

両耳装用における両耳間通信の重要性

バイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジー（両耳間音声通信技術）により、補聴器は広帯域音声データの双方向通信をリアルタイムで行うことが出来ます。これにより、フォナックの補聴器は聞き取りが困難な環境でも両耳装用による利点を提供できるようになりました。

概要

長年にわたって(Cherry, 1953)、聴覚の専門家は片耳よりも両耳での聞き取りの方が有益だと訴えてきました。それは両耳で聞くことで、静かな環境下、騒がしい環境下、または反響する環境下における言葉の明瞭度が改善することに加えて、より音を認識し、聞きたい音により集中することが出来るためです。

重要なことは、両耳間で広帯域音声通信できるようになったことで、聴力低下を抱える人にメリットを提供できるようになったということです。本書では、なぜ両耳間による広帯域音声通信が難聴者に効果的で、特に聞こえにくい環境において、両耳で聞くことが重要であるのかの詳細を述べています。

はじめに

聴力低下は健康問題として深刻で、近年では 65 歳以上のおおよそ 40%がこの問題を抱えています(Yueh ら, 2003)。聴力低下をそのままにしておくと心理的、感情的、身体的、認識的、または日々の振る舞いに大きく影響してきます(Dalton ら, 2003)。WHO（世界保健機関）によると、聴力低下は国際レベルでも 2 番目に多い障害であるとの報告があります。聴力低下に対する改善方法としては、カウンセリングを実施した後、補聴器を装用することが一般的です。約 30 年にわたる研究の中で、両

耳に難聴を抱える人にとって、片耳装用よりも両耳装用の方が大きい効果があると分かっています。しかし、なぜ片耳ではなく両耳で聞く方が多くの人にとって有益であるのか、という研究は今もなお行われ続けています。次章ではカクテルパーティー（多人数が雑談しているような騒音下）で起こる問題を研究した内容や両耳装用による主な効果など、補聴器開発におけるテクノロジーの改革に伴う有益な詳細、すなわち、片側の補聴器からもう片側へと音声信号をワイヤレス通信する機能について述べています。

カクテルパーティー効果で起こる問題

研究者達は"カクテルパーティー"という聞こえの環境で、人はどのようにして非常に聞き取りが困難な環境を克服するのか、50年以上にもわたり調査し続けてきました。(Cherry, 1953)。人はカクテルパーティーのような大勢の人が色々な会話をする中で、ある一人の言葉を選別して聞き分けることが出来ます(Bregman, 1990; Bronkhorst, 2000)。ある音(例:目的の会話音)の検出閾値が別の音(例:他の会話音)によってかき消されるマスキング現象が起こるため、多くの言葉が飛び交う空間で言葉を認識することは決して容易ではありません。多くの言葉が混在する空間で聞きたい言葉を聞き分ける時、2種

類の異なるマスキングが生じます。聞きたい音と、それをかき消す音(マスカー)が聴覚末梢系(蝸牛フィルタや聴神経の近位部分)の情報伝達経路でぶつかり合うと、エネルギーマスキング現象が起こります(French & Steinberg, 1947)。また、類似音のぶつかりが強かったり、おおよそ同じ音圧でぶつかり合うと、インフォメーションマスキング現象が起こります(Durlach ら, 2003)。マスカーより聞きたい音が小さい、またはSN比が悪い環境では、年配者や聞こえにくさを感じる人の聞き取りに大きく悪影響を及ぼします(Pichora-Fuller & Singh, 2006)。

両耳で聞くことで得られるメリット

カクテルパーティーのような問題を克服するため、聞こえにくさを抱える人は特に、両耳を十分に活用すべきです。補聴器の両耳装用に関して、次のようなメリットが挙げられます：

- 静かな場所(Nabelek & Pickett, 1974)や騒がしい場所(McArdle ら, 2012)での聞き取りの向上
- 音源定位の客観的(Kobler & Rosenhall, 2002)・主観的(Noble & Gatehouse, 2006)認知
- 音質の改善(Balfour & Hawkins, 1992)
- 騒音下による聞き取りの煩わしさの軽減(Noble & Gatehouse, 2006)

- 補聴器装用による聴覚損失の進行を抑制(O'Neil, Connelly, Limb, & Ryugo, 2011)
- 消費者満足度アップ(Kochkin & Kuk, 1997)
- 生活レベルに対する自己評価指数での高い点数を獲得(Kochkin, 2000)

このような利点を考慮すると、両耳に難聴を抱える人が両耳装用することはとても自然です(Boymans ら, 2008)。

両耳で聞くことはなぜ大切なのか

両耳での可聴性には、騒音下における聴覚的手がかりが多く得られるという、次のような利点があります。

1. "良聴耳"効果
2. 両耳音源定位
3. 両耳ラウドネス加算効果
4. 両耳冗長性
5. 両耳情報比較

次章では、それぞれに関する詳細について述べています。

"良聴耳"効果

人は騒音下での聞き取りを高めるために、良聴耳効果、すなわち最も重要な手がかりを片耳に集中して聞くことが挙げられます(Zurek, 1993)。聞きたい音とマスカーが別の場所で発生する場合、片側の耳の SN 比はもう片側よりも良くなります。頭がバリアーとして作用し、両耳に異なった SN 比が作り出されるので、自然な音響的效果が得られます（頭部回折伝達）。聞きたい音とマスカーが聞き手の左側に同時にある場合と、聞きたい音が右側でマスカーが左側にある場合を比較してみましょう。聞きたい音を左から右に動かすと右側の SN 比が著しく上がります。これは聞く人の頭部の陰影効果によるもの

です。また聞きたい音が左側にあり、マスカーが右側にある場合、右側の SN 比は悪くなり、左側が良い SN 比になります。聞きたい音とマスカーが自由空間にあっても、両耳を使うことで SN 比の良い耳が聞きたい音の存在に気づき、騒音下でも言葉を聞き取れるのです(Hornsby, Ricketts & Johnson, 2006)。良聴耳で聞いたときに感じ取る“音の判断”もまた、騒音下や反響下での言葉を理解するときに役に立ちます。この良聴耳効果で SN 比がおおよそ 8dB 改善すると報告されています(Bronkhorst & Plomp, 1988)。

両耳音源定位

音は自由空間から鼓膜へと伝わりますが、音源の位置を判断するには頭や胴体、そして耳介による音響効果が大いに役立ちます(Shaw, 1974)。重要なことは、音の到来方向を知ること、音に対して注意が向くということです(Singh ら, 2008)。身体に関連した音響変換の研究において、これまでは片耳による音響効果が主に調査されてきました。しかし今日では、両耳の聴覚信号処理アルゴリズムに関する究明が進み、これが補聴器開発にとって

より必要不可欠となったことで、聴覚システムがどのように片耳の指向性(Sivonen, 2011)に作用するのかという研究に重きが置かれています。結果、両耳の指向性そのものが、両耳で音を聞く際に得られる音源定位の利点なのです。また、両耳音源定位の効果を高めるには、空間ベクトルにある聞きたい音に注意を向けることがポイントです。

両耳ラウドネス加算効果

次に重要な点として、両耳ラウドネス加算効果、いわゆるラウドネスの増加が挙げられます(Reynolds & Stevens, 1960)。特に補聴器開発者の興味を引く特徴が 2 つあります。まずは、両耳ラウドネス加算効果による閾値の増加です。一般的に、両耳ラウドネス加算効果では約 3dB 音圧が上がったように感じます(Keys, 1947)。そして、閾値よりも大きい信号の場合は約 6~10dB だと言われています(Haggard & Hall, 1982)。これが両耳ラウドネス加算効果に関して私たちが初めに興味を引く特徴なのです。つまり、両耳で聞くことは片耳と比べて 6~10 dB の音圧の違いを感じるという聞こえのメリットがあるのです。

もう一つは補聴器開発者が最も注目した特徴です。健聴者と比べて、難聴者はいくつかの聞こえの環境において聞き取りが困難でしたが(例：空間上にマスキャーが多く存在するとき[Best, Mason & Kidd, 2011]、両耳の騒音抑制機能がより乏しいとき[Peissig & Kollmeier, 1997]、前方のマスキャーへの煩わしさが増すとき [Oxenham & Plack, 1997])、両耳加算比は健聴者とよく似た数値となりま

した(図 1: Hawkins ら, 1987)。補聴器は両耳ラウドネス加算効果を有効活用できるよう開発され続けており、聴力レベルに関係なく、どのユーザーにもこの効果を実現できることから、この両耳ラウドネス加算効果に関する情報はとても重要です。

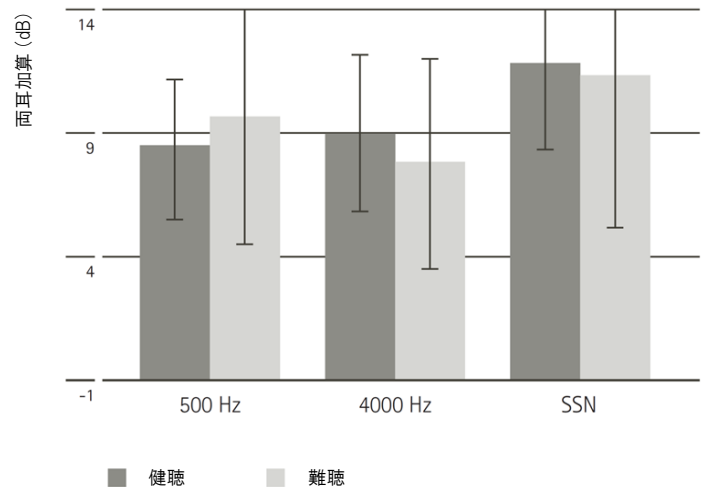


図 1

健聴者と難聴者を対象に 500Hz と 4000Hz の純音とスピーチスペクトラム騒音(SSN)で測定した平均両耳加算。
Hawkins およびその他(1987) Table4 "MCL-B"を参照

両耳冗長性

両眼に視覚低下があり、それぞれの見え方が異なる人がいると想像してください。左眼は周りが真っ暗で管状視野で見えており(網膜色素変性の可能性)、右眼は周りは問題なく真ん中だけ完全に見えていません(黄斑変性の可能性)。片眼だけを使うと視界はかなり限られてきますが、学説では物体の認知力が高い目の真ん中が色々な図を一つにまとめ上げているので、このようなケースでも、両眼で見ればほぼ全体像で見ることが出来ると言われています。ここでは両眼の視覚システムにおける冗長性(欠けた部分を補完する機能)について述べています(図 2)。驚くことに、聴覚システムでも同じような

ことが起こるのです。両耳冗長性の有利な点は、それぞれの耳(両耳)が音声信号の中にある情報を拾い得ることができるということです。片耳で聞くということは、音声信号の中の手がかりを一回で得なければならないのです。これが両耳冗長性が無い状態です。脳が左右別々に機能するのと同じように、耳も同じように左右別々に機能します(Dillon, 2001)。両耳に聴力差がある人だと、両耳装用なら本来得られるはずのもう片方での音声信号にある聴覚の手がかりが拾えないかもしれません。例えば、左耳は高音に聴力低下が見られて、右耳は低音に聴力低下が見られるとします。

こういった人でも、両耳に音が入ってくれば、左耳、右耳それぞれの耳で低音、高音の手がかりを見つけられるかも知れません。重要なことに、両耳冗長性はしばしば両耳加算と捉えられがちですが、両耳ラウドネス加算効

果とは異なります。両耳で聞くことで SN 比が 1~2dB 改善されず(Bronkhorst & Plomp, 1988)。両耳冗長性は難聴者だけでなく健聴者にも存在します (Day およびその他, 1988)。



図2

左：網膜色素変性：管状視野状態（周りの視界が完全に損失）

真ん中：黄斑変性：真ん中が見えない状態（周りは正常）

右：視覚の手がかりを一つにして見た図

両耳情報比較

音は空間中に（聞き手の左右）到来すると、まず初めに片側の耳に届き（ここで両耳間位相差の手がかりや両耳間でのタイミング差が生じます）、次に信号に近い耳側で大きくなります。このプロセスを踏むことで両耳間で音を比較し合い聞こえの質が増します (Bronkhorst, 2000 を参照)。いずれの手がかりも音の到来方向を知るには非常に重要で、聞きたい音が想定外の場所にあるような場合、この手がかりによって聞き取りが非常に困難な環境でも言葉が聞き取りやすくなります (Singh, Pichora-Fuller & Schneider, 2008)。両耳間レベル差や両耳間位相差に関する手がかりについてさらに述べると、両耳間の違いを比較することで、両耳間相互相関(ICCs)のプロセスを経て、それぞれの耳に届いた信号とマスクーとの間に生まれる一時的な僅かなスペクトルの違いをより高く感知することが出来ます (Colburn ら, 2006; Culling, Hawley

& Litovsky, 2004)。例えば、Akeroyd と Summerfield(2000)では、SN 比の悪い聞き取りが困難な環境でも、人はそれぞれの耳に届いた信号スペクトルプロファイルを細かく比較して聞き分けているということを発表しています。重要なことは、反響の無い、静かで調和の取れた聞こえの環境下でも、両耳間相互相関(ICCs)、両耳間位相差(ITDs)、両耳間レベル差(ILDs)によって、それぞれの耳で音を聞き分けているということです。しかし、これら全ての手がかりは非常に複雑に結合しているので、現在検証可能な方法で調べる事が出来ません。反響下や複数の話者が存在する環境下で得られる手がかりの利点についてはまだまだ研究をしていかなければなりません。

ワイヤレスで両耳間通信ができる補聴器は競合他社に既に存在しますが、開発者たちが重要視するのはデータ通信機能の精巧さです。最新の補聴器は約 300k ビット/秒で情報を送受信します。補聴器で音声信号を送受信するデータ転送レートの向上で、開発者や補聴器ユーザーにとって、期待が膨らむ新しい未知の領域を切り開くことができました。両耳間のリアルタイム音声データ通信機能が、これまでの数十年にわたる両耳間処理の研究結果と相まって、新しい革命を生み出し続けるのです。

先ほど述べたように、騒音下や反響下において、SN 比の良い側の耳で聞くとよく聞こえます（良聴耳効果）。最近の補聴器の大きい進歩の一つに、騒音量と信号量を比較計算する機能があり、各周波数帯でこれを分析します。片側からもう片側へと全音声信号が通信し、それぞれの補聴器が SN 比を計算します。その結果、今では SN 比の良い補聴器からの音声信号を SN 比の悪い補聴器へと通信し、SN 比の良い音を両耳で聞くことが可能になりました。

これを実感できる機能にデュオフォンが挙げられます（図 3）。従来の補聴器で電話を使った場合、SN 比が良い耳と（電話側）、SN 比が悪い耳（もう片側）が存在します。SN 比の良い耳側からの信号を SN 比の悪い耳側へとワイヤレス通信することで、電話の言葉がよりはっきりと聞き取れます (Picou & Ricketts, 2011)。電話使用時における補聴器間でのリアルタイム音声通信を例に挙げましたが、片側の SN 比がもう片側よりも良い環境であれば、この機能は効果的です。

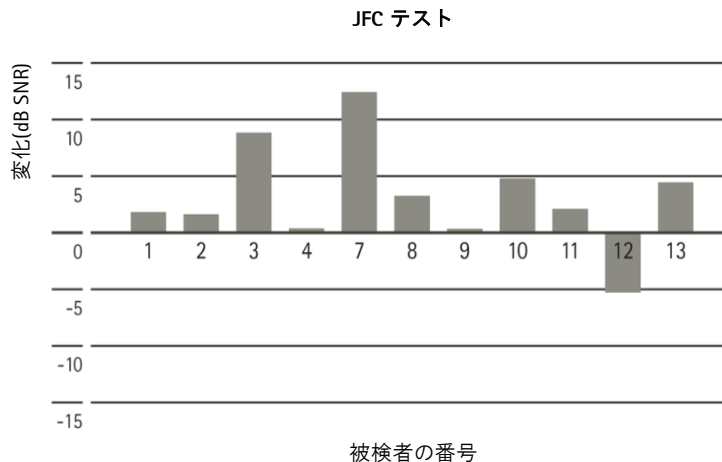


図 3

JFC テスト結果。片耳で聞くのに必要なスピーチレベルから、デュオフォンで聞くときに必要なスピーチレベルを差し引いた数量変化

バイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジーを指向性マイクと組み合わせることでさらに別の利点が生まれます。最近の補聴器には 2 つのマイクロホンによる指向性機能が搭載されています。しかし、補聴器間で行われる広帯域音声通信の出現で、両耳の補聴器に搭載された合計 4 つのマイクロホンが作り出すポーラーパターンによる指向性処理が可能となり、本来の両耳指向性が実現しました。フォナックは従来の指向性マイクロホンと比べて、より前方にフォーカスした鋭いビームパターンを開発することに成功し、ステレオズームなど聞こえに対するパフォーマンスが著しく改善しました (Kreikemeier ら, 2012)。

両耳間での広帯域音声通信によって、なぜ聞こえが改善するのか？

両耳間を広帯域音声通信させることで聞こえが改善する理由は、補聴器は良く聞こえる耳に効果的に働き、これが両耳ラウドネス加算効果や両耳冗長性に大きく貢献するからです。聞きたい音とマスキングが別々の場所にあるときに、なぜ良聴耳効果が聞き取りが困難な環境下において明瞭度改善に重要であるのか思い出してください (Brungart & Simpson, 2002)。SN 比の良い耳側の補聴器の音声信号をコピーして、SN 比の悪い耳側の補聴器へ送ることで、より良い聞こえを提供します。SN 比の良い耳側の音声信号は、両耳間で通信して処理されます。

重要なことは、両耳間での広帯域音声通信は良聴耳効果だけにとどまらないということです。ワイヤレス通信によって両耳ラウドネス加算効果や、両耳冗長性の効果が得られます。前にも述べたように、両耳ラウドネス加算効果は約 6~10dB のラウドネスの増加を得られ、感音難聴の耳に負担が少ないと言われています。両耳間で音声

信号が通信することで、聴覚システムは信号音にある手がかりを見つける機会を一度だけではなく、多く得ることが出来ます。先ほど示したように、両耳から得る情報により SN 比が 1~2dB 改善されるので、左右に異なる聴力低下を抱える人にとって両耳冗長性は効果的です。

最後に、人の体は音が自由空間から鼓膜へと伝わるときに、人の身体によって反射・回折が起こることによって音源の位置を知ることが出来ます。つまり、両耳でそれぞれの手がかりを拾うことで、両耳の指向性または音源定位の効果が上がります。補聴器に搭載したツインマイクロホンとバイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジーによって可能となるステレオズームとオートステレオズームが両耳に難聴を抱える人の指向性として働きます。

まとめ

- バイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジーは両耳間で広帯域音声信号をワイヤレス通信させる機能です。テクノロジーの進化によって生まれたこの機能は、補聴器開発において、歴史上でも非常に優れていると言えます。
- 補聴器はどの周波数帯においても、互いにより有利な SN 比を検出し、広帯域の音声通信技術を適用することが出来ます。
- バイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジーによって、聞き取りが困難な環境で、言葉の明瞭度を改善するために必要となるメカニズム（良聴耳効果、両耳ラウドネス加算効果、両耳冗長性など）を有効活用することが出来ます。
- 指向性マイクロホン技術と連動した、バイノーラル・ボイスストリーム・テクノロジーによって、ステレオズームやオートステレオズームが実現しました。これにより、両耳の指向性がもたらす聞こえのメリットを得ることが可能となりました。

- Akeroyd M.A. & Summerfield A.Q. (2000). Integration of monaural and binaural evidence of vowel formants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 3394-3406.
- Balfour P.B. & Hawkins D.B. (1992). A comparison of sound quality judgments for monaural and binaural hearing aid processed stimuli. *Ear and Hearing*, 13(5), 331-339.
- Best V., Mason C.R. and Kidd G. (2011). Spatial release from masking in normally hearing and hearing-impaired listeners as a function of the temporal overlap of competing talkers. *Journal of the Acoustical Society of America* 129(3), 1616-1625.
- Boymans M., Goverts S.T., Kramer S.E., Festen J.M. & Dreschler W.A. (2008). A prospective multi-centre study of the benefits of bilateral hearing aids. *Ear and Hearing*, 29(6), 930-941.
- Bregman A.S. (1990). *Auditory Scene Analysis*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Bronkhorst A.W. (2000). The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple talker conditions. *Acustica*, 86, 117-128.
- Bronkhorst A.W. & Plomp R. (1988). The effect of head-induced interaural time and level differences on speech intelligibility in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 1508-1516.
- Brungart D. & Simpson B. (2002). The effects of spatial separation in distance on the informational and energetic masking of a nearby speech signal. *Journal of the Acoustical Society of America* 112, 664-676.
- Cherry E.C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and two ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 975-979.
- Colburn H.S., Shinn-Cunningham B., Kidd G. Jr. & Durlach N. (2006). The perceptual consequences of binaural hearing. *International Journal of Audiology*, 45(Suppl 1), S34-44.
- Culling J.F., Hawley M.L. & Litovsky R.Y. (2004). The role of head-induced interaural time and level differences in the speech reception threshold for multiple interfering sound sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 1057-1065.
- Dalton D.S., Cruickshanks K.J., Klein B.E.K., Klein R., Wiley T.L., et al. (2003). The impact of hearing loss on quality of life in older adults. *The Gerontologist*, 43(5), 661-668.
- Day G., Browning G. & Gatehouse S. (1988). Benefit from binaural hearing aids in individuals with a severe hearing impairment. *British Journal of Audiology*, 23, 273-277.
- Dillon A. (2001). Beyond usability: process, outcome and affect in human-computer interactions. *Canadian Journal of Library and Information Science*, 26(4), 57-69.
- Duquesnoy A.J. (1983). The intelligibility of sentences in quiet and in noise in aged listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, 1136-1144.
- Durlach N.I., Mason C.R., Kidd G. Jr., Arbogast T.L., Colburn H.S. & Shinn-Cunningham B.G. (2003). Note on informational masking. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 2984-2987.
- French N.R. & Steinberg J.C. (1947). Factors governing the intelligibility of speech sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19, 90-119.
- Haggard M. & Hall J. (1982). Forms of binaural summation and the implications of individual variability for binaural hearing aids. *Scandinavian Audiology Supplementum* (15), 47-63.
- Hawkins D.B., Walden B.E., Montgomery A. & Prosek R.A. (1987). Description and validation of an LDL procedure designed to select SSPL90. *Ear and Hearing*, 8(3), 162-169.
- Hornsby B.W., Ricketts T. A. & Johnson E. E. (2006). The effects of speech and speechlike maskers on unaided and aided speech recognition in persons with hearing loss. *Journal of the American Academy of Audiology*, 17, 432-447.
- Keys J.W. (1947). Binaural versus monaural hearing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19(4), 629-631.
- Kobler S. & Rosenhall U. (2002). Horizontal localization and speech intelligibility with bilateral and unilateral hearing aid amplification. *International Journal of Audiology*, 41, 395-400.
- Kochkin S. & Kuk F. (1997). The binaural advantage: evidence from subjective benefits and customer satisfaction data. *The Hearing Review*, 4(4), 29-32.
- Kochkin S. (2000). MarkeTrak V: Consumer Satisfaction Revisited. *The Hearing Journal*, 53(1), 38-55.
- Kreikemeier S., Margolf-Hackl S., Raether J., Fichtl E. & Kiessling J. (2012). Vergleichende Evaluation unterschiedlicher Hörgeräte-Richtmikrofontechnologien bei hochgradig Schwerhörigen. *Zeitschrift für Audiologie, Supplement zur 15. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Audiologie*.
- McArdle R., Killion M., Mennite M. & Chisolm T. (2012). Are two ears not better than one? *Journal of the American Academy of Audiology*, 23, 171-181.
- Nabelek A.K. & Pickett J.M. (1974). Reception of consonants in a classroom as affected by monaural and binaural listening, noise, reverberation, and hearing aids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 628-639.
- Noble W. & Gatehouse S. (2006). Effects of bilateral versus unilateral hearing aid fitting on abilities measured by the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 45, 172-181.
- Nyffeler M. (2010). DuoPhone. *Field Study News*, February.
- O'Neil J.N., Connelly C.J., Limb C.J. & Ryugo D.K. (2011). Synaptic morphology and the influence of auditory experience. *Hearing Research*, 279(102), 118-130.
- Oxenham A.J. & Plack C.J. (1997). A behavioral measure of basilar membrane nonlinearity in listeners with normal and impaired hearing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 3666-3675.
- Peissig J. & Kollmeier B. (1997). Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners, *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 1660-1670.
- Pichora-Fuller M.K. & Singh G. (2006). Effects of age on auditory and cognitive processing: implications for hearing aid fitting and audiological rehabilitation. *Trends in Amplification*, 10, 29-59.
- Picou E.M. & Ricketts T.A. (2011). Comparison of wireless and acoustic hearing aid-based telephone listening strategies. *Ear and Hearing*, 32(2), 209-220.
- Reynolds G.S. & Stevens S.S. (1960). Binaural summation of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32(10), 1337-1344.
- Singh G., Pichora-Fuller M.K. & Schneider B.A. (2008). The effect of age on auditory spatial attention in conditions of real and simulated spatial separation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124, 1294-1305.
- Sivonen V.P. (2011). Binaural directivity patterns for normal and aided human hearing. *Ear & Hearing*, 32, 674-677.
- Shaw E.A.G. (1974). Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 1848-1860.
- Yueh B., Shapiro N., MacLean C.H., et al. (2003, April 16). Screening and management of adult hearing loss in primary care. *Journal of the American Medical Association*, 289 (15), 1976-1985.
- Zurek P. M. (1980). The precedence effect and its possible role in the avoidance of interaural ambiguities. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 953-964.