

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04021

研究課題名(和文) ヒト生体での耳小骨振動実測値に基づく骨導聴覚伝達経路の解明

研究課題名(英文) Identification of routes contributing to bone conduction hearing by means of measurement of vibrations of ossicular chain and cochlea in living humans

研究代表者

有井 士郎 (ARII, Shiro)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80222751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの骨導による蝸牛への伝音経路を明らかにするため、骨導加振時のヒト生体での耳小骨、外耳道後壁、蝸牛骨包の振動、および外耳道内音圧を計測した。さらに、耳小骨振動シミュレーションにより蝸牛への伝達力を求めた。この結果、耳珠からの加振力が耳小骨および外耳道後壁、さらに直接蝸牛へ伝播していること、さらに、耳小骨の構造は鼓膜からの入力を最も効率よく伝達することを明らかにした。骨導加振時の外耳道内音圧の上昇は耳小骨振動に比べて小さく、ヒトの骨導による伝音経路は、耳小骨の振動が蝸牛に伝播する経路、蝸牛に直接振動が伝播する経路の二つと考えられる。どちらの経路の役割が高いかについては明らかにできなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの骨導聴力は、頭骨の振動が3通りの経路で伝達される聴力と言われている。(1)外耳道壁を介して外耳道内の空気および鼓膜を振動させて気導と同様に伝わる、(2)耳小骨に伝わり、その振動が蝸牛に伝わる、(3)直接蝸牛に伝わる、である。しかしながら、ヒトの生体においては十分に解明されていなかった。本研究では、ヒト生体での骨導加振時の耳小骨、外耳道後壁、蝸牛骨包の振動、および外耳道内音圧を計測し、これらの経路の検証を行なった。その結果、ヒトの骨導聴力の経路は、外耳道内の空気の振動による経路はなく、耳小骨の振動が蝸牛に伝播する経路、蝸牛に直接振動が伝播する経路の二つと考えられることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Humans can perceive sound when the bones of the skull are excited by a vibrator. This phenomenon is normally referred to as hearing by bone conduction. Three bone conduction routes are proposed. (1) Sound radiated into the external ear canal is transmitted via the eardrum and the ossicular chain. (2) Vibrations of the bones are transmitted directly to the cochlea. (3) Vibrations of the bones are transmitted directly to the cochlea. In order to identify the routes contributing to bone conduction hearing, the tragus was excited by a vibrator and the vibrations of ossicular chain, cochlea, and external ear canal wall were measured in three living volunteers. Furthermore, the sound radiated into the external ear canal was measured in nine living volunteers. The exciting force was transmitted directly to the ossicular chain and the cochlea. However, the sound pressure radiated into the external ear canal was very low. The sound dose not contribute to the bone conduction route.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：骨導聴力 伝音経路 耳小骨振動 生体計測 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

通常ヒトの聴力とは、空気を伝わって来た音(気導音)が鼓膜でとらえられ、この音圧変動が中耳の耳小骨を介して内耳に伝わり、内耳の蝸牛で変換され脳神経に伝達される気導聴力を指す。一方、頭部の骨や軟組織の振動が直接内耳を刺激してもヒトは音として知覚でき、これを骨導聴力と言う。耳の後ろの乳様突起部に振動子をあて加振すると骨導聴力も検査できる。骨導音は振動子で発生させる特殊な現象のように思われるが、実は身近な現象である。録音した自分の声を聞くと自分の声と違って感じられるが、これは我々自身の発する声の一部が声道からただちに骨導で聴覚器官へと伝わっているからである。声楽家は自分で聞く声と他人が聞く声の違いを正確に学習することが必須の要件で、最初の関門と言われる。

骨導により蝸牛に伝わるまでの経路として提唱されているのは、以下の3通りの経路である。

(1) 頭骨の振動が外耳道壁を介して外耳道内の空気に伝わり、鼓膜を振動させて気導と同様に伝わる。

(2) 頭骨の振動が耳小骨に伝わり、耳小骨を振動させて蝸牛に伝わる。

(3) 頭骨の振動が直接蝸牛に伝わる。

気導による伝音特性についてはいくつか研究が報告されているが^{(1)~(3)}、ヒトの骨導による蝸牛への伝音経路に関しては、まだ十分に解明されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究の背景で述べたとおり身近な現象であるにもかかわらず、まだ十分に解明されていないヒトの骨導による蝸牛への伝音経路を明らかにすることである。このため、まず、以下の3項目を実施する。

(1) ヒト生体での骨導加振時の耳小骨、外耳道壁、蝸牛骨包の振動計測

(2) ヒト生体での骨導加振時の外耳道内音圧変化の計測

(3) 骨導加振時のマルチボディダイナミクスを用いた耳小骨振動解析

次に、これらの結果を用いて、骨導による加振力の耳小骨、外耳道壁、蝸牛への伝搬の検証と伝搬経路の考察、骨導加振による外耳道内音圧変化の検証と伝搬経路の考察、耳小骨振動および蝸牛への伝達力のシミュレーション結果と振動計測実験結果との検証を行い、ヒトの骨導による蝸牛への伝音経路を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ヒト生体での骨導加振時の耳小骨、外耳道壁、蝸牛骨包の振動計測

ヒト生体での振動計測は、被験者の同意を得て、人工内耳装着術中に実施する(鳥取大学医学部倫理委員会承認番号2100)。計測装置は、手術用顕微鏡(Zeiss, OPMI)、レーザドップラ速度計(OMETRON, VH300)、オーディオメータ(RION, AA-73A)で構成されている。手術用顕微鏡は、接眼レンズと対物レンズの間に、左右に側視鏡が取り付けられる構造になっている。側視鏡では接眼レンズの画像と同一の画像を見ることができる。この左側の側視鏡取り付け部にCCDカメラを取り付け、実験中の顕微鏡画像をモニタ画面に表示する。レーザドップラ速度計のレーザ光は、右側の側視鏡取り付け部に照射する。側視鏡取り付け部から入ったレーザ光は、プリズムで顕微鏡の光軸方向に曲げられ、対物レンズを通過して計測点に照射される。反射したレーザ光は、入力と同一の経路を逆の方向に進んでレーザドップラ速度計にもどり、照射点の振動速度が計測できる⁽³⁾。

被験者の側頭部耳介後方の皮膚を切開し側頭骨を削開すると耳小骨が目視できるようになる。振動計測はこの時点で本来の治療等に影響がなく計測可能と判断した場合に実施した。また、必要最小限の計測のみを実施した。1回の計測に要する時間は約4秒である。

骨導加振器(RION)は、被験者の耳珠に十分な接着強度を持つ両面テープで接着して固定する。骨導加振器はオーディオメータで加振する。レーザドップラ速度計で計測された計測点の振動はAD変換装置(B&K, PULSE, 356-B-130, サンプリング周期131kHz (2^{17} Hz), 分解能24bit)を介して計算機に記録する。記録した振動速度波形は、ロックインアンプのアルゴリズムを用いて、加振周波数と等しい周波数成分を抽出し、加振周波数での振動の振幅を求める。

(2) ヒト生体での骨導加振時の外耳道内音圧変化の計測

頭骨に伝播したヒト生体での骨導加振時の振動が外耳道内の音圧に及ぼす影響を明らかにするため、被験者の耳珠、耳垂、耳介軟骨裏面の3箇所骨導加振器(RION)を十分な接着強度を持つ両面テープで接着して固定した。それぞれの加振器を順にオーディオメータ(RION, AA-73A)で加振し、外耳道内の音圧を計測する(鳥取大学医学部倫理委員会承認番号21A216)。外耳道内の音圧は、プローブマイク(B&K, 4182)で計測し、AD変換装置(B&K, PULSE, 356-B-130, サンプリング周期131kHz (2^{17} Hz), 分解能24bit)を介して計算機に記録する。プローブマイクは、耳介および外耳道壁に接触しないように、かつ、先端が外耳道有毛部を越えるように挿入して固定した。記録した音圧波形は、サンプリング数131,072 (2^{17})個で高速フーリエ変換を用いて周波数分析を行った。周波数分析結果は

オーバーラップ 50% で平均化処理を行い，加振周波数での音圧を求めた。

被験者に固定した骨導加振器は被験者の骨だけではなく加振器周囲の空気も振動させて音を発生させる。外耳道内の音圧変化に及ぼす骨導の影響を明確にするため，接着せず気導で伝音した場合の外耳道内の音圧も計測する。

(3) 骨導加振時のマルチボディダイナミクスを用いた耳小骨振動解析

耳小骨モデルは，成人男性の右側中耳 X 線体軸断面撮影画像を基にして耳小骨の形状を求めた。シミュレーションに使用する CAD モデルは，耳小骨の 3 次元形状を再現した耳小骨モデルを非接触三次元デジタイザー (COMET511M) で三次元計測し，作成した⁽⁴⁾。

マルチボディダイナミクスの手法を用いたシミュレーションは，LMS Virtual.Lab⁽⁵⁾を使用した。人が外界からの音波を捉えて聴覚に伝達する状態を想定し，気導は鼓膜をモデル化したばねの基礎を変位加振して音波に相当する入力を与える。骨導は筋腱に関して，同様に変位加振し，伝播する振動に相当する入力を与える。耳小骨振動のシミュレーション結果より，振動計測では得られない骨導刺激の蝸牛への伝達力を求める。

4. 研究成果

(1) ヒト生体での骨導加振時の耳小骨，外耳道壁，蝸牛骨包の振動計測

振動計測に際して，成人の被験者 3 名に協力を依頼した。研究協力の説明を行い全員の同意が得られた。オーディオメータの出力 60dB，加振周波数 1kHz および 3kHz で加振し，各部位の振動を計測した。計測結果を表 1 に示す。計測点は，ツチ骨頭，キヌタ骨体部，アブミ骨上部，蝸牛岬角，外耳道後壁である。数値が記入されていない欄は計測できなかった。

観測された振動振幅には個人差があり，特に被験者 3 は振幅が大きい。全ての被験者で気導加振と同様に加振周波数 3kHz の振幅が 1kHz の振幅よりも小さい。また，ツチ，キヌタ骨とアブミ骨がほ

表 1. 耳小骨，外耳道壁，蝸牛骨包の振動計測結果

(a) Subject 1

Frequency	1 kHz		3 kHz	
	Amplitude (μ)	Phase (degree)	Amplitude (μ)	Phase (degree)
Stapes	0.0806	96	0.0031	21
Malleus	0.0794	249	-	-
Incus	0.0414	237	0.0023	222
Cochlea	0.0008	136	-	-
Canal wall	-	-	-	-

(b) Subject 2

Frequency	1 kHz		3 kHz	
	Amplitude (μ)	Phase (degree)	Amplitude (μ)	Phase (degree)
Stapes	0.0874	150	-	-
Malleus	0.1012	6	0.0093	88
Incus	0.0944	0	0.0070	87
Cochlea	0.0040	150	-	-
Canal wall	0.0041	153	-	-

(c) Subject 3

Frequency	1 kHz		3 kHz	
	Amplitude (μ)	Phase (degree)	Amplitude (μ)	Phase (degree)
Stapes	0.3999	175	0.1164	189
Malleus	0.5338	-42	0.0320	9
Incus	0.1606	-81	0.0863	56
Cochlea	-	-	-	-
Canal wall	-	-	-	-

ば逆位相で振動しており、これは気導加振時の耳小骨振動⁽³⁾と同じ振動モードである。外耳道内を100dB SPLで気導加振した時の耳小骨振動振幅と比較すると、観測された振幅は数倍から数十倍と極めて大きな値である。これは、実験に用いた骨導加振器の出力が極めて大きいことに起因すると考えられる。鼓膜を直径1cmの円板として音圧100dB SPLで鼓膜を加振する力と比較すると、オーディオメータの出力60dBの時、1kHzの出力は約2,800倍、3kHzの出力は約2,300倍である。しかしながら、観測された振幅はこの加振力の倍率と比べればかなり小さく、骨導では内部減衰が大きいことを示す結果でもある。

被験者1の1kHzでの加振では、蝸牛岬角での振動が観測されている。また、被験者2の1kHzでの加振では、蝸牛岬角に加え外耳道後壁でも振動が観測されている、いずれも振幅値は耳小骨の1/100のオーダーであるが、耳珠での加振で、蝸牛岬角および外耳道後壁に加振力が伝播し振動していることが確認できた。

(2) ヒト生体での骨導加振時の外耳道内音圧変化の計測

耳疾患の治療歴がなく、視診上外耳および中耳にいずれも奇形がなく、また、聴力検査上30dB以内の正常聴力を有する、成人の被験者9名に協力を依頼した。研究協力の説明を行い全員の同意が得られた。被験者の耳珠、耳垂、耳介軟骨裏面の3箇所に骨導加振器を接着し、オーディオメータの出力60dB、加振周波数1kHzで加振した。使用した3個の骨導加振器の感度のばらつきは1dB μ N未満で、3個とも同等の加振性能を有する。実験では、まず、骨導加振器を外耳道入口近傍に糸で吊るし、音響加振を行なって外耳道内の音圧を計測した。次に、接着した加振器を順に加振して音圧を計測した。

被験者9名の音響加振の音圧計測結果は、平均82dB SPL(最大84,最小81)であった。耳珠加振での音圧は平均89dB SPL(最大93,最小78)、耳介軟骨裏面加振での音圧は平均84dB SPL(最大91,最小77)であった。図1に、横軸に加振位置、縦軸に骨導加振で得られた音圧を音響加振での音圧で無次元化した音圧比を示す。音圧比が1を超えるということは、外耳道内の空気を加振する何らかの加振源があることを示している。加振源となりうるのは、外耳道壁と鼓膜以外には考えられない。計測結果には個人差が見られ、耳介軟骨裏面での加振で2名が、耳珠での加振で1名が音圧比が1以下となっている。しかしながら、前者の2名は耳珠で1を超えており、後者の1名も耳介軟骨裏側で1を超えている。加振力が伝播する経路は、個人の頭骨内部の骨および軟骨の構成が影響しているものと考えられる。一方、耳垂での加振では全ての被験者で音圧比が1を超えない。したがって、耳珠および耳介軟骨裏面での加振では、加振力が軟骨を介して伝搬し、その結果外耳道内の音圧を高めることが明らかとなった。

ここで、外耳道内の音圧を高める部位について考察する。耳小骨、外耳道壁の振動計測結果では、耳小骨の振動が大きく、外耳道壁は1/100のオーダーである。また、外耳道内を100dB SPLで気導加振した時の耳小骨振動振幅と比較すると、骨導加振で観測された耳小骨の振幅は数倍から数十倍の大きさで極めて大きな値である。気導加振でこの大きさの振動を得るためには、少なくとも10倍の音圧で加振すること、すなわち、120dB SPL程度は必要と考えられる。しかしながら、計測した外耳道内の音圧は最大でも93dB SPLである。したがって、骨導により外耳道内の音圧が上昇し気導と同様に鼓膜、耳小骨、蝸牛へと伝わりとは考えにくい。骨導により耳小骨が振動し、その結果鼓膜が振動して、外耳道内の音圧の上昇につながったと考える方が妥当である。

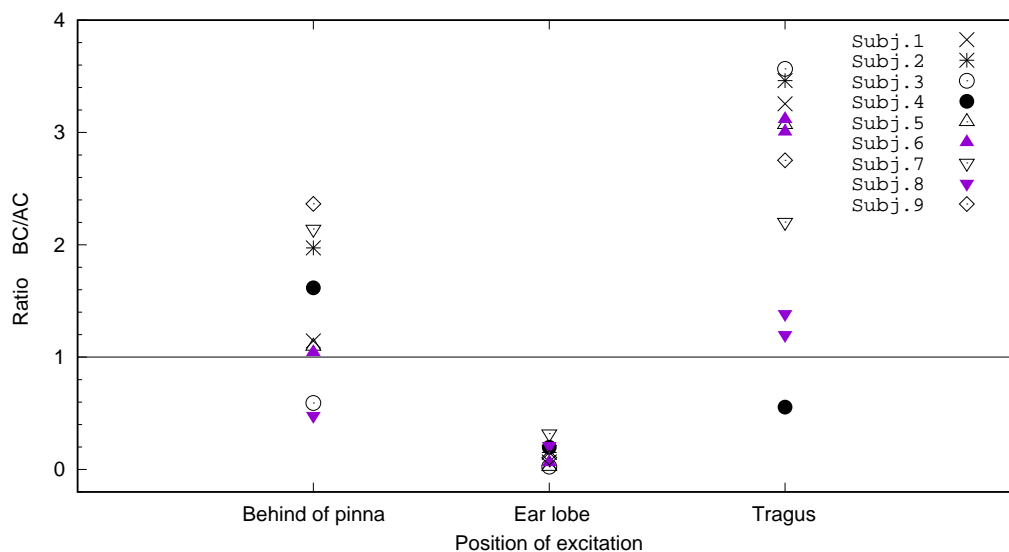


図1. 骨導加振時の外耳道内音圧

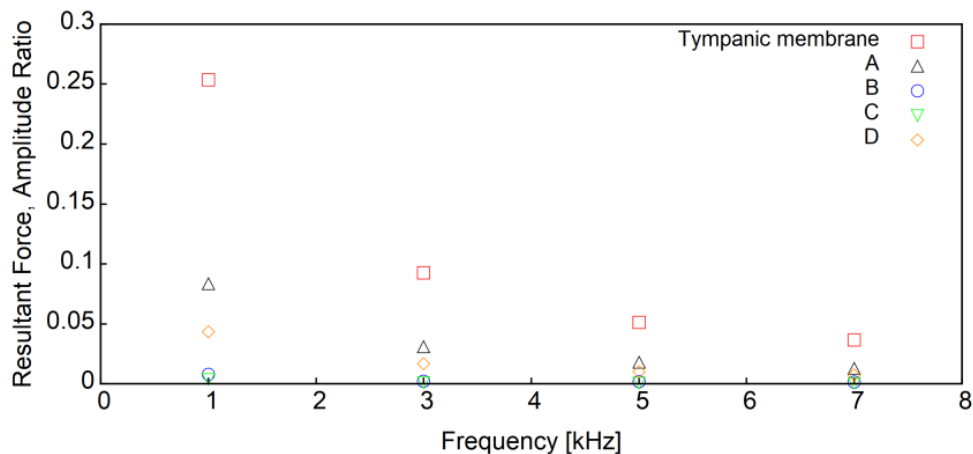


図2. 骨導加振時の蝸牛伝達力

(3) 骨導加振時のマルチボディダイナミクスを用いた耳小骨振動解析

耳小骨を剛体、筋および腱をばねと減衰とした鼓膜および耳小骨モデルによる、耳小骨振動シミュレーションを行い、アブミ骨から蝸牛に伝達される力を求めた⁽⁴⁾。伝達力は、耳小骨を支持する、鼓膜張筋腱、上ツチ骨靭帯、前ツチ骨靭帯、アブミ骨筋腱それぞれを加振して求めた。図2に、各周波数での鼓膜、鼓膜張筋腱 (A)、上ツチ骨靭帯 (B)、前ツチ骨靭帯 (C)、アブミ骨筋腱 (D) それぞれの加振力に対する、伝達力の振幅比を示す。加振周波数が高くなると伝達力が減少する、すなわち、耳小骨振動が減少する、のはヒト生体での実験結果と同様である。最も伝達力の振幅比の大きい鼓膜張筋腱からの入力でも、鼓膜入力からの振幅比の1/3程度である。

シミュレーション結果より、骨導により耳小骨を介して加振力が蝸牛へ伝達されること、また、耳小骨は鼓膜からの入力に対して最も効率よく伝達する構造になっていることが確認できた。

(4) ヒトの骨導による伝音経路

本研究により、ヒトの骨導による伝音経路として、耳小骨が振動し蝸牛に伝播する経路、蝸牛に直接振動が伝播する経路が確認された。計測された耳小骨振動は音圧100dBの気導加振と比較して数倍から数十の大きな値が観測された。この主な原因は、骨導加振器の加振出力が音圧加振と比較して非常に大きいことにあると考えられる。しかしながら、外耳道内音圧変化の計測では、被験者は特に大きな音とは知覚していない。骨導加振時の耳小骨振動の大きさと、被験者が知覚する音の大きさは、直接の関係が無い可能性も考えられる。

骨導加振時に計測された外耳道内の音圧は高くても90dB程度であり、気導加振時のヒト生体での実験結果から、骨導で観測された耳小骨振動を実現するためには明らかに不足している。頭骨の振動が外耳道壁を介して外耳道内の空気に伝わり、鼓膜を振動させて気導と同様に伝わる経路は耳小骨振動の大きさから矛盾することになる。骨導により耳小骨が振動し、耳小骨の振動は鼓膜と蝸牛の両方に伝達されていると考えるのが妥当である。したがって、ヒトの骨導による蝸牛への伝音経路は、耳小骨が振動し蝸牛に伝播する経路、蝸牛に直接振動が伝播する経路の二つと考えられる。どちらが主な経路であるかについては本研究では明らかにできなかった。

<引用文献>

- (1) 有井 士郎, 長谷川 賢作, 國本 泰臣, 片岡 英幸, 矢間 敬章, 久家 純子, 北野 博也, “ヒト耳小骨の振動解析”, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集(2016), J2320104.
- (2) Kunimoto Y, Hasegawa K, Arii S, et al. Sequential Multipoint Motion of the Tympanic Membrane Measured by Laser Doppler Vibrometry: Preliminary Results for Normal Tympanic Membrane, *Otology & Neurotology*, Vol.35, No.4 (2014), pp.719-724, doi: 10.1097/MAO.0000000000000242.
- (3) Kunimoto Y, Hasegawa K, Arii S, et al. Sequential motion of the ossicular chain measured by laser Doppler vibrometry, *Acta Oto-Laryngologica*, 2017, Vol. 137, No. 12, 1233- 1237, DOI:10.1080/00016489.2017.1357833.
- (4) 岩崎 大輝, 有井 士郎, 長谷川 賢作, 國本 泰臣, 矢間 敬章, 片岡 英幸, 北野 博也, “骨導によるヒト耳小の伝音特性に関する研究”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2019 (2019), 455.
- (5) LMS Virtual.Lab, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., <https://www.plm.automation.siemens.com/ja-jp/products/lms/virtual-lab/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩崎大輝, 有井士郎, 長谷川賢作, 國本泰臣, 矢間敬章, 片岡英幸, 北野博也
2. 発表標題 骨導によるヒト耳小の伝音特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学科 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢間敬章, 有井士郎, 渡部佑, 片岡英幸, 藤原和典
2. 発表標題 生体の軟骨伝導における伝音メカニズム解明の予備実験
3. 学会等名 第31回日本耳科学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	片岡 英幸 (KATAOKA Hideyuki) (00224436)	鳥取大学・医学部・教授 (15101)	
研究分担者	長谷川 賢作 (HASEGAWA Kensaku) (60252847)	日本医科大学・医学部・教授 (32666)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	矢間 敬章 (YAZAMA Hiroaki) (30444631)	鳥取大学・医学部・助教 (15101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関