

Title	骨導音知覚特性に関する調査研究 [課題研究報告書]
Author(s)	山本, 克彦
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/12642
Rights	
Description	Supervisor: 鶴木祐史, 情報科学研究科, 修士

課題研究報告書

骨導音知覚特性に関する調査研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

山本 克彦

2015 年 3 月

課題研究報告書

骨導音知覚特性に関する調査研究

指導教員 鷗木祐史 准教授

審査委員主査 鷗木祐史 准教授

審査委員 赤木正人 教授

審査委員 田中宏和 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

1310073 山本 克彦

提出年月: 2015 年 2 月

概 要

気導音が空気中を伝搬して外耳・中耳を経由して内耳に到達し知覚される音であるのに対して、骨導音は頭蓋骨の振動を介して内耳に到達し知覚される音である。骨導は気導とは異なる音の伝達経路を持つため、伝音性難聴者のための骨導補聴器や高騒音環境下でもコミュニケーションが可能な骨導ヘッドホンなど、工学的に幅広く利用されている。しかし、骨導音の伝達過程は非常に複雑であるため、ヒトの骨導音知覚メカニズムの全容は未だに明らかにされていない。

本研究のねらいは、骨導音の伝達経路をそれぞれ伝達システムとして注目し、気導音知覚と骨導音知覚の関係性を深く議論することで、骨導音がどのようなメカニズムで知覚されているのかを明らかにすることである。本論文では、これらの課題の達成に必要なと考えられる既存研究について調査を行い、骨導音の知覚メカニズムをより明確にするためにどのようなアプローチを取れば良いか検討することを目的とする。

はじめに、生理学的アプローチによって骨導の振動特性を計測した先行研究について調査を行った。調査結果から、骨導音知覚において主に(1) 外耳道内放射、(2) 中耳の耳小骨の慣性振動(慣性骨導)、(3) 内耳のリンパ液の慣性振動、(4) 圧縮骨導、(5) 脳脊髄液経由の圧力の5つの経路が関連していることが示唆されている。また、生理学的アプローチによって、内耳までの伝達経路においては骨導音の振動特性が物理的に計測されていることがわかった。しかし、蝸牛内部へと通じる経路における伝達メカニズムや、その伝達経路が知覚にどのような影響を与えているのかということは依然として未解明であることが明らかになった。

次に、心理物理学的アプローチによって骨導音の知覚特性を測定した既存研究について調査を行った。調査結果から、骨導音知覚における音の大きさに関しては多くの調査が行われているものの、位相変化に対する知覚特性については調査が少ないことがわかった。一方で、骨導音が気導音と同様に蝸牛内の基底膜振動として伝達されるという過程をもとに、骨導音知覚を気導音によって相殺する心理物理実験が行われていることがわかった。この知見から、骨導音の振幅特性だけではなく位相特性にも注目することで、骨導音の伝達メカニズムと関連付けて議論できることが明らかになった。

以上の調査結果から、骨導音知覚における位相変化の知覚特性を気導音知覚のものと比較することで、伝達メカニズムの推定を行えるのではないかと考えた。気導音知覚において、位相変化による知覚特性が音色知覚の変化から観察できることが明らかになっており、骨導音知覚においても位相変化の知覚特性を推定できる可能性がある。このアプローチにおいて使用される位相補正フィルタは、生理学的アプローチから明らかになっている伝達経路の各伝達特性を合成することにより設計する。

結論として、骨導音知覚メカニズムをより明確にするためのアプローチとして、骨導音伝達時の位相特性に注目し、位相特性の変化に対する知覚特性を気導音の知覚特性と比較

することにより，内耳以降の伝達経路における知覚特性および伝達経路メカニズムを推定できる可能性がある．

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	骨導	2
1.3	骨導音知覚のモデル化	4
1.4	本課題研究の目的	5
1.5	本報告書の構成	5
第2章	骨導音の伝達特性・知覚特性に関する先行研究	7
2.1	生理学的アプローチ	7
2.1.1	外耳道内放射	8
2.1.2	中耳耳小骨の慣性振動	10
2.1.3	内耳以降の伝達経路	13
2.2	心理物理学的アプローチ	18
2.2.1	絶対閾値	18
2.2.2	ラウドネス	19
2.2.3	音源定位	20
2.2.4	気導音を用いた骨導音の知覚的な相殺実験	20
2.3	両アプローチのまとめ	22
第3章	骨導音知覚特性の解明に向けて	25
3.1	骨導音の伝達経路の全体像	25
3.2	骨導音知覚における伝達特性	27
3.2.1	振幅特性	27
3.2.2	位相特性	30
3.3	位相変化の知覚特性に注目した心理物理実験	31
3.4	骨導音知覚メカニズム解明のためのアプローチ	32
3.5	現時点での問題点	35
第4章	結論	37

目 次

1.1	気導と骨導による音の伝搬過程の概要.	2
1.2	本調査研究で検討する骨導音の伝達システムの概要.	6
2.1	外耳道放射の概要.	9
2.2	外耳道内放射における外耳道内の音圧.	9
2.3	中耳耳小骨の慣性骨導（慣性骨導）.	11
2.4	アブミ骨の慣性振動の振動速度.	12
2.5	蝸牛内での音の伝搬過程.	13
2.6	気導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積.	16
2.7	気導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の入出力関係.	16
2.8	骨導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積.	17
2.9	骨導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の入出力関係.	17
2.10	心理物理学的アプローチにおいて着目するシステムの概要.	18
2.11	心理物理学的アプローチによる骨導音と気導音の伝達システムの概要.	23
2.12	骨導音知覚の相殺実験時の外耳道内の音圧特性.	23
3.1	調査結果をもとにした骨導音と気導音の伝達経路の概要.	26
3.2	測定値から導出された頭蓋骨の伝達関数.	28
3.3	骨導音相殺時の気導音の音圧と骨導振動子の加振強度.	29
3.4	相殺時の骨導音の聴力レベルと気導音の聴力レベル.	29
3.5	図 2.2(b) における位相特性の比較.	30
3.6	図 2.4 における (c) 位相特性の比較.	31
3.7	骨導音知覚メカニズム解明のための課題 1.	33
3.8	骨導音知覚メカニズム解明のための課題 2.	34
3.9	骨導音知覚メカニズム解明のための課題 3.	34

第1章 序論

1.1 はじめに

ヒトの聴覚は非常に優れた音情報処理能力を備えており、音声を聴き取ることにより容易にコミュニケーションを行うことができる。しかし、加齢に伴う聴力低下や聴覚障がいにより、従来の気導での聴き取りが困難になりコミュニケーションに支障をきたしてしまうことがある。さらには、難聴者だけではなく健聴者でも、高騒音環境下や気導を用いることができない環境下では音声を用いたコミュニケーションは困難になる。そこで、気導とは異なる音の伝達経路を持つ骨導が、気導に代わる音の伝達手法として注目されている。

骨導は医療分野において聴覚補助を目的とした骨導補聴器として利用されている。骨導補聴器は、外耳や中耳における障害による難聴（伝音性難聴）に対しての聴覚補償には非常に効果的な機器である。さらに、近年では健聴者を対象として、高騒音環境下において気導音を使用しないでコミュニケーションを可能とする骨導方式の通信機器や、気導音知覚と骨導音知覚の併用を目的とした骨導ヘッドホンが利用されている。しかしながら、現時点の骨導呈示を用いた音響機器において知覚される骨導音の聴こえは、気導音と比較すると決して良いとは言えない。今後の課題として、音伝達を効率よく行える骨導方式の音響機器（ハードウェア）の発展だけではなく、骨導音の聴こえを改善しより明瞭な音として知覚できるような信号処理技術（ソフトウェア）の発展が望まれる。

気導音が空気中を伝搬して外耳・中耳を経由して内耳に到達し知覚される音であるのに対して、骨導音は頭蓋骨の振動を介して内耳に到達し知覚される音である [1]。また、骨導音は内耳に到達するまでに外耳や中耳にも影響を及ぼすため、気導音と同じ経路に合成されることもある。骨導は気導とは異なる音知覚のための伝達手段として幅広く利用されているが、伝達過程が非常に複雑であるため、骨導音知覚メカニズムの全容は未だに明らかにされていない [2, 3]。骨導音がどのような経路を通過して知覚されているのかという疑問は、科学的に非常に興味深く重要な研究課題である。この疑問を解決するためには、骨導音知覚メカニズムについて現時点で明らかになっている知見と、未だに未解明な事柄を明確にしなければならない。

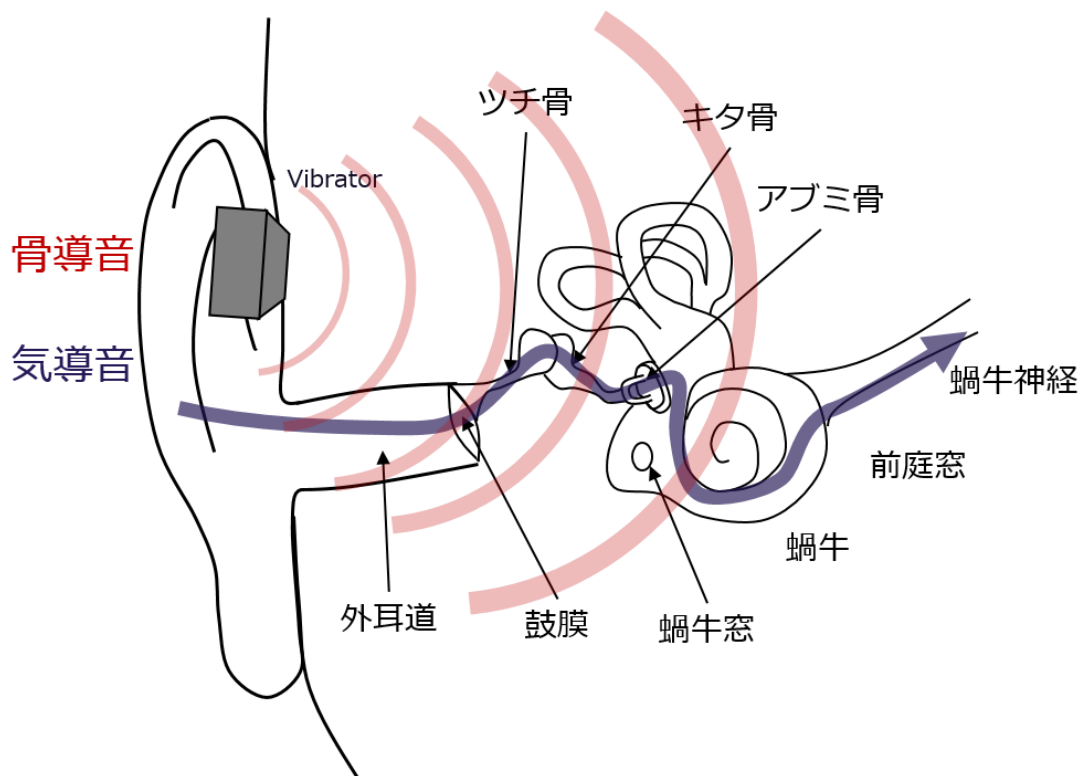


図 1.1: 気導と骨導による音の伝搬過程の概要.

1.2 骨導

はじめに、どのような伝達過程が骨導と定義されているかを気導と比較しながら述べる．図 1.1 に、気導と骨導による音の伝搬過程を示す．気導は、音が空気振動として外耳道から入り、鼓膜、耳小骨を介して内耳に伝達されることをいう [1]．気導によって呈示された音を聴き取ることができる能力を気導聴力と呼ぶ．ヒトが日常生活において聴いている音は気導音であり、一般的な聴力はこの気導聴力を指す．気導に対して、音が頭蓋骨の振動を介して蝸牛に伝達されることを骨導という [1]．骨導によって呈示された音を聴き取ることができる聴力を骨導聴力と呼ぶ．気導音が外耳、中耳、内耳と決まった伝達経路を持つことに対して、振動子から呈示されることによって発生する骨導音は頭蓋骨内を伝搬する．さらに、骨導は内耳に直接到達する伝達経路だけではなく、外耳道内に放射されたり中耳の耳小骨を慣性的に振動させる．このような伝達経路の違いから、オーディオメーターを用いて気導聴力と骨導聴力を測定・比較を行うことにより、難聴者がどのような症状（伝音性難聴/感音性難聴/混合性難聴）であるかを診断することができる [4]．

骨導は、呈示を行う機器や加振方式の違いからいくつかの種類に分けられる．以下で

は、骨導の種類についてそれぞれ説明する。

圧着型の振動子を用いた骨導

可聴周波数帯域の信号を電氣的に増幅させ、振動子（トランスデューサ）を頭部に圧着させて呈示する骨導を指す。外耳道を閉鎖しないで装用が行えるため、伝音性難聴者のための補聴器としてだけではなく、ヘッドホンや通信機器の受話器といった健聴者のための音響機器としても幅広く利用されている [5]。

半埋込み型の振動子を用いた骨導

圧着型の振動子を用いた骨導では、振動子を頭部の皮膚上に圧力を加えて固定するため、長時間の装用による痛みや不快感が問題となる [6]。特に、骨導補聴器を装用する難聴者には日常的な使用が困難であった。そのため、難聴者の頭蓋骨にチタン製の骨導端子をあらかじめ埋めておき、皮膚を介さずに直接骨に振動を伝達する半埋込み型骨導補聴器（bone-anchored hearing aid : BAHA）が開発された [7]。BAHA は従来の骨導補聴器と比較して、振動子を皮膚を介さずに安定して固定できることから、振動子の振動を効率よく蝸牛に伝えることができる。しかしながら、BAHA を使用するためには頭部へチタン端子を埋込むための手術や端子の保護が必要となる。

歯骨導

皮膚の影響を受けないで頭蓋骨に音響信号を伝える呈示手法として、歯を直接加振することで頭蓋骨に振動を伝達させる歯骨導が提案されている。歯骨導による骨導音の知覚特性について研究が行われており、従来の乳様突起に呈示した骨導音と比較して、その絶対閾値は 10 dB 程度小さいことが報告されている [8, 9]。また、歯骨導を用いた補聴用デバイスの開発や、複数チャンネルの振動子を用いることによる音源定位の検討が行われている [10]。

軟骨導

耳介と外耳道の半分を構成する耳軟骨を振動させると、振動した軟骨が外耳道内に放射音を生成する。生成された音は気導音と同様に鼓膜を振動させ耳小骨を経由して内耳以降へと伝搬する。細井らはこの経路を「軟骨導」と呼び、新たな音の伝達経路として提唱した [11]。以後、その伝達メカニズムを調べるための基礎研究や補聴器の開発、携帯電話・イヤホンへの応用・性能評価を行ってきた [12, 13, 14]。

軟骨導は軟骨の振動が外耳道内に生成する放射音であるから、骨導の伝達経路の一つである「外耳道内放射」と同様の経路で伝達されると考えられる（2.1.1 項を参照）。しかし

ながら，圧着型の骨導と比較して長時間の装用時にも痛みが生じにくく，さらには気導音の補聴器と比較して低音強調に優れていることと音漏れが少ないことから，音響機器としての実用化が期待されている [13]．

骨導超音波

周波数 20 kHz 以上の高周波音であっても，骨導で呈示された場合（骨導超音波）は明瞭な音として知覚される [15]．また，この骨導超音波を音声で振幅変調することにより，重度感音性難聴者でも複数の単語を区別して知覚できる場合があることが報告されている [16]．しかし，骨導超音波知覚の神経生理メカニズムは依然として不明な点が多く残されており，細井ら・中川らによって骨導超音波知覚の生理学的・心理学的特性を解明するための研究が行われている [17, 18, 19]．さらに，中川らは骨導超音波知覚の生理学・心理学的特性を明らかにした上で，それらの成果を生かした重度難聴者にも適用可能な骨導超音波補聴器の開発に取り組んでいる [20]．

本調査研究で対象とする骨導

骨導は呈示方式の違いにより，以上のような種類に分けることができることを示した．骨導音の知覚特性についてはそれぞれの呈示方式に合わせて調査が行われているため，調査研究を行うためにはどの方式の骨導に注目するかを決定しておく必要がある．本調査研究では，健聴者における骨導音の知覚メカニズムについて注目するために，圧着型の振動子を用いて可聴域周波数帯の信号を呈示したときの骨導を対象として調査を行う．

1.3 骨導音知覚のモデル化

骨導音がどのような振動特性で伝達されているか，そのメカニズムについて数値解析的手法を用いてモデル化が行われている．簡易的な手法として，二次元および三次元で記録された頭蓋骨の CT スキャンデータを参考に頭部モデルを作成し，そのモデルに時間領域差分法（finite difference time domain method, FDTD）を用いて頭部内の音場を解析するモデルが提案されている [21]．ただし，この手法では骨導音の伝達過程は内耳までの伝達経路を不均質の弾性率をもつ媒質として定義しているため，実際の頭部内での骨導音の伝達経路などは考慮されていない．

骨導における振動音の伝搬過程に関係する個々の聴覚器の構造を，二次元および三次元の有限要素法（finite element model method, FEM）を用いて精巧に作成し模擬したモデルを用いて，骨導による聴覚器への力学・流体力学的な影響を分析する手法が提案されている [22, 23, 24]．しかし，骨導音の振動特性をより詳細に模擬するためには現状よりもさらに多くのパラメータを用いた複雑なモデル群を構成する必要がある．

そこで本研究では、頭蓋骨や聴覚器の物理的振動を数値解析的に模擬するのではなく、骨導音の伝達経路をそれぞれ「周波数特性を持つ伝達システム（サブシステム）」として注目する方法を検討する。図 1.2 に、本調査研究で検討する骨導音の伝達システムを示す。本調査研究では、骨導音知覚に関係すると考えられる伝達経路について論文サーベイを行い、伝達特性が調べられている伝達経路と未知の伝達経路に分類してサブシステムを検討する。最終的に、図 1.2 のように、全てのサブシステムを合成させた骨導音の伝達システムがどのような特性として考えられるか検討する。この伝達システムの周波数（振幅・位相）特性を議論することにより、骨導音知覚メカニズム（未知の伝達経路に対する知覚特性）を解明するための手がかりを得ることができるのではないかと考えられる。

1.4 本課題研究の目的

本研究のねらいは、骨導音の伝達経路をそれぞれ伝達システムとして注目し、気導音知覚と骨導音知覚の関係性を深く議論することで、骨導音がどのようなメカニズムで知覚されているのかを明らかにすることである。本課題研究では、これらの課題の達成に必要な既存研究について調査を行い、骨導音の知覚メカニズムをより明確にするためにどのようなアプローチを取れば良いか検討することを目的とする。

はじめに、骨導音はどのような伝達経路を経由して知覚され则认为られているのか、その伝達特性はどの程度調べられているのかを、既存研究の知見をもとに明らかにする。次に、骨導音の知覚特性については心理物理的な立場からどの程度調べられているのかを、既存研究の知見をもとに明らかにする。その結果をふまえ、骨導音知覚に関係する伝達経路はどのようなシステムとして考えることができるのか、さらには骨導音の知覚特性と対応できるのかどうかを分析・考察する。

1.5 本報告書の構成

本報告書は全 4 章で構成されている。第 1 章では、本研究で扱う問題点を示すために、本研究の背景と骨導に関する基礎知識、研究のねらいと本調査研究の目的について述べる。第 2 章では、骨導音知覚特性の解明のために行われている 2 種類のアプローチ（生理学的アプローチ、心理物理学的アプローチ）について述べる。また、それぞれのアプローチではどのようなことが明らかになっているのかに加え、両アプローチの利点と欠点について分析する。第 3 章では、得られた知見を伝達システムの視点から分析し、本研究で検討する骨導音知覚メカニズム解明のためのアプローチについて述べ、現時点での問題点を挙げる。第 4 章では、本報告書の内容をまとめ、結論とする。

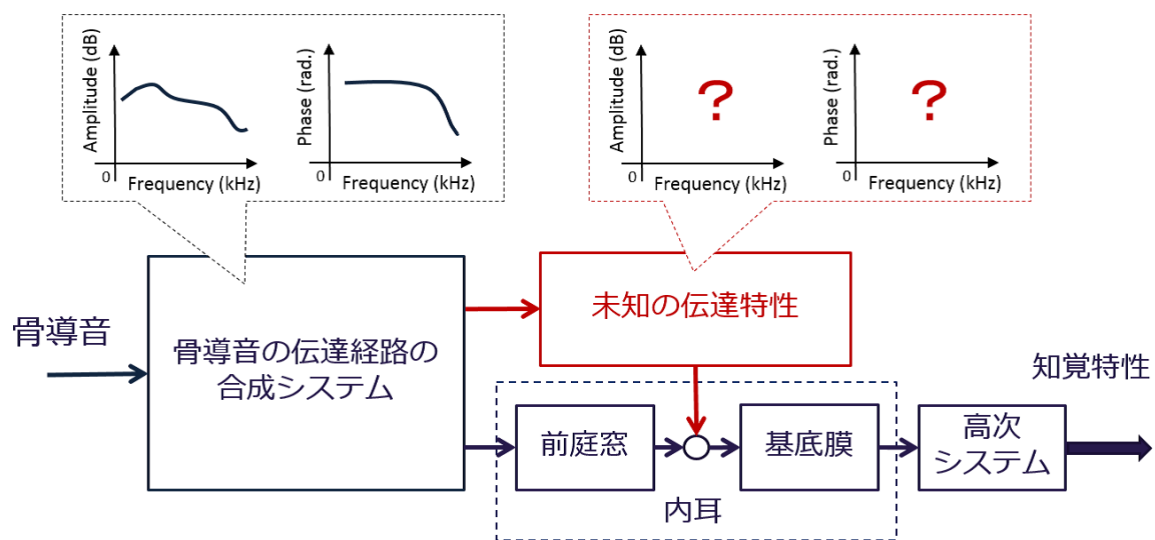


図 1.2: 本調査研究で検討する骨導音の伝達システムの概要.

第2章 骨導音の伝達特性・知覚特性に関する先行研究

骨導音の伝達メカニズムおよび知覚特性を解明するために行われている先行研究は、以下の大きな2つのアプローチに分けることができる。

1. 生理学的アプローチ
2. 心理物理学的アプローチ

本章では、両アプローチが骨導のどのような点に注目して調査を行い、その結果どのようなことを明らかにしたのかということについて述べる。また、両アプローチの特徴および利点と欠点についてまとめる。

2.1 生理学的アプローチ

Tonndorf や Stenfelt らによって、骨導音知覚に寄与している伝達経路および伝達メカニズムの概要が示されている [25, 2, 3]。骨導音の伝達過程において、主に以下の5つの経路が関与することが示唆されている。

- (1) 外耳道内放射
- (2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導）
- (3) 内耳のリンパ液の慣性振動
- (4) 圧縮骨導
- (5) 脳脊髄液経由の圧力

ここで、それぞれの経路は、外耳に関係する経路(1)、中耳に関係する経路(2)、内耳に関係する経路(3)(4)(5)と分類することができる。気導音の知覚過程と同様に、骨導音の場合でも伝達されてきた音が高次レベルの聴覚系（一次聴神経や脳幹など）に直接到達するわけではなく、物理的な振動が複数の経路を通じて蝸牛に到達し、蝸牛内の有毛細胞を振動させることにより神経発火させていると考えられている [5]。

本項で述べる生理学的アプローチでは、各経路の伝達特性を明らかにするために、実際に解剖を行い頭蓋骨および聴覚器の振動特性・伝達特性を物理的に計測している。以降では、生理学的アプローチから明らかになった、骨導音の各伝達経路における伝達メカニズムおよびその伝達特性について説明する。

2.1.1 外耳道内放射

気導呈示での音の伝達過程において、外耳は耳介で集められた音のエネルギーを外耳道を介して鼓膜に伝える役割を果たす。外耳は耳介と軟組織、外耳道で構成されている。耳介はその形状によって到来した音の周波数特性を変化させることにより、音の到来方向を認識しやすくする。外耳道は奥にある鼓膜を保護する役割のほかに、到来した音を共鳴させ音圧を増大させる音響管のような仕組みを持つ [6, 26, 27]。

骨導呈示での音の伝達過程において、頭蓋骨や軟組織が変形・振動することにより、骨導音が外耳道内に空気振動として放射される。この現象は外耳道内放射（osseotympanic effect）と呼ばれる [25]。図 2.1 に外耳道内放射の概要を示す。刺激音の呈示が骨導振動子から行われたとき、外耳道内における空気振動は鼓膜上の音圧として働き、気導音と同様の経路を通過して蝸牛に伝達される。骨導音の知覚特性は、外耳道を塞ぐことにより著しく変化する。この現象は耳閉塞効果（occlusion effect）と呼ばれ、外耳道内放射によって漏れでた骨導音が逃げ場所を失うことにより知覚される骨導音の低域成分を強調させる。骨導音の知覚特性を調査するときには、この耳閉塞効果の影響を常に考慮する必要がある [28, 29, 30]。

外耳道内放射における骨導音の寄与成分を調査するために、プローブマイクロホンやレーザードップラーなどの機器を用いた伝達特性の測定が行われてきた [31, 32, 28]。Stenfelt らは、外耳道内放射による骨導音の伝達特性を調査するために、外耳道内の音圧をプローブマイクロホンによって計測した [28]。図 2.2 に外耳道放射における鼓膜上での音圧の (a) 振幅特性および (b) 位相特性を示す。耳道開放時（実線）において、振幅特性は 0.5 ~ 2.7 kHz の周波数域で 15 dB/octave の上昇（2.7 kHz 付近で共振特性）を示す高域通過フィルタの形状を持つことが示された。外耳道放射による骨導音の位相特性は、呈示された骨導音に対して遅延が生じた。位相特性の形状から、7 kHz までの周波数域の骨導音において、外耳道放射における外耳道内の音圧は直線位相特性を持つことが示唆される。耳閉塞時（破線）において、2 kHz 以下の低周波数帯域の外耳道内の骨導音の振幅特性が 10 ~ 15 dB 上昇した。これは、耳閉塞効果により耳道開放時における高域通過フィルタの減衰特性が弱められたことを意味する。位相特性は、耳道開放時と似たような形状を示すが、全周波数域において約 180° の進みがあることがわかった。

外耳道内放射の音圧特性はプローブマイクロホンを外耳道内に挿入することで容易に測定できることから、この音圧特性から頭蓋骨上における骨導音の伝搬過程を解析的に推定する手法が提案されている。金井らは、骨導音の呈示位置の違いが外耳道内放射に与える影響を調べるために、外耳道内に耳栓型のマイクロホンを挿入し、その音圧特性を呈示

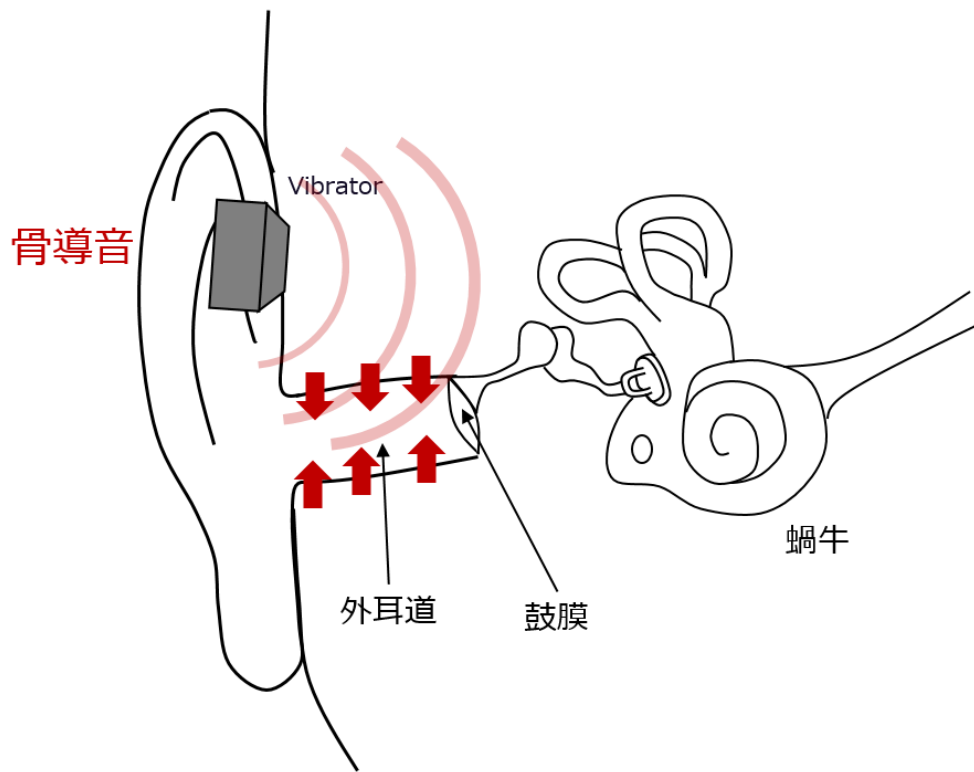


図 2.1: 外耳道放射の概要.

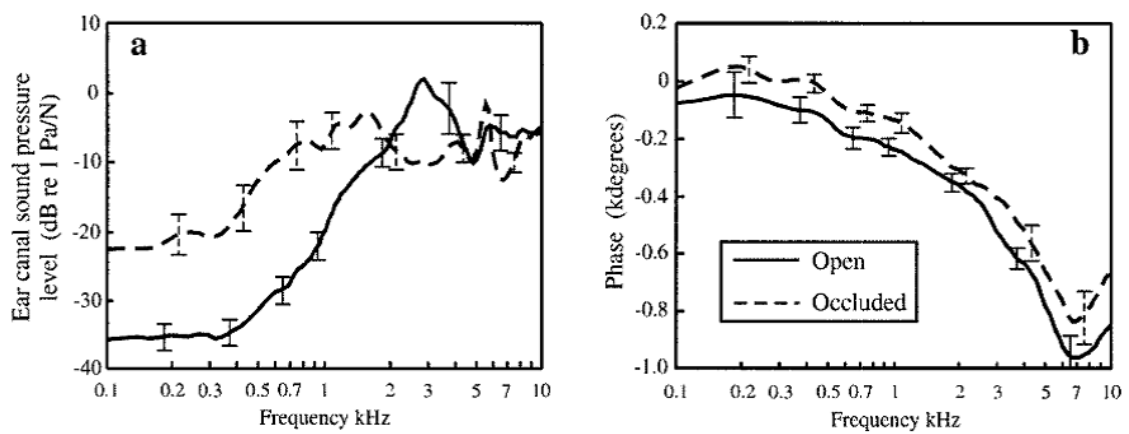


図 2.2: 外耳道内放射における外耳道内の音圧（文献 [28] からの引用）: (a) 振幅特性, (b) 位相特性.

位置ごとに計測した [33]. その結果, 呈示したどの周波数においても乳様突起に骨導音を呈示した場合が最も大きく, 鼻・耳介など軟骨部や肉の厚い部位に呈示した場合は減衰が大きいことが明らかになった. Reinfeldt らは, 外耳道内の音響特性と骨導音知覚における絶対閾値を複数の呈示位置において測定することで, 頭蓋骨上における骨導音の伝達時における振幅特性を推定した [30]. 乳様突起上で呈示した実験結果から, 外耳道が閉鎖されているとき, 外耳道の音響特性から推定した振幅特性と絶対閾値から推定した振幅特性が, 全周波数帯において類似することが明らかになった. しかし, 外耳道が開放されているとき, 外耳道内の音響特性および絶対閾値から推定された振幅特性は 1 kHz 以下で最大 10 dB の差が生じた. また, 前額正中面から呈示した場合も, 推定された振幅特性の周波数特性は異なるが, 乳様突起上で呈示した場合と同様の傾向が示された.

2.1.2 中耳耳小骨の慣性振動

外耳道を通過した音波は, 中耳の入力部に相当する鼓膜に到達する. 中耳は鼓膜が受けた空気中の音波のパワーを機械的な振動に変換し, 内耳に効率よく伝える音響インピーダンス変換器としての役割を果たす [6, 26]. 鼓膜は外耳道の奥にある薄い膜であり, 外耳道を通過した空気振動によって振動し, 耳小骨へと振動を伝達する. 耳小骨 (鎖) は 3 つの小さな骨 (ツチ骨・キヌタ骨・アブミ骨) から構成される伝達機構であり, 中間部が耳小骨筋に釣り下げられたような機構をもつ [27]. この機構によって中耳はてこの原理のような働きを行い, 外耳からの空気振動のエネルギーを内耳へ効率良く伝達できる機械的な振動に変換する仕組みをもつ.

骨導音呈示において, 頭蓋骨の振動が伝達され中耳耳小骨も振動する. この現象は慣性骨導 (middle ear inertia) と呼ばれる [25]. 図 2.3 に, 慣性骨導の概要を示す. 骨導による頭蓋骨の振動が中耳耳小骨に伝達され, 耳小骨自身の慣性質量によって振動して, 蝸牛の前庭窓を刺激させる. 中耳耳小骨が硬化 (耳硬化症) することによって, 骨導音知覚において 2 kHz 付近の周波数帯域の振幅特性が大きく落ち込む. この現象は Carhart notch とよばれ, 耳硬化症の症状を判定するときの指標になる [34]. この現象は, 中耳耳小骨による慣性振動が主に 2 kHz 付近の骨導音知覚に大きな影響を与えていることを示唆している.

慣性骨導の振動特性についても, 外耳道内放射における外耳道内の音響特性の計測と同様に調査が行われている. Stenfelt らは, 気導呈示時の中耳耳小骨の振動を計測した手法 [35] を参考に, レーザードップラー機器を用いてアブミ骨の振動速度を計測した [36]. 図 2.4 に, アブミ骨の慣性振動の振動速度: (a) 基準振動との比, (b) 差分速度, (c) 位相差を示す. 基準振動として, 蝸牛表面 (promontory) の振動速度がレーザードップラーにより計測された. 呈示される骨導音が 1 kHz 以下の場合, アブミ骨の振幅特性は内耳表面の振幅特性と同じで一定である. 1 kHz 以上では, 個々の測定値が大きく散乱するが, その平均値は -5 dB 程度だけ減衰する. 図 2.4(b) はアブミ骨の振動と蝸牛表面の振動の差分であり, これは前庭窓への入力だとみなすことができる [36]. 差分速度は 40 dB/decade で上

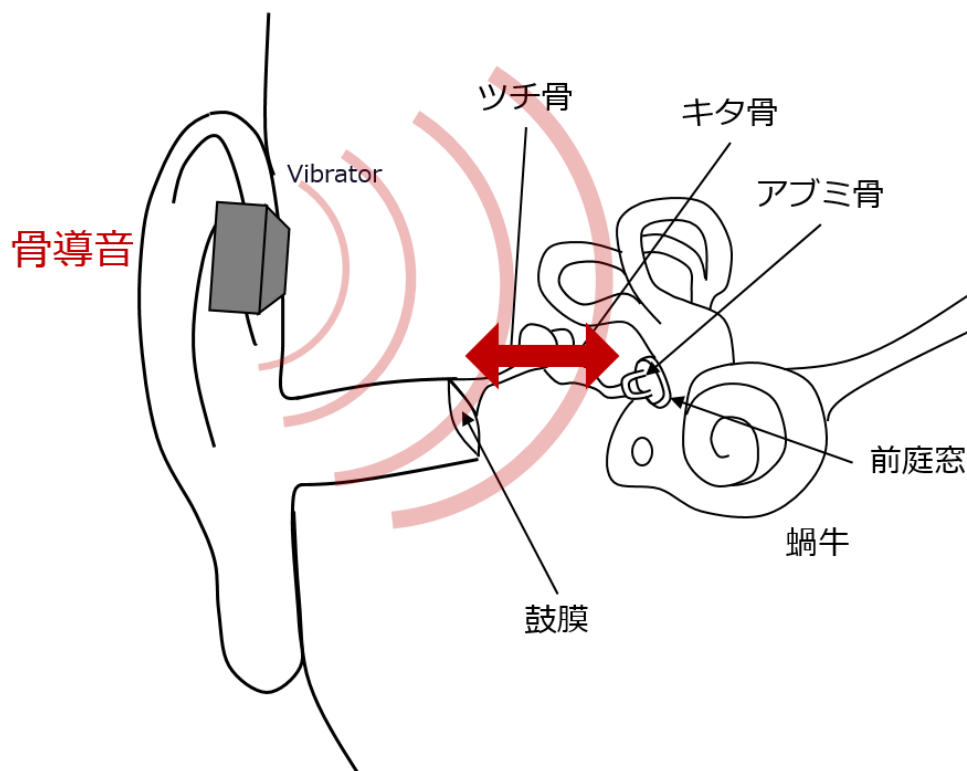


図 2.3: 中耳耳小骨の慣性骨導（慣性骨導）。

昇し，共振周波数である 1.5 kHz で -5 dB 付近に安定する．つまり，慣性骨導によって蝸牛の前庭窓へ入力される振動速度は，蝸牛に直接伝わる振動よりも約 5 dB 小さいことを示唆している．図 2.4(c) は，アブミ骨の振動と蝸牛表面の振動の位相差である．1 kHz 以下では，位相差は 0° で一定だった．1 kHz 以上において，位相差は徐々に下降し，10 kHz においては -100° を示した．以上から，中耳耳小骨の慣性骨導に関連する伝達経路では，耳小骨の共振周波数である 1 ～ 3 kHz あたりの成分が主要であることが明らかになった．この結果は，耳硬化症の症例として現れる骨導音の知覚特性 (Carhart notch) とも対応している [34]．

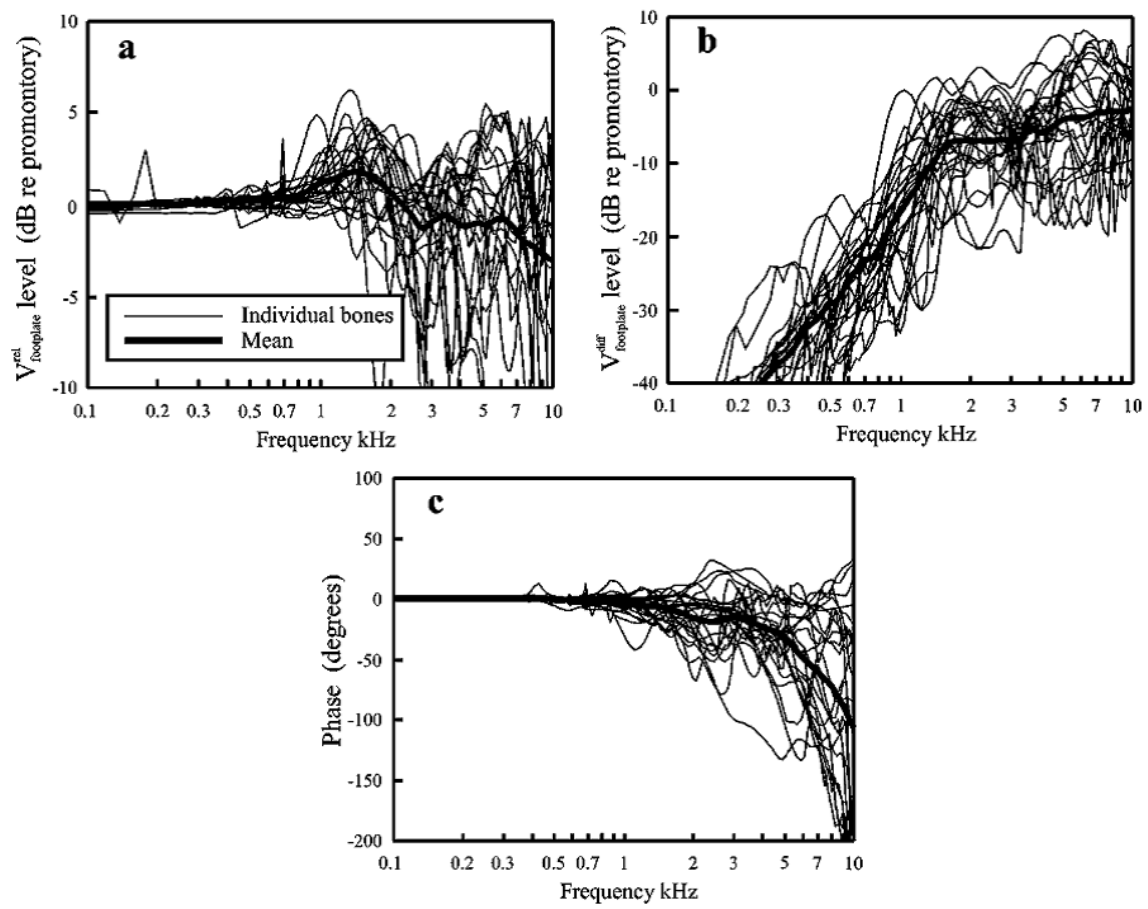


図 2.4: アブミ骨の慣性振動の振動速度（文献 [36] から引用）：(a) 基準振動（蝸牛表面）との比，(b) 差分速度，(c) 位相差．

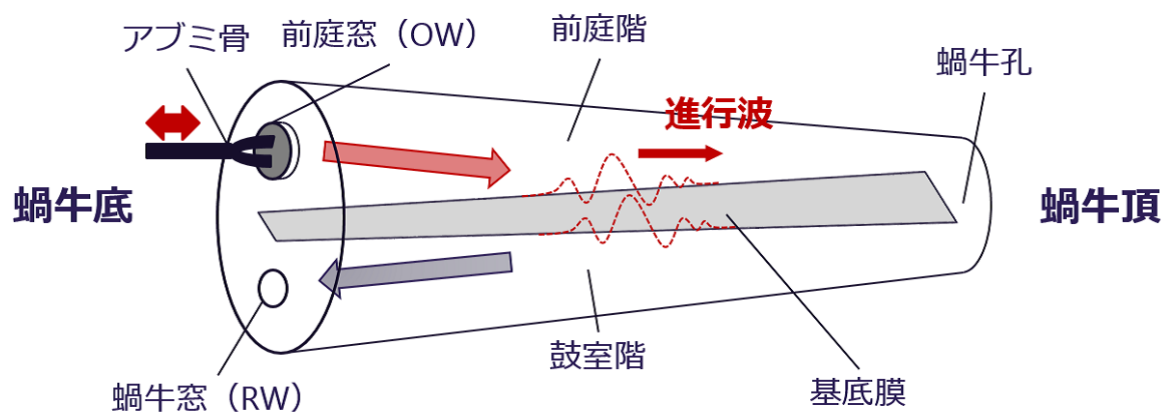


図 2.5: 蝸牛内での音の伝搬過程.

2.1.3 内耳以降の伝達経路

内耳は音を周波数分析する機能をもつ [37]. 図 2.5 に蝸牛内での音の伝搬過程を示す. 耳小骨から伝達された機械的振動は内耳の入り口である蝸牛の前庭窓を振動させ, 蝸牛の内部を満たしているリンパ液を振動させる. 蝸牛は内部を基底膜で前庭階と鼓室階に区切られた細長い管として考えられ, リンパ液の振動は前庭窓側から蝸牛孔 (蝸牛の先端部) へと伝搬する. この際に, リンパ液の振動は共鳴周波数に対応した位置において基底膜の振動を引き起こす. 基底膜上には内有毛細胞と外有毛細胞が存在し, 内有毛細胞上の聴毛が基底膜の振動に同期して傾くことにより神経伝達物質を放出する. それが一次聴神経に到達することにより, 一次聴神経の細胞内電位が急激に上昇してパルス状の活動電位が生じる (放電もしくは発火). このように, 音の情報を周波数帯域毎の多数の神経パルスに符号化して, 聴覚中枢系の蝸牛神経核に伝達される.

骨導でも, 外耳道内放射や中耳耳小骨の慣性振動のような伝達経路を通過した骨導音は, 気導音と同様に進行波として変換されるはずである. しかしながら, 骨導において, 伝達された音が蝸牛を直接刺激するような, 気導とは異なる経路で蝸牛を刺激する伝達経路が存在することが示唆されている. 以下では, 内耳に関係する骨導音の伝達経路の伝達メカニズムを列挙する.

はじめに, 蝸牛内のリンパ液の慣性振動について述べる. 骨導音によって内耳が直接加振されることにより, 蝸牛内のリンパ液の慣性力により, 前庭窓および蝸牛窓が振動する. これにより, 蝸牛内に進行波が生まれ音として知覚されていることが示唆されてきた. また, 外耳道が開放されて耳閉塞効果の影響がないときに, 1 kHz 以下の低周波数の骨導音はこの経路から伝達され知覚されていると述べられている [2].

次に, 圧縮骨導について述べる. 骨導音の内耳への伝達過程を明らかにするために, 古くから議論されてきた経路が圧縮骨導である. 圧縮骨導の伝達メカニズムとして, 骨導音

が蝸牛全体を圧縮・拡張させることにより蝸牛内の前庭窓と蝸牛窓の両方を駆動することによって進行波を引き起こすと考えられてきた。しかしながら、Tonndorf は骨導音到達時に発生する蝸牛内の前庭階と鼓室階での不均等な断面積変化が圧縮骨導の成分の実体であることを示唆した [38, 39]。この伝達経路を経由する骨導音は 4 kHz より高周波帯の振動であることが述べられている。

最後に、脳脊髄液経由の圧力について説明する。蝸牛は蝸牛水管を通じて脳脊髄と繋がっている。そのため、蝸牛水管経由で蝸牛内に脳髄液が微量に流入することが、近年明らかになっている [40]。これらの知見を受けて、骨導音が伝達されときの圧力が脳脊髄液の流入作用として生じ、蝸牛内のリンパ液に影響を与えている可能性が議論されている。しかしながら、この現象についての影響の程度や骨導音知覚との関連性は明らかになっていない。

骨導によって蝸牛内のリンパ液に慣性振動を引き起こす内部エネルギーが生じることが示唆されているが、蝸牛壁を切開するような解剖的手法は、内耳に直接到達する骨導音の伝達特性を侵害してしまうことになる。そこで、内耳への侵襲を最小限に抑え聴覚器の計測を行い、骨導の内耳への寄与を示唆する研究例を紹介する。

前庭窓および蝸牛窓の計測

鼓膜の空気振動は、中耳の 3 つの耳小骨を経由して内耳入り口の前庭窓 (oval window; OW/vestibular window) と呼ばれる膜を振動させる。前庭窓の振動は、蝸牛内を見たしている外リンパ液を介して基底膜の振動へと変換される。リンパ液による流体力学的な振動は、最終的に蝸牛窓 (round window; RW/cochlear window) に伝えられる。蝸牛窓の振動は蝸牛外部から観察可能であるため、前庭窓を入力部そして蝸牛窓を出力部として両者の入出力関係を調査すれば、蝸牛内部における音の伝搬の様子を推測することができる。過去の解剖学的研究から以下の仮説が提示されている。

- 蝸牛内の各リンパ液は非圧縮である
- 気導音を呈示したとき、前庭窓と蝸牛窓のリンパ液の流動体積はほぼ等しく、互いに逆位相の関係である [41]。

Stenfelt らは、この前庭窓と蝸牛窓における入出力関係が骨導呈示でも同様の関係になるのかを調べるために、レーザードップラーを用いて気導および骨導呈示による前庭窓と蝸牛窓の振動特性を計測した。もし気導呈示と同様の特性が得られるのであれば、内耳起因による特性の変化は無いと言えるが、特性が異なるのであれば、骨導が蝸牛内に影響を与えていることが推測できる。膜面の振動における変動量は蝸牛表面 (promontory) の振動特性を基準にして導出された。

図 2.6 に気導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の計測結果を示す。また、図 2.7 に、両窓の入出力関係を示す。振幅特性の結果から、前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の体積流動の差は ± 3 dB 程度であり、ほぼ等しいと言える。また位相特

性の結果から、前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の体積流動の位相差は、7 kHz 以下の呈示音では 180° 付近に安定していることが示された。これにより、Kringelbotn[41] が示唆した仮説と同様の結果になることがわかった。

図 2.8 に骨導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の計測結果を示す。また、図 2.9 に、両窓の入出力関係を示す。振幅特性の結果から、リンパ液の体積流動は 3 kHz 以下では蝸牛窓の方が大きく、3 kHz 以上では前庭窓の方が大きくなった。つまり、骨導呈示の場合は体積流動量に大きな差が生じることが示された。また位相特性の結果から、2 kHz 以下では 150° から 250° の位相差が見られた。さらに、2 kHz 以上では位相差が $80^\circ/\text{oct}$ で上昇する群と $80^\circ/\text{oct}$ で下降する群に分かれる現象が見られた。同様の振幅および位相特性の傾向が、標本化されていない頭蓋骨上への呈示による結果からも得られた（図 2.9 中の点線）。以上の結果から、気導呈示での結果（図 2.6 および図 2.7）と大きく異なり、骨導呈示により特別な影響を受けていることが示唆される。しかしながら、この現象が知覚にどのような影響を与えているかは不明である。骨導呈示による体積流動の不均衡現象の要因として、Stenfelt らは以下の候補を挙げている。

- 蝸牛内のリンパ液の慣性振動
- 蝸牛壁の圧縮・膨張（圧縮骨導）
- 脳脊髄液経由の振動

しかしながら、これらについては調査ができていないため、要因を特定することは難しいと述べられている。

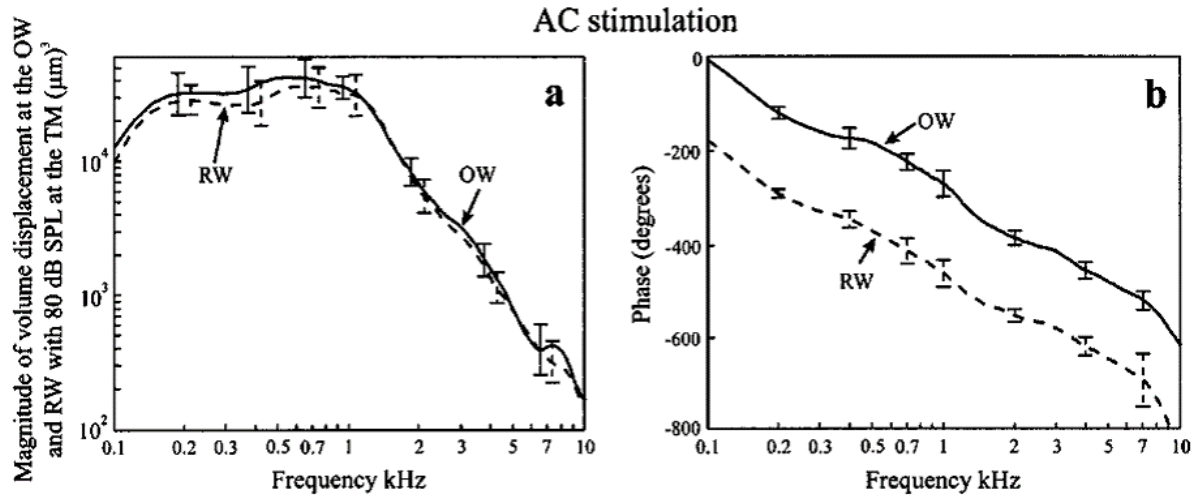


図 2.6: 気導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積（文献 [42] からの引用）：(a) 振幅特性，(b) 位相特性．

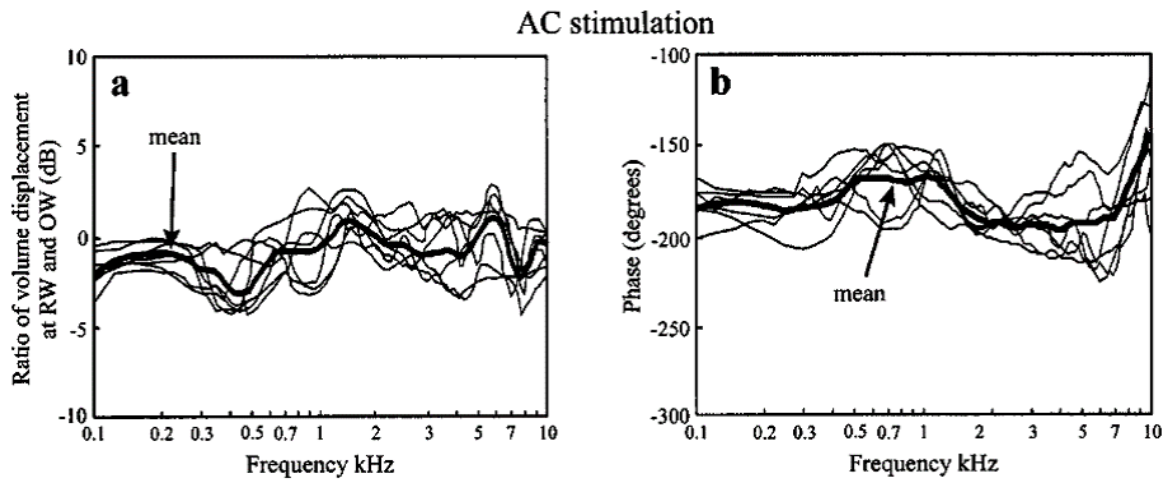


図 2.7: 気導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の入出力関係（文献 [42] からの引用）：(a) 振幅特性，(b) 位相差．

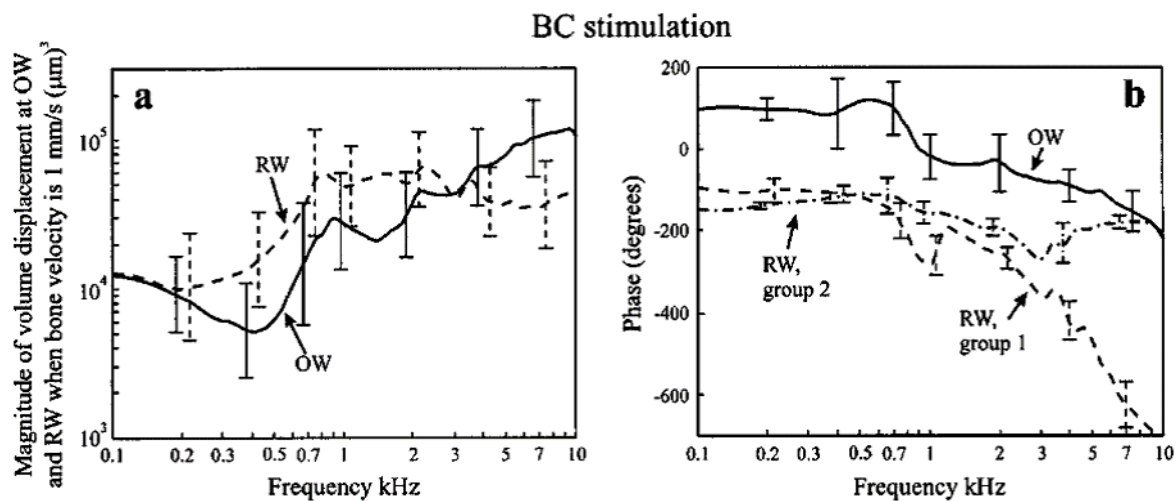


図 2.8: 骨導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積（文献 [42] からの引用）：(a) 振幅特性，(b) 位相特性．

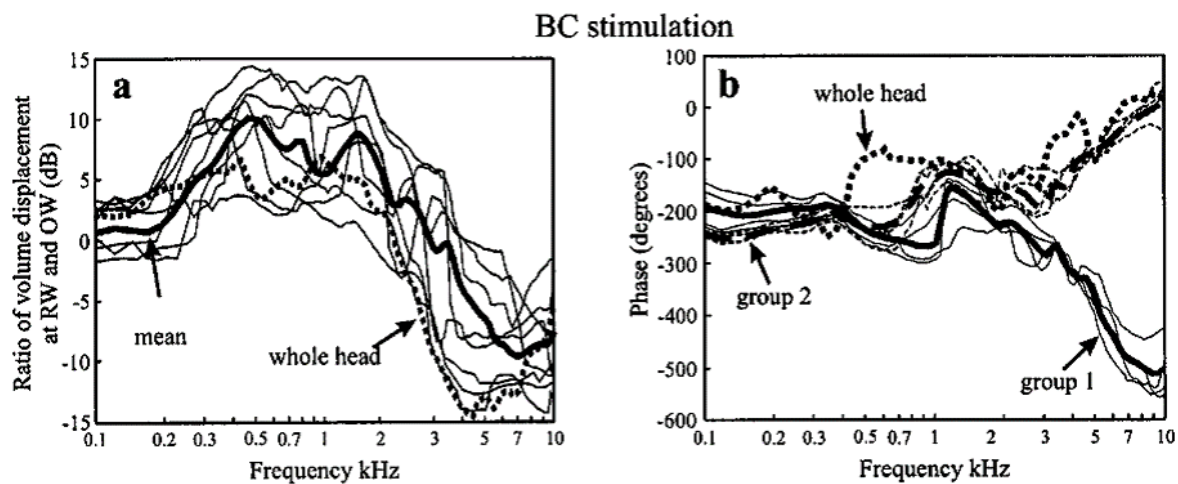


図 2.9: 骨導呈示における前庭窓および蝸牛窓でのリンパ液の流動体積の入出力関係（文献 [42] からの引用）：(a) 振幅特性，(b) 位相特性．

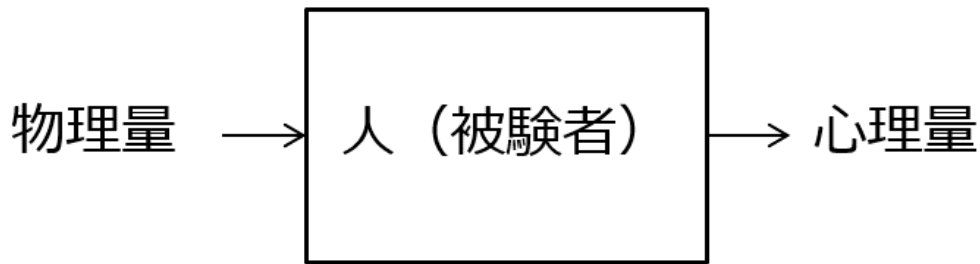


図 2.10: 心理物理学のアプローチにおいて着目するシステムの概要.

2.2 心理物理学のアプローチ

第 2.1 項では，骨導音の伝達に寄与していると考えられている経路の伝達特性を調べるために，振動の様子を物理的に計測するアプローチについて調査を行った．しかしながら，これらの特性は物理的な振動特性であり，ヒトがどのように骨導音を知覚している（聴いている）のかということには直接的に結びつけることができない．

本項では，音の聴こえ方の尺度を物理的と対応させた心理物理量を扱う心理物理学のアプローチの立場から，骨導音の知覚特性について調査する．図 2.10 に，心理物理学のアプローチにおいて着目するシステムの概要を示す．心理物理学では，入力に呈示する刺激音の物理量，出力に心理量をもつシステムの内部特性に注目する．つまり，骨導の伝達経路や聴覚系における個々の伝達特性は一つのブラックボックスにまとめられ，心理物理実験により明らかになる知覚特性はシステム内部全体の伝達特性を示すことになる．

2.2.1 絶対閾値

音の絶対閾値は，他に妨害する音の無い状態で検知することができる，最小の音レベルを指す [37]．基本的にヒトの聴力を調べる聴力検査（オーディオグラム）を行うときには，この音の絶対閾値が求められる．また，伝達経路の違いから，気導での絶対閾値と骨導での絶対閾値の測定値は，難聴者が伝音性の難聴もしくは感音性の難聴であるかを判別するために比較される．

骨導の絶対閾値の測定方法は国際標準規格（ISO）として規格化されている [43]．日本聴覚医学会では，ISO に準拠して，オーディオメーター専用の骨導受話器（振動子）を被験者の乳様突起部もしくは全額正中部に装着する測定法を制定している [44]．骨導音は頭内をほとんど減衰しないで伝搬されるため，刺激音を呈示する耳とは反対側の耳で骨導音を聞いてしまいやすい（交叉聴取）．そのため，骨導での聴覚検査時には呈示する耳とは反対の耳にノイズ音を気導で呈示する [4]．

骨導の絶対閾値は、呈示に用いられる骨導スピーカーの特性や骨導を呈示する部位によって大きく変動する。Khanna らは、全額正中部と乳様突起部における骨導音の絶対閾値を測定した [31]。その結果、全額正中部での感度は乳様突起部より全体的に小さいことがわかった。Richer と Brinkmann は、Khanna らの実験と同様の位置で、0.125 ～ 8 kHz の周波数帯域で骨導音の閾値を測定し比較した [45]。結果として、全額正中部での絶対閾値は乳様突起部より約 11 dB 大きいことがわかった。McBride らは、骨導が効率よく知覚される呈示部位を特定するために、頭部の様々な位置に振動子を圧着することにより、呈示部位毎に骨導の絶対閾値を測定した [46]。その結果、下顎頭（condyle）付近での呈示が最も良い絶対閾値を示すことが明らかになった。また、顎関節に続いて乳様突起（mastoid）、頭頂部（vertex）、こめかみ（temple）の順に骨導の絶対閾値が良いことがわかった。石橋らは、骨導振動子の種類および加振部位による絶対閾値の変化を調査するために、3 種類の骨導振動子（電磁式、圧電式、超磁歪式）を乳様突起および後頭部に呈示して絶対閾値の測定を行った [47]。また、その他の骨導振動子を用いた骨導の絶対閾値の測定が行われている [48, 49]。

外耳道を閉鎖すること（occluded）により、外耳道内放射成分の骨導音が強調され、骨導音の絶対閾値が小さくなる（知覚されやすくなる）。Walker らは、外耳道閉鎖による絶対閾値への影響を調べるために、外耳道を開放した場合（open）と耳栓で閉鎖した場合（plugged）において骨導の絶対閾値を測定した [50]。その結果、1 kHz 以下の低域帯域において、絶対閾値が 20 dB 以上下降することが明らかになった。また、外耳道を開放してマスキングを気導で呈示した場合、絶対閾値が上昇することが示された。これは、外耳道内放射成分の骨導音が強調され、鼓膜を気導と同様に振動させて知覚されていることを示す。

2.2.2 ラウドネス

大小の印象を与える音の属性をラウドネスと呼ぶ [37]。また、各周波数の純音が等しいラウドネスに聞こえる音圧レベルを結んだ曲線を等ラウドネスレベル曲線という。気導音知覚において計測された等ラウドネス曲線は国際規格化しており、現在利用されている多くの音響機器や騒音レベルの測定器の設計に利用されている [51]。

骨導振動子の性能の向上により、10 kHz 以上の周波数帯域の呈示音でも安定した出力を行うことができるようになっている。このことから、一方に呈示された骨導音を反対側に呈示された気導音と同程度のラウドネスに調整することで、気導音のラウドネス特性との対応を調査する試みが行われている [52]。実験結果から、聴力レベル 30 ～ 80 dB において、1 kHz 以下では 6 ～ 10 dB の差が生じ、1 ～ 4 kHz では 4 ～ 5 dB の差があることが示された。Qin らは、骨導振動子の加振強度とラウドネスの関係を導出するために、気導音との比較から導出された骨導音のラウドネス特性と人工マストイドにより計測した骨導振動子の加振特性を計測した [53, 49, 54]。その結果、耳栓をして下顎頭に骨導を呈示した場合において、骨導振動子の加振特性から骨導のラウドネス特性を推定できることを示

唆した。また、個々の骨導振動子が持つ共振特性が骨導のラウドネス特性に大きく影響することが指摘されている [52, 55]。

2.2.3 音源定位

骨導振動子の呈示位置を変化させることにより、知覚される骨導音の定位が変わることが示されている。Sporer らは、頭頂部を経由するように左右の耳間で振動子を移動させて呈示して、骨導音の定位を調べた [56]。その結果、どちらかの耳に近づくにつれてその方向へ音源が定位されることがわかったが、呈示音の周波数によっては知覚される音源の位置が変化することが明らかになった。

単一の骨導振動子だけではなく、複数個の骨導振動子を用いた両耳受聴により、音源方向の制御を試みる研究が行われている。Jahn と Tonndorf は、左右の乳様突起にクリック音をそれぞれ呈示し、時間差 (internal time difference, ITD) を変化させることによって音源定位の特性を調査した [57]。その結果、0.1 ms 以下の時間差では骨導音の定位を行うことはできないが、0.2 ~ 0.25 ms の時間差を与えることで音源定位が可能であることを示した。Stanley らは、呈示信号にレベル差 (internal level difference, ILD) や時間差を付与することで、音源方向をある程度制御できることを示している [58]。MacDonald らは、頭部伝達関数 (heard-related transfer function, HRTF) を畳み込んだ信号を左右チャンネルの骨導振動子で呈示することにより、気導より制御できる範囲は狭いものの、骨導による音源定位が可能であることを示している [59]。この両耳装用の特性から、骨導は聴覚ディスプレイへの応用が期待されている。しかし、埋込み型の骨導振動子を両耳に装用した場合では、骨導の減衰が著しく小さいために片方の刺激に他方の刺激が干渉し、音源定位が行いづらいことが示されている [60, 61]。

2.2.4 気導音を用いた骨導音の知覚的な相殺実験

骨導音知覚において、「骨導音は気導音と同じように蝸牛を刺激しているのか」という基本的な疑問が挙げられる。この疑問を解決するためには、von Békésy が蝸牛内の基底膜上での進行波を発見した研究 [62] のように、骨導音呈示時の基底膜振動の様子を直接調べることが理想的な方法であると考えられる。しかしながら、骨導音は気導音よりはるかに複雑な伝達経路をもつ。さらに、蝸牛の前庭窓のみを入力とする気導音と異なり、蝸牛全体を刺激して基底膜振動を引き起こしていることが示唆されている [25]。そのために、心理物理学のアプローチから、骨導音の知覚メカニズムにおける蝸牛の関与が議論されてきた。

代表的な実験例として、von Békésy らによって行われた骨導音知覚の相殺実験が挙げられる [63]。von Békésy は、「骨導音は気導音と同様に蝸牛内の基底膜上での振動に集約される」という仮説を立てた。この仮説をもとに、知覚される正弦波の骨導音を、同時に呈示する気導音の振幅・位相特性を調整することにより相殺する実験を行った。その結果、

0.4 kHz の正弦波の気導音を同周波数の骨導音と逆位相で呈示することにより、骨導音を知覚的に相殺できることが明らかになった。

気導音による骨導音の知覚的な相殺実験は心理物理学的アプローチに分類されるが、この現象に対して臨床学的アプローチからも検証が行われている。Wever と Bray はネコを実験対象として、蝸牛内の電位変動を表す蝸牛マイクロホン電位を骨導音と気導音でそれぞれ測定し、基底膜振動の挙動が両刺激で類似していることを示した [64]。さらに、Lowy はネコとモルモットを実験対象として、蝸牛マイクロホン電位を測定しながら、骨導音と気導音による相殺実験を行った [65]。その結果、0.25 ～ 3 kHz の周波数帯において骨導音と気導音による蝸牛マイクロホン電位の相殺が可能であることが明らかになった。また、蝸牛マイクロホン電位が相殺される蝸牛の位置は一周波数において一箇所であることを示した。その後、Wever と Lawrence は、Lowy の実験を 0.1 ～ 15 kHz まで拡張できることを明らかにした。さらに、基底膜振動をレーザードップラーにより直接計測する手法においても、骨導音呈示でも気導音呈示の場合と同様の基底膜振動を示すことが明らかになっている [66]。以上の結果から、骨導音も気導音と同様に、蝸牛を刺激して基底膜振動を引き起こすという仮説が有力であることが明らかになった。

図 2.11 に、心理物理学的アプローチから定義される骨導音と気導音の伝達システムの概要を示す。von Békésy らの心理物理実験では、骨導音の経路を基底膜上を終点とする線形システムとして仮定している。この仮説をもとに、気導音を用いた骨導音知覚の相殺実験は、心理物理学の視点から骨導音の伝達メカニズムを調査したり、気導音知覚との関係性を議論するためのアプローチとして用いられてきた。大野らは骨導音の位相特性を調査するために、気導音の音源距離を移動させることにより位相特性を調整し、骨導音の知覚的な相殺実験を行った [67]。また、呈示信号の周波数を固定して振動子の位置を頭蓋骨上で移動することにより、気導音との位相関係が逆相になる位置を測定した。Khanna らは、安定した信号が呈示できるように開発した骨導振動子を用いて、気導音を用いた骨導音知覚の相殺実験における耳閉塞効果の影響を調査した。その結果、耳閉塞時において 2 kHz 以下の周波数の骨導音が 180° の位相差で相殺されたことから、耳閉塞時に知覚される骨導音の主要成分が外耳道内放射によるものであることが示された。また、2 kHz 以上の周波数の骨導音では、相殺時における気導音の振幅および位相差が大きく変化したことから、高周波帯においては中耳・内耳以降において相殺が行われていることが示唆された。さらに、気導音と骨導音が相殺されときの位相差を固定し振幅特性のみを変化させた場合、骨導音の振幅の上昇に伴い気導音も比例的に増加することが示された。これらの結果から、骨導音は感覚レベル 40 ～ 70 dB において、知覚的に線形であると結論づけた。川戸らは、耳栓型のイヤホンを用いた気導音呈示によって骨導音知覚の相殺実験を行った [68]。結果として、0.2 ～ 1 kHz において骨導音の相殺が確認できた（5 段階評価によるもの）。これらの結果は、Khanna らによって述べられた知見と同様に、外耳道内放射で外耳道内に発生した骨導音が気導音によって知覚的に相殺されたものだと考えることができる。

Stenfelt は、単一の正弦波だけではなく 2 つの異なる周波数（0.7 kHz と 1.1 kHz）の正

弦波を同時に呈示した場合でも、骨導音の相殺が可能であるかどうかを聴取実験によって検証した。骨導音の2音の振幅特性と位相特性は固定され、気導で呈示される2つの正弦波の振幅特性と位相特性をそれぞれ調節する調整法が用いられた。また、耳閉塞効果による低域音強調の影響を最小限にするために、外耳道を開放したまま気導音の呈示が行えるヘッドホンが使用された。結果として、気導音による骨導音の知覚的な相殺実験は、たとえ呈示音が2つの異なる正弦波になったとしても可能であることが明らかになった。また、2音が同時に呈示された場合でも振幅・位相特性はそれぞれ独立して決定されることがわかった。

Clavierらは、外耳道内にブローマイクロホンを挿入し、気導音により骨導音が知覚的に相殺されるときの外耳道内の音圧を測定した[69]。図2.12に、骨導音知覚の相殺実験時の外耳道内の音圧特性を示す。実線は呈示音圧ごとの音圧特性、破線は気導音によって骨導音が知覚的に相殺されるとき位の相特性を表す。呈示音が1kHzのとき、外耳道内の音圧はある位相差で急激に降下する。これは、外耳道内放射による骨導音が外耳道内の気導音と相殺したことを示す。また、骨導音が知覚的に相殺されたときの位相差が外耳道内の音圧が最小になったときの位相差と一致することから、1kHzの周波数で知覚される骨導音は外耳道内放射の伝達経路を経由したものが主要成分であると考えられる。しかしながら、呈示音が2kHz以上のとき、外耳道内での音圧の降下はより緩やかに、さらには知覚的に相殺される位相差とのずれが生じる。この結果から、2kHzの周波数で知覚される骨導音は中耳や内耳を経由したものが主要成分であると考えられる。

気導音を用いた骨導音の知覚的な相殺実験では、骨導音が知覚される側の耳に気導音を同時に呈示するというアプローチをとっている。さらに、気導音を用いた骨導音の知覚的な相殺実験では、呈示音の振幅特性とともに位相特性を調整することにより心理物理実験が行われている。これまでの心理物理学的アプローチでは、絶対閾値やラウドネスを始めとした骨導音知覚時の振幅特性にのみ注目して調査が行われていたが、位相特性に注目することで骨導音の知覚メカニズムをより明確にできる可能性がある。

2.3 両アプローチのまとめ

これまでに、骨導音の知覚特性に関する先行研究として、大きく2つのアプローチ（生理学的アプローチと心理物理学的アプローチ）が行われていることがわかった。以下では、両アプローチの特徴および利点と欠点について述べる。

生理学的アプローチの特徴は、骨導音の伝達過程における一経路に着目し、その振動特性および伝達特性を物理的計測から直接導出することである。利点として、骨導音に係る経路の詳細な伝達特性を知ることができることが挙げられる。欠点は、解剖を伴うアプローチのために、生きたヒトの非線形的な知覚特性との対応が困難であることや、調査できる範囲に限界（特に内耳に係る経路）があることである。

心理物理学的アプローチの特徴は、ヒトの聴覚機構を1つのブラックボックス（システム）とみなし、その入出力特性を観察することである。利点として、骨導音に係る知覚

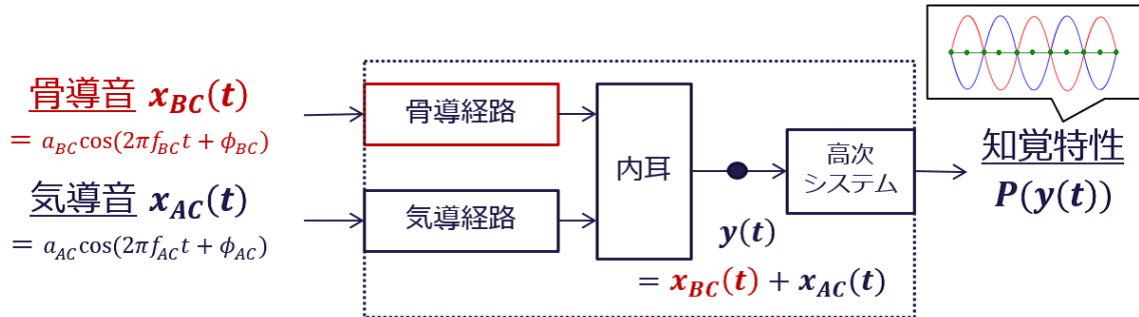


図 2.11: 心理物理学的方法による骨導音と気導音の伝達システムの概要（文献 [29] をもとに作成）．破線はブラックボックスの範囲を表しており，内部のシステム群は骨導音の推測される伝達過程を示している．

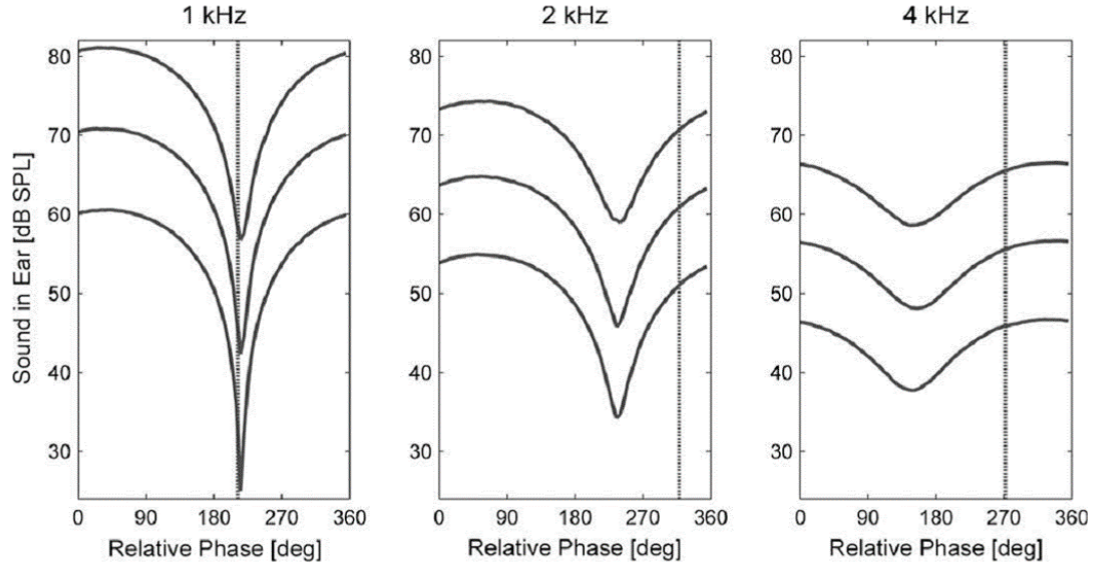


図 2.12: 骨導音知覚の相殺実験時の外耳道内の音圧特性．（文献 [69] の引用）．実線は呈示音圧ごとの音圧特性，破線は気導音によって骨導音が知覚的に相殺されるとき位相特性を表す．

特性の機能を知ることができることが挙げられる。しかしながら、システムの内部の詳細な伝達特性について知ることはできないため、骨導音の伝達経路については知ることができないことが欠点である。

骨導音の知覚特性を調べるためには、後者の心理物理学的方法を行うことが有用であると考えられる。ただし、心理物理学的方法では骨導音の伝達経路を切り分けて議論することは不可能であり、生理学的方法でさえ測定が不可能な伝達経路が知覚特性にどのような影響を与えているかを知ることができない。次章では、その問題に対してどのような方法を取れば解決できるかを、骨導音の伝達経路を伝達システムとして考えて検討する。

第3章 骨導音知覚特性の解明に向けて

本調査研究では、骨導音知覚に関係する伝達経路を伝達システムとして仮定することを想定して、骨導音の知覚特性に関する知見の調査を行ってきた。本章では、これまでの知見を検討する伝達システムに適用することを目的として、先行研究から得られた知見をもとに、骨導の知覚メカニズムおよびその知覚特性について考察する。

3.1 骨導音の伝達経路の全体像

図 3.1 に、著者がこれまでの調査結果をもとに作成した、骨導音および気導音の伝達経路の概要を示す。骨導音の伝達過程において、

- 内耳に関係する伝達経路として、前庭窓以降の蝸牛内部にエネルギーを生成する経路が存在すると考えられているが、その伝達特性と骨導音知覚との関係性は未解明である
- 広域の周波数帯域において気導音を用いて骨導音が知覚的に相殺できることから、骨導音は最終的に基底膜上で合成される

という知見から、図 3.1 のような入力部に骨導音と気導音を持つ伝達経路の概要を作成した。

第 2.1 項で述べたように、生理学的アプローチから骨導音が内耳に到達するまでに主に 5 つの経路があることが示唆されている。そこで本調査研究では、「周波数特性を持つ伝達システム（サブシステム）」として注目するために、図 3.1 内に 5 つの骨導音の伝達経路を配置した。以下では、図 3.1 内の各経路のサブシステムにおける入出力特性（伝達特性）を生理学的アプローチによって得られている各経路の振動特性と比較して考察を行う。

(1) 外耳道内放射

外耳道放射は、振動子から呈示された骨導音が軟組織および頭蓋骨を經由し、外耳道壁の軟組織が共振することにより放射される音である。生理学的アプローチでは、外耳道内放射の振動特性について、入力部は振動子との圧着部における加振特性、出力部は外耳道内の鼓膜付近の音圧特性として測定されている [28]。つまり、(1) 外耳道内放射に関係する伝達経路を伝達システムとして注目したとき、伝達特性は実際に測定された音響特性（図 2.2）と対応できると考えられる。

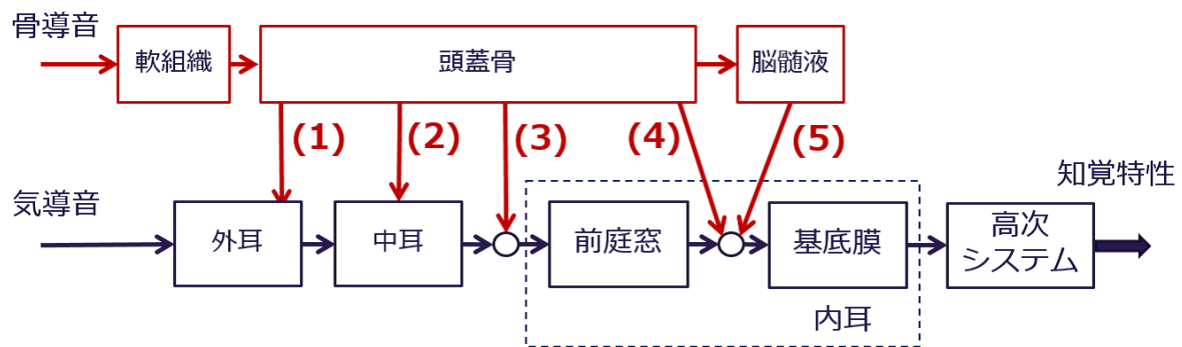


図 3.1: 調査結果をもとにした骨導音と気導音の伝達経路の概要：(1) 外耳道内放射，(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導），(3) 内耳のリンパ液の慣性振動，(4) 圧縮骨導，(5) 脳脊髄液経由の圧力。

(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導）

耳小骨の慣性振動は，頭蓋骨の振動が中耳に伝達され，中耳耳小骨が振動して前庭窓を刺激することにより伝達される音である．生理学的アプローチでは，中耳の耳小骨の慣性振動の振動特性について，入力部は振動子との圧着部における加振特性，出力部はアブミ骨と前庭窓の振動特性として測定されている [36]．つまり，(2) 中耳の耳小骨の慣性振動に関係する伝達経路を伝達システムとして注目したとき，その周波数特性は実際に測定された振動特性（図 2.4）に対応できると考えられる．

(3) 内耳のリンパ液の慣性振動

内耳のリンパ液の慣性振動は，頭蓋骨の振動が内耳に直接伝達され蝸牛自身が振動した際に，蝸牛内を満たすリンパ液が慣性的に振動して発生する体積流動である．蝸牛内を満たすリンパ液は非圧縮性のため，その体積流動を前庭窓および蝸牛窓の振動特性から推定することができる．生理学的アプローチでは，内耳のリンパ液の慣性振動について，入力部は振動子との圧着部における加振特性，出力部は前庭窓および蝸牛窓の振動特性として測定されている [42]．つまり，(3) の内耳のリンパ液の慣性振動に関係する伝達経路を伝達システムとして注目したとき，この伝達システムの周波数特性は測定された振動特性から推定可能だと考えられる．

(4) 圧縮骨導と (5) 脳脊髄液経由の圧力

圧縮骨導は，頭蓋骨の振動が内耳に直接伝達され蝸牛表面に対して垂直方向に力が加わった際に蝸牛が圧縮され，その影響によりリンパ液が流動し基底膜振動を引き起こす作

用である。また、脳脊髄液経由の伝搬とは、骨導音が脳脊髄液内を伝搬しその振動が蝸牛水管を通じ蝸牛内へと伝達される現象である。これらは、骨導音知覚との関与が示唆されているが、生理学的アプローチからも十分な調査が行われていない。したがって、現時点では、この(4)圧縮骨導と(5)脳脊髄液経由の伝搬に関係する伝達経路を、既存研究の知見から伝達システムとして考察することは困難であると考えられる。

3.2 骨導音知覚における伝達特性

心理物理学的アプローチ(第2.2項)では、骨導音知覚の過程を一つの大きな伝達システムとしてみなし、その伝達特性を心理物理量と照らし合わせながら調査されてきた。本項では、本調査研究によって得られた知見をもとに、この骨導音知覚に関する伝達システムを一つの大きな伝達システムと見たときの、その周波数(振幅・位相)特性について考察する。

3.2.1 振幅特性

はじめに、骨導における伝搬音の振幅特性を線形性の観点から評価する。骨導音の呈示時においても、信号の高調波が知覚されることが指摘されている。この現象について、「高調波は振動子と皮膚面の接触により生じる非線形振動が原因か、それとも骨導の伝搬過程で生じているものか」という議論が行われてきた。

非線形的な高調波が骨導の伝搬過程で生じているのかどうかを調べるために、頭蓋骨上の伝搬特性が計測されている[70]。Håkanssonらは、被験者の頭蓋骨の両側に振動子および計測器をそれぞれ配置することで、頭蓋骨上の伝搬特性を測定した。図3.2に、導出された頭蓋骨の伝達関数を示す。伝達関数は周波数特性として表され、2本の線は強度が異なるときの伝達特性を示す。線形性の定義では、入力信号の強度が変化しても伝達特性が一定の場合、そのシステムは線形システムだと言える。したがって、図3.2の実験結果から、頭蓋骨における骨導音の伝搬特性は線形だと考えられる。この線形特性は、0.1～10 kHzの帯域において聴力レベル77 dBの音圧まで維持されることが示された。また、Håkanssonらは伝達関数以外にもコヒーレンス関数とヒルベルト変換を使用することで、頭蓋骨の線形性を説明している。さらに、頭蓋骨の機械インピーダンスの測定結果から、可聴域周波数・音圧での特性が線形であることが示されている[71, 72, 73]。

次に、骨導音の知覚的な線形性について、気導による骨導音知覚の相殺実験の観点から説明する。図3.3に、Clavierらによって行われた相殺実験の結果を示す。彼らの実験では、気導音知覚の相殺が完了したときの気導呈示用のイヤホンの音圧と骨導振動子の加振強度の関係をグラフ化している。図から、1 kHzおよび2 kHzでの相殺実験においては、気導音の音圧と骨導音の加振強度が線形の関係になっていることがわかる。被験者毎にレベル差が見られるが、気導音の呈示音圧に対して骨導音の加振強度が線形的に増加する傾

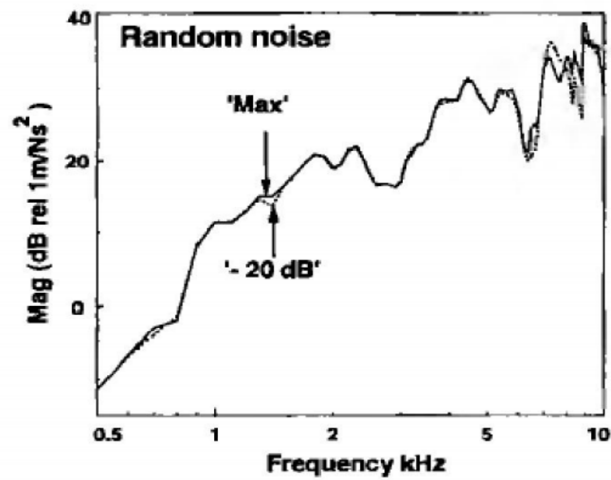


図 3.2: 測定値から導出された頭蓋骨の伝達関数（ランダムノイズを呈示）．'Max' は呈示された信号の最大出力での伝達関数，'-20 dB' は最大の信号より 20 dB 小さい伝達関数を示す（文献 [70] からの引用）．

向は変わらない．また、同様の傾向が、骨導音知覚の相殺を 0.7 kHz と 1.1 kHz の正弦波で行った Stenfelt の実験結果からも示されている（図 3.4）．

以上の知見から、骨導音の知覚特性を伝達システムとして注目したとき、システムの振幅特性は可聴域周波数・音圧において線形性を持つことが示唆された．

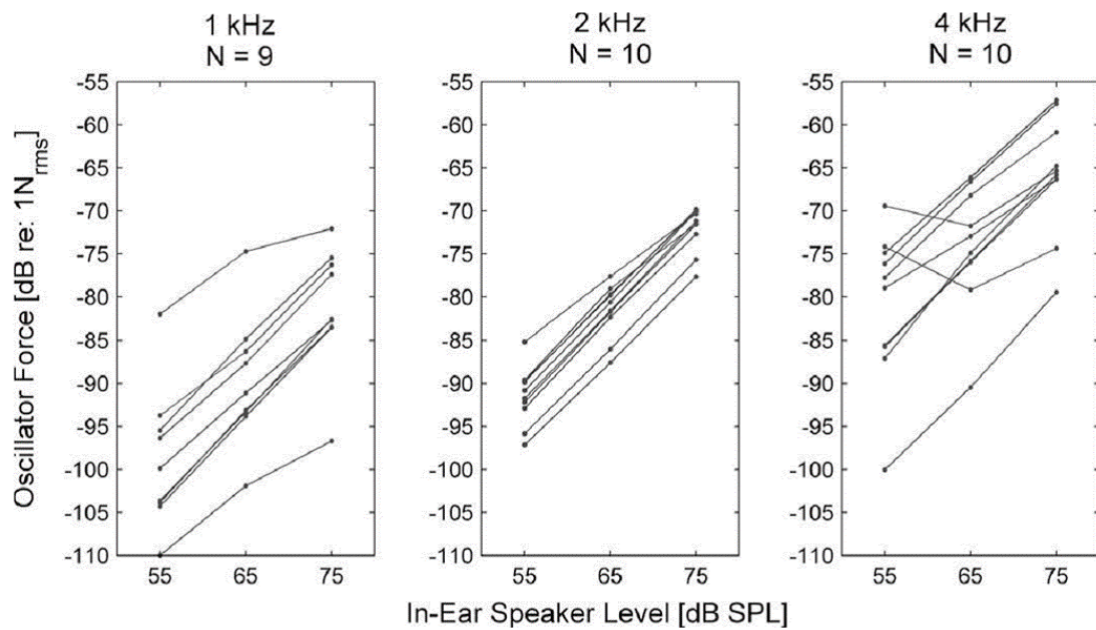


図 3.3: 骨導音相殺時の気導音の音圧と骨導振動子の加振強度. 実線の繋がりは被験者毎の結果を表す (文献 [69] からの引用).

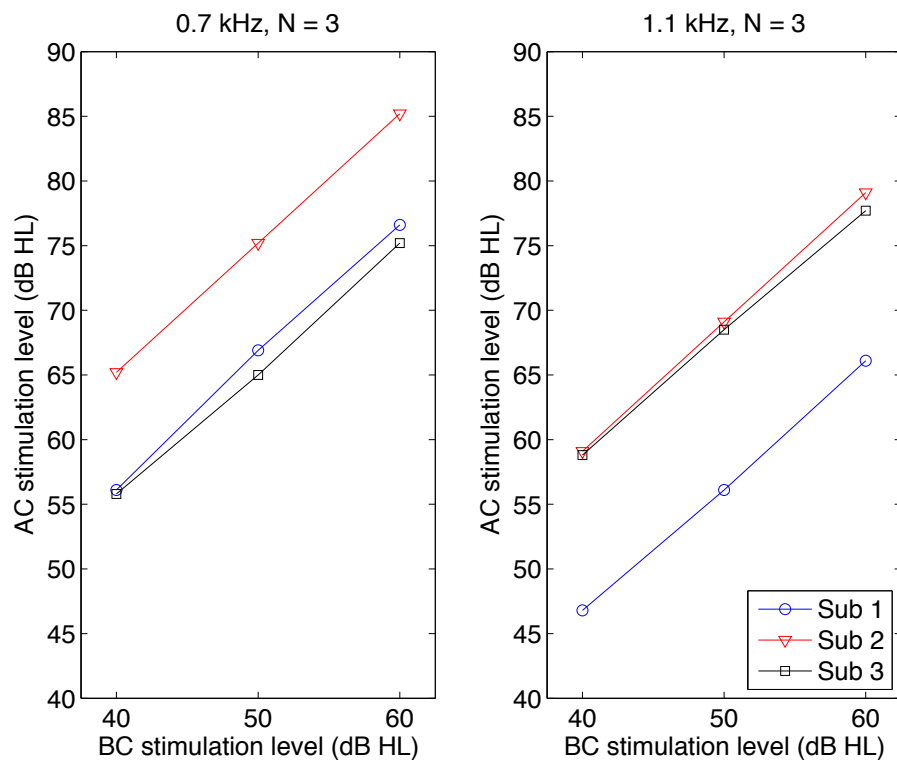


図 3.4: 相殺時の骨導音の聴力レベルと気導音の聴力レベル (文献 [29] のデータをグラフ化).

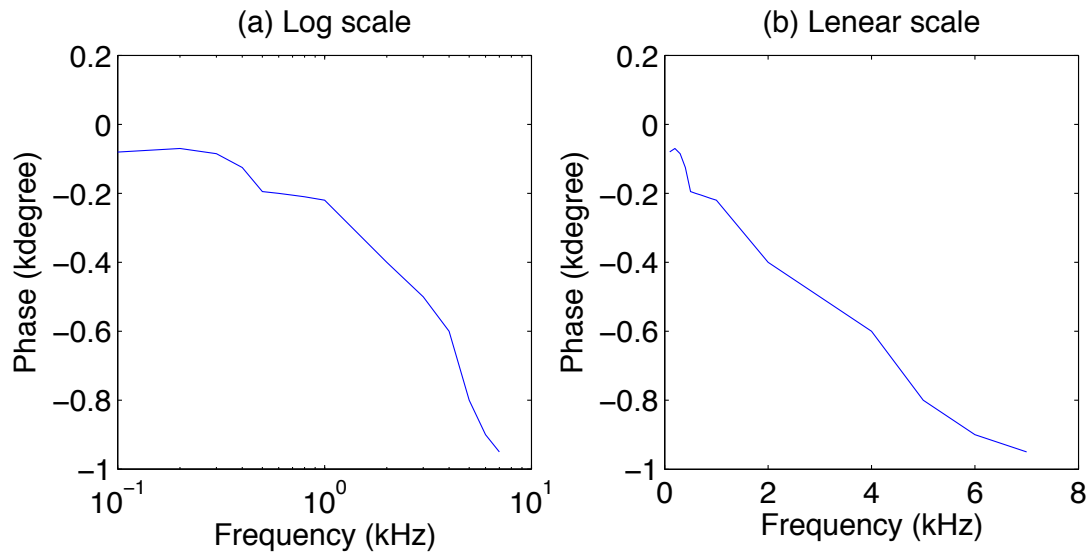


図 3.5: 図 2.2(b) における位相特性の比較：(a) 対数軸表示，(b) 線形軸表示.

3.2.2 位相特性

骨導音の伝達過程を線形システムとしてみたときの，伝達経路の位相特性について考察する．ここでは，生理学的アプローチの知見から明らかになった，外耳道内放射および中耳耳小骨の慣性振動に関する伝達経路の位相特性に着目して調査を行った．

はじめに，外耳道内放射における伝達特性の位相特性について考察する．ここでは，図 2.2(b) の位相特性のデータを参照し，周波数軸（横軸）を線形軸に変換して検証した．図 3.5 に，図 2.2(b) の結果を (a) 対数軸表示，(b) 線形軸表示に変換した位相特性を示す．周波数軸を線形軸で表すことにより，位相特性が直線に近づくことが示された．つまり，外耳道内放射における骨導音の伝達経路は直線位相性を持ち，全周波数域で遅延時間がある程度一定であることが推測できる．

次に，中耳耳小骨の慣性振動における伝達特性の位相特性について考察する．図 3.6 に，図 2.4(c) の結果を (a) 対数軸表示，(b) 線形軸表示に変換した位相特性を示す．周波数軸を線形軸で表すことにより，1 kHz 以上の位相特性が直線に近づくことが示された．なお，1 kHz 以下の位相特性は外耳道内放射が主要成分であることから無視することができると考えられる．したがって，中耳耳小骨の慣性振動における伝達経路も，外耳道内放射と同様に直線位相性を持ち，主要周波数帯において遅延時間がほぼ一定であることが推測できる．

以上の結果から，外耳道内放射および中耳耳小骨の伝達経路を伝達システムとして注目したとき，その位相特性は直線位相特性であることがわかった．これは，両伝達経路における骨導音の伝達メカニズムが単純な物理的振動であることが要因だと考えられる．したがって，両経路の群遅延特性は一定であり，骨導音知覚において両経路における位相特性

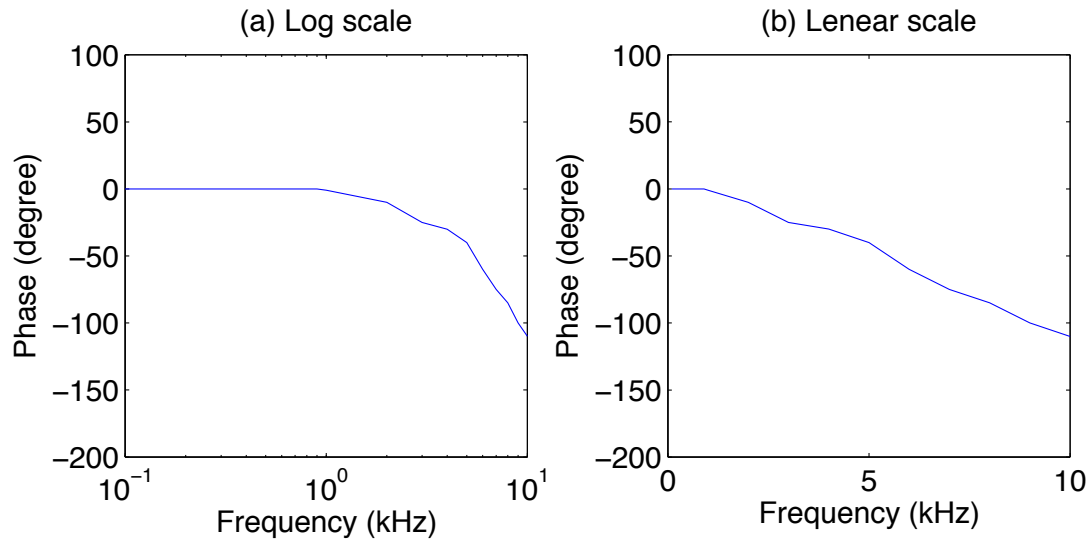


図 3.6: 図 2.4 における (c) 位相特性の比較：(a) 対数軸表示，(b) 線形軸表示.

の影響は受けないと推測できる．しかし，内耳に関する骨導音の伝達経路における伝達メカニズムは非常に複雑であり，その位相特性は直線位相特性ではなく周波数に大きく依存していることが考えられる．もし，ヒトが音の位相変化を知覚することができるのであれば，骨導音の知覚メカニズムを解明するために，骨導音伝達時の位相特性に着目することで知覚特性と対応付けて議論が行える可能性がある．

3.3 位相変化の知覚特性に注目した心理物理実験

前項において，骨導音が伝達されときの位相変化が骨導音の知覚特性に関連していることを示唆した．これまでの調査から，気導音を用いた骨導音の知覚的な相殺実験（第 2.2.4 項）では，骨導音知覚において振幅特性のほかに位相特性をパラメータとしていることが明らかになった．この心理物理学的アプローチから，骨導音の位相変化に対する知覚特性を調べるためには，気導音の位相変化に対する知覚特性と比較することが有用であると考えられる．

気導音知覚において，位相特性の変化に対する知覚特性に注目した心理物理実験が行われている．Licklider は，複合音を利用してそれぞれの位相特性を変化させた音が判別可能かどうかを調べた [74]．その結果，高周波数成分の位相を変化させた場合もしくは基本周波数が低い場合に，ヒトは音色の違いを判別することが示された．この実験結果は，Helmholtz の実験 [75] 以降に解釈されてきた「音色には複合音の成分間の位相関係は影響しない」という主張を否定するものであった．

Patterson は，正弦波が指数関数的な減衰包絡特性を持つように変調させた変調波（damped sounds）とその時間反転形（ramped sounds）がそれぞれ異なる音色として知覚されるこ

とに対して、聴取実験およびモデルでの検証を行った [76]。これらの刺激音はパワースペクトルとしては同一で、物理的な違いは位相特性のみで説明される。ヒトがこの2種類の刺激音を判別することができることは、ヒトが位相特性の変化を知覚していることを示している。

Blauert らは、電気音響機器の群遅延特性がヒトの知覚特性にどのような影響を与えるかを調べるために、群遅延特性を変化させた様々な音を聴取させることにより、音色変化の検出限を測定した [77]。それを踏まえて、赤木と安武は刺激本来の位相関係を被験者に呈示することを目的として逆フィルタを設計し、これを作用させた刺激音を使用して聴取実験を行った [78]。その結果、群遅延特性の標準偏差が $200\ \mu\text{s}$ でもその音色の違いが判別できることが明らかになった。この結果から、ヒトは複合音に含まれる成分音間のパワースペクトルを固定しても、成分音間にわずかな位相差が生じれば音色の相違として知覚できることが示されている。

3.4 骨導音知覚メカニズム解明のためのアプローチ

これまでの知見から、気導音知覚において位相特性がわずかに変化するだけでも知覚される音色が変化することが示されており、ヒトは位相変化の知覚に敏感であることが示唆されていることがわかった。しかし、骨導音知覚における位相特性については十分な検討がされていない。骨導音の伝達経路において、内耳までの経路では直線位相特性が仮定できるが、複雑な伝達メカニズムをもつ内耳では位相特性が大きく変化し、骨導音知覚にも影響を与えている可能性がある。そこで、前項で述べた気導音で行われている心理物理実験（前項）と比較することにより、骨導音が伝達される過程で変化する位相特性が知覚特性にどのような影響を与えているのかを調べるのではないかと考えた。さらには、最終的に得られた骨導音知覚に関係する位相特性から、(4) 圧縮骨導と (5) 脳脊髄液経由の圧力に関係する伝達経路が骨導音知覚にどのように関係しているのかといった知覚メカニズムを推定することもできると考えられる。

以下では、本調査研究で得られた知見をもとに、骨導音知覚メカニズム解明のためのアプローチにおいて扱う課題について説明する。

課題 1：骨導音と気導音における位相変化に対する知覚特性の比較

図 3.7 に、概要を示す。ここでは、気導と骨導で位相変化の知覚にどのような違いがあるかを調べることを目的として、位相変化による知覚される音色の変化の閾値を気導と骨導でそれぞれ求める。

この検討によって、知覚される音色に関する位相変化のパラメータが異なる傾向を示すときは、骨導音伝達時において気導音の位相特性とは異なる位相特性が生じて、知覚にも変化をもたらしていることを示す。反対に、知覚される音色に関する位相変化のパラメー

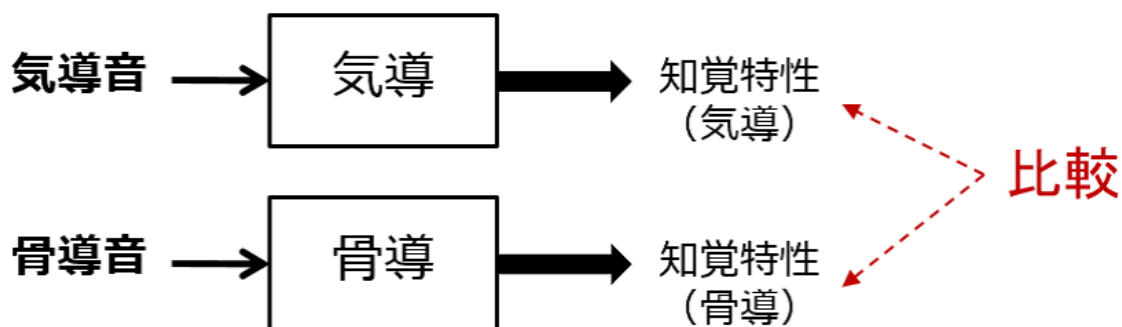


図 3.7: 骨導音知覚メカニズム解明のための課題 1. 同じ刺激音を用いて位相変化の知覚特性を検証する.

タが同じ傾向を示すときは、骨導音知覚時の位相特性は気導音伝達時のものと同様であることが言える。

課題 2：内耳までの伝達経路における骨導音の位相変化に対する知覚特性

骨導音伝達時の位相特性の変化が、既存研究の位相特性のみで説明できるのかを検証する。図 3.8 に、概要を示す。ここでは、骨導呈示を行う前に刺激音に位相補正フィルタを適用する。これは、生理学的・解剖学的アプローチの知見から得られた、(1) 外耳道内放射、(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導）、(3) 内耳のリンパ液の慣性振動の位相特性を合成することによって得られた位相特性の逆フィルタである。この位相補正フィルタを適用することによって、内耳以前における骨導の伝達経路の位相特性を相殺できると仮定する。このように、骨導音の伝達経路を考慮した位相補正を適用した刺激音を用いて課題 1 と同様の検討を行うことにより、気導における位相変化の知覚特性との比較を行う。

この検討によって、知覚される音に関する位相変化のパラメータが異なる傾向を示すときは、骨導音伝達時において内耳以降の伝達経路（(4) 圧縮骨導と (5) 脳脊髄液経由の圧力）が、骨導音の知覚に関与している可能性を示すことになる。反対に、知覚される音に関する位相変化のパラメータが同じ傾向を示すときは、骨導音知覚において位相変化の知覚に重要な経路として、(1) 外耳道内放射、(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導）、(3) 内耳のリンパ液の慣性振動の経路が関与していることが明らかになる。

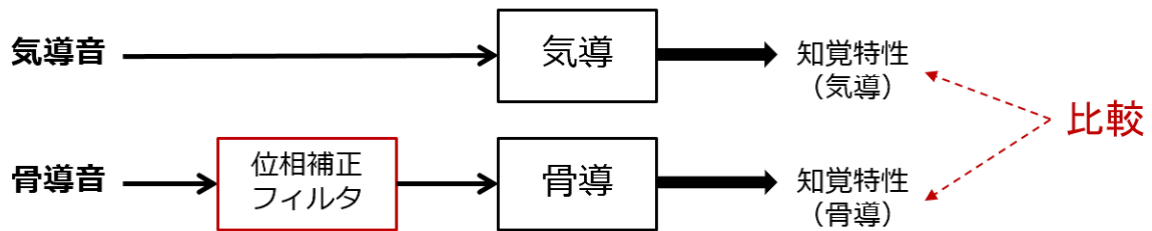


図 3.8: 骨導音知覚メカニズム解明のための課題 2. 骨導の伝達経路の位相特性の補償フィルタを追加.

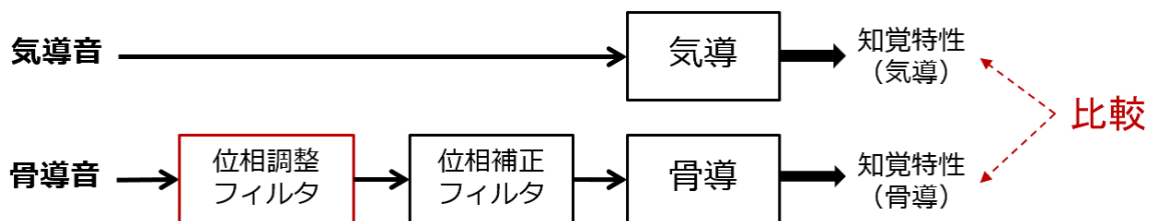


図 3.9: 骨導音知覚メカニズム解明のための課題 3. 位相特性を調整するためのフィルタを追加.

課題 3：内耳以降の伝達経路における骨導音の位相変化に対する知覚特性の推定

骨導音知覚における未知の経路における位相特性を推定する．図 3.9 に，概要を示す．ここでは，骨導呈示を行う前に刺激音に位相補正フィルタに加え位相調整用のフィルタを適用する．このフィルタには，例えば「1 kHz 以下は遅れ位相」や「3 kHz 以上は遅れ位相」など，様々なパターンはの位相特性を持つフィルタをパラメータとして用意する．聴取実験では，それぞれのフィルタを用いて検証を行い，気導音の知覚特性に最も近い位相特性を求める．課題 2 で説明したように，(1) 外耳道内放射，(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導），(3) 内耳のリンパ液の慣性振動の経路に關与する位相特性は後部の位相補正フィルタによって既に補正されているため，得られた位相特性は (4) 圧縮骨導と (5) 脳脊髄液経由の圧力に關する伝達経路に關与する位相特性だと考えることができる．さらに，得られた位相特性が (4) 圧縮骨導と (5) 脳脊髄液経由の伝搬に關する伝達経路においてどうやって発生するのか，そのメカニズムを生理学的アプローチに加え物理学的な知見から推測できる可能性がある．

3.5 現時点での問題点

前項において、骨導音知覚における位相変化の知覚特性を心理物理実験から求める実験系について考察した。これにより、骨導音知覚時の位相特性が、骨導音の知覚メカニズムを解明するための手がかりとなりうることを示したが、現時点では以下の問題点がある。

聴取実験に使用する刺激音の選択

気導音知覚における実験結果と比較するために、気導音によって行われている既存研究と対応させることが望ましい。また、低周波数帯域（1 kHz 以下）の骨導音は (1) 外耳道内放射の伝達経路を通過するように、骨導音は周波数特性に依存して伝達される経路が異なることが生理学的・解剖学的アプローチから明らかになっている。そのため、位相変化の知覚実験に用いる刺激音は、

- 各信号の周波数差が大きい複合音
- 広帯域で位相特性を変化させたパルス音

のような信号が有用であると考えられる。

並列システムにおける位相特性の分析

課題2において、(1) 外耳道内放射、(2) 中耳の耳小骨の慣性振動（慣性骨導）、(3) 内耳のリンパ液の慣性振動の位相特性を一つのシステムとして合成することについて述べた。しかし、並列システムの位相特性を議論するときには、振幅特性との重み付けを行った複雑な計算が必要になるため [79]、生理学的・解剖学的アプローチから明らかになった位相特性だけではなく振幅特性にも注目して検討を行う必要がある。

位相補正フィルタの設計法の検討

課題2において、各経路の伝達特性を合成した後に位相補正フィルタ（逆フィルタ）の設計が必要となる。位相補正フィルタとして、任意の位相特性をもち振幅が全体域で1の全域通過型 IIR フィルタが適していると考えられる。IIR フィルタは、伝達関数の極が単位円内に存在することが安定性の必要十分条件であり、その条件を満たすような設計法の検討が必要である [79]。

実験機器（伝送系）の群遅延特性への対策

位相変化による音色弁別の知覚特性を聴取実験から正確に測定するために、実験装置を始めとした伝送系における群遅延特性の検討が必要である。赤木と安武は、伝送系におけるインパルス応答を時間引き伸ばしパルス（time stretched pulse, TSP）を用いて測定し、そのインパルス応答の逆特性を使用して逆フィルタを作成している [78]。実験装置の電源には安定化電源を用いることにより実験装置の群遅延特性の時間的な変化を最小限に抑えている。しかし、低域では伝送系の変動が大きすぎて補正が困難であることから、補正帯域を制限し、補正帯域外では定常になるように逆フィルタを補完するなど、低域成分に対しての考慮が必要となる [80]。このように、気導および骨導での心理物理実験において正確な測定を行うために、呈示信号に対する伝送系による歪み成分の影響を、補正フィルタで取り除くことが可能であるかを検討する必要がある。

第4章 結論

はじめに，骨導音はどのような伝達経路を経由して知覚されると考えられているのか，その伝達特性はどの程度調べられているのかを明らかにするために，生理学的アプローチによって骨導の伝達特性を測定している既存研究について調査を行った．調査結果から，骨導音知覚において主に5つの経路が関連していることが示唆されており，内耳の入力部である前庭窓の振動特性までは伝達特性の計測が行われていることが明らかになった．しかしながら，蝸牛内部へと通じる経路における伝達メカニズムや，その伝達経路が知覚にどのような影響を与えているのかということは依然として未解明であることがわかった．

次に，骨導音の知覚特性についてどの程度調べられているのかを明らかにするために，心理物理学のアプローチによって骨導音の知覚特性を検討した既存研究について調査を行った．調査結果から，骨導音知覚における音の大きさ（ラウドネス）に関しては多くの調査が行われているものの，位相変化に対する知覚特性については調査が少ないことがわかった．ただし，骨導音知覚を気導音によって相殺する心理物理実験では，骨導音の振幅特性だけではなく位相特性に注目することで，骨導音の伝達メカニズムと関連付けて議論していることが明らかになった．

調査結果から，骨導における内耳以降の伝達メカニズムや知覚との関係性については未だ明らかになっていないことが示された．この問題点に対し，心理物理学のアプローチの立場から，骨導音知覚における位相変化の知覚特性を気導音知覚のものと比較することで，伝達メカニズムの推定を行えるのではないかと考えた．気導音知覚において，位相変化による知覚特性は音色変化から観察できることが明らかになっており，骨導音知覚においても位相変化の知覚特性を測定できる可能性がある．このアプローチにおいて使用される位相補正フィルタは，生理学的アプローチから明らかになっている伝達経路の各伝達特性を合成することにより導出することができる．ただし，骨導音の知覚メカニズムを明らかにするためには，聴取実験に用いる実験パラダイム，伝達システムにおける位相特性の分析，位相補正フィルタの設計法，実験機器における群遅延特性への対策など，検討すべき課題点が残されていることを示した．

結論として，骨導音知覚メカニズムをより明確にするためのアプローチとして，骨導音伝達時の位相特性に注目し，位相特性の変化に対する骨導音の知覚特性を気導音の知覚特性と比較することにより，内耳以降の伝達経路における知覚特性および伝達メカニズムを推定できる可能性がある．

謝辞

本課題研究を遂行するにあたり、多大な助言と懇切丁寧かつ、熱心な御指導をしていただきました鵜木祐史 准教授に心から感謝致します。また、研究室会議をはじめ、様々な機会で多くの助言をしていただきました赤木正人 教授，森川大輔 助教に深く感謝致します。さらに、本課題研究を進めるにあたり、御指導や御討論に加え、適切な助言をしていただきました宮内良太 助教に心より感謝致します。加えて、本課題研究を遂行していく上で熱心な議論と多面にわたるご協力を賜った党建武 教授，田中宏和 准教授，末光厚夫 助教，川本真一 助教に深く御礼申し上げます。

日頃の研究生生活において、議論だけではなく個人的なご相談にも気軽に応じていただいた，赤木・鵜木研究室や党・田中研究室のメンバーの皆様にも深く感謝致します。また，公私にわたりお世話になった長田和也氏，附田茉由氏に心より感謝致します。

最後に，本大学院での研究生生活において携わっていただきました全ての方々に改めて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 日本音響学会，新版 音響用語辞典，コロナ社第1版，2003.
- [2] S. Stenfelt, and R. L. Goode, “Bone-Conducted Sound: Physiological and Clinical Aspects,” *Otol. Neurotol.*, vol.26, no.6, pp.1245–1261, Nov. 2005.
- [3] S. Stenfelt, “Acoustic and physiologic aspects of bone conduction hearing,” *Adv. Otorhinolaryngol.*, vol.71, pp.10–21, 2011.
- [4] 日本聴覚医学会，聴覚検査の実際，日本聴覚医学会（編），南山堂第1版，2009.
- [5] 伊藤憲三，坂本真一，“骨導受聴の現状と新しい応用への可能性,” 聴覚研究会資料, vol.39, no.8, pp.587–592, Dec. 2009.
- [6] 小川郁，よくわかる聴覚障害：難聴と耳鳴のすべて，永井書店，2010.
- [7] A. Tjellström, and B. Håkansson, “The bone-anchored hearing aid. Design principles, indications, and long-term clinical results,” *Otolaryngol. Clin. North Am.*, vol.28, no.1, pp.53–72, 1995.
- [8] G. C. Dahlin, “Bone-conduction thresholds of human teeth,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.53, no.5, p.1434, 1973.
- [9] S. P. Y. Stenfelt, and B. E. V. Håkansson, “Sensitivity to bone-conducted sound: excitation of the mastoid vs the teeth,” *Scand. Audiol.*, vol.28, no.3, pp.190–198, 1999.
- [10] 村松未輝雄，及川靖広，山崎芳男，黒澤潤子，“歯骨伝導アクチュエータを用いたコミュニケーションエイド,” 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, vol.95, no.7, pp.623–630, July 2012.
- [11] 細野裕司，安部善幸，田村光男，“骨伝導スピーカの使用方法及び骨伝導受話装置の使用方法,” , 2004.
- [12] H. Hosoi, S. Yanai, and T. Nishimura, “Development of cartilage conduction hearing aid,” *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol.42, no.2, pp.104–110, 2010.

- [13] T. Nishimura, H. Hosoi, O. Saito, R. Miyamae, R. Shimokura, T. Matsui, and T. Iwakura, “Benefit of a new hearing device utilizing cartilage conduction,” *Auris. Nasus. Larynx*, vol.40, no.5, pp.440–6, Oct. 2013.
- [14] R. Shimokura, H. Hosoi, T. Iwakura, T. Nishimura, and T. Matsui, “Development of monaural and binaural behind-the-ear cartilage conduction hearing aids,” *Appl. Acoust.*, vol.74, no.11, pp.1234–1240, Nov. 2013.
- [15] V. Gavreau, “Audubillite de sons de frequence elevee,” *Compt Rendu*, vol.226, pp.2053–2054, 1948.
- [16] M. L. Lenhardt, R. Skellett, P. Wang, and A. M. Clarke, “Human ultrasonic speech perception,” *Sci.*, vol.253, no.5015, pp.82–85, July 1991.
- [17] H. Hosoi, S. Imaizumi, T. Sakaguchi, M. Tonoike, and K. Murata, “Activation of the auditory cortex by ultrasound,” *Lancet*, vol.351, no.9101, pp.496–507, Feb. 1998.
- [18] 中川誠司, 今泉敏, “骨導超音波補聴器の試み (小特集：骨導超音波とその応用),” *日本音響学会誌*, vol.59, no.8, pp.464–467, Aug. 2003.
- [19] K. Ito, and S. Nakagawa, “Bone-conducted ultrasonic hearing assessed by tympanic membrane vibration in living human beings,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.34, no.6, pp.413–423, 2013.
- [20] 中川誠司, “骨導超音波知覚の解明：重度難聴者のための新型補聴器の開発に向けて (小特集：超高周波音の効果に関する最近の話題),” *日本音響学会誌*, vol.65, no.1, pp.46–51, Dec. 2008.
- [21] T. Sakaguchi, T. Hirano, Y. Watanabe, T. Nishimura, H. Hosoi, S. Imaizumi, S. Nakagawa, and M. Tonoike, “Inner Head Acoustic Field for Bone-Conducted Sound Calculated by Finite-Difference Time-Domain Method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.41, no.Part 1, No. 5B, pp.3604–3608, May 2002.
- [22] M. K. Brummund, F. Sgard, Y. Petit, and F. Laville, “Three-dimensional finite element modeling of the human external ear: Simulation study of the bone conduction occlusion effect,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.135, no.3, p.1433, March 2014.
- [23] L. Demkowicz, P. Gatto, J. Kurtz, M. Paszyski, W. Rachowicz, E. Bleszyski, M. Bleszyski, M. Hamilton, C. Champlin, and D. Pardo, “Modeling of bone conduction of sound in the human head using hp-finite elements: Code design and verification,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol.200, no.21-22, pp.1757–1773, May 2011.

- [24] 深澤達也, 石田和男, 村井裕子, “骨導聴力のメカニクス,” 日本音響学会聴覚研資料, vol.31, no.3, pp.203–209, 2001.
- [25] J. Tonndorf, “Bone conduction. Studies in experimental animals,” *Acta Otolaryngol.*, vol.213, pp.1–132, Jan. 1966.
- [26] 平原達也, 蘆原郁, 小澤賢司, 宮坂榮一, 音と人間, 日本音響学会 (編), コロナ社 第1版, 2013.
- [27] J. O. Pickles, 堀川順生, 矢島孝雄, ピクルス聴覚生理学, 二瓶社, 1995.
- [28] S. Stenfelt, T. Wild, N. Hato, and R. L. Goode, “Factors contributing to bone conduction: the outer ear,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.113, no.2, pp.902–913, 2003.
- [29] S. Stenfelt, “Simultaneous cancellation of air and bone conduction tones at two frequencies: Extension of the famous experiment by von Békésy,” *Hear. Res.*, vol.225, no.1-2, pp.105–116, March 2007.
- [30] S. Reinfeldt, S. Stenfelt, and B. Håkansson, “Estimation of bone conduction skull transmission by hearing thresholds and ear-canal sound pressure,” *Hear. Res.*, vol.299, pp.19–28, May 2013.
- [31] S. M. Khanna, “Mechanical parameters of hearing by bone conduction,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.60, no.1, p.139, 1976.
- [32] E. H. Huizing, “Bone conduction-the influence of the middle ear,” *Acta Otolaryngol. Suppl.*, vol.155, pp.1–99, Jan. 1960.
- [33] 金井孝幸, 粥川大祐, 降旗建治, 柳沢武三郎, “骨導音の外耳道内音圧特性からみた頭部内伝搬,” 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響, vol.102, no.398, pp.45–50, Oct. 2002.
- [34] R. Carhart, “Clinical Application of Bone Conduction Audiometry,” *Arch. Otolaryngol. - Head Neck Surg.*, vol.51, no.6, pp.798–808, June 1950.
- [35] R. Aibara, J. T. Welsh, S. Puria, and R. L. Goode, “Human middle-ear sound transfer function and cochlear input impedance,” *Hear. Res.*, vol.152, pp.100–109, 2001.
- [36] S. Stenfelt, N. Hato, and R. L. Goode, “Factors contributing to bone conduction: The middle ear,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.111, no.2, p.947, 2002.
- [37] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*, BRILL6 edition, 2013.
- [38] J. Tonndorf, “Compressional Bone Conduction in Cochlear Models,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.34, no.8, p.1127, 1962.

- [39] J. Tonndorf, “A New Concept of Bone Conduction,” *Arch. Otolaryngol. - Head Neck Surg.*, vol.87, no.6, pp.595–600, June 1968.
- [40] M. Yoshida, and T. Uemura, “Transmission of cerebrospinal fluid pressure changes to the inner ear and its effect on cochlear microphonics,” *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.*, vol.248, no.3, pp.139–43, Jan. 1991.
- [41] M. Kringlebotn, “The equality of volume displacements in the inner ear windows,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.98, no.1, p.192, 1995.
- [42] S. Stenfelt, N. Hato, and R. L. Goode, “Fluid volume displacement at the oval and round windows with air and bone conduction stimulation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.115, no.2, p.797, 2004.
- [43] “ISO 8253-1:2010 - Acoustics – Audiometric test methods – Part 1: Pure-tone air and bone conduction audiometry,” .
- [44] 日本聴覚医学会, “日本聴覚医学会聴覚検査法 1. オーディオメータによる純音聴力 (閾値) レベル測定法,” *Audiol. Japan*, vol.51, 2008.
- [45] U. Richter, and K. Brinkmann, “Threshold of hearing by bone conduction. A contribution to international standardization,” *Scand. Audiol.*, vol.10, no.4, pp.235–7, Jan. 1981.
- [46] M. McBride, T. Letowski, and P. Tran, “Bone conduction reception: head sensitivity mapping,” *Ergonomics*, vol.51, no.5, pp.702–18, May 2008.
- [47] 石橋睦美, 神田浩一, “骨導音の聴覚感度特性の計測,” 東京都立産業技術研究センター研究報告, vol.3, pp.84–85, 2008.
- [48] 渡邊祐子, 浜田晴夫, “骨伝導による音響信号生成に関する基礎検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響, vol.105, no.136, pp.19–24, June 2005.
- [49] 福田吉真, 荳木禎史, 宇佐川毅, “骨伝導アクチュエータによるラウドネスと加速度特性の関連性について: 耳道挿入型および下顎頭装着型アクチュエータ,” 聴覚研究会資料, vol.42, no.6, pp.519–524, Aug. 2012.
- [50] B. N. Walker, R. M. Stanley, and C. Street, “Thresholds of audibility for bone-conduction headsets,” *Proc. ICAD 05-Eleventh Meet. Int. Conf. Audit. Disp.*, pp.218–222, Limerick, Ireland, 2005.
- [51] “ISO 226:2003 - Acoustics – Normal equal-loudness-level contours,” Technical report, 2003.

- [52] S. Stenfelt, and B. Håkansson, “Air versus bone conduction : an equal loudness investigation,” *Hear. Res.*, vol.167, pp.1–12, 2002.
- [53] X. Qin, Y. Fukuda, Y. Chisaki, and T. Usagawa, “Frequency Characteristics of Bone Conduction Actuator -Loudness and Acceleration-,” *Proc. Int. Conf. Information, Commun. Technol. Syst.* 2013, pp.251–256, 2013.
- [54] 八江優輝, 中原史博, 中谷任徳, 小林甲児, 荳木禎史, 宇佐川毅, “骨伝導アクチュエータによる音響信号提示に関する検討: 検知限・ラウドネス特性測定の試み,” *電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響*, vol.111, no.306, pp.49–54, Nov. 2011.
- [55] 杉原裕樹, 佐々木謙介, 鈴木敬久, “骨導音の頭部内伝搬特性とラウドネスの評価に関する研究,” *聴覚研究会資料*, vol.40, no.2, pp.31–36, Feb. 2010.
- [56] A. Spoor, P. H. Schmidt, and H. A. V. Dishoeck, “The Location on the Skull of A Bone Conduction Receiver and the Lateralization of the Sound Impression,” *Acta Otolaryngol.*, vol.48, pp.594–597, July 1957.
- [57] A. F. Jahn, and J. Tonndorf, “Lateralization of bone-conducted sounds,” *Am. J. Otolaryngol.*, vol.3, no.2, pp.133–140, March 1982.
- [58] R. M. Stanley, and B. N. Walker, “Lateralization of Sounds Using Bone-Conduction Headsets,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol.50, no.16, pp.1571–1575, SAGE Publications, Oct. 2006.
- [59] J. A. MacDonald, P. P. Henry, and T. R. Letowski, “Spatial audio through a bone conduction interface,” *Int. J. Audiol.*, vol.45, no.1959, pp.595–599, 2006.
- [60] S. Stenfelt, “Bilateral fitting of BAHAs and BAHA fitted in unilateral deaf persons: Acoustical aspects,” *Int. J. Audiol.*, vol.44, no.3, pp.178–189, Jan. 2005.
- [61] C. Priwin, S. Stenfelt, G. Granström, A. Tjellström, and B. Håkansson, “Bilateral bone-anchored hearing aids (BAHAs): an audiometric evaluation,” *Laryngoscope*, vol.114, no.1, pp.77–84, 2004.
- [62] G. V. Békésy, *Experiments in Hearing*, McGraw, 1960.
- [63] G. v. Békésy, “Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung,” *Ann. Phys.*, vol.405, no.1, pp.111–136, 1932.
- [64] E. Wever, and C. Bray, “The nature of bone conduction as shown in the electrical response of the cochlea,” *Ann Otol Rhinol Laryngol*, vol.45, pp.822–830, 1936.

- [65] K. Lowy, “Cancellation of the Electrical Cochlear Response with Air- and Bone-Conducted Sound,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.13, pp.156–158, 1942.
- [66] S. Stenfelt, S. Puria, N. Hato, and R. L. Goode, “Basilar membrane and osseous spiral lamina motion in human cadavers with air and bone conduction stimuli,” *Hear. Res.*, vol.181, no.1-2, pp.131–143, 2003.
- [67] 大野壽彦, 河合平司, “骨伝導の位相変化,” *日本音響学会誌*, vol.10, no.2, pp.77–80, June 1954.
- [68] 川戸千明, 猿舘朝, 伊藤憲三, “気導音と骨導音の蝸牛加算モデルに関する一検討,” *聴覚研究会資料*, vol.36, no.7, pp.617–620, Oct. 2006.
- [69] O. H. Clavier, J. A. Norris, and A. J. Dietz, “A comparison of the nonlinear response of the ear to air and to bone-conducted sound,” *Hear. Res.*, vol.263, no.1-2, pp.224–32, May 2010.
- [70] B. Håkansson, P. Carlsson, A. Brandt, and S. Stenfelt, “Linearity of sound transmission through the human skull in vivo,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.99, no.4, p.2239, 1996.
- [71] B. Håkansson, “The mechanical point impedance of the human head, with and without skin penetration,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.80, no.4, p.1065, 1986.
- [72] G. Flottorp, and S. Solberg, “Mechanical impedance of human headbones (forehead and mastoid portion of the temporal bone) measured under ISO/IEC conditions,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.59, no.4, p.899, 1976.
- [73] E. L. Smith, “Mechanical Impedance of the Forehead and Mastoid,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.30, no.7, p.695, 1958.
- [74] J. C. R. Licklider, “Effects of Changes in the Phase Pattern upon the Sound of a 16-Harmonic Tone,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.29, no.6, p.780, 1957.
- [75] H. Helmholtz, “Ueber die Klangfarbe der Vocale,” *Ann. der Phys. und Chemie*, vol.108, pp.280–290, 1859.
- [76] R. D. Patterson, “The sound of a sinusoid: Time-interval models,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.96, no.3, pp.1419–1428, 1994.
- [77] J. Blauert, “Group delay distortions in electroacoustical systems,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.63, no.5, p.1478, 1978.

- [78] 赤木正人, 安武浩二郎, “時間方向情報の知覚の検討: 位相変化の音色知覚に及ぼす影響について,” 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響, vol.98, no.157, pp.15–22, June 1998.
- [79] 尾知博, シミュレーションで学ぶデジタル信号処理—MATLAB による例題を使って身につける基礎から応用 (TECHI), CQ 出版第 8 版, 2013.
- [80] 西澤雅人, “位相変化に対する音色知覚機構に関する研究,” 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, 2000.