

総説

骨導聴覚の知覚機序に関する実験的考察

伊藤 一仁

純真学園大学 保健医療学部 医療工学科

An Experimental Study on Perception Mechanisms of Bone Conduction Hearing

Kazuhito ITO

Department of Medical Engineering, Faculty of Health Sciences, JUNSHIN GAKUEN UNIVERSITY

要旨：本稿では、これまでに分かっている骨導聴覚の様々な知覚機序について紹介すると共に、一つの実験的考察について議論する。この実験では、健聴者における骨導の末梢伝搬特性を、両耳間ラウドネスマッチングにより推定した。一側耳に気導刺激、対側耳に骨導刺激を呈示し、両耳間のラウドネスが一致した時の外耳道内音圧レベルを比較した。その結果、両耳における外耳道内音圧レベルは概ね、全ての測定周波数で同様の値を示した。従って、健聴者における骨導聴取は、内壁から外耳道に放射される成分によって凡そ決定されていることが示唆された。

キーワード：骨導聴取、両耳間ラウドネスマッチ、外耳道内放射、外耳道内音圧、頭内定位

Abstract：This study introduces various perception mechanisms of bone conduction hearing that have been investigated to date and discusses an experimental examination of these mechanisms. In this study, the sound propagation of bone conduction hearing in the auditory periphery is estimated for some normal hearing listeners using interaural loudness matching. A tone in air conduction was presented to one ear and the same tone in bone conduction to the other ear. The sound pressure levels in both ear canals were then compared when the interaural loudness levels were matched. Results showed that the sound pressure levels in both ear canals were nearly the same over the measured frequency range. Consequently, it was concluded that bone conduction hearing with normal hearing listeners was dominated by the osseotympanic components in the ear canal.

Keyword：Bone Conduction Hearing, Interaural Loudness Matching, Osseotympanic effects, Ear canal sound pressure level, Auditory Lateralization

はじめに

ヒトは空気の振動を耳という末梢器官で捉え、脳内で“音”として認識する。もっと具体的に言うならば、先ず外界の空気の振動が顔の両端にある耳介によって捉えられ、外耳道を通してその奥にある鼓膜を揺らす。鼓膜の振動は、中耳の3つの耳小骨を介して内耳の蝸牛という器官へ送られる。蝸牛の内部ではその振動によって動かされたリンパ液が、基底板（基底膜）に“進行波”と呼ばれる揺れを起こす¹⁾。この基底板の上には受容細胞が規則正しく並んでいて、揺れによって興奮させられ電気信号を発する。電気信号は隣接する聴神経線維へと伝わり、幾つもの脳幹の神経核を

経由しながら、やがて聴覚野と呼ばれる脳領域に達する。ここで漸く“音”になる。始まりが空気振動として伝わるため、“気導”と呼ばれ、一般的な“聞く・聴く”を形作る。

一方、これとは違う聞き方がある。始まりが空気の振動ではなく、頭蓋骨の振動として伝わる、即ち骨導（骨伝導）である。骨導は、外耳道や鼓膜などの外・中耳伝達系を介さずに音が直接内耳に伝達されると考えられている²⁻⁵⁾。それ故、外耳や中耳に障害を持つ伝音性難聴者の補聴手段として利用されることがある。また、一般的な健聴者（正常な聴力の持ち主）においても、騒音下での音の聞き取りが比較的良好なことから、工事現場

や繁華街での通信装置や携帯音楽プレイヤーに利用されることもある。

骨導を利用した補聴機器

骨導を利用した補聴器や通信機器の多くは、マイクロホン等で集音した外界の音や話し声を、骨導振動子というデバイスを用いて、皮膚の上から頭蓋骨へ振動呈示することにより音の伝達を行う。骨導音の呈示によく使われる身体の部位は、耳の後ろの乳様突起部や耳の前方の側頭骨部である。前者は従来の骨導補聴器で、後者は近年の耳掛け型やメガネ型の補聴器や音楽プレイヤーなどで使われる傾向にある(図1)。いずれの部位にしても骨導音の呈示には、振動子がある程度の圧力で皮膚に圧着し、固定しておく必要がある。例えば、従来の骨導補聴器では4~5 Nほどの押し付け圧力を出すヘッドセットが利用されてきた(図2)。但し、長時間の装用において、振動子の位置がズレたり、呈示部位の皮膚に痛みを起こしたりする等の問題も多い。

そこで究極の骨導補聴器として、埋め込み型骨導補聴器(BAHA®)がある⁶⁾(図3)。これは、頭蓋骨に埋め込まれたチタン製のインプラントを介し、直接頭蓋骨を振動させるものである。皮膚や皮下組織などの柔らかな生体組織を介さないためエネルギー損失が少なく、よりクリアな音の伝達が可能である。その一方、使用するためには外科的手術を受けなければならない。また、インプラント部から感染症等を起こさないように衛生面での日常的なケアを必要とする。



図1 耳掛け型骨導式音楽プレイヤー(両耳用)



図2 ヘッドセット付骨導補聴器 RadioEar B71(単耳用)

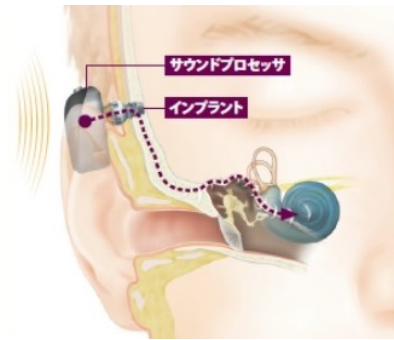


図3 BAHAR®のイラスト(株)日本コクレア社のHPより引用⁶⁾

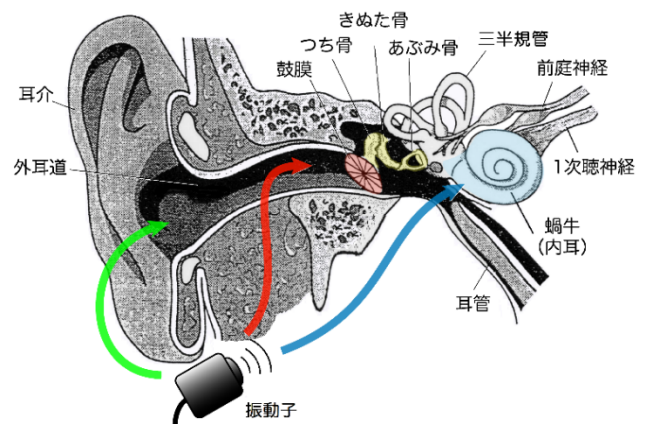


図4 骨導振動子からの音の伝わる経路の種類

このような様々な方式が提案されている骨導補聴機器であるが、そもそも骨導であることの利点はどの程度あるのだろうか。巷では、以下のような商業的な謳い文句をよく見かける。例えば、「骨を通して聞くので、騒音下でも聞き取りやすい」、「骨導だから騒音に強い」、「耳を塞がないので、外の音と同時に聞くことができる」、「内耳に直接届くため、鼓膜を痛める恐れがない」、あるいは「鼓膜が疲れにくい」といった具合である。このうち、気導音と骨導音を同時に聞くことが出来るのは間違いないが、骨導が本当に騒音に強いのか、または、鼓膜を傷めないのか、等の真偽には注意が必要である。そもそも、鼓膜は疲れるものなのかも疑問だ。それ故、ここでは骨導聴覚の知覚メカニズムについて確認しておきたい。

骨導経路とその知覚メカニズム

図4に示す様に、骨導振動子からの音の伝わり方には大雑把に3つの経路が考えられている²⁻⁵⁾。

- ① 振動子から直接空気中へ漏れ出た音が、通

常の気導経路（外耳道→鼓膜→耳小骨→蝸牛）を通して知覚される（図中の→）。

② 骨導音が生体内部を伝導する過程で、外耳道内に気導音として放射され、その音が鼓膜を振動し、通常気導音と同じ経路（外耳道→鼓膜→耳小骨→蝸牛）で知覚される（図中の→）。この経路は皮膚を介した骨導音の呈示において顕著であり、外耳道内放射（osseotypanic effects）には外耳道周囲の軟骨や軟組織が大きく寄与することが知られている^{5,7)}。

③ 外耳や中耳を経由せず、直接内耳に到達し、蝸牛内の受容器官を刺激して知覚される（図中の→）。外耳道や鼓膜、中耳の耳小骨に障害のある伝音難聴において有効な知覚経路となる⁸⁾。

このうち、①は気導経路に、②と③が骨導経路に分類される。通常骨導音呈示の場合、②と③の経路の音の成分が十分に大きいため、①の経路の成分はほとんど知覚に寄与しない。また、③の経路はさらに異なる複数の知覚メカニズムに分類できる。以下ではその幾つかを紹介する。

a) 耳小骨の慣性 側頭骨が振動させられた時、中耳の耳小骨連鎖の慣性によって側頭骨との間で位相の異なる相対的な運動が起こされ、結果的に蝸牛内に進行波が引き起こされる。この慣性は、耳小骨連鎖の共振周波数（1.5 kHz）周辺の骨導知覚に重要であるようだ。その根拠として、例えば、耳硬化症などで耳小骨の動きが硬化した場合に2 kHz 辺りの骨導閾値が悪化させられること（Carhart's notch）が知られている⁹⁾。

b) 蝸牛内液の慣性 蝸牛内のリンパ液もまた、側頭骨が振動させられた時に、その慣性によって基底膜上に圧力勾配をもたらす、結果的に進行波を形作る。これは、より低い周波数の骨導知覚に重要であると考えられている¹⁰⁾。

c) 蝸牛容積の変化 内耳を包む側頭骨が骨導音の振動によって圧縮と拡張を繰り返すことにより、蝸牛内部（および半規管）の容積にも変動がもたらされる。蝸牛が圧縮される時、余剰なリンパ液が基底膜を前庭階側から鼓室階側へ押し、蝸牛が拡張される時はその逆が起こる。その結果、基底膜を振動させ、受容細胞を興奮させる。この容積変化による進行波の生成は、蝸牛内部の構造が前庭階と鼓室階に関して非対称なことが一つの

要因とされ、また、4 kHz 以上の高周波の骨導知覚に重要と考えられている¹⁰⁾。

以上のように、骨導聴覚には複数の経路やメカニズムの存在が考えられている。そして、意外に感じるかもしれないが、健聴者においては、②の経路の外耳道内放射（Osseotypanic effects）の寄与は比較的大きい可能性がある^{10,11)}。例えば、骨導音を聞いている際に外耳道を耳栓や指などで閉鎖すると、1 kHz 以下の低周波域の音が5~20 dB 強調されて聴こえる現象（外耳道閉鎖効果）がある。これは外耳道壁から外耳道へ放射される音が、外耳道の閉塞によって共鳴されるから、との説もある¹²⁾。そこで、我々の一連の骨導聴覚研究の中で、これらの仮説を検討するために試みられた一つの実験について紹介したい^{8,11)}。

気導聴取と骨導聴取の両耳間比較

この実験では、特定の音圧レベルの気導純音を、健聴な被験者の片耳（基準耳）に呈示し、同じ音高の骨導純音を対側の耳（対象耳）に呈示する。被験者は、両耳間の心理的な音の大きさ（ラウドネス）が等しくなるように、骨導音の音量を調整する。両耳間のラウドネスが一致した時、両外耳道内の音圧レベルを計測して比較する。もし基準耳と対象耳との間で、外耳道内音圧に乖離があれば、外耳や中耳を経由しない骨導成分の量を推定することが出来る。

I. 実験方法

気導刺激は開放型ヘッドホン（HD650, Sennheiser）により基準耳に、骨導刺激は骨導振動子（PIEZO 素子, kyocera）を用いて、被験者の対側耳のやや前方の側頭骨（頬骨弓）に呈示された（図5）。外耳道内音圧の測定のために、両外耳道内（耳珠から約3 mm 奥）にプローブマイクロホン（ER-7C, Etymotic Research）を設置した（図6）。なお、両外耳道とも開放された状態である。

刺激は、125~8000 Hz の間の8つの純音（時間長0.8 s）が用いられた。基準となる気導音の音圧レベルは2通りで、それらは外耳道内音圧にして40 dB SPL と60 dB SPL である。被験者の任務は、対象耳側の骨導刺激の呈示レベルを GUI 上で調

整し、両耳間（骨導聴取と気導聴取）のラウドネスを等しくさせることであった。この試行を呈示順序や初期呈示レベルをランダムに変更しながら計4回行った。そして、ラウドネスがマッチする時の骨導刺激の平均呈示レベルを算出し、そのレベルにおける対象耳での外耳道内音圧レベルを記録した。なお、左右の耳へのプローブマイクロホンの挿入位置の微妙な違いによる観測音圧の差異を補正するため、一連の実験に先立って両耳共に気導聴取を用いた外耳道内音圧の記録および比較が行われた。本実験は、正常な聴力を有し、かつ、両耳間聴力差を持たない聴取者6名の参加により、防音室で行われた。図7に、実験装置の概要を示す。



図5 骨導呈示デバイス (左) とその装着の様子 (右)



図6 プローブマイクロホン (左) とその装着の様子 (右)

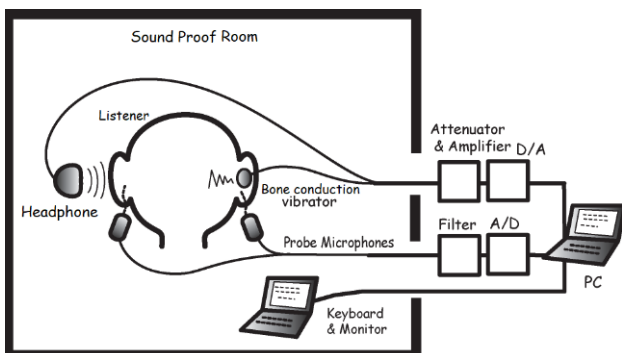


図7 実験装置の概要

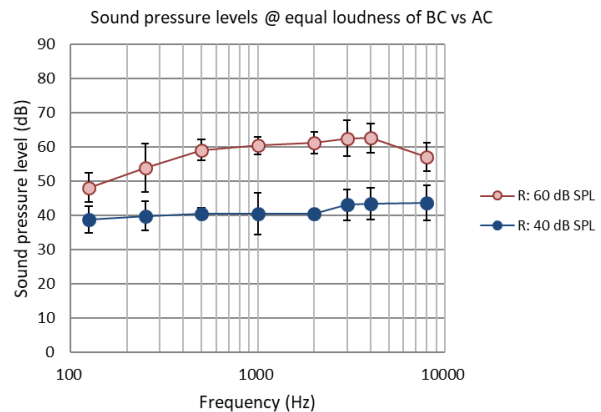


図8 対象耳の外耳道内での等ラウドネス音圧レベル

II. 結果

図8に本実験の結果を示す。2つの基準音圧レベルに対する対象耳での等ラウドネスな音圧レベルを表している。その結果、40 dB SPLの基準音圧レベルに対し、対象耳でもほぼ同等の音圧レベル（下のグラフ）が検出された（両耳共に気導聴取の場合との二元配置分散分析： $F_{(1,80)} = 0.14$, 有意差無し）。これは、健聴者の骨導聴取において直接内耳に届く成分（③の経路）が知覚にあまり寄与せず、主に外耳道内放射された成分（②の経路）が知覚に大きく寄与していることを示唆するものである。

一方、60 dB SPLの基準音圧レベルでは、低域と高域で対象耳の音圧レベルが低下した（上のグラフ）。一見、外耳道を経由しない骨導成分の寄与に見えるが、実は低域の125, 250 Hzと高域の8000 Hzにおいて、骨導刺激に歪みが生じた影響であった。即ち、対象耳側で、基準耳と同等の60 dB SPLのラウドネスを実現するために刺激レベルを上げたところ、これらの周波数では、振動子が安定して出力する限界を超えてしまい、高調波成分を生じさせた。そのため、音色も複雑になり、相対的なラウドネスも増加してしまったと考えられる。従って、データとして信頼出来る区間は500~4000 Hzの帯域であり、そこでは両耳間で同等の音圧レベルが観測された（両耳共に気導聴取の場合との二元配置分散分析： $F_{(1,50)} = 0.50$, 有意差無し）。それ故、60 dB SPLの基準音圧レベルでも、外耳道内放射された成分が知覚に寄与している可能性が示された。

Ⅲ. 考察

実験結果は非常に興味深いものとなった。気導聴取と骨導聴取との間で外耳道内音圧がほぼ等しいということは、健聴者における骨導聴取では、②の経路（外耳道→鼓膜→耳小骨→蝸牛）が知覚を支配しており、直接内耳に届く成分はあまり貢献していない可能性があるからである。但し、これを結論付けるには、なお解決しなければならない課題がある。それは、蝸牛内部からの反射の有無である¹³⁾。仮に骨導音が外耳道を経由せず、すべて直接内耳に到達したとしても、蝸牛内部では気導音の場合と同等に、“進行波”を基底膜上に作り出すはずである。そして、この時のリンパ液の動きは前庭窓（卵円窓）に接続した耳小骨のあぶみ骨にも伝わるに違いない。つまり、蝸牛リンパ液→耳小骨→鼓膜→外耳道という逆のルートでの振動伝達により外耳道内音圧を作り出した可能性を否定出来ないのである。この反射の存在を示唆する事例として、耳音響放射と呼ばれる現象が知られている¹⁴⁾。そして、この反射の有無を検証することは現時点では容易ではなく、今後の課題である。

Ⅳ. まとめ

本実験では、骨導聴取と気導聴取での両耳間ラウドネスマッチングを用いて、健聴者の骨導聴取メカニズムを検討した。その結果、健聴者における骨導聴取は、外耳道の内壁から放射される骨導成分によって凡そ決定されていることが示唆された。

以上、健聴者における骨導聴覚の知覚メカニズムについて一つの実験的な考察を議論した。重要な点は、たとえ骨導音の伝達がどのような経路で行われているとしても、その知覚には、気導音の場合と同様の“進行波”が基底膜上に作り出されなければならないという点である。この事実は、骨導聴力が、気導音によって容易に変動させられることも意味している。即ち、骨導聴力は外界の騒音の影響を受け易いのである。これは骨導純音の知覚が、同じ周波数で逆位相の気導純音によって容易にキャンセルさせられることから明らかである^{1, 11)}。それ故、骨導方式の謳い文句にあっ

た「骨導だから騒音に強い」は必ずしも正確ではない。では、骨導音が騒音下でも比較的聞き分けられ易い要因は、他にあるのだろうか。

骨導での両耳聴処理

我々が普段聴いている気導音では、二つの耳の間で、到来する音の時間差や強度差を利用して音源の方向定位を行っている。しかし、骨導は頭蓋骨を振動させるため、左右の耳でそのような差が生じにくい可能性がある。例えば、右側頭部を骨導刺激したとき、右耳ばかりでなく、左耳でも音は減衰の少ないレベルで聴くことが可能だ。この両耳間移行減衰量は、骨導の場合0~10 dB程度とも言われている。実際、両耳 BAHA® 装用の聴取者を使った両耳聴研究で明らかなのは、骨導での両耳間時間差や強度差による音源方向定位などの両耳聴処理は、気導に比べて、機能し難いことが報告されている¹⁰⁾。さらに、骨導音の作成段階で頭部伝達関数を考慮していないのならば、その骨導音の音像定位は頭内に留まるだろう（頭内定位）^{15, 16)}。その結果、音源はまるで頭の中に存在するかのように聞こえるはずだ。この感覚は、通常気導音のヘッドホン聴取やイヤホン聴取でも体験できる現象である。それ故、このような定位感の違いが外界の騒音に対して骨導音の知覚を際立たせ、聞き分け易くしているのかもしれない。

謝辞

本研究の一部は科研費（16K12447, 16H02838：代表 伊藤、および26282130：代表 中川）の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) Békésy, “Experiments in Hearing,” McGraw-Hill; New York: 1960.
- 2) J. Tonndorf, “Bone conduction. Studies in experimental animals,” Acta Oto-Laryngol., Suppl. 213. pp. 1-132, 1966.
- 3) S. Stenfelt, N. Hato, and R. L. Goode, “Factors contributing to bone conduction: the middle ear,” J. Acoust. Soc. Am. 111 (2), pp. 947-959, 2002.
- 4) S. Stenfelt, T. Wild, N. Hato, and R. L. Goode, “Factors contributing to bone conduction: the outer ear,” J. Acoust. Soc. Am. 113 (2), pp. 902-913, 2003.
- 5) S. Stenfelt, “Middle ear ossicles motion at hearing

- thresholds with air conduction and bone conduction stimulation," *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (5), pp. 2848-2858, 2006.
- 6) Cochlear®, "BAHA bone conduction implants," <https://www.cochlear.com/jp/home/discover/baha-bone-conduction-implants/baha-system/sound-processors>.
 - 7) R. Shimokura, H. Hosoi, T. Iwakura, T. Nishimura, and T. Matsui "Development of monaural and binaural behind-the-ear cartilage conduction hearing aids," *Applied Acoustics* 74, pp. 1234-1240, 2013.
 - 8) 伊藤, 保手浜, 稲垣, 中川, "一側性伝音性難聴者による骨導成分の分離・抽出に関する検討," *日本音響学会春季研究発表会講演論文集*, pp.453-454, 2015.
 - 9) R. Carhart, "Clinical application of bone conduction audiometry," *Archives of Otolaryngology*, 51, 798-808, 1950.
 - 10) S. Stenfelt, "Acoustic and Physiologic Aspects of Bone Conduction Hearing," in *Implantable Bone Conduction Hearing Aids*, pp.10-21, *Adv. Oto-rhinolaryngol.* Basel, Karger, 2011.
 - 11) K. Ito and S. Nakagawa, "Self-demodulation of amplitude-modulated signal components in amplitude-modulated bone-conducted ultrasonic hearing," *Japanese Journal of Applied Physics*, 54, 07HF07, 2015.
 - 12) M.A. Fagelson and F.N. Martin, "The occlusion effect and ear canal sound pressure level," *American J. of Audiology*, 7 (2), pp.50-54, 1998.
 - 13) K. Ito and S. Nakagawa, "Bone-conducted ultrasonic hearing assessed by tympanic membrane vibration in living human beings," *Acoust. Sci. & Tech.* 34, 6, pp.413-423, 2013.
 - 14) D.T.Kemp, "Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, pp.1386-91, 1978.
 - 15) B. C. Moore, "Space Perception" in *An Introduction to the Psychology of Hearing* 6th edition, p. 245, BRILL, Boston, 2013.
 - 16) 伊藤, "骨導補聴器", *音響キーワードブック*, 日本音響学会編, p.202-203, コロナ社, 2016.