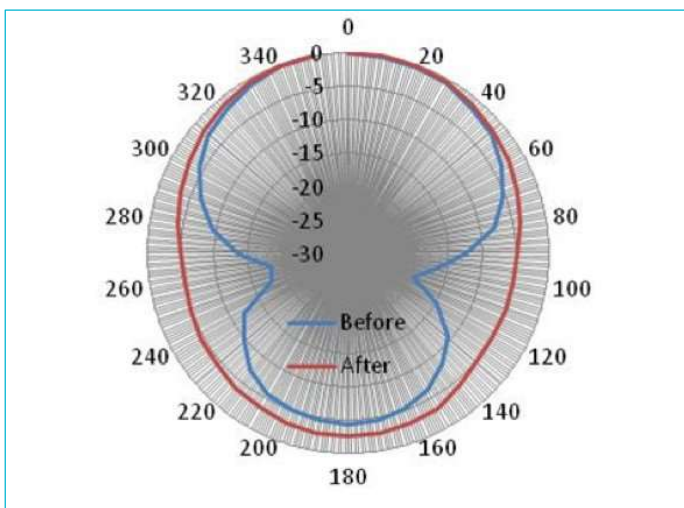
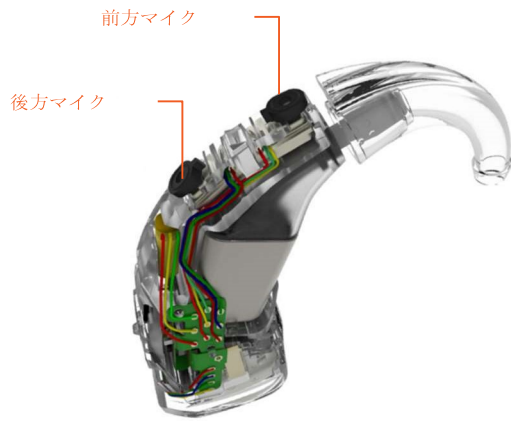


図1:デュアルマイク指向性システム、500Hzにおける0.8dBマイク感度ミスマッチのポーラパターンへの影響



臨床の現場で直面している課題は、ドリフトによるマイク感度のミスマッチが原因で、補聴器が実質的に常時無指向性モードのままであるということです。これは補聴器が自動、あるいは手動で指向性モードに切り替えた時であっても起こります。その結果、補聴器ユーザーは、時間の経過とともにノイズ環境下で性能が低下したと訴えることが考えられます。さらに、指向性システムは無指向性と比べてマイクノイズが多いため、「指向性」に切り替わるとマイクノイズが増えるという訴えがあるかもしれません。結果として、所定の電気音響的なマイク性能の評価が推奨されますが、適切な測定器がない場合、指向性能を実証することは難しいかもしれません。

解決策：ドリフトしないマイク

この度のスターキーの新しい指向性システムは、アキューイティ指向性を搭載し、デュアルマイクによる自動切替機能を持つ、完全アダプティブな指向性システムであり、MEMS (Micro-Electronic-Mechanical System/微小電気機械システム) マイクを用いた、ドリフトを最小限に抑えるマイク技術を利用しています。詳しくは、Galster and Warren (2014)の白書「MEMS マイクを解き明かす」をご参照ください。MEMS マイクは、シリコン結晶から作られ、標準的なエレクトレットマイクよりも湿度と温度の変化に耐性があります。MEMS マイクは、環境条件に左右されることなく、経年によるドリフトとそれに続くマイクの不マッチが少なく、一定のレスポンスを生み出します。その結果として誕生したのが、時間がたっても安定した性能を発揮するように設計された完全アダプティブなマルチチャンネル指向性マイクシステムです。

システム品質テスト

スターキーと Knowles Cooperation (MEMS マイク製造元) が行った研究では、加速劣化試験後の長期的なマイク性能の変化についてテストしました。このテストでは、MEMS マイクの補聴器とエレクトレットマイクの補聴器を多湿、塩水噴霧、温度変化の環境下にさらしました。図2に加速劣化試験の結果を示します。この結果から、高温多湿にさらされた後の MEMS マイクのドリフトの大きさと変動は、エレクトレットマイクに比べて非常に小さいことがわかります。MEMS マイクの公称ドリフトは、方向と位相において一貫性があり、マイク間のミスマッチが最小になります。つまり、デュアル MEMS マイクでドリフトが起こったとしても、2つのマイクがドリフトに対して一貫性があるため、ミスマッチが最小になるということです。これらのテスト結果から、MEMS マイクは複数回の感度キャリブレーションが不要であり、補聴器の寿命を通して指向性能に一貫性があることを示唆しています。

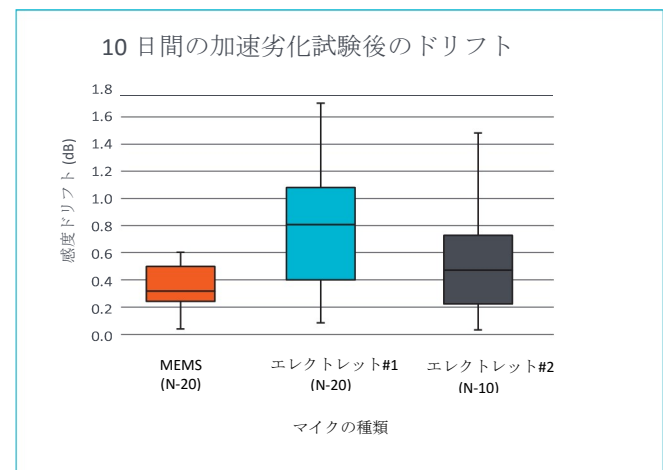


図2: 10日間の加速劣化試験後のMEMS マイクと一般的に使用されるエレクトレット補聴器マイクの感度ドリフトを箱ひげ図にプロットした。各ボックスの中央横線はドリフトの中央値を示し、上下の横線は四分位範囲を示す。各ひげ線は最小と最大のドリフトを表す。

システムの検証と妥当性確認

スターキーで実用化されている3つの指向性システム：1) アキューイティ指向性、2) 無指向性から固定の指向性ポーラパターンに自動的に切換るシステム(例 ダイナミック指向性)、3) 固定無指向性を使用して、難聴者のノイズ環境下での聞き取りテストの成績を、研究室内と音場で試験して比較しました。被験者は全員、NAL-NL1 もしくはスターキー独自の e-STAT® 処方式のターゲット値にフィッティングしました。

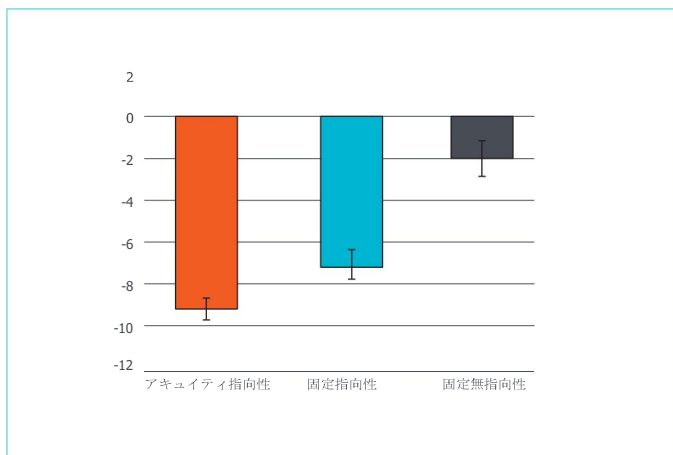


図3: 3つの指向性モードでのmHINTを用いた平均50%正答のSN比。エラーバーは標本平均の標準偏差を表す。

研究室では「騒音のある環境下での聞き取りテスト修正版 (mHINT/modified Hearing in Noise Test)」により成績を測定しました。このテストでは、聞き手の正面または背面から音声呈示し、その間にスピーカー単体、または聞き手の周りを取り囲んだ複数のスピーカーからノイズを呈示するものです。図3に、正面からの音声、90°から270°の間のランダムな場所からノイズを呈示した場合のテスト結果を示します。結果は、アキュイティ指向性の成績が著しく改善しており ($F(8, 2)=99.66$, $p<.001$)、ダイナミック指向性、無指向性の順で続きます。アキュイティ指向性は固定指向性の条件より2dB以上も成績が良く ($p<.01$)、最大で4dB以上、最小で1dB優れています。固定指向性とアキュイティ指向性の両方でのmHINT閾値は、無指向性モードよりもそれぞれおよそ5dBと7dB改善しています。このことから、成績が大きく改善されるアキュイティ指向性により、補聴器装用者の聞き取りは大幅に改善できることが示唆されます。

また、約3週間の間、被験者は「聴き取りの労力に対するマグニチュード推定法 (MELE/Magnitude Estimation of Listening Effort, Humes, Christensen & Bess, 1997)」を使用して、聴き取り労力の尺度について評価されました。MELEの課題では、複数のノイズ環境下における音声聞き取りの難しさを被験者が0から100の尺度で評価し、100が最小の労力、0が最大の労力を表します。ここでは、2つの補聴器のメモリーを1)アキュイティ指向性と2)ダイナミック指向性 (例: 固定ボラパターンを持つ自動指向性切換えモード) に設定して、比較しました。

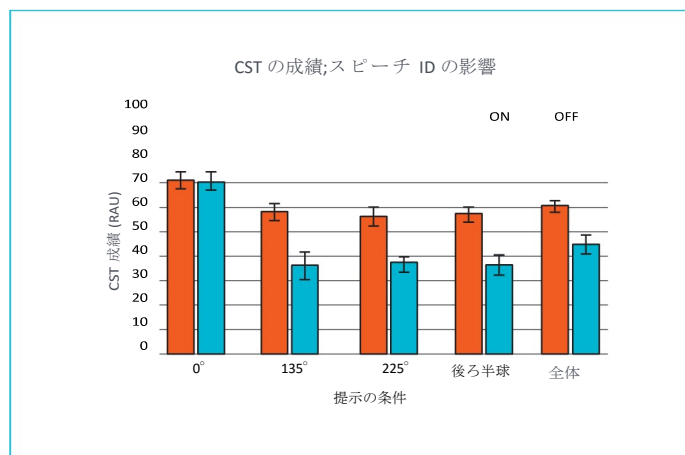


図4: スピーチIDがオン(オレンジ)とオフ(青色)の状態の拡散ノイズ中でのmCSTの成績。音声源の角度は0°、135°、225°。エラーバーは平均の標準誤差を表す。

被験者に割り当てられたメモリーは知らされず、無作為に選ばれた均衡の取れるものとなりました。被験者は、主観的に自身が所持している補聴器と比較して音声の明瞭度が改善したと報告しただけでなく、アキュイティ指向性がダイナミック指向性よりもかなり聞き取りやすいと評価しました ($F(1, 63)=5.282$, $p<.05$)。

さらに、アキュイティ指向性の特長であるスピーチIDの検証も行いました。スピーチIDは、後ろ半球で発生する音声信号からボラレスポンスのヌルをスムーズに遠ざけ、増幅ローブを話者の方向に伸ばすことによって、ノイズの多い環境では後ろ半球からの音声信号を維持するように設計されています。

「連結文テスト修正版 (mCST/modified Connected Sentence Test)」を使用して、スピーチIDをオンとオフにした時の成績を比べました。mCSTでは、円形に並べられた8つのスピーカー中7個から無相関ノイズを呈示し、0°、135°、225°の方位にあるスピーカーのうち無作為に1つから音声呈示されます。図4では、スピーチIDを有効にした場合に、方位135°からの音声 ($t=8.5$, $p<.0001$) と方位225°からの音声 ($t=8.1$, $p<.0001$) では、聞き手の成績が20%近く大きく改善し、音声が正面から来たときには影響を受けないことを示しています。最後に、図5はスピーチIDを持つアキュイティ指向性、固定指向性、及び無指向性モードから得られた結果です。方位180°からの音声と8個のスピーカー中7個からの無相関ノイズが呈示された時のmHINTの結果を示しています。結果として、スピーチIDを設定したアキュイティ指向性の性能は無指向性と同等で、固定指向性レスポンスよりも3dB近く優れており、スピーチIDを設定したアキュイティ指向性は無指向性と同程度に背面からの音声を維持することを示唆しています。これらの結果から、スターキーのスピーチIDがノイズの多い環境下で後ろから話者が話す際に重要な音声をうまく保護できることを意味します。

参考文献

Bentler, R.A., Tubbs, J.L., Effe, J.L., Flamme, G.A., & Dittbener, A.B. (2004). Evaluation of an adaptive directional system in a DSP hearing aid. *American Journal of Audiology*, 13(1), 73-9.

Elko, G.W. & Pong, A.N. (1995). A simple adaptive first-order differential microphone. Acoustics Research Department, AT&T Bell Laboratories.

Galster, J.A. & Warren, D. (2014). Micro-electronic-mechanical-systems. Starkey Hearing Technologies, Technical Paper.

Humes, L.E., Christensen, L.A., & Bess, F.H. (1997). A comparison of the benefit provided by well-fit linear hearing aids and instruments with automatic reductions of low-frequency gain. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 40, 666-685.

Kuk, F., Keenan, D., Lau, C., & Ludvigsen, C. (2005). Performance of a fully adaptive directional microphone to signals presented from various azimuths. *Journal of the American Academy of Audiology*, 16, 333-347.

Ricketts, T.A., Galster, J.A. & Tharpe, A.M. (2007). Directional benefit in simulated classroom environments. *American Journal of Audiology*, 16, 130-144.

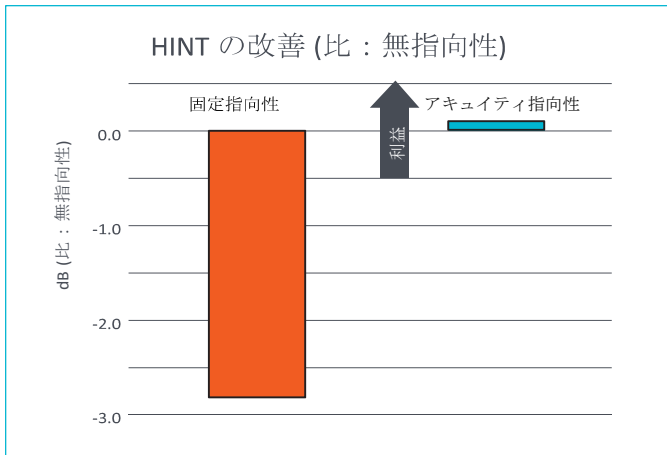


図5: 固定無指向性と比較した場合の、拡散ノイズ中での固定指向性モード（オレンジ）とアキュイティ指向性（青色）の HINT の成績

これら研究結果全体から言えることは、スターキーのアキュイティ指向性システムは固定指向性や無指向性システムと比較した場合に、背景にノイズがあっても、聞き手のきこえは改善できるということです。MEMS マイク技術により、経年マイク感度が安定するため、MEMS マイク技術とスピーチ ID を併せ持つアキュイティ指向性は、補聴器を長期間使用していても高い指向性能が維持できます。

結論

マルチチャンネルのアダプティブ指向性マイクは、現在の補聴器では目新しいものではありません。そこで、スターキーでは、ユニークで安定性の高い解決策であるアキュイティ指向性を導入しました。MEMS マイク技術を活用することで、既存のマイクドリフトに関連する問題に対処しました。長期的に良好なパフォーマンスを実現し、補聴器ユーザーに大きな利益となることを裏付けることで、このアダプティブ指向性の応用はユーザーが信頼できるものになっています。アキュイティ指向性の性能をさらに高めるものが前方以外から音声を保護するスピーチ ID です。これらのシステムは一体となり機能し、研究室から現実の世界へと広がり効果を発揮します。