

Title	聴覚フィードバックにおける骨導音声の伝達過程に関する研究
Author(s)	鳥谷, 輝樹
Citation	
Issue Date	2021-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/17479">http://hdl.handle.net/10119/17479</a>
Rights	
Description	Supervisor: 鶴木 祐史, 先端科学技術研究科, 博士

博士論文

聴覚フィードバックにおける骨導音声の  
伝達過程に関する研究

鳥谷 輝樹

主指導教員 鷗木 祐史

北陸先端科学技術大学院大学  
先端科学技術研究科 [情報科学]

令和3年3月

## 概要

音声生成と音声知覚は表裏一体の関係にあるため、個々のメカニズムの解明のみならず、両者の相互的な働きの解明も重要である。生成と知覚の相互作用を示すものとして、話者が生成した音声を話者自身が知覚する「聴覚フィードバック」がある。聴覚フィードバックに関連する複数の現象の観察や心理物理実験により、発話における音響レベルでのモニタリングの重要性が示されている。

これまでの検討では、聴覚フィードバックが基本的に気導音声として聴覚に伝達されていることを前提に議論されている。しかし、発話中には気導音声だけでなく骨導音声も話者に知覚されていることは明らかである。多くの検討では、骨導音声をマスクするためのマスキング雑音を提示して実験を行なっているが、マスキング雑音により骨導音声が確実にマスキングされているかどうかについては検証されていない。骨導から伝達される聴覚フィードバックが発話にどのような影響を与えているかについては、気導経路とは切り分けて検討する必要がある。骨導の聴覚フィードバックの性質を明らかにするための基盤として、骨導音声に含まれる(1)如何なる音響的特徴が、(2)如何なる伝達経路を通じて、(3)どの程度伝達されるのか、その伝達過程を体系化することが求められる。

骨導音声は発話器官から外耳や中耳・内耳に至るさまざまな経路を通じて伝達されると推測されており、中耳以降に到達する骨導音声成分は直接観測することができない。これまでの研究は、外耳を経由する伝達のみに着目して伝達特性を測定したものと、中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できないという立場で、すべての骨導経路の合成系としての伝達特性をマスキングの手法で測定したものがある。これまでの検討では、中耳以降の骨導伝達経路に対する解釈が一貫しておらず、統一した結論を導き出せていない。

本論文では、「骨導音声の伝達においては中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できない」という考えのもと、中耳以降に直接到達する骨導音声のスペクトル形状は、軟組織・頭蓋骨(側頭部)振動のスペクトル形状によって特徴づけられることに着目して音声生成過程の観点から聴覚フィードバックにおける骨導音声伝達の様相を明らかにした。

まず、骨導音声の伝達において観測可能な側頭部振動と外耳道内音声に着目し、母音ごとの短時間的な特徴および長時間的なスペクトル特徴を分析した。母音発話時のF0分析の結果、側頭部振動と外耳道内音声ともに、気導音声と同様のF0を有することが確認された。また、母音発話時のスペクトル包絡を分析した結果、側頭部振動・外耳道内音声の多くの母音において気導音声のフォルマントに対応するスペクトルピークが見られることが確認された。これらのことから、外耳経由および中耳以降で伝達される骨導音声には、音声知覚に重要な音響的特徴が見られることが明らかになった。

次に、骨導音声が発話器官から聴覚末梢系へ伝達される際の経路とその伝達特性について検討するために、喉頭付近の振動と口腔内音圧を基準としたときの骨導経路の伝達特性

の物理測定を行なった。測定の結果、喉頭付近の振動および口腔内音圧のどちらを基準としても、軟組織・頭蓋骨への伝達で2 kHz以下の低域通過特性を有し、軟組織・頭蓋骨を介して外耳道内に至る伝達で2～3 kHz付近の帯域通過特性を有するという共通の性質が見られた。また、喉頭付近の振動から軟組織・頭蓋骨の振動への伝達には、各母音に対応する声道伝達特性の影響が含まれることが分かり、骨導音声の伝達においては口腔内の音圧伝搬の寄与が大きいことが示唆された。

続いて、骨導音声知覚に対するそれぞれの伝達経路の寄与について検討するために、自己聴取音声の声質に類似すると感じられる気導音声と外耳・中耳以降に対応する模擬骨導音声のパワー比を検討した。検討の結果、発話中の骨導音声知覚において、中耳以降への直接伝達の寄与は外耳経由の伝達の寄与に対して少なくとも-3 dB程度、あるいは両者の寄与が同程度であるという可能性が示唆された。

最後に、第3章で明らかにした骨導音声の音響的特徴、第4章で明らかにした口腔内音圧を基準とした骨導音声の伝達特性、および第5章で推測された外耳経由および中耳以降の伝達経路の知覚的寄与を総括し、聴覚フィードバックとして骨導音声がどのような情報伝達を担っている可能性があるかを内耳でのスペクトル表現から検討した。この結果、外耳経由・内耳以降での骨導の聴覚フィードバックは主に生成・知覚間の音高情報のモニタリングに対して同程度に寄与している可能性が示唆された。

結論として、聴覚フィードバックにおける骨導音声の伝達過程として、(1) 2 kHz以下の周波数帯域に表れる特徴（F0あるいは低次のフォルマント）を、(2) 外耳道内放射だけでなく中耳以降への伝達経路からも、(3) 互いにおよそ同程度の寄与で伝達する可能性があることが分かった。本論文を通じて、聴覚フィードバックとして中耳以降に伝達される骨導経路の寄与を無視できない可能性を示唆した。



# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>2</b>
1.1	はじめに . . . . .	3
1.2	本研究の背景 . . . . .	6
1.2.1	聴覚フィードバックの関連知見 . . . . .	6
1.2.2	骨導音声とその聴覚フィードバック . . . . .	9
1.3	本研究の動機・位置づけ . . . . .	12
1.4	本研究の目的 . . . . .	15
1.5	本研究の構成 . . . . .	15
<b>2</b>	<b>伝達過程の解明に向けた前提知見と方略</b>	<b>20</b>
2.1	はじめに . . . . .	21
2.2	音声生成過程の音源・フィルタ理論 . . . . .	21
2.3	骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見 . . . . .	23
2.3.1	外耳道内放射 . . . . .	23
2.3.2	中耳での伝達経路 . . . . .	25
2.3.3	内耳以降の伝達経路 . . . . .	25
2.4	聴覚フィードバックにおける骨導経路 . . . . .	30
2.5	伝達過程を解明するための方略 . . . . .	30
2.6	おわりに . . . . .	35
<b>3</b>	<b>観測可能な骨導経路における音声の音響的特徴</b>	<b>36</b>
3.1	はじめに . . . . .	37
3.2	母音の種類ごとの音響的特徴 . . . . .	37
3.2.1	話者 . . . . .	37
3.2.2	収録装置と収録手続き . . . . .	37

3.2.3	分析方法 . . . . .	39
3.2.4	補正 . . . . .	39
3.2.5	考察 . . . . .	49
3.3	長時間平均的なスペクトル特徴 . . . . .	50
3.3.1	話者 . . . . .	50
3.3.2	収録装置と収録手続き . . . . .	50
3.3.3	分析方法 . . . . .	51
3.3.4	分析結果 . . . . .	51
3.3.5	考察 . . . . .	55
3.4	おわりに . . . . .	58
<b>4</b>	<b>観測可能な骨導経路における伝達特性の物理測定</b>	<b>59</b>
4.1	はじめに . . . . .	60
4.2	喉頭付近の振動を基準とした骨導経路の伝達特性 . . . . .	60
4.2.1	側頭部・外耳道での伝達関数の測定 . . . . .	60
4.2.2	測定結果 . . . . .	65
4.2.3	考察 . . . . .	73
4.3	口腔内音圧を基準とした骨導経路の伝達特性 . . . . .	75
4.3.1	側頭部・外耳道での伝達関数の測定 . . . . .	75
4.3.2	測定結果 . . . . .	82
4.3.3	考察 . . . . .	85
4.4	骨導経路における声道内音圧伝搬の貢献 . . . . .	88
4.5	おわりに . . . . .	89
<b>5</b>	<b>外耳・中耳以降の骨導経路の知覚への寄与</b>	<b>92</b>
5.1	はじめに . . . . .	93
5.2	外耳・中耳以降の伝達経路を考慮した模擬骨導音声 . . . . .	93
5.2.1	気導音声から骨導音声を模擬するためのスペクトル変形 . . . . .	93
5.2.2	伝達特性を近似するフィルタの設計 . . . . .	94
5.3	自己聴取音声を用いた気導音声と模擬骨導音声のパワー比の主観評価実験 . . . . .	96

5.3.1	気導音声の収録 . . . . .	96
5.3.2	実験方法 . . . . .	98
5.3.3	実験結果 . . . . .	101
5.3.4	考察 . . . . .	103
5.4	おわりに . . . . .	104
<b>6</b>	<b>骨導音声による情報伝達の様相</b>	<b>106</b>
6.1	はじめに . . . . .	107
6.2	内耳でのスペクトル表現 . . . . .	107
6.3	骨導音声による情報伝達に関する考察 . . . . .	108
6.4	おわりに . . . . .	110
<b>7</b>	<b>結論</b>	<b>112</b>
7.1	本論文で明らかにされたことの要約 . . . . .	113
7.2	今後の展望 . . . . .	113
7.2.1	骨導音声の聴覚フィードバックとしての役割の解明に向けて	114
7.2.2	伝達特性の精緻化 . . . . .	116
7.2.3	骨導音声伝達における位相特性の検討 . . . . .	117
7.2.4	他の研究分野への波及効果 . . . . .	117
	謝辞	119
	参考文献	121
	本研究に関する発表論文	129

# 目 次

1.1	話者内部における音声知覚と音声生成の関係 . . . . .	5
1.2	本研究で取り扱う研究の焦点 . . . . .	14
1.3	本研究で明らかにすること . . . . .	16
1.4	本論文の構成 . . . . .	19
2.1	音声生成過程における音源・フィルタ理論 . . . . .	22
2.2	解剖・生理学的知見から推測される骨導音の伝達経路の概略 . . . . .	24
2.3	外耳道内放射による骨導音伝達の概略 . . . . .	27
2.4	耳小骨慣性振動による骨導音伝達の概略 . . . . .	28
2.5	内耳に直接到達する骨導音伝達の概略 . . . . .	29
2.6	聴覚フィードバックにおける気導・骨導音声の伝達経路 . . . . .	31
2.7	気導音声・外耳道内音声・側頭部振動のパワーと伝達経路の関係 . . . . .	34
3.1	収録装置の概略 . . . . .	38
3.2	骨導マイクロホンの応答特性 . . . . .	41
3.3	耳閉塞効果の周波数特性 . . . . .	42
3.4	母音/a/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡 . . . . .	44
3.5	母音/e/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡 . . . . .	45
3.6	母音/i/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡 . . . . .	46
3.7	母音/u/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡 . . . . .	47

3.8	母音/o/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡 . . . . .	48
3.9	気導音声・側頭部振動・外耳道内音声の LTAS . . . . .	52
3.10	気導音声と側頭部振動・外耳道内音声との間の LTAS の比 . . . . .	56
4.1	測定装置の概略 . . . . .	61
4.2	喉頭加振に伴う喉頭内部での音圧特性 . . . . .	64
4.3	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 F1 における測定結果	66
4.4	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M1 における測定結果	67
4.5	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M2 における測定結果	68
4.6	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M3 における測定結果	69
4.7	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M4 における測定結果	70
4.8	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M5 における測定結果	71
4.9	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の参加者 M6 における測定結果	72
4.10	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数の母音間での平均 . . . . .	74
4.11	口腔内での励振装置 . . . . .	77
4.12	測定環境と測定装置の概略 . . . . .	79
4.13	スピーカーとマイクロホンの装着位置 . . . . .	80
4.14	励振による口腔内の平均音圧レベル . . . . .	83
4.15	口腔内音圧を基準とした伝達関数 . . . . .	84
4.16	口腔内音圧を基準とした側頭部振動への伝達関数と外耳道内音圧への伝達関数の比 . . . . .	86
4.17	喉頭付近の振動および口腔内音圧を基準とした伝達関数の比較 . . . . .	90
5.1	生理学的知見から知られている外耳道・鼓膜と中耳の伝達関数 . . . . .	95
5.2	模擬骨導音声のための FIR フィルタの振幅・位相特性 . . . . .	97
5.3	気導音声と模擬骨導音声のパワー比の主観評価実験のための実験装置の概略 . . . . .	99
5.4	トーナメント方式における刺激提示・回答取得の流れ . . . . .	102
6.1	聴覚モデルから算出された気導音声と模擬骨導音声のスペクトル表現	109

# 表 目 次

3.1	気導音声・側頭部振動・外耳道内音声の F0 分析結果（母音/a/）	43
3.2	気導音声・側頭部振動・外耳道内音声の LTAS におけるスペクトル傾斜	54
4.1	喉頭付近の振動を基準とした伝達関数に見られる参加者共通のピーク周波数の平均	73
5.1	各提示刺激においてトーナメントで 1 位・2 位・4 位以内に選出された件数	103

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 はじめに

音声はヒトのコミュニケーションにおける最も重要なメディアである。音声コミュニケーションは、声を出すこと（音声生成）と、声を聴くこと（音声知覚）の繰り返しにより行われる。日常会話の場面では、相手の声を聴き、自身が話したい内容を意図し、自らの口を動かして声を出すという一連の過程を踏むが、多くの場合、これらの過程ひとつひとつを意識せずに遂行する。周りが騒がしい環境での会話では、気づけば自然と口を大きく動かして声を張り上げているということがあろう。また、こうした動作を、敢えて意識的にするという場面もあるかもしれない。歌唱のように意識的に声を張り上げたり、ふだんの日常会話では出さないような高い声を出すこともある。このように、ヒトは状況に応じて音声生成系を巧みに制御することで多様な特徴をもつ音声を生成する。また、多様な特徴をもつ音声を、聴き手側は巧みに聞き分けることができる。では、ヒトは状況に応じた多様な発話を、どのようなメカニズムで実現しているのだろうか。

こうしたヒトの優れた音声生成・音声知覚のメカニズムは古くから個別に科学的究明が行われ、現在までに音声合成・音声認識技術への工学的応用も盛んに進められている。しかし、それぞれが表裏一体の関係にある音声生成・音声知覚については、両者の相互的な働きを含めた統合的な解明が望まれる。音声生成と音声知覚の関係性については古くから理論が提唱されている。主には、音声は通常の音響信号と同様の過程で知覚されるとする聴覚説 [1] と、音声知覚の際には通常の音響信号に対する知覚過程とは異なり、音声生成（運動）に関わる内部表現を参照する特別な知覚過程を有するとする運動理論が提唱されてきた [2]。現在では脳機能計測技術が発展したことで、脳科学的側面からも研究が進んでいるが [3]、ヒトの発話メカニズムにおける生成・知覚の関係性については未だ十分に解明されたとは言えない。

発話者は、発話内容を脳でプランニングし、それを実現するように音声生成系（発声器官・調音器官）に運動指令することでこれらを運動させて空気振動としての音声を生成する。聴取者は、空気振動としての音声（あるいは音声以外の外界の音も）を聴覚末梢系で周波数分解して神経インパルスに変換し、脳に至る聴覚中枢系の働きによってひとつの音声（あるいはその他の音）として統合して知覚す



る。これら一連の情報交換は、ことばの鎖 (Speech chain) と呼ばれる [4]。ヒトの発話における運動制御は、聴覚や体性感覚、その他の感覚情報が統合されることにより実現すると考えられている [5]。外界での空気振動 (音響信号) として伝搬する発話者の音声は、聴取者と同様、発話者自身によっても聴取されることになる。このような発話者自身の聴覚にフィードバックされる音響信号は聴覚フィードバックと呼ばれる。また、音声生成系の運動に伴い発話者自身は運動情報を体性感覚として知覚する [3]。さらに、発話における振動触覚情報の重要性も示唆されている [6]。図 1.1 に、話者内部における音声知覚と音声生成の関係を示す。

「ヒトは自分の声を聴いているのか」という疑問に対して、これまで聴覚フィードバックに着目した検討が行われてきた。話者が生成した音声に遅延や変形を施して話者に知覚させると、発声に変化することを示した知見から [7,8]、発話中における自身の音声のモニタリングが重要であることが示されている。このように、発話における聴覚 (音声知覚) の役割については多くの重要な知見が得られている。しかし、発話における聴覚の役割を解明するための前提として、発話における「話者自身の聴覚からの情報」については十分に理解されたと言えるだろうか。

自身の録音した音声を聴いたとき、違和感を覚えた経験が一度はあるだろう。これは、自身が発話して聴いている音声外界の空気振動 (気導) と頭蓋骨の振動 (骨導) の両方で伝達されるのに対し、録音した音声は気導でのみ伝達されることに起因する。このように、発話中での自らの骨導音声の知覚は身近な現象である。しかし、上述した聴覚フィードバックに関する検討では専ら気導音声のみが対象されており、骨導音声の知覚の役割について、それ以前に骨導音声の知覚が発話に対して何らかの影響を与えているのかどうかさえ、明らかになっていない。歌唱における音高の制御において、自らの骨導音声の知覚が役立っている可能性を議論した報告は見られるが [9,10]、それを支持する知見は得られていない。

発話における「話者自身の聴覚からの情報」の全容を明らかにする上で、発話により生じる骨導音声の音響的特徴や骨導伝達特性を、気導とは切り分けた形で明らかにする必要がある。気導音声の伝達については、音源・フィルタ理論 [11] のように音声生成のシステムが複数のサブシステムの線形結合としてモデル化される。一方、骨導音声の伝達過程については統一的なモデル化には至っていない。これまで、骨導音知覚については主に死体の頭蓋骨などを使った測定 [12] や心理

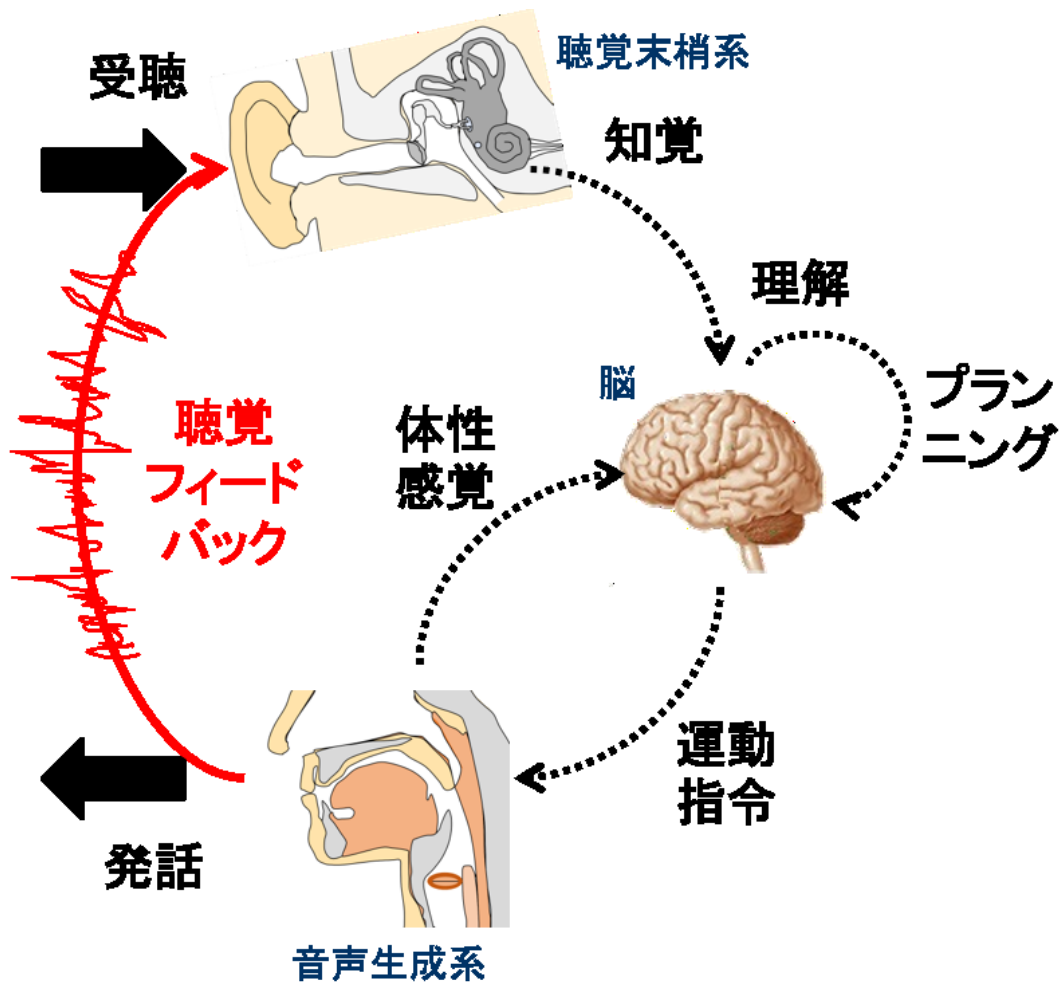


図 1.1: 話者内部における音声知覚と音声生成の関係

物理的手法 [13] から究明が進められ、伝達メカニズムや伝達経路の一端が明らかになりつつある。話者内部（発話器官）を音源とする骨導の伝達システムの様相を明らかにすることができれば、骨導音知覚の研究分野に対する知見の拡充とともに、発話における「真の」聴覚フィードバックの役割を解明することに繋がる。また、骨導音声は話者内部を伝達する音響信号という点で工学的にも応用性が高く、伝達過程の究明は骨導デバイスによる音声コミュニケーションの発展にも資する。

以上の点から、本研究では発話における聴覚フィードバックについて、これまで十分な解明に至っていない骨導音声知覚に焦点を当てる。骨導音声が発話器官を出発点としてどのような伝達過程を経て聴覚抹消系に至っているのかの解明を目指す。

## 1.2 本研究の背景

### 1.2.1 聴覚フィードバックの関連知見

発話における音声知覚と音声生成の相互作用を明らかにするために、聴覚フィードバックの重要性に着目した研究が行われてきた。以下に、聴覚フィードバックに関連する現象や研究アプローチと、それらから明らかになっている知見と課題を述べる。

#### ロンバード効果

発話中に外界の騒音レベルが上昇すると、話者の音声のパワーや基本周波数 (F0)、第一フォルマント周波数 (F1) などが上昇する現象が知られている [14]。この現象はロンバード効果と呼ばれ、音声生成が聴覚情報からの影響を受けることを示す重要な知見である。ロンバード効果は、雑音レベルの変化に応じて音声生成系を制御し、他者への音声伝達が円滑に保たれるようにするための反射（不随意的な現象）であると考えられている [15]。

## 変形聴覚フィードバック

音声知覚と音声生成の結びつきを示すために、話者自身の音声の音響的特徴を変形し話者にフィードバックして音声生成系の応答を観察するという方法が多数行われてきた。そのひとつの手法として、遅延聴覚フィードバック (Delayed auditory feedback, DAF) がある。健常話者に対して生成音声を 100 ~ 200 ms 程度遅延させて提示すると、吃音に類似した発話スタイルや話速の減少が見られる [16]。この知見は、聴覚フィードバックによる知覚と生成との間の時間的整合性が破綻すると、正常な発話が困難になることを意味する。この知見とは反対に、吃音話者に対して生成音声を約 93 ms 遅延させる DAF の下で発話させると、吃音症状が低減することが報告されている [17]。この現象を応用して、吃音話者に対するリハビリを目的として DAF の手法が用いられている [18]。DAF の手法は高度な信号処理を必要とせず、比較的簡易な実験装置により実現できるため、DAF の下での発話の様相については磁気テープが普及し始めた 1950 年代より多くの報告がある。しかし、DAF は上述のように発話過程の破綻を伴うため、得られた知見が直ちに聴覚フィードバックの重要性を示すものであるとまでは言えない。

発話過程の破綻を伴わずに聴覚フィードバックの性質を検討する手法に、生成音声の音響的特徴をリアルタイムに微小変形した音声刺激を話者に聴取させる変形聴覚フィードバック (Transformed auditory feedback, TAF) がある。発話中、生成音声の F0 を微小に上昇/下降させる摂動を与えると、数百 ms の潜時を伴って摂動とは逆方向に F0 を変化させる補償応答が見られることが分かっている [19]。また、F1 や F2 に対応するスペクトルピークの微小変形に対しても、同様に生成音声に補償応答が見られることが分かっている [20,21]。TAF によるフォルマントへの摂動に対する補償動作は、生成音声の音響分析のみならず、音声生成系の筋電信号解析からも示されている [22]。

## 聴覚以外の感覚フィードバックとの関連性

上述したように、聴覚フィードバックに関連する複数の現象の観察や心理物理実験により、発話における音響レベルでのモニタリングの重要性が示されている。発話においては聴覚フィードバックの他にも、図 1.1 に示した体性感覚など複数の

モニタリンググループの存在が示唆されており [5], 脳を中心として多感覚からの情報を統合して発話の運動制御が行われているものと予想される。

聴覚フィードバックをマスキング雑音により遮断したときの発話への影響を調べることで, 聴覚フィードバックと他の感覚情報との関連性が検討されている。基準音により目標の音高を提示し, 生成音声の音高を目標の音高に合わせて維持するよう発声させるとき, 雑音提示時には非提示時に比べ基準音からの F0 の逸脱が大きくなる [23]。これは, 聴覚フィードバックにおける音高情報のモニタリングの重要性を示すものであるが, 聴覚フィードバックの手がかりを使えない状況では体性感覚や喉頭での振動覚など他の感覚情報を手がかりに発声を継続できることが示唆される。

喉頭音源を模擬した調波複合振動を喉頭付近に触覚提示して F0 への摂動を与えたときにも生成音声の F0 に補償応答が観察されている [6]。このことから, 聴覚フィードバックに加え喉頭付近での振動覚も手がかりにして音高情報のモニタリングが行われていることが示唆される。

### 聴覚フィードバック実験における骨導音声知覚の影響

上述したさまざまな検討から, 聴覚フィードバックが発話時の音高情報や音韻情報のモニタリングに重要な役割を果たしていることが明らかとなっている。ただし, これまでの検討では図 1.1 に示すとおり, 聴覚フィードバックが基本的に気導音声として聴覚に伝達されていることを前提に議論されている。1.1 節に述べた通り, 発話中には気導音声だけでなく骨導音声も話者に知覚されていることは明らかである。

変形聴覚フィードバックの実験においては, 変形された気導音声のみを話者に知覚させることが望ましい。しかし, 如何なる聴覚フィードバック実験においても変形されずに聴覚に到達する骨導音声も同時に知覚されてしまうことは避けられず, 実験上の大きな課題であるとされている [3]。多くの聴覚フィードバック実験では骨導音声をマスキングするために低域通過雑音やピンク雑音を高い音圧レベル (約 50 ~ 90 dB) で提示しながら, 変形した聴覚フィードバック音声を提示するという対策が講じられている [19,24,25]。ただし, これらのマスキング雑音によって骨導音声が確実にマスキングされているかどうかについては検証されてい

ない。この課題に対する解決に向けて、骨導から伝達される聴覚フィードバックが発話にどのような影響を与えているかを、気導経路とは切り分けて検討する必要がある。

## 1.2.2 骨導音声とその聴覚フィードバック

発話中の話者自身の骨導音声の知覚については1930年代より既に検討されている [26] が、骨導による音の知覚メカニズム自体が複雑であることから検討が難しく、今日までに明確な理解には至っていない。本項では、骨導による音の伝達や知覚メカニズムについての知見を述べるとともに、発話中に知覚される話者自身の骨導音声についての知見および未解明な点を述べる。

### 骨導音知覚

空気振動としての音が外耳で集音され、鼓膜、耳小骨を介して蝸牛に到達する経路を気導と呼び、気導で聴取される音を気導音と呼ぶ。それに対し、頭蓋骨や軟組織の振動が蝸牛に到達（することで“音”として知覚）する経路を骨導と呼び、骨導で聴取される音を骨導音と呼ぶ。気導音を聴取できる能力を気導聴力、骨導音を聴取できる能力を骨導聴力と呼ぶ [27]。上述のように気導音はひとつの決まった経路を伝搬するが、骨導音は頭蓋骨内を振動として伝搬しているため、2.2節で後述するようにその頭部振動は聴覚末梢系のあらゆる場所に（外耳道内への放射や中耳・内耳への振動伝達として）到達し得る。このような伝達経路の違いから、難聴者に対する症状（伝音性難聴・感音性難聴）の診断には気導・骨導聴力をそれぞれ測定することが有効である。

骨導音を聴取する方式としては、頭部に圧着した振動子（トランスデューサ）から振動を伝える方式（経皮骨導）が一般的である。経皮骨導による方式は補聴器、ヘッドホンや骨導電話機などに広く利用される [28]。また、振動子を頭蓋骨に埋め込んで皮膚を介さずに頭蓋骨を振動させる方式（直接骨導）もある。直接骨導による方式は骨固定型補聴器（Bone-anchored hearing aid, BAHA）に応用されている [29]。他には、歯を直接加振することで頭蓋骨に振動を伝える歯骨導 [30] や、耳軟骨を振動させて外耳道内に音を放射させる軟骨導 [31] などの聴取方式がある。

骨導音聴取特有の現象としては、20 kHz 以上の高周波音（骨導超音波）を知覚できることが知られており、骨導超音波知覚特性の生理・心理学的側面からの検討が行われている [32]。また、これらの知見を応用した骨導超音波補聴器が開発されている [33]。

## 骨導音声

骨導を介して伝搬する音声のことを骨導音声と呼ぶ。骨導音声は空気を伝搬する通常の音声（気導音声）と異なり、発話器官内で生じた空気の振動あるいは喉頭での振動そのものが頭蓋骨を振動させることで生じる。このため、頭部や皮膚の振動を骨導マイクロホン（振動センサ）で検出することで気導での雑音の影響を受けずに音声を収録することができる。音声信号における音素ごとの振幅、あるいは長時間的な振幅の変動は、気導で収録された場合と骨導で収録された場合では大きく異なる [34]。また、骨導音声の収録の際には、骨導マイクロホンの接着位置によって収録音声のレベルやスペクトル特性が異なることが知られている [35]。骨導音声の収録における課題として、気導で収録された音声に比べ明瞭性が著しく損なわれることが分かっている [36]。収録された骨導音声の明瞭性回復の手法が検討されており [37]、音声認識などへの工学的応用が期待される。

## 発話における骨導音声の知覚

話者自身が知覚する音声（自己聴取音声）の聴感に対して、骨導による音声の伝達が大きく関わっていることは明確である。収録した気導音声の周波数成分をイコライザーで調整することで、知覚的に自己聴取音声の音色（声質）に近づける検討が行われている [38–40]。これらの検討から、自己聴取音声は気導音声に対して 1 kHz 以下の低域成分を強調し、1 kHz 以上の高域成分を減衰するような知覚特性を有することが明らかとなった。この知覚特性から、話者の頭内を伝搬する骨導音声が高域減衰特性を有していることが示唆される。しかし、自己聴取音声と気導音声の間の声質を知覚的に比較しただけでは、骨導音声の伝達過程や知覚メカニズムを詳細に議論することが難しい。

骨導音知覚の観点からヒトや動物の発声と聴覚の関連性について検討した最初期の報告は von Békésy によるものである [41]. ここでは、話者の気導音声の知覚を遮断させるためのチューブを外耳道内に挿入しながら発声させたとき、知覚される自己聴取音声のレベルが 6 dB (約 1/2 倍) 低下することを示した上で、「自己聴取音声において気導音声と骨導音声は概ね同程度の音の強さで伝達されている」と結論づけた. しかし、この知見からは、自己聴取音声の知覚に対する骨導音声伝達の寄与をトータルのパワーという点でのみ見積もることができたに過ぎず、周波数成分ごとの寄与（すなわち、伝達特性）が如何なるものであるかという点は長らく未説明のままであった.

骨導音声は発話器官から外耳や中耳・内耳に至るさまざまな経路を通じて伝達されると推測されており [42], 中耳以降に到達する骨導音声成分は直接観測することができない. このことを踏まえ、今日に至るまで骨導音声に関わる伝達特性の測定については専ら次の二種類の方法で行われている.

1. 観測可能である外耳道内への伝達成分にのみ着目し、発話時に外耳道内に漏れ出る音声信号のスペクトル特性を分析する.
2. 自己聴取音声を用いたマスキング特性を測定することで、骨導経路全体での伝達特性を心理物理的に推定する.

Hansen & Stinson は、「骨導音声の伝達においては外耳道壁の振動が外耳道内に漏れ出た（外耳道内放射）後、気導音と同様にして蝸牛に到達する伝達経路の影響が支配的である」という仮定を置いた [43]. この下で、気導音声の長時間スペクトルと外耳道内放射される音声信号（外耳道内音声）の長時間スペクトルの比によって気導・骨導間の伝達関数を推定し、気導・骨導間の伝達関数は約 0.6 kHz 以下の低域通過特性を有する結果を示した. Reinfeldt らは複数の音韻を単独で発話した際の気導音声のスペクトルと外耳道内音声のスペクトルの比を分析した. さらに、気導・骨導提示音の最小可聴値をもとにして気導音声と外耳道内音声の間の相対感覚レベルを算出した [44]. この結果から、自己聴取音声の知覚における骨導音声伝達の寄与は音韻によりさまざまではあるが、骨導音声伝達はとくに 1 ~ 2 kHz の周波数成分の知覚に大きく寄与している可能性を示唆した. ただし、外耳道内放射のみに着目したこれらの検討では、骨導経路全体での伝達特性が示され



たとは言い難い。

Pörschmann は、「骨導音声の伝達においては外耳道内放射だけでなく、中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できない」という立場を取り、すべての骨導経路の合成系としての伝達特性を心理物理的手法で検討した [45]。ここでは、話者に骨導音声のみを知覚させる（気導音声の知覚を遮断する）ためのイヤーマフを装着した状態で発声させ、その音声をマスクとした純音のマスクング閾値を測定することで骨導経路全体の伝達特性を分析した。さらに、録音した話者の気導音声をイヤーマフ内から提示し、その提示音声をマスクとした純音のマスクング閾値を測定することで気導経路の伝達特性を分析した。これらの伝達特性の関係から、骨導音声伝達は自己聴取音声の 0.7 ~ 1.2 kHz の周波数成分の知覚に大きく寄与している可能性を示唆した。また、発声時の気導音声と外耳道内音声の間のスペクトル比から外耳道内放射による骨導経路の伝達特性を推定し、骨導音声の伝達においては外耳道内放射による伝達経路の影響は支配的ではないと結論づけた。ただし、ここで得られた外耳道内放射による骨導経路の伝達特性は測定機器の影響を受けたおおよその推定であることが言及されている。

### 1.3 本研究の動機・位置づけ

前節に述べた従来知見を見ると、発話中には気導音声に加えて骨導音声も知覚していることが明らかであるにもかかわらず、骨導音声知覚が発話に与える影響について気導音声と切り分けた議論がなされていない。従来検討から気導による聴覚フィードバックの性質に絞って議論するとしても、聴覚フィードバック実験において変形のない骨導音声の知覚による影響は無視できるものであるかどうかには疑問の余地がある。将来的に骨導の聴覚フィードバックの性質を議論していくためには、骨導音声の音響的特徴を操作したり、その知覚を遮断したりするような手法を検討する必要がある。しかし、そもそも骨導音声の伝達過程が不明である現状では、上記の手法を直ちに検討することは不可能である。発話における「話者自身の聴覚からの情報」の全容の解明は、骨導という伝達システムがどのような情報の伝達を担っているのかという大きな疑問の解決を図らなければ成し遂げられない。発話器官を出発点として、(1) 骨導経路から音声の如何なる音

響的特徴が伝達されているのか、(2) 如何なる伝達経路において如何なる伝達特性を有し、それぞれの経路がどの程度知覚に寄与しているのか、これらのをを体系化することが求められる。

骨導音声の音響的特徴については、工学的応用を意識した音響分析が多数行われている [34–36] 一方で、得られた特徴が骨導伝達とどのように結びついているのかについては不明な点が多い。骨導音声が気導音声に対して相対的に高域減衰特性を有するという一点については [38–40, 43, 45]、骨導音声の伝達において概ね統一的に理解されている。しかし、骨導音声に関わる伝達特性の検討については、中耳以降の骨導伝達経路に対する解釈は一貫しておらず [43–45]、統一した結論を導き出せていない。本研究では、骨導音声の伝達が発話器官を出発点とすることを踏まえ、骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見をもとにサブシステムを推測することで、情報科学的視点から骨導音声伝達の解明を目指す。本研究で取り扱う研究の焦点を図 1.2 に示す。

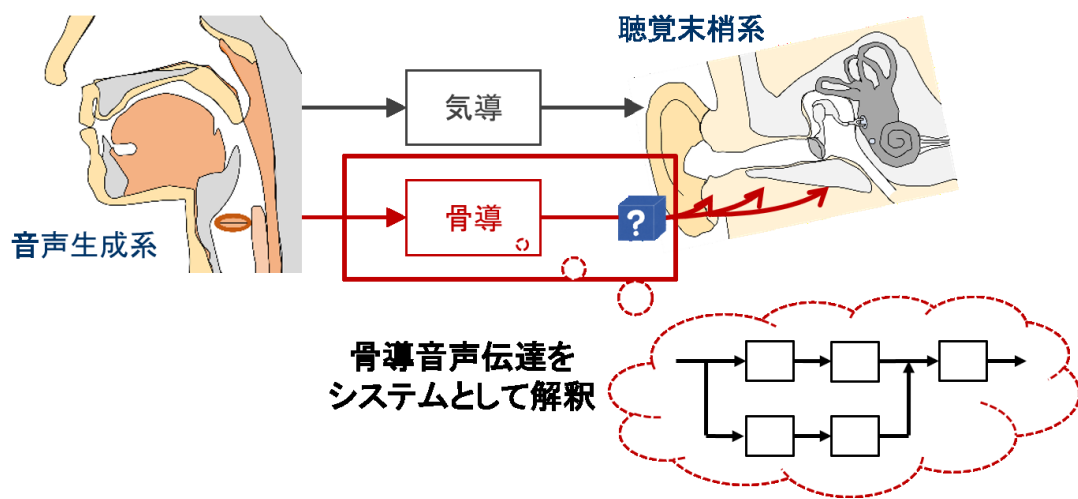


図 1.2: 本研究で取り扱う研究の焦点

## 1.4 本研究の目的

本研究では Pörschmann [45] と同様に、「骨導音声の伝達においては外耳道内放射だけでなく、中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できない」という立場を取る。この上で、骨導伝達経路をブラックボックスとしてではなく、生理学・心理学的知見をもとにサブシステムを定義し、外耳経由の伝達だけでなく中耳以降での伝達経路における特性および知覚的寄与に着目する。

本研究の目的は、発話器官を出発点とした骨導音声伝達システムの様相を明らかにすることである。観測可能なサブシステムに着目した物理測定・主観評価と従来の生理学的知見を組み合わせることにより、(1) 発話に関わる如何なる音響的特徴が骨導音声に含まれるか、(2) 骨導音声の伝達経路において如何なる伝達特性を有しているかについて明らかにすることを目指す。本研究で明らかにすることの概略を、図 1.3 に示す。

## 1.5 本研究の構成

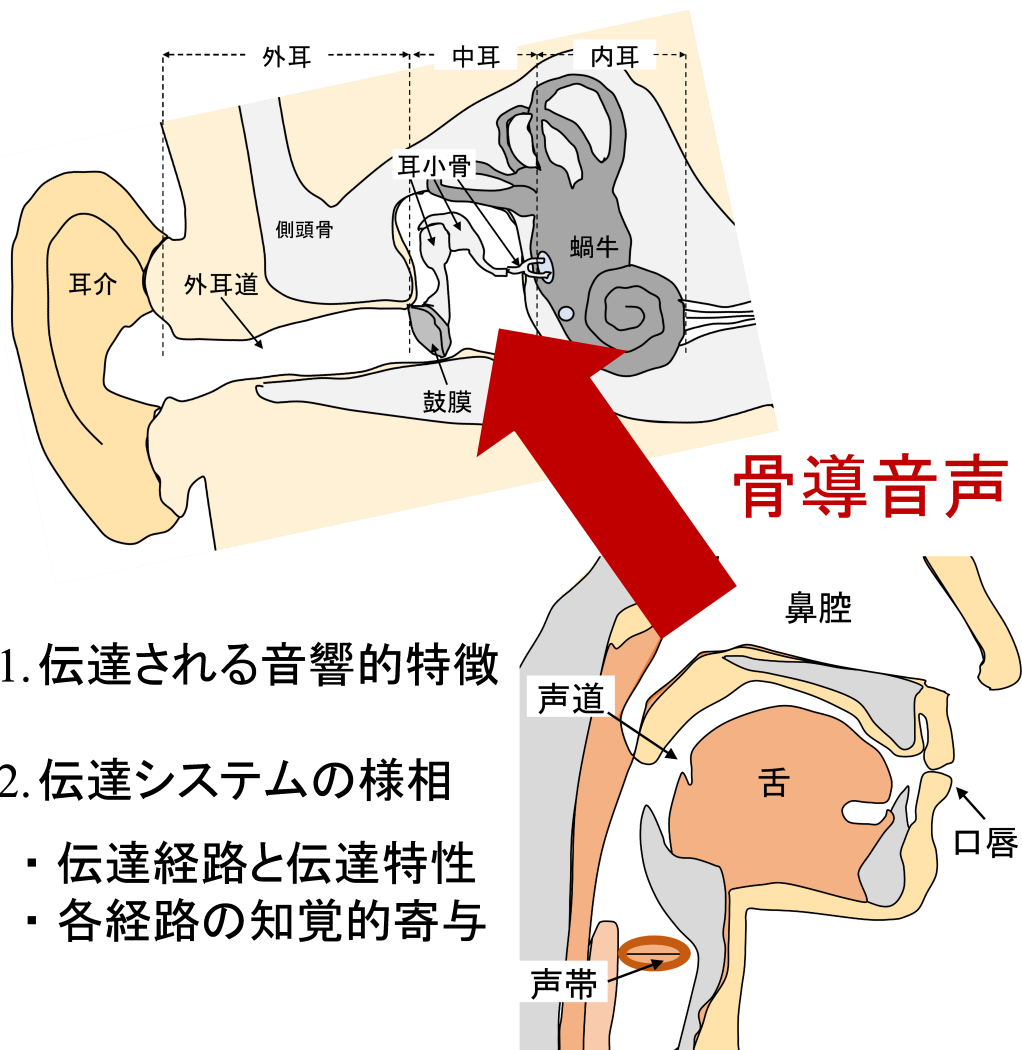
本論文は、7章で構成される。図 1.4 に本論文の構成を図示する。

### 第 1 章:

本論文が対象としている研究分野の背景について述べ、その問題点を指摘した。本研究の動機、および当該分野における本論文の位置づけを示し、目的を述べた。

### 第 2 章:

本論文において、発話器官を出発点とした骨導音声の伝達過程を明らかにするための前提知見と方略を述べる。最初に、音声生成過程の音源・フィルタ理論について概説する。次に、骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見を概説する。続いて、音声生成過程の理論と骨導音知覚に関する知見を統合することで、骨導音声の伝達過程におけるサブシステムを定義し、それらの線形結合として伝達経路をモデル化する。最後に、本研究における伝達過程の解明に向けた方略として、外



1. 伝達される音響的特徴
2. 伝達システムの様相
  - ・ 伝達経路と伝達特性
  - ・ 各経路の知覚的寄与

図 1.3: 本研究で明らかにすること

耳を経由する伝達経路と中耳以降に直接到達する伝達経路に分割した音響的特徴・伝達特性の検討について述べる。

### **第3章:**

研究の第一段階として、第2章での前提知見の下で、骨導音声を通じて伝達される音響的特徴（F0およびスペクトル特徴）を外耳経由の伝達と中耳以降への直接伝達のそれぞれで分析する。分析結果から、骨導経路を通じて如何なる音響的特徴が伝達されているかについて検討する。

### **第4章:**

研究の第二段階として、第2章での前提知見の下で、骨導経路の伝達特性を外耳経由の伝達と中耳以降への直接伝達のそれぞれで物理測定する。最初に、喉頭付近の振動を基準とした伝達特性を測定する。次に、口腔内音圧を基準とした伝達特性を測定する。最後に、これら二つの結果から、骨導音声の声道内音圧伝搬の優位性について考察する。

### **第5章:**

研究の第三段階として、外耳経由の伝達と中耳以降への直接伝達の両者の知覚への寄与を検討する。第4章で測定されたそれぞれの伝達経路に対応する伝達特性を用いて、気導音声から2種類の模擬骨導音声を作成する。気導音声と2種類の模擬骨導音声の計3種類の音声を混合し、自己聴取音声の声質に最も近づくときの3種類の音声のパワー比を検討する。

### **第6章:**

研究の最終段階として、第3章～第5章の結果を統合し、骨導音声による情報伝達の様相を推測する。気導音声と2種類の模擬骨導音声について、聴覚モデルから計算される内耳でのスペクトル表現を比較する。これらのスペクトル表現を

基にして、聴覚フィードバックとしての音高・音韻情報の伝達に骨導音声がどのように関与している可能性があるかを考察する。

## 第7章:

本論文で得られた結果を要約し、今後の展望について述べる。

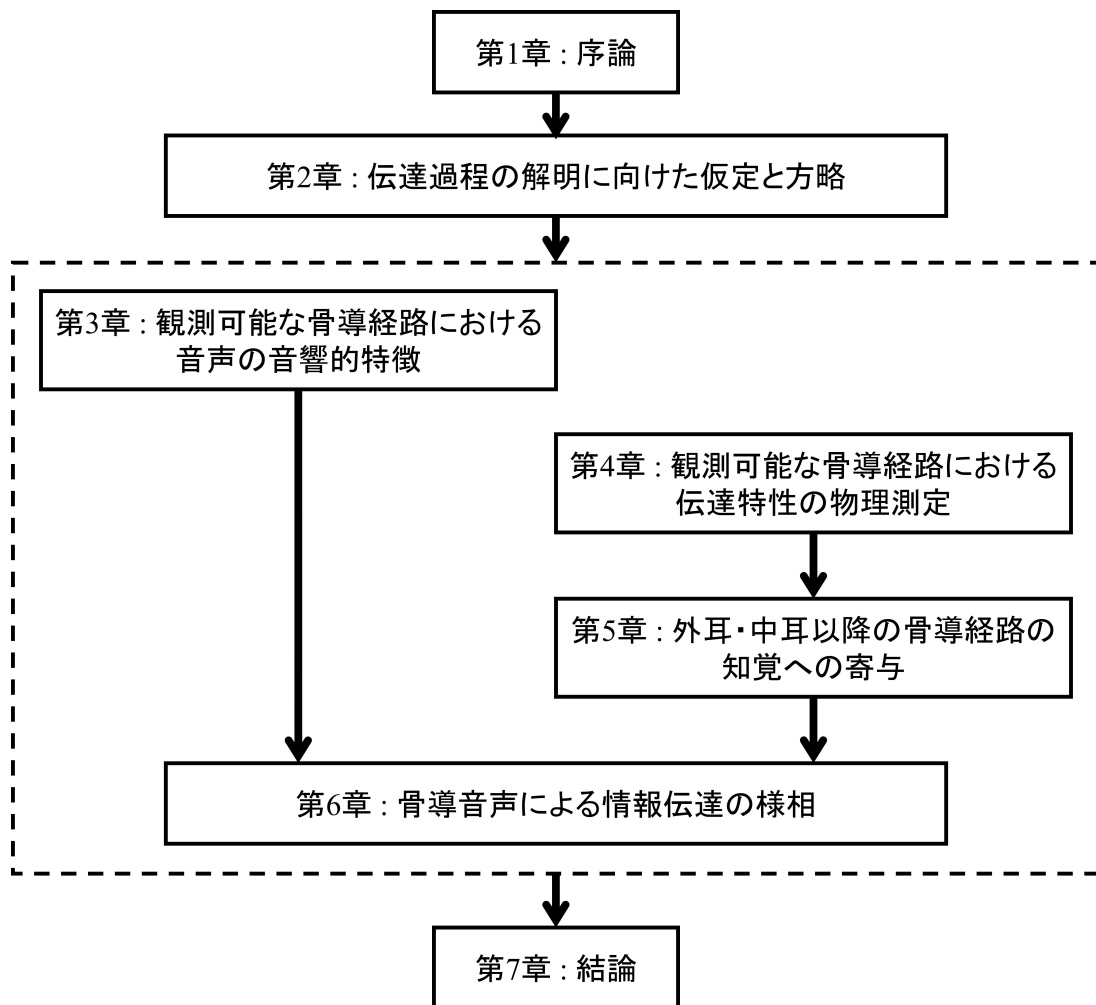


図 1.4: 本論文の構成



## 第 2 章

# 伝達過程の解明に向けた前提知見と 方略

## 2.1 はじめに

本章は、発話において話者自身に伝達される骨導音声の伝達過程を明らかにするための方略を示すことを目的とする。

はじめに、音声生成過程の音源・フィルタ理論について概説し、骨導音声伝達における発話器官からの出発点について述べる。

次に、骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見を概説し、骨導音声伝達における聴覚末梢系への到達点について述べる。

続いて、音声生成過程の理論と骨導音知覚に関する知見を統合し、聴覚フィードバックにおける気導・骨導経路を複数の伝達システム線形結合としてモデル化する。

最後に、上記の前提知見に基づき、骨導音声の音響的特徴と骨導の伝達経路、および各経路の知覚的寄与を明らかにするための方略を示す。

## 2.2 音声生成過程の音源・フィルタ理論

発話器官は、呼吸器官（肺）、発声器官（声帯）、調音器官（声道）の3つの単位で構成されている [46]。有声音の発声の際には、肺から送られる空気流が声帯を通過することにより、声帯からパルス調の音が発せられる。この音は喉頭音源と呼ばれる。気導音声の伝達において、喉頭音源は声道の共鳴特性の影響を受けた後、口唇から外界に放射される。このように、声帯による音源生成と声道による調音（声道フィルタ）および口唇からの放射というシステムの結合で表現する音声生成の機能モデルを、音源・フィルタ理論という [27]。音源・フィルタ理論の概略を図 2.1 に示す。喉頭音源のスペクトルは約  $-12$  dB/octave の傾斜をもつ調波スペクトルであることが知られている。声道の共振特性に対応するスペクトル上のピークをフォルマントと呼び、フォルマントはとくに母音の知覚に大きく寄与している。口唇での放射特性は  $+6$  dB/octave の高域強調特性であることが知られている。

Howell は発話器官からの骨導音声の伝達に関して、(1) 声帯振動から軟組織や頭蓋骨の振動が生じる過程と、(2) 声道（口腔）内の音圧伝搬により声道壁が振動することで軟組織や頭蓋骨の振動が生じる過程に分かれると推測している [47]。

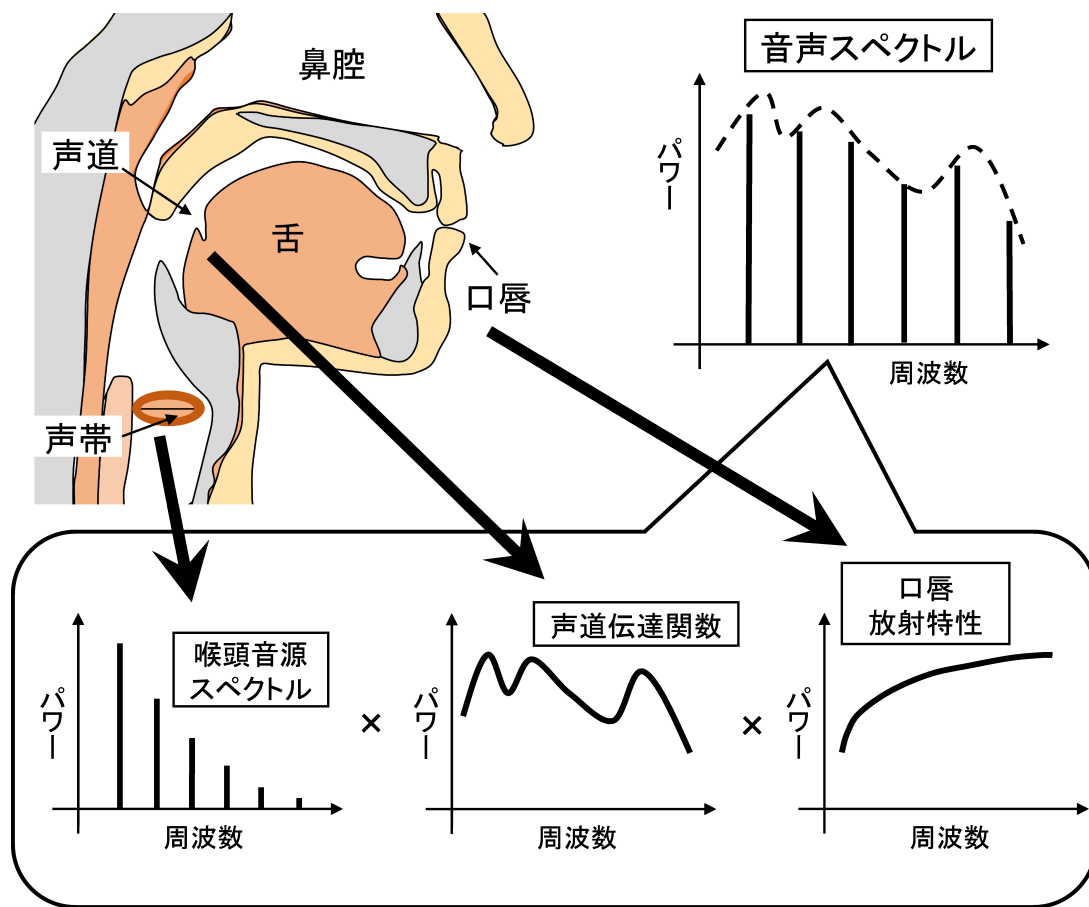


図 2.1: 音声生成過程における音源・フィルタ理論

## 2.3 骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見

骨導音知覚に関する最初期の研究の出発点は、「骨導音は気導音と同様に蝸牛で処理されるのか」という疑問であった。von Békésy は、「骨導音は気導音と同様に、最終的に基底膜振動に集約される」という仮説を立て、気導・骨導音どちらの知覚的な相殺実験を通して仮説を検証した [26]。骨導音の知覚においても気導音と同様に、頭部振動が複数の経路を通じて最終的に蝸牛に到達して知覚されることが示唆されている。

解剖・生理学的検討で得られた知見を踏まえ、Tonndorf や Stenfelt らにより骨導音知覚に寄与する伝達経路の概要が示されている [42,48,49]。現在のところ、骨導音知覚における主要な伝達経路は下記の 4 つであると推測される。

- (1) 外耳道内放射
- (2) 中耳の耳小骨慣性振動（慣性骨導）
- (3) 内耳のリンパ液慣性振動
- (4) 蝸牛壁の圧縮・伸長（圧縮骨導）

図 2.2 に、解剖・生理学的知見から推測される骨導音の伝達経路の概略を示す。以下に、各伝達経路における伝達メカニズムと伝達特性を述べる。

### 2.3.1 外耳道内放射

気導音の伝達においては、外耳は耳介で集められた空気振動を外耳道を介して鼓膜に伝達する。耳介の形状によって到来した音の周波数特性が変化するため、耳介は音の到来方向の知覚に寄与している。外耳道はおよそ 3 kHz 付近において共鳴する特性を有する [50]。

骨導音の伝達においては、頭蓋骨や軟組織の振動に由来する外耳道壁の振動が外耳道内への空気振動として放射され、気導音として中耳・内耳に到達するものがある。この現象は外耳道内放射と呼ばれる [48]。外耳道内放射による骨導音伝達の概略を図 2.3 に示す。

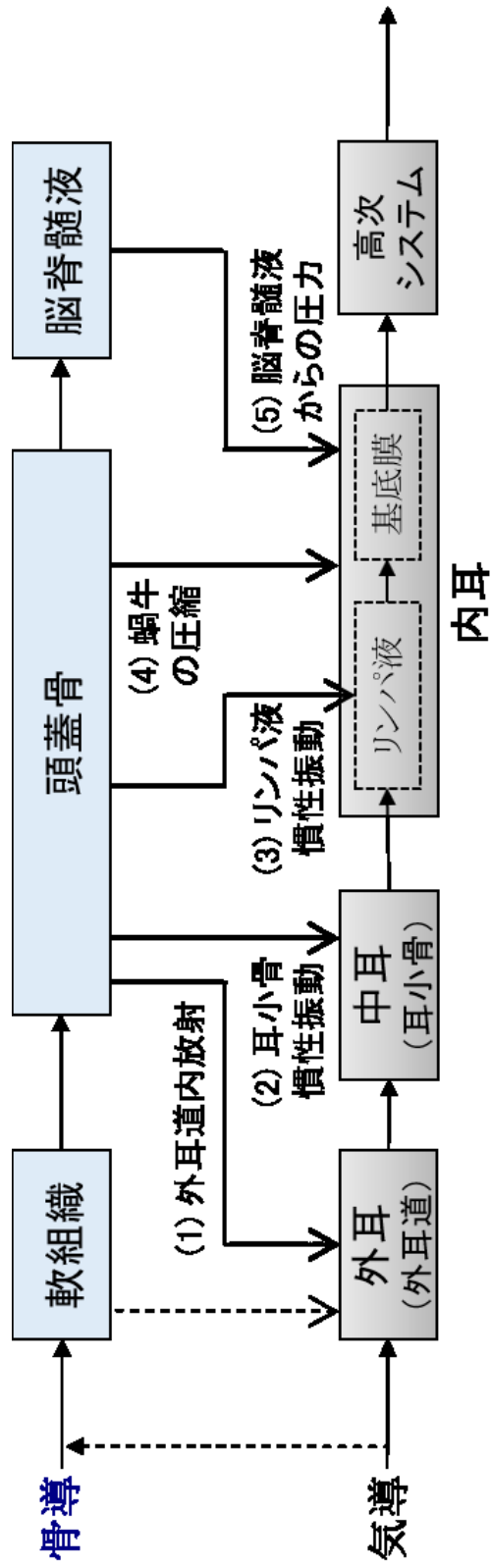


図 2.2: 解剖・生理学的知見から推測される骨導音の伝達経路の概略

骨導音提示において外耳道を塞ぐと、外耳道内放射によって漏れ出た気導音が逃げ場を失うことで低域強調される。この現象は耳閉塞効果 (Occlusion effect) と呼ばれる [51,52]。骨導音提示に伴う外耳道内音圧は、外耳道開放時には 0.5 ~ 2.7 kHz の周波数帯域において約 +15 dB/octave の高域強調特性を有する一方、外耳道閉塞時には開放時に比べて 2 kHz 以下の低域成分が最大約 15 dB 増加することが報告されている [53]。

### 2.3.2 中耳での伝達経路

気導音の伝達において、外耳道を通過した音波は鼓膜に到達する。中耳は鼓膜に伝わる空気振動を機械振動に変換し、蝸牛のリンパ液に圧力を効率よく伝えるためのインピーダンスマッチングの役割を果たしている [54]。

中耳の耳小骨は鼓膜および前庭窓と接続している。骨導音の伝達に伴って頭蓋骨が振動すると、耳小骨も慣性質量によって振動することになり、蝸牛の前庭窓を刺激する。この現象は慣性骨導と呼ばれる [48]。中耳の耳小骨慣性振動による骨導音伝達の概略を図 2.4 に示す。慣性振動によるアブミ骨の振動速度の計測では、アブミ骨の振動速度は蝸牛壁の基準振動速度に対して 1 ~ 3 kHz の周波数帯域で相対的に大きくなる傾向がある [55]。このことから、中耳の耳小骨慣性振動による伝達では、耳小骨の共振周波数付近である 1 ~ 3 kHz での成分が主要であることが明らかになっている。

中耳の周囲は空洞になっており、鼓膜と側頭骨により覆われている。この腔体は鼓室と呼ばれる。頭蓋骨の振動に伴い、鼓室内の空気振動が生じ、知覚に影響を与える可能性が生理学的に検討されてきた。しかし、動物での測定 [56] やヒトの死体の標本を用いた測定 [55] により、鼓室内部の空気振動が中耳の機械振動に与える影響は小さいことが示唆されており、現在に至るまで中耳での骨導伝達は完成骨導による寄与が主要であると考えられている。

### 2.3.3 内耳以降の伝達経路

中耳の機械振動は蝸牛の前庭窓を刺激し、蝸牛内部の非圧縮性リンパ液を振動させる。蝸牛の内部は基底膜によって、前庭窓側の前庭階と蝸牛窓側の鼓室階に

区切られており，リンパ液の振動に伴って基底膜上の特定の共振位置に振動が引き起こされる．基底膜上の内毛細胞のはたらきにより，基底膜振動に同期して神経伝達物質が放出され，それが聴神経に到達することにより神経発火が起こり，中枢系に情報が伝達される [54]．

骨導音の伝達に伴う頭蓋骨振動により，内耳が直接加振され，蝸牛内部のリンパ液の慣性力により基底膜上の進行波が引き起こされて音として知覚される．このリンパ液の慣性振動による伝達経路は外耳道開放時における主要な伝達経路であることが推測されており，とくに 1 kHz 以下の低域成分の伝達を担っていると述べられている [42,49]．また，頭蓋骨振動に伴って蝸牛の前庭階と鼓室階がそれぞれ圧縮・伸長することにより，両者の不均等な断面積変化により音を知覚することが示唆されている．この伝達メカニズムは圧縮骨導と呼ばれ，4 kHz 以上の高域成分の伝達を担っていると述べられている [57]．内耳に直接到達する骨導音伝達の概略を図 2.5 に示す．

蝸牛は蝸牛水管を通じて脳脊髄と繋がっているため，骨導音の伝達に伴い蝸牛水管を経由した圧力流入が生じ，蝸牛のリンパ液に影響を及ぼしている可能性が議論されている [58]．しかし，このメカニズムによって骨導音の知覚が生じているかについては未だ明らかになっていない．

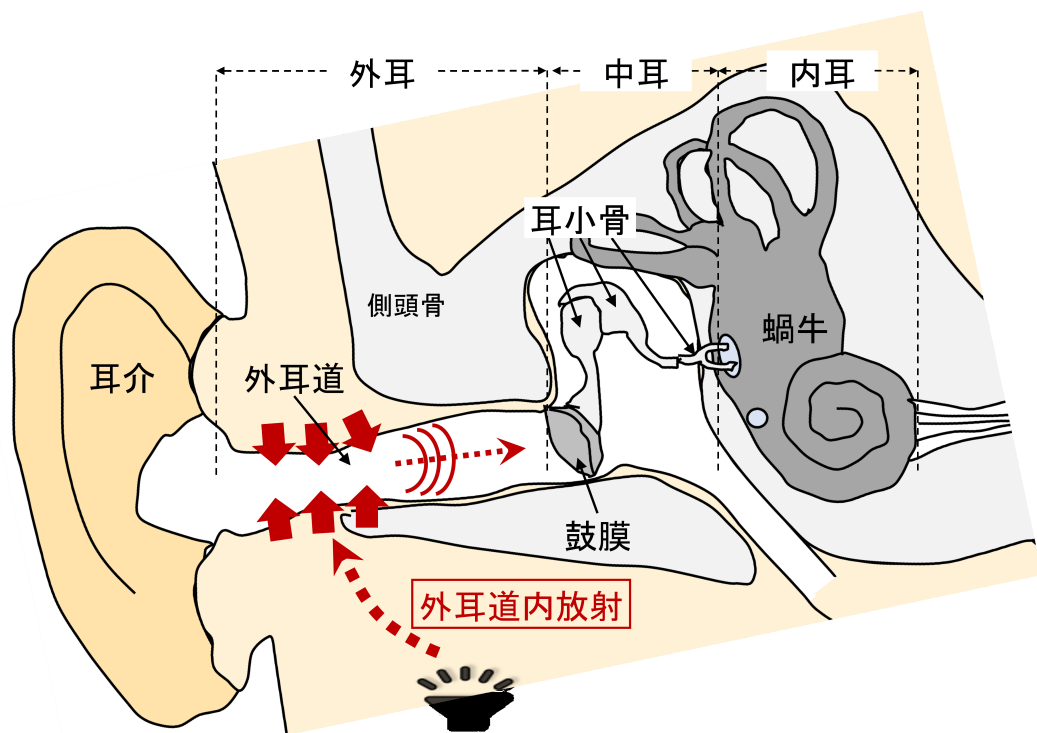


図 2.3: 外耳道内放射による骨導音伝達の概略



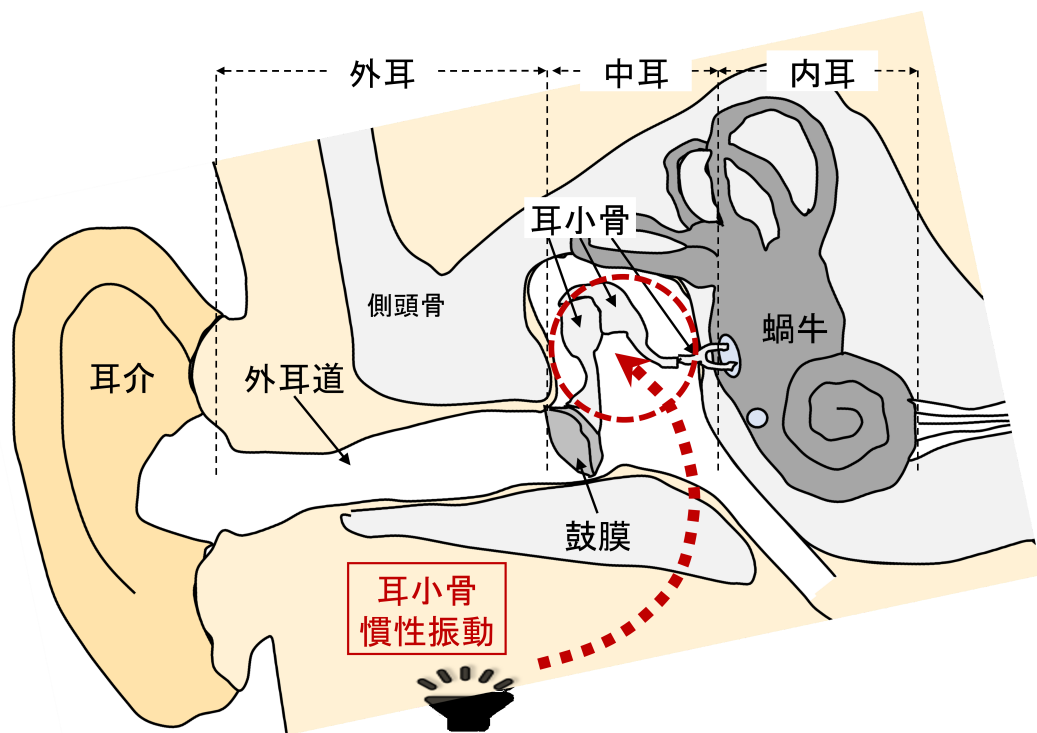


図 2.4: 耳小骨慣性振動による骨導音伝達の概略

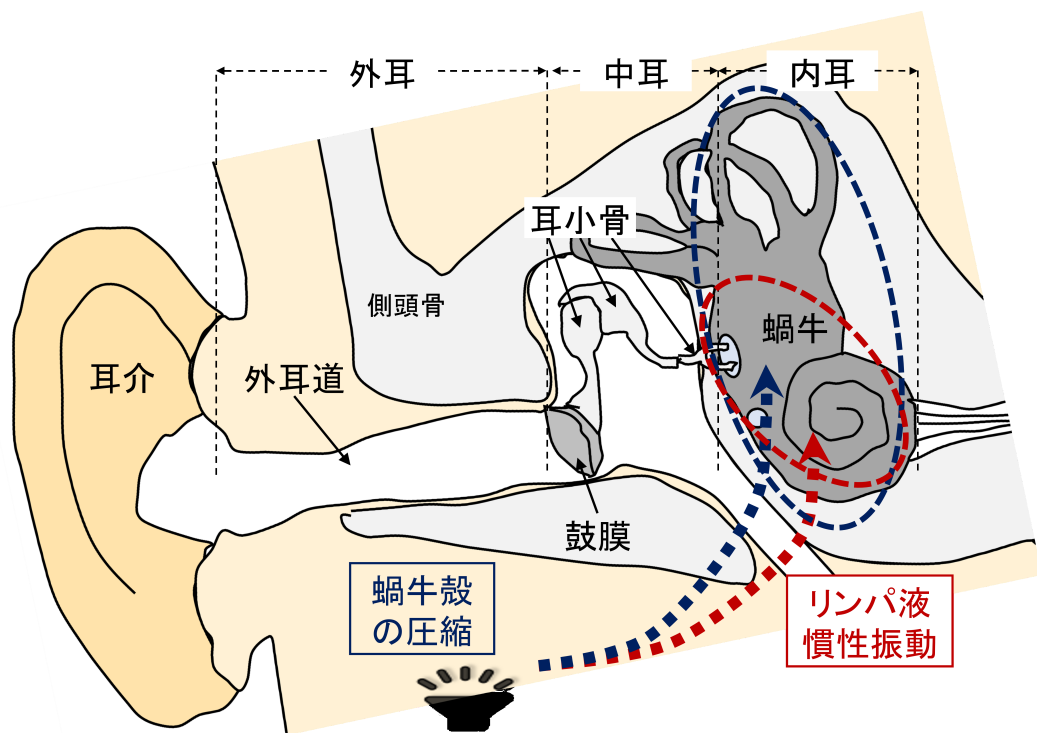


図 2.5: 内耳に直接到達する骨導音伝達の概略

## 2.4 聴覚フィードバックにおける骨導経路

2.2節および2.3節より、聴覚フィードバックにおける骨導経路として、発話器官からの2種類の経路、および聴覚末梢系に到達する4種類の経路が結び付けられると推測される。骨導音知覚における研究 [42] では、聴覚末梢系への音（振動）の伝達は軟組織や頭蓋骨の振動として捉えられている。厳密には、従来の骨導音声伝達に関する検討 [44] で仮定されるように、外耳・中耳・内耳に対して音が伝達される際に軟組織や頭蓋骨から受ける振動特性の影響はそれぞれ同様ではないかもしれない。しかし、軟組織・頭蓋骨をひとつの合成システムと定義し、その出力が外耳・中耳・内耳に対して作用していると仮定すれば、軟組織・頭蓋骨の振動を観測することで外耳・中耳・内耳への個々の入力を知ることができる。

以上の知見を踏まえ、本研究では聴覚フィードバックにおける気導・骨導音声の伝達経路を図2.6のようにモデル化する。気導音声は喉頭音源が声道伝達特性と口唇での放射特性の影響を受けた後、外耳に至る。骨導音声は、声帯振動そのもの、あるいは声道を経由した音圧伝搬が軟組織・頭蓋骨の振動を介して外耳・中耳・内耳のそれぞれに至る。ここで、気導音声と外耳を経由する骨導音声は直接観測可能である。また、側頭骨と聴覚末梢系が隣接していることを踏まえると、側頭骨で観測される骨導音声のスペクトルは、外耳・中耳・内耳に至る前の軟組織・頭蓋骨振動の出力とみなすことができる。ここで、側頭部振動を経皮的に観測した場合、経皮特性の影響を無視できない。しかし、側頭骨への骨導刺激の最小可聴値（振動加速度）を経皮骨導と直接骨導で比較した場合、経皮骨導では直接骨導に比べて周波数に依らず一様に約20 dBほど高くなる傾向が示されている [59]。したがって、側頭部振動の経皮的な観測によっても、軟組織・頭蓋骨振動のスペクトルの概形を推測できると考えられる。

## 2.5 伝達過程を解明するための方略

第1章で述べた通り、本研究では「骨導音声の伝達において中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できない」という立場で、聴覚フィードバックにおける骨導音声の伝達過程を(1)骨導音声に含まれる音声的特徴、(2)骨導経路の伝達特性とその知覚的寄与の観点から検討する。

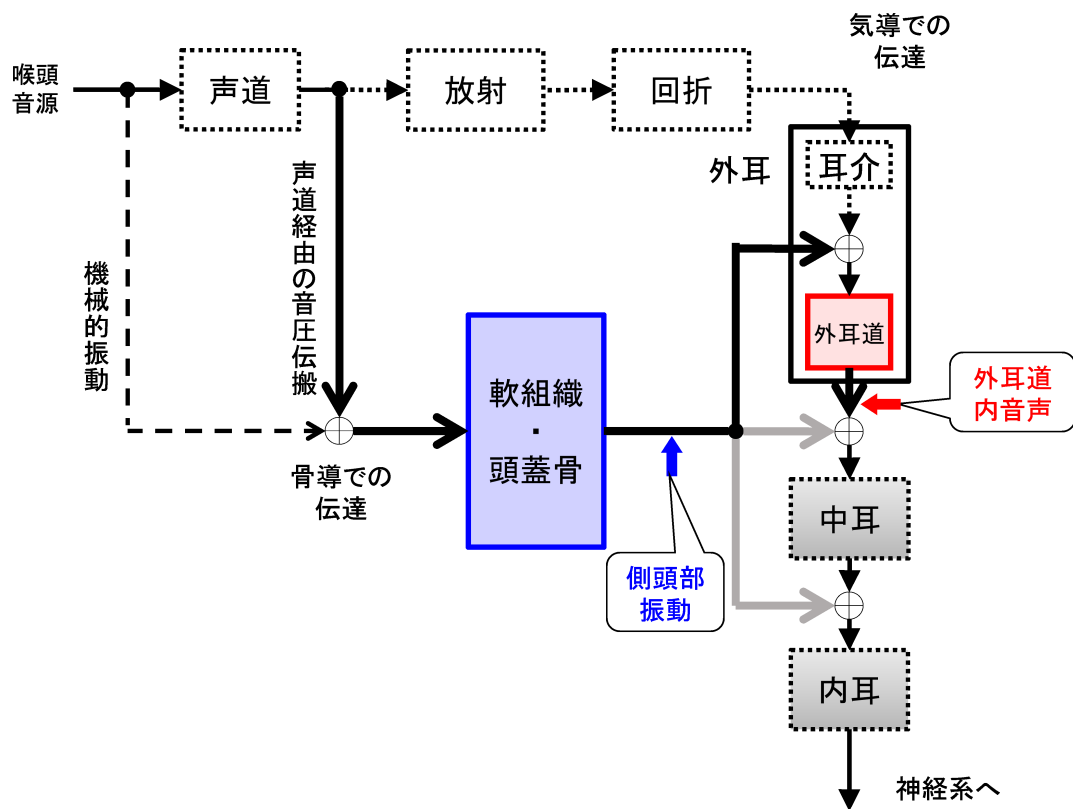


図 2.6: 聴覚フィードバックにおける気導・骨導音声の伝達経路

ここで、とくに内耳に至る経路（リンパ液慣性振動や圧縮骨導）については、その個々の伝達特性が生理学的にも明らかになっているわけではないため個別に検討することが難しい。しかし、側頭骨振動を基準とした耳小骨振動の平均的な相対速度レベルは、1.5 kHz 付近に見られる約 2 dB の増加を除けば約 0 dB で一定となることから [55]、少なくとも発話器官から伝達される信号から頭蓋骨振動が生じた後の過程においては、中耳に至るまでに特定の周波数成分の 2 dB 以上の増幅や減衰を伴わないと考えられる。さらに、内耳に直接至る経路の伝達メカニズムは蝸牛全体に作用するものであり、頭蓋骨での振動特性の影響が大きく反映されたものであると考えられる。この点を踏まえ、本研究では「中耳以降に直接到達する骨導音声のスペクトル形状は、軟組織・頭蓋骨（側頭部）振動のスペクトル形状によって特徴づけられる」という前提で、観測可能な外耳経由の骨導音声（外耳道内音声）および側頭部振動に着目して次のように研究の道筋を立てる。

## (1) 骨導音声に含まれる音響的特徴

最初に、図 2.6 の伝達経路の中で観測可能な側頭部振動と外耳道内音声の音響的特徴を分析し、気導音声の特徴と比較する。上記の前提知見をもとに、聴覚フィードバックにおいて重要な音響的特徴が外耳経由および中耳以降で伝達される骨導音声にも表れるかどうかを検討する。

### (2-1) 骨導の伝達経路とその伝達特性

次に、図 2.6 における声帯振動・口腔内音圧の優位性を明確にするとともに、軟組織・頭蓋骨および外耳道に対応するサブシステムの特性を明らかにする。

骨導音声伝達における声帯振動と口腔内音圧のそれぞれの優位性は明確になっていないが、(1) のような実際の発話音声を用いたスペクトル分析では両者の寄与を切り分けて議論することが難しい。また、発話音声では話者個人の音源特性の影響を大きく受けてしまい、伝達経路における普遍的な伝達特性の推定は難しいと考えられる。そこで、声帯振動および口腔内音圧の伝搬を模擬する励振信号を用いて、外耳経由および中耳以降での骨導経路が有する普遍的な伝達特性を物理測定する。

## (2-2) 骨導における各々の伝達経路の知覚的寄与

続いて、(2-1)における外耳経由および中耳以降での伝達経路のそれぞれが骨導音声知覚にどの程度寄与しているかを明らかにする。

(2-1)により、外耳経由および中耳以降での伝達経路の有する伝達特性についてはそれぞれのスペクトル形状という観点で比較することができる。しかし、外耳道内音圧特性と側頭部の振動特性を互いに直接、定量的に比較することができない。そこで、(2-1)で明らかになった伝達特性のスペクトル形状を用いて、各々の経路の知覚的寄与を主観評価により明らかにする。外耳道内音声および中耳以降に到達する骨導音声のスペクトル形状を模擬した上で、自己聴取音声の声質に最も近くなるような気導音声・外耳道内音声・中耳以降に到達する骨導音声のパワーの比を検討する。

発話中に同期観測された  $N$  サンプル分の気導音声、外耳道内音声および軟組織・頭蓋骨振動の第  $n$  サンプルをそれぞれ  $x_a[n]$ ,  $x_{b1}[n]$ ,  $x_{b2}[n]$  ( $1 \leq n \leq N$ ) とする。自己聴取音声  $y[n]$  の総パワー  $P_{OV}$  は、各観測信号どうしのクロスタームを無視すれば次式のように表せる。

$$\begin{aligned} P_{OV} &= \sum_n y^2[n] = P_a + P_{b1} + P_{b2} \\ &= \sum_n (x_a^2[n] + x_{b1}^2[n] + x_{b2}^2[n]) \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで、 $P_a$ ,  $P_{b1}$ ,  $P_{b2}$  はそれぞれ気導音声、外耳道内音声および軟組織・頭蓋骨振動の総パワーを表す。なお、厳密には  $x_a[n]$ ,  $x_{b1}[n]$ ,  $x_{b2}[n]$  は互いに無相関ではない可能性があるため、 $P_{OV}$  には各成分どうしのクロスタームを考慮しなければならないが、各経路での位相特性が得られないため振幅特性のみ議論するものとし、知覚における各経路の寄与は単純に各信号のパワーの比によって決定されるものとする。着目する伝達経路と  $P_a$ ,  $P_{b1}$ ,  $P_{b2}$  の関係を図 2.7 に示す。これら  $P_a$ ,  $P_{b1}$ ,  $P_{b2}$  の間の関係性を主観評価実験から決定し、それぞれの経路の知覚への寄与を推測する。

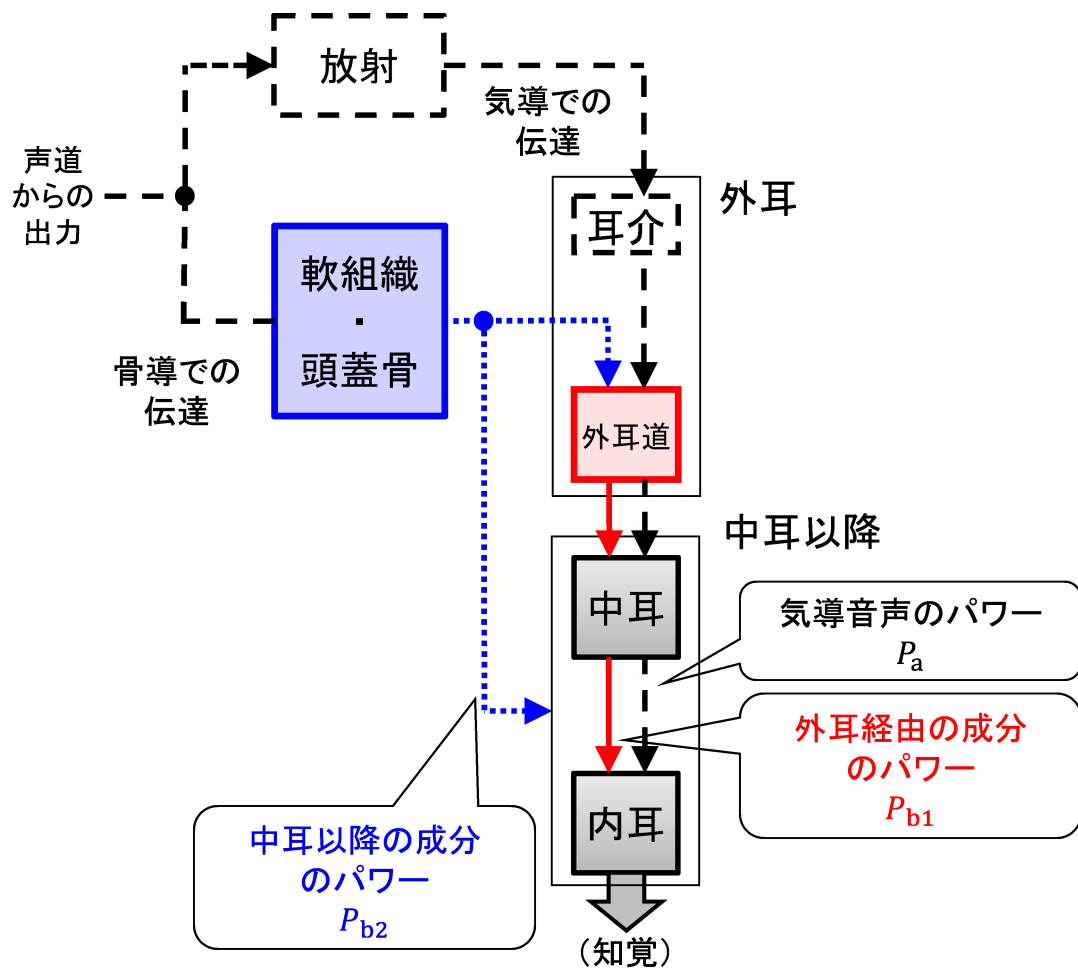


図 2.7: 気導音声・外耳道内音声・側頭部振動のパワー ( $P_a$ ,  $P_{b1}$ ,  $P_{b2}$ ) と伝達経路の関係

## (1), (2-1), (2-2) の統合：骨導の聴覚フィードバックによる情報伝達の様相

最後に、(1)~(2-2)の結果を踏まえ、骨導の聴覚フィードバックが音高・音韻情報の伝達に対してどのように寄与する可能性があるかを聴覚上のスペクトル表現から推察する。これらの検討により、聴覚フィードバックにおける骨導音声伝達の様相を結論付ける。

## 2.6 おわりに

本章は、音声生成過程の音源・フィルタ理論と骨導音知覚に関する生理学・心理学的知見を整理し、聴覚フィードバックにおける気導・骨導経路を複数の伝達システムの線形結合としてモデル化することで、聴覚フィードバックにおける骨導音声伝達の様相を明らかにするための方略を示した。

本研究では、従来知見から「中耳以降に直接到達する骨導音声のスペクトル形状は、軟組織・頭蓋骨振動のスペクトル形状によって特徴づけられる」という前提で、観測可能な軟組織・頭蓋骨振動と外耳道内音声の2つを軸に研究を進める。外耳経由および中耳以降で伝達される(1)音響的特徴、(2-1)その伝達特性、(2-2)両者の伝達の知覚的寄与の検討を統合し、骨導音声の伝達過程を明らかにする。

次章より、観測可能な軟組織・頭蓋骨振動と外耳道内音声の音響的特徴について検討する。



## 第 3 章

# 観測可能な骨導経路における音声の音響的特徴

## 3.1 はじめに

聴覚フィードバックにおける音高情報や音韻情報のモニタリングに対する骨導音声の貢献については未だ不明である。このことを検討する上で、音声知覚に関連する骨導音声の音響的特徴が如何なるものであるかを整理する必要がある。

本章では、骨導音声の伝達において観測可能な側頭部振動と外耳道内音声に着目し、母音ごとの短時間的な特徴および長時間的なスペクトル特徴を明らかにする。

## 3.2 母音の種類ごとの音響的特徴

本節では、気導音声および側頭部・外耳道内で観測される骨導音声の音響的特徴を、母音の種類ごとに比較する。同時収録した気導音声、側頭部振動および外耳道内音声の基本周波数（F0）および母音ごとのスペクトル包絡の分析を行なう。

### 3.2.1 話者

大学院生5名（男性3名，女性2名）の音声を収録した。話者の年齢は22～26歳であり、いずれも正常聴力を有する健常な日本語話者であった。

### 3.2.2 収録装置と収録手続き

図3.1に、収録装置の概略を示す。音声の収録は防音室内で行われた。気導音声、側頭部振動、外耳道内音声の収録にはそれぞれマイクロホン（Rode NT1-A）、骨導マイクロホン（TEMCO HG70）、プローブマイクロホン（ETYMOTIC RESEARCH ER-10C）を用いた。マイクロホンは話者の口唇から水平に約20 cmの距離に設置した。骨導マイクロホンは話者の左側頭部に接着し、プローブマイクロホンは話者の右耳に挿入した。収録機器からの音声信号はオーディオインタフェース（Steinberg UR44）を経由してPC（LG Sharkoon）上のソフトウェア（Steinberg Nuendo）により収録した。信号のサンプリング周波数は10 kHz、量子化ビット数は16 bitsとした。

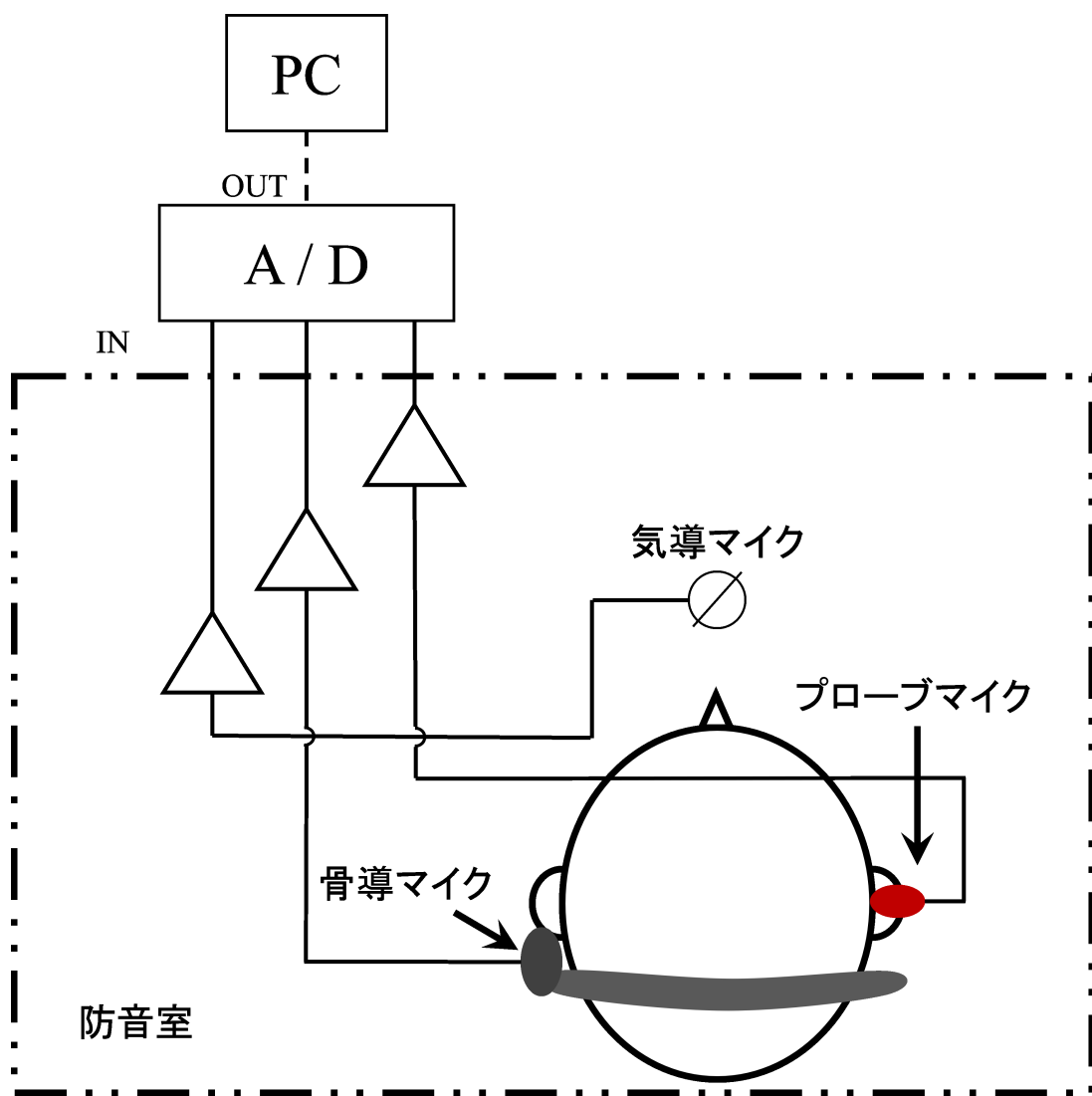


図 3.1: 収録装置の概略

話者には、母音/a/, /e/, /i/, /u/, /o/をそれぞれ約1秒ずつ発話させた。このとき、発声レベルをなるべく一定に保つように指示した。マイクロホンの位置での音圧レベルは約83 dBであった。

### 3.2.3 分析方法

収録された気導音声，側頭部振動，外耳道内音声の各信号の定常部に対してハニング窓を適用し，定常部中の20フレームを抽出した。F0の分析は，窓長を100 msとし，各フレームごとに自己相関法により行なった。20フレームから得られたF0の分析結果を平均して比較評価に用いた。スペクトル包絡の分析は，窓長を10 ms各フレームごとにケプストラム法により行なった。このとき，リフタのカットオフを16とした。20フレームから得られたスペクトル包絡を平均して比較評価に用いた。得られたスペクトル包絡について，パワーの最大値を0 dBとするよう正規化した。

### 3.2.4 補正

骨導マイクロホンは加速度ピックアップのセンサであるため，側頭部での観測信号は振動加速度に対応する信号である。一方で，プローブマイクロホンはコンデンサ型のマイクロホンであるため，外耳道内での観測信号は音圧に対応する信号である。加速度と音圧は定量的には比較できないが，筋電計測等においてはコンデンサ型マイクロホンから得られる周波数応答は加速度センサから得られる周波数応答の二重積分（変位特性）に類似することが分かっている [60]。この知見に基づき，側頭部での観測信号から直接得られたスペクトル包絡  $S_{RT}(f)$  を，次式に従って  $S_{RT,d}(f)$  に変換した。

$$S_{RT,d}(f) = \frac{S_{RT}(f)}{(2\pi f)^2} \quad (3.1)$$

ここで，周波数領域における  $1/(2\pi f)^2$  の操作は，時間領域における二重積分に対応する。得られた  $S_{RT,d}(f)$  を，側頭部振動のスペクトル包絡と見なし，比較評価に用いた。

骨導マイクロホンの加速度応答特性は、Shimizu らの NAM マイクロホン応答特性の測定 [61] と同様の装置・手法を用いて予め測定された。図 3.2 に、0.2 ~ 5 kHz の周波数帯域における骨導マイクロホンの応答特性を示す。上述した側頭部振動のスペクトル包絡  $S_{RT,d}(f)$  に対しては、(3.1) 式の処理を施す前に図 3.2 の応答特性を補正した。

外耳道内音圧の測定は外耳道内を閉塞した状態で行なった。外耳道の閉塞に伴い、外耳道内の周波数特性は開放時に対して主に 1 kHz 以下の周波数成分が強調される [51–53]。この周波数特性の変化は耳閉塞効果 (Occlusion effect) と呼ばれる。本測定では、実際の発話環境を想定した外耳道開放時のスペクトル包絡を推定するために、外耳道内の観測信号から直接得られたスペクトル包絡に対して耳閉塞効果の周波数特性を補正した上で、比較評価に用いた。補正には、Stenfelt ら [53] により測定された耳閉塞効果の周波数特性を用いた。補正に用いた耳閉塞効果の周波数特性を図 3.3 に示す。この特性は、頭蓋骨の骨導刺激に対する 9 名の開放・閉塞外耳道内音圧比の平均により算出されたもので、プローブ挿入長 8 mm での測定結果であった [53]。

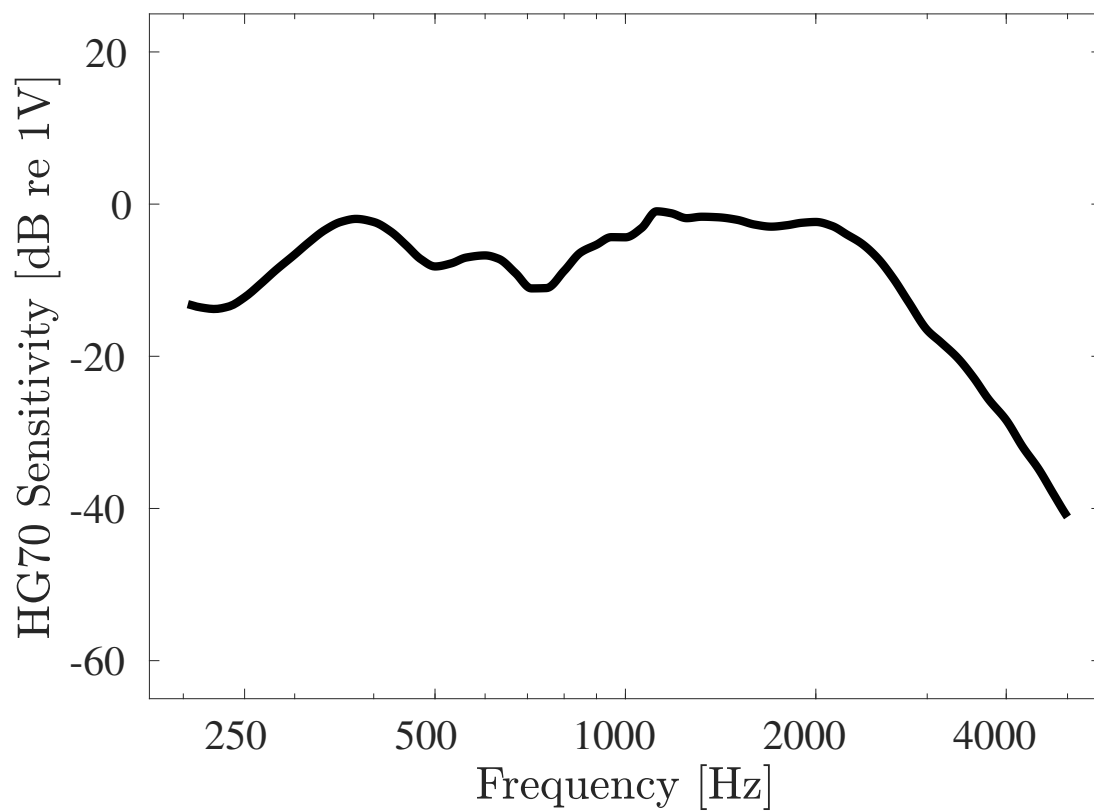


図 3.2: 骨導マイクロホン (HG70) の加速度応答特性 (Shimizu ら [61] と同様の装置・手法を用いて測定)

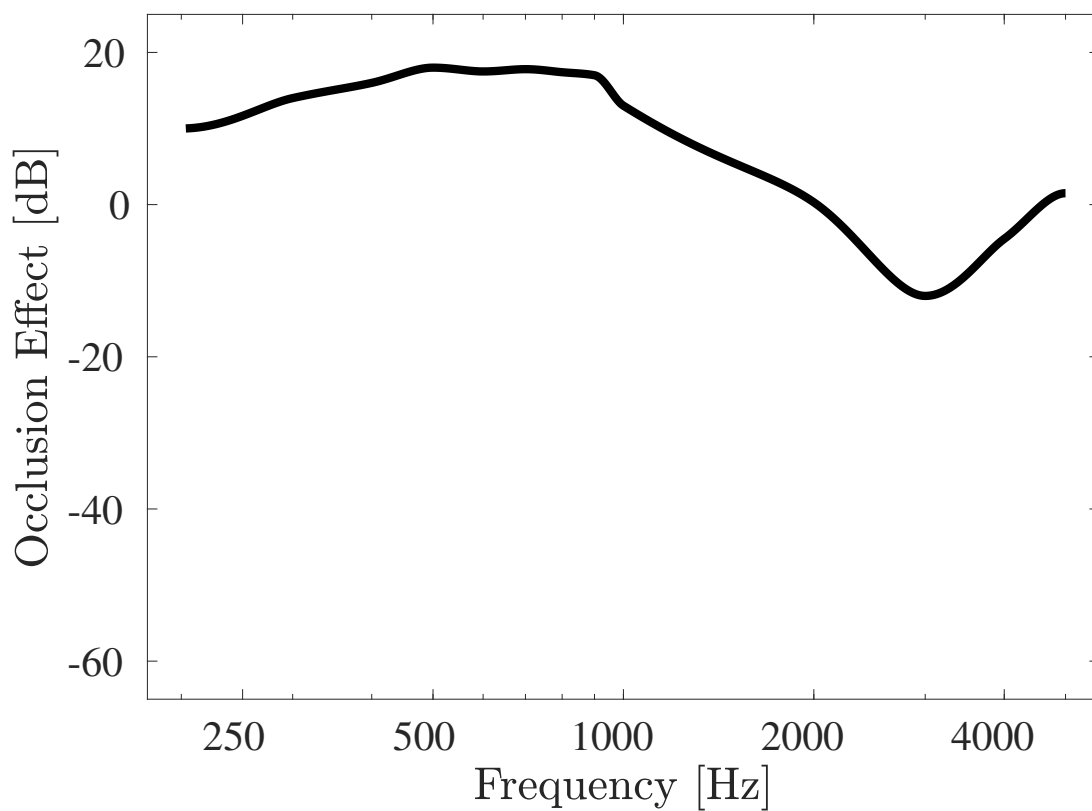


図 3.3: Stenfelt ら [53] により測定された耳閉塞効果の周波数特性（頭蓋骨の骨導刺激に対する 9 名の開放・閉塞外耳道内音圧比の平均、測定時のプローブ挿入長は 8 mm）

表 3.1: 気導音声・側頭部振動・外耳道内音声の F0 分析結果 (母音/a/)

[Hz]		気導音声	側頭部振動	外耳道内音声
話	f1	254.2	253.8	253.8
	f2	261.5	260.8	259.8
者	m1	183.7	183.8	184.0
	m2	166.1	166.1	166.1
	m3	163.8	163.8	164.2

## 分析結果

表 3.1 に、話者 5 名の母音/a/における気導音声，側頭部振動および外耳道内音声の F0 分析結果を示す。いずれの話者も，気導音声，側頭部振動，外耳道内音声の間で F0 は同一であった。

図 3.4～図 3.8 に、話者 5 名から得られた母音/a/, /e/, /i/, /u/, /o/のスペクトル包絡を示す。各図の (a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ話者 f1, f2, m1, m2, m3 の結果を表す。破線，点線，実線はそれぞれ気導音声，側頭部振動，外耳道内音声の結果を表す。それぞれのスペクトル包絡の平均に対する標準偏差を，薄い塗りつぶしで表す。

気導音声のスペクトル包絡を見ると，すべての話者，すべての母音について第一フォルマント (F1) から第三フォルマント (F3) に対応するピークが見られた。これらの結果は，従来より知られているスペクトル包絡の形状とほぼ同等のものであった。

側頭部振動のスペクトル包絡を見ると，母音/a/, /e/, /o/では F1 に対応する位置に，母音/i/, /u/では F2 に対応する位置にスペクトルピークが見られる場合が多かった。一方，いずれの話者のいずれの母音においても，F3 以降に対応するスペクトルピークははっきりとは見られなかった。また，2 kHz 未満の周波数帯域において，母音に依らず周波数の増加とともにパワーが急激に減少する傾向が見られた。

外耳道内音声のスペクトル包絡を見ると，母音/a/, /e/では気導音声のスペクトル包絡と概形が類似する場合が多かったが，F1 に対応するスペクトルピークがはっきりと見られない場合もあった。母音/i/ではすべての話者において，気導音



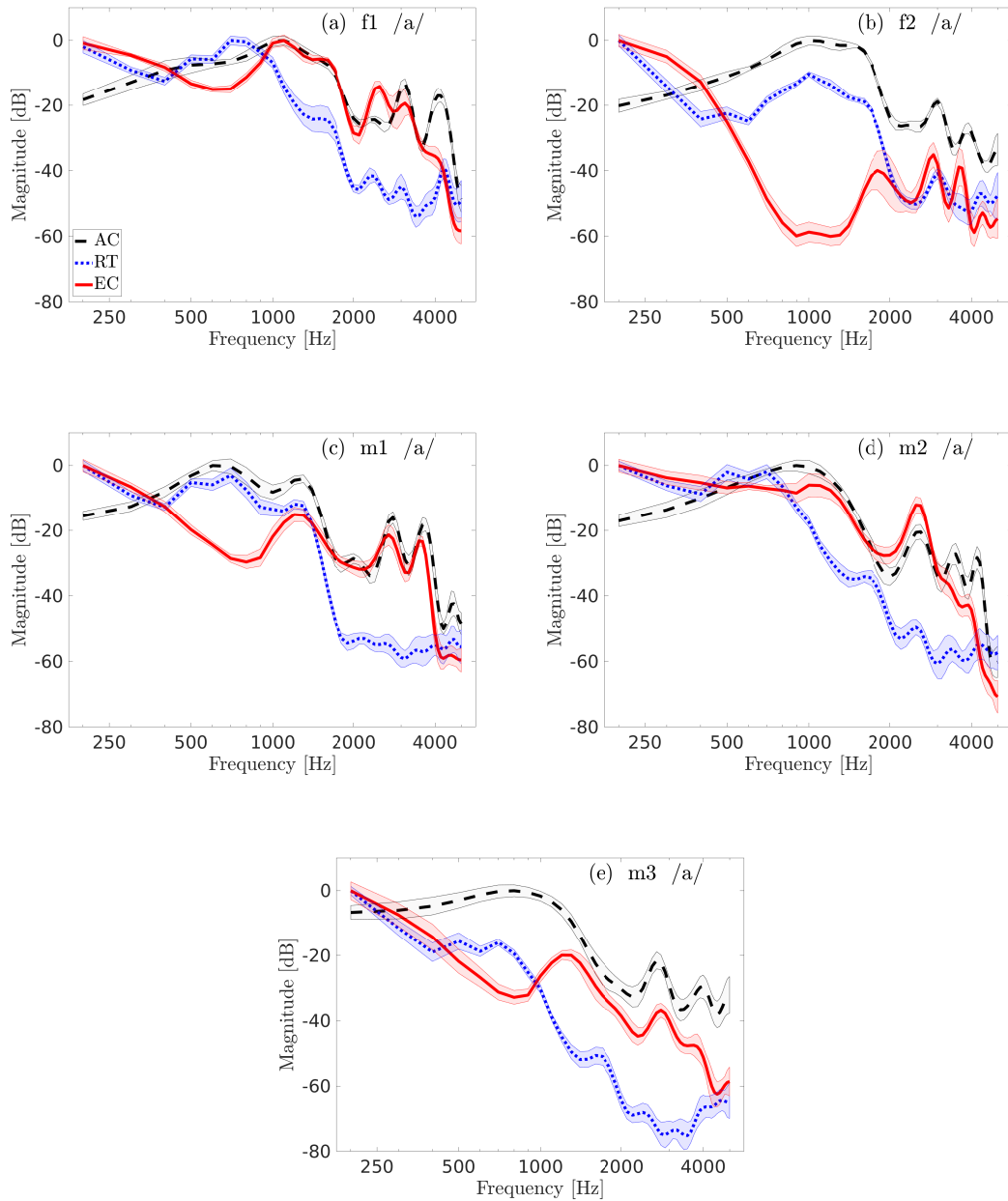


図 3.4: 母音/a/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡:  
 (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 m3 (破線・点線・  
 実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

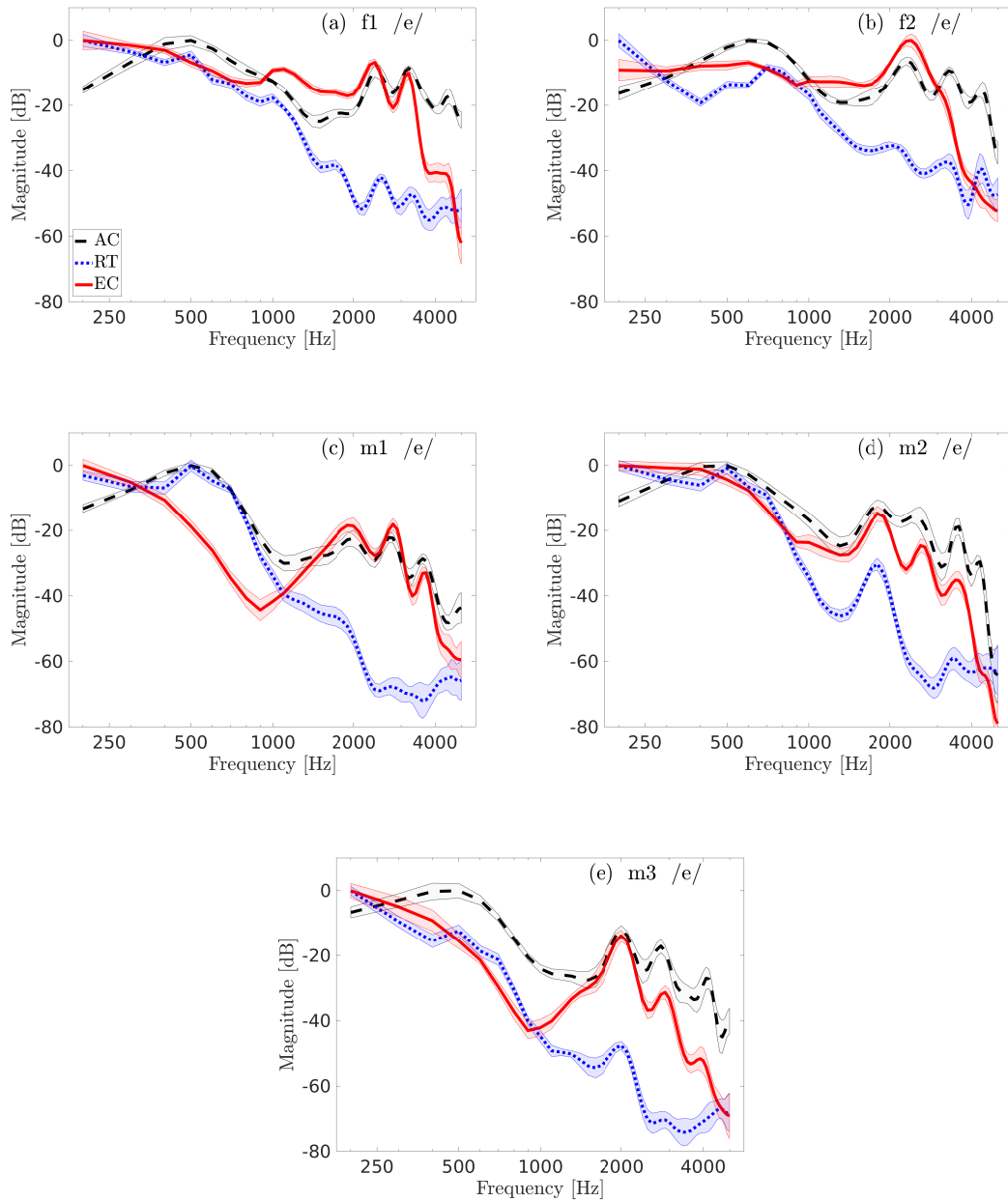


図 3.5: 母音/e/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡:  
 (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 m3 (点線・実線の  
 周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

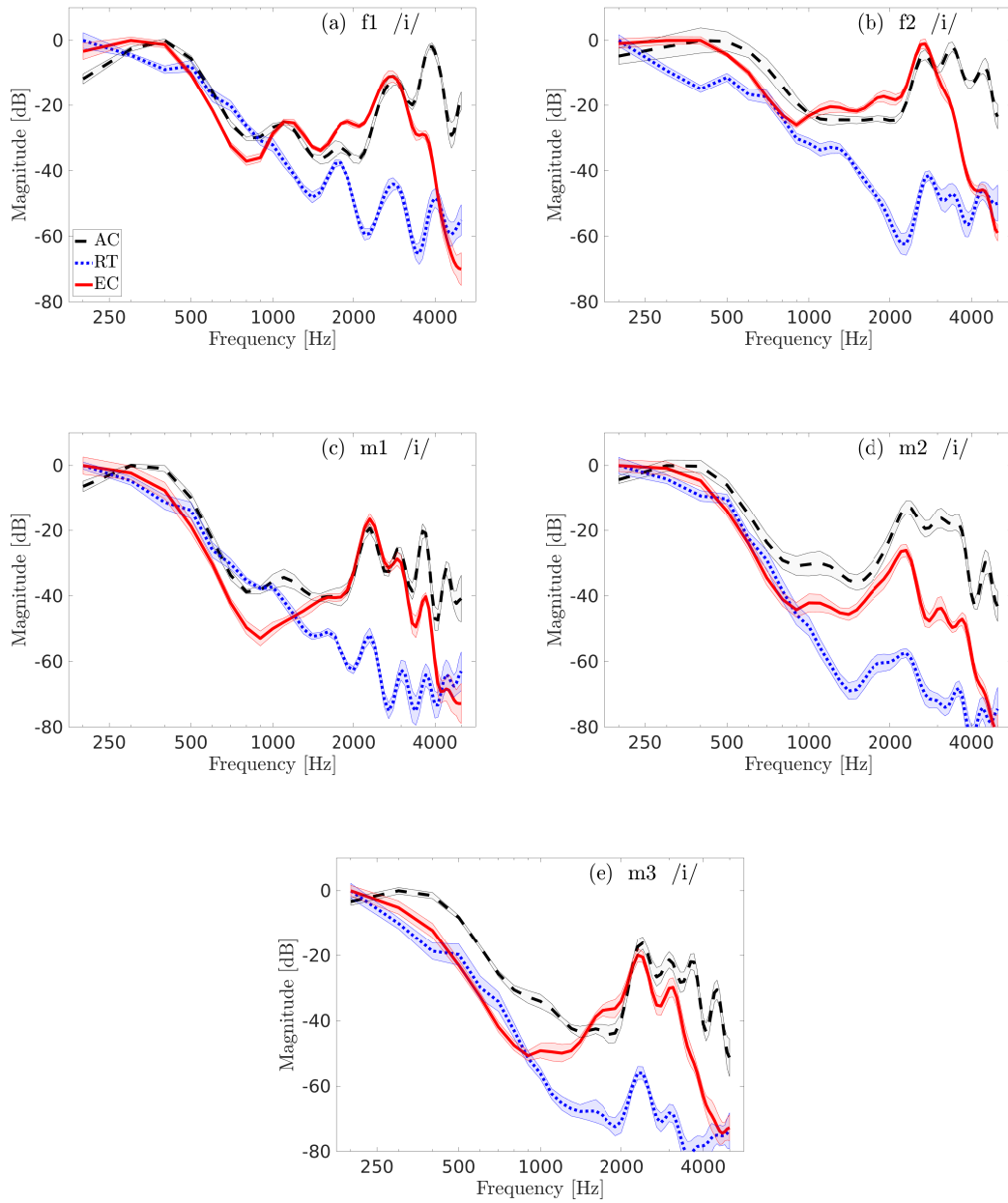


図 3.6: 母音/i/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡:  
 (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 m3 (破線・点線・  
 実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

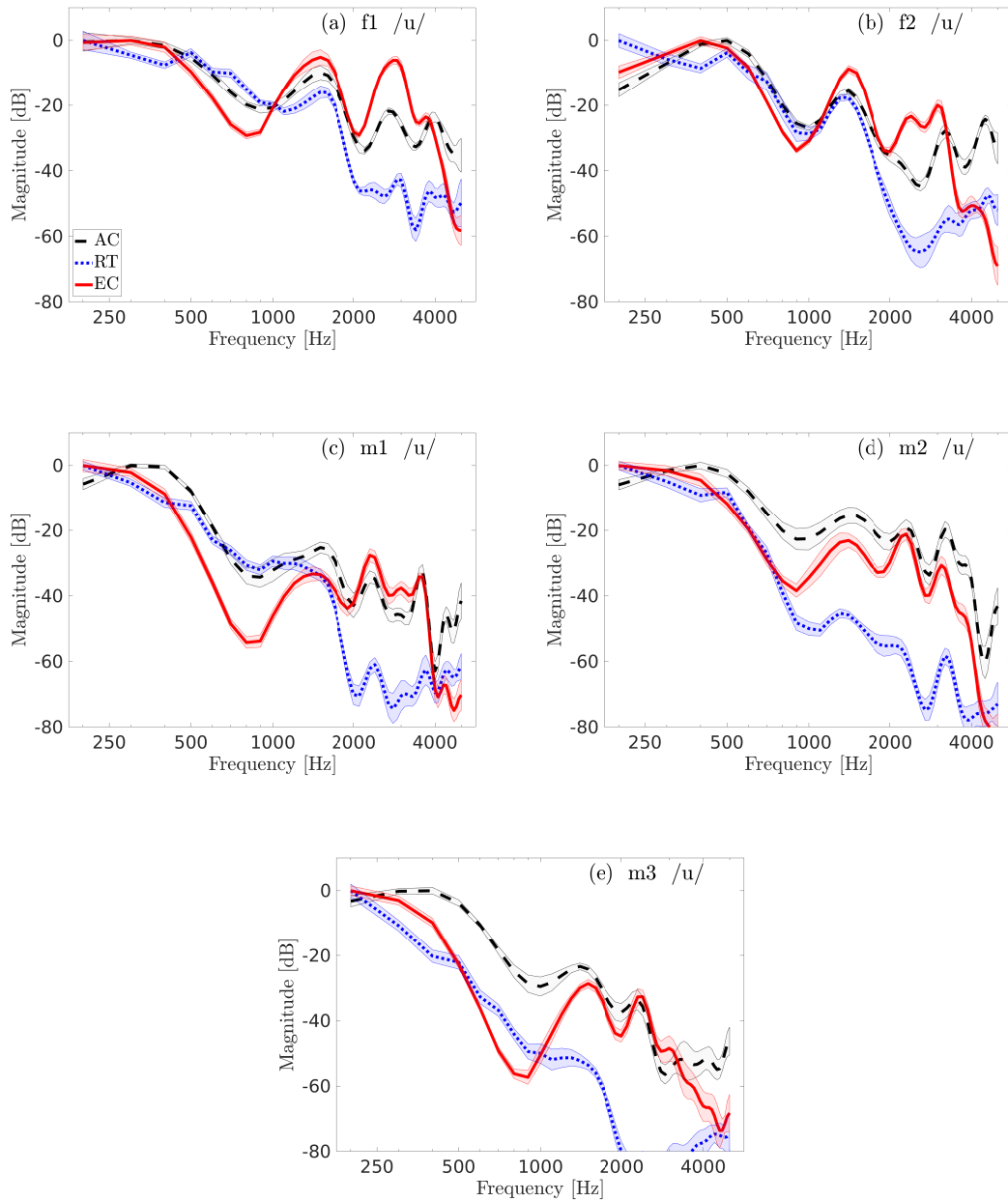


図 3.7: 母音/u/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡:  
 (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 m3 (点線・実線の  
 周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

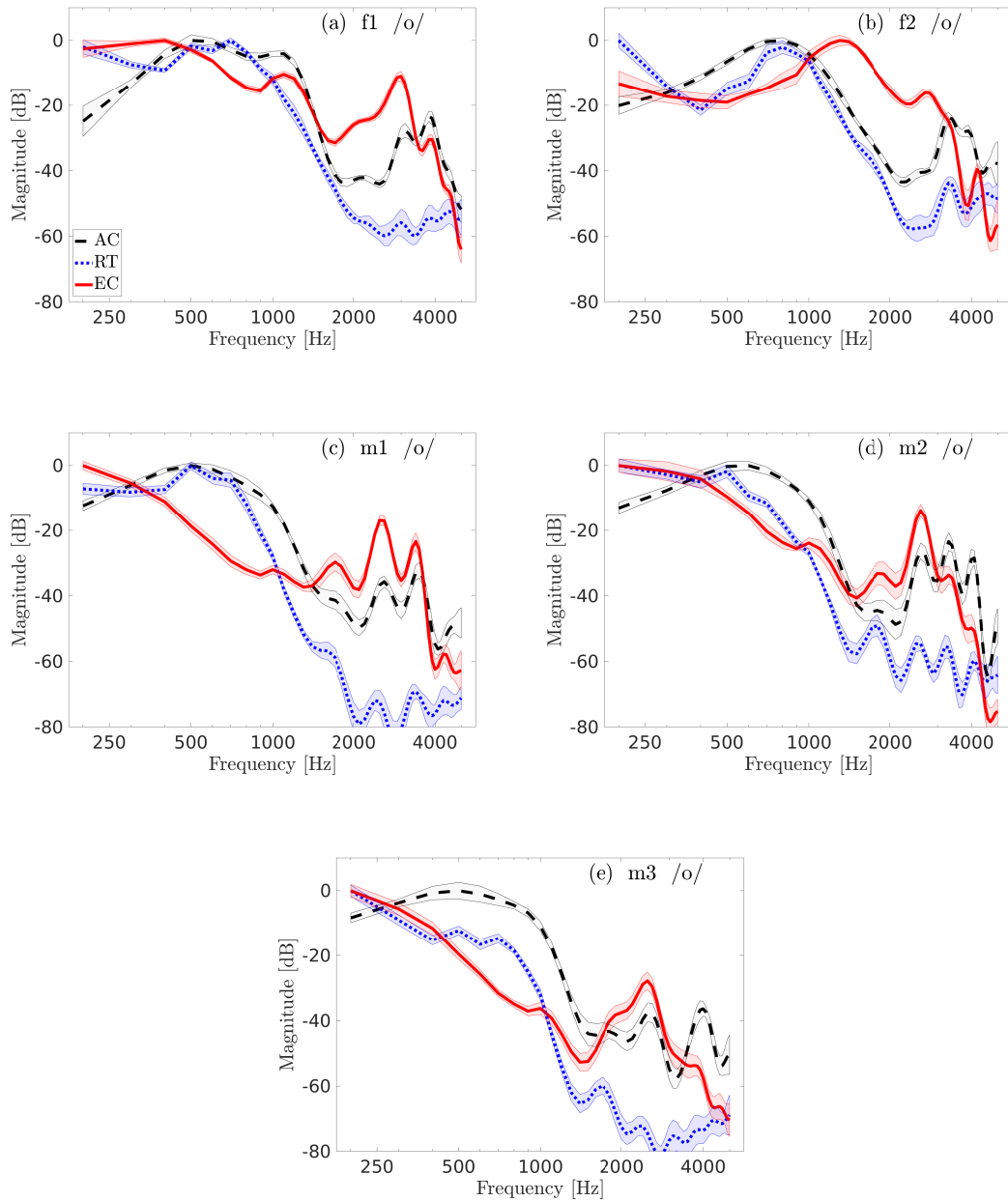


図 3.8: 母音/o/における気導音声・側頭部振動・外耳道内音声のスペクトル包絡:  
 (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 m3 (点線・実線の  
 周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

声の F1, F2 に対応する鋭いスペクトルピークが見られた。母音 /u/ では、すべての話者において F1~F3 に対応するピークがはっきりと見られた。母音 /o/ では、話者 f2 のスペクトル包絡において如何なるフォルマントに対応するピークも見られなかったが、その他の話者のスペクトル包絡には F3 に対応する鋭いピークが見られた。

全体として、気導音声に比べ側頭部振動は 2 kHz 以上の周波数成分が減衰する傾向があり、外耳道内音声は 3 ~ 4 kHz 以上の周波数成分が減衰する傾向があることが分かった。

### 3.2.5 考察

F0 の分析結果より、発話された音声は気導・骨導の経路の違いや観測位置の違いによらず同様の F0 を有することが確認された。これは音響・振動の物理現象としては自明であると言えるが、聴覚フィードバックとして伝達される知覚量としての音高情報が気導・骨導の間で同様であるという可能性が示唆される。なお、音高の知覚は基本周期や F0 だけでなくスペクトル形状の違いにも影響を受けることが知られており [62]、聴覚フィードバックとしての音高情報のやりとりが気導・骨導間で同様であるかどうかについては、更なる知覚的検証が必要である。

スペクトル包絡の分析結果より、側頭部振動・外耳道内音声の多くの母音において気導音声のフォルマントに対応するスペクトルピークが見られることが確認された。このことから、骨導によって発話器官から側頭部や外耳道内へ音声伝達される過程では声道伝達特性の影響を大きく受けていることが示唆される。また、母音 /a/, /e/, /o/ のスペクトル包絡よりも母音 /i/, /u/ のスペクトル包絡のほうがフォルマントに対応するピークがはっきりと見られる傾向があり、開口度が小さいほど骨導音声は声道内からの伝達の影響を大きく受けるという可能性が示唆される。骨導マイクで収録された音声のパワーは開口度の小さい場合 (/i/, /u/ など) に大きくなることが報告されている [34]。また、自己聴取音声の知覚においても、開口度が小さいほど骨導音声の占める割合が大きくなることが指摘されている [41]。これらのことを踏まえると、開口度の違いが主に声道内からの骨導伝達の影響に関与することで、骨導音声全体のパワーに影響を及ぼしているの

はないかと推測できる。

### 3.3 長時間平均的なスペクトル特徴

前節では、側頭部・外耳道内で観測される骨導音声に関して主に母音ごとの性質を明らかにした。しかし、特定の調音動作に依らない骨導音声の普遍的な性質が如何なるものであるかについては更なる分析の余地がある。

音声生成過程の音源・フィルタ理論に基づく [11, 63], 有声信号の長時間平均的なスペクトル特徴を得れば、特定の時刻での声道形状に対応する声道伝達特性の影響を排除することができると考えられる。すなわち、気導音声であれば喉頭音源特性および口唇での放射特性に対応する平均的なスペクトル特徴が、骨導音声であれば喉頭音源特性およびその観測位置までの伝達経路に対応する平均的なスペクトル特徴が得られると考えられる。

そこで本節では、気導音声および側頭部・外耳道内で観測される骨導音声の長時間平均的なスペクトル特徴を分析する。

#### 3.3.1 話者

大学院生7名（男性5名，女性2名）の音声を収録した。話者の年齢は24～32歳であり，いずれも正常聴力を有する健常話者であった。いずれの話者も英語を母語としないが，英語発話経験を有していた。

#### 3.3.2 収録装置と収録手続き

音声の収録は防音室内にて行なった。収録に用いた装置および信号処理は，オーディオインタフェース（MOTU 828mk3）を除き3.2節に記載したものと同様であった。

話者には，31単語からなる英文をモニタに教示し，自由な話速で英文を音読させた。いずれの話者の発話長も約10秒であった。音読の際には発声レベルをなるべく一定に保つように指示した。このとき，音読中のマイクロホンの位置での音圧レベルは60～70 dBであった。音読中の気導音声，側頭部振動および外耳道内

音声を収録した。信号のサンプリング周波数（10 kHz）および量子化ビット数（16 bits）は、3.2 節と同様とした。

### 3.3.3 分析方法

まず、各収録位置で収録された音声の有声部のみを抽出した。音声の有声部の切り出しは、スペクトログラムを参考に Praat により行なった。次に、収録音声の有声部に対して、フレームごとの短時間 FFT スペクトルを算出した。分析フレームにはハニング窓を用い、フレーム長を 10 ms、シフト長さを 2.5 ms とした。最後に、長時間平均スペクトル（Long-term average spectrum, LTAS）（ $X_L(f)$ ）を、次式に従って算出した。

$$X_L(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(f) \quad (3.2)$$

ここで、 $f$  は周波数、 $N$  は分析対象の総フレーム数、 $X_i(f)$  は  $i$  番目（ $i = 1, 2, \dots, N$ ）のフレームから得られた短時間 FFT スペクトルを表す。得られた LTAS について、3.2 節に記載した方法と同様にして収録機器の周波数特性と耳閉塞効果の特性を補正した後、パワーの最大値を 0 dB とするよう正規化し、分析対象の周波数帯域を 0.2 ~ 5 kHz として比較評価に用いた。また、気導音声と骨導音声の間の伝達特性を調べるため、気導音声と側頭部振動、および気導音声と外耳道内音声の間の LTAS の比を求めた。

### 3.3.4 分析結果

図 3.9 に、LTAS の分析結果を示す、図 3.9(a)~3.9(d) はそれぞれ女性話者 f1, f2 および男性話者 m1, m2 の結果を、図 3.9(e) は話者 7 名の平均をそれぞれ表す。破線、点線、実線はそれぞれ気導音声（AC）、側頭部振動（RT）、外耳道内音声（EC）の結果を表す。図 3.9(a)~3.9(d) における薄い塗りつぶしは、各話者の平均に対する標準偏差を表す。

気導音声の LTAS は、全体として周波数の増加とともにパワーが緩やかに減衰し、0.2 ~ 5 kHz におけるパワーのレンジは約 40 dB であった。この傾向は、7 名すべての話者に共通して得られた。



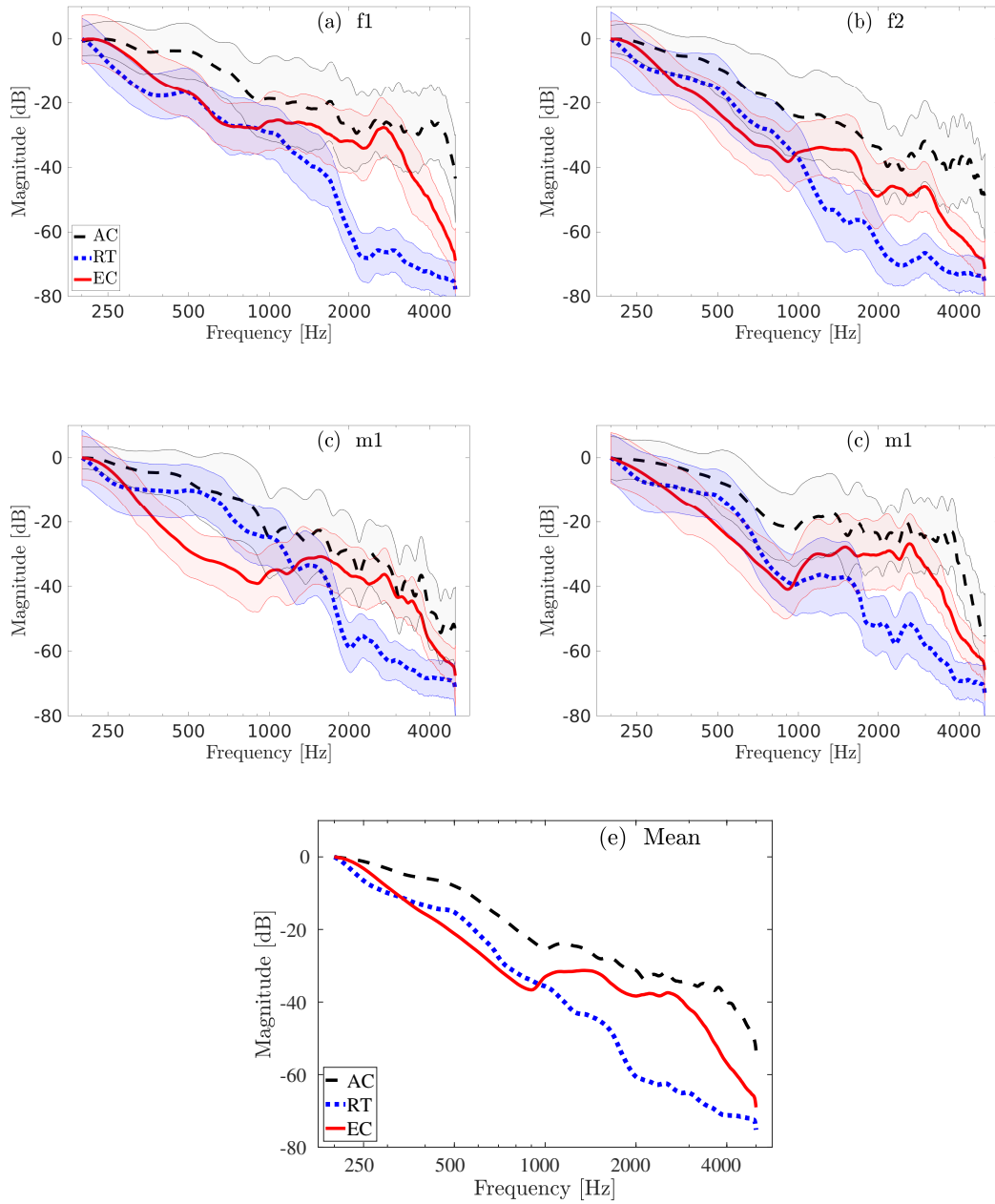


図 3.9: 気導音声 (AC)・側頭部振動 (RT)・外耳道内音声 (EC) の LTAS: (a) 話者 f1, (b) 話者 f2, (c) 話者 m1, (d) 話者 m2, (e) 話者 7 名の平均 (点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

側頭部振動の LTAS は、全体として周波数の増加とともにパワーが急激に減衰した。減衰量が 2 kHz を超えると緩やかになる傾向、あるいは 2.1 kHz 付近に局所的なピークを有する傾向が見られた。0.2 ~ 5 kHz におけるパワーのレンジは約 60 ~ 70 dB であった。これらの傾向は、7 名すべての話者に共通して得られた。

外耳道内音声の LTAS は、約 900 Hz 以下の帯域において周波数の増加とともにパワーが急激に減衰し、1 ~ 3 kHz の帯域では概ね平坦であった。また、3 kHz 以上の帯域では周波数の増加とともにパワーが減衰した。パワーのレンジは 0.2 ~ 5 kHz におけるパワーのレンジは約 60 ~ 70 dB であった。これらの傾向は、7 名すべての話者に共通して得られた。

表 3.2 に、気導音声、側頭部振動、外耳道内音声の LTAS に対する回帰直線の傾きによって得られたスペクトル傾斜 (dB/octave) を示す。いずれの話者においても、側頭部振動のスペクトル傾斜が最も急峻であり、気導音声のスペクトル傾斜が最も緩やかであった。

表 3.2: 気導音声・側頭部振動・外耳道内音声の LTAS におけるスペクトル傾斜（全帯域（0.2 ~ 5 kHz）および 0.2 ~ 0.9 kHz の帯域における LTAS の回帰直線の傾き [dB/oct]）

[dB/octave]		気導音声 (全帯域)	側頭部振動 (全帯域)	外耳道内音声 (全帯域)	外耳道内音声 (0.2 ~ 0.9 kHz)
話 者	f1	-7.9	-16.9	-10.2	-15.3
	f2	-10.3	-18.3	-13.0	-18.9
	m1	-8.1	-15.8	-9.5	-19.2
	m2	-11.7	-19.1	-11.4	-20.0
	m3	-11.1	-16.6	-10.0	-20.0
	m4	-10.2	-15.2	-12.2	-11.8
	m5	-10.7	-17.8	-12.6	-21.5
平均スペクトル		-10.0	-17.1	-11.3	-18.0

図 3.10 に、気導音声と側頭部振動・外耳道内音声との間の LTAS の比を示す。点線は気導音声の LTAS に対する側頭部振動の LTAS の比を、実線は気導音声の LTAS に対する外耳道内音声の LTAS の比を示す。気導音声の LTAS に対する側頭部振動の LTAS の比は、1kHz 以下ではほぼ横ばいであるのに対し、1～3 kHz にかけて周波数の増加とともに約 20 dB ほど単調に減衰した。気導音声の LTAS に対する外耳道内音声の LTAS の比は、0.2～0.7 kHz にかけて周波数の増加とともに約 20 dB ほど単調に減衰した後、1～3.5 kHz 付近の成分を他の帯域に比べて約 20 dB 強調するような帯域通過特性を有していた。

### 3.3.5 考察

LTAS の分析結果として、側頭部振動、外耳道内音声ともに気導音声に比べて急峻なスペクトルを有することが分かった。側頭部振動と外耳道内音声の平均的なスペクトルの振る舞いは 1 kHz 未満において比較的類似しているのに対し、1 kHz 以上において互いに異なる傾向があることが分かった。また、気導音声のスペクトルを基準とすると、側頭部振動のスペクトルは相対的に概ね 1 kHz 以下の低域通過特性を、外耳道内音声のスペクトルは概ね 1～3 kHz の帯域通過特性を有することが分かった。

本分析で得られた LTAS は各収録音声の有声部から得られたものであるため、気導音声の LTAS には喉頭音源特性と口唇での放射特性の両方が含まれると考えられる。古典的には、喉頭音源特性のスペクトル傾斜は約  $-12$  dB/octave、放射特性のスペクトル傾斜は約  $+6$  dB/octave であるとされており [11,63]、これに基づけば気導音声の LTAS におけるスペクトル傾斜は  $-6$  dB/octave 程度であると見積もられるが、本分析で得られた気導音声のスペクトル傾斜はそれよりもやや急峻であった。これは、喉頭音源特性の個人差に起因するものであると考えられる。

側頭部振動の LTAS における約  $-17$  dB/octave の減衰特性には、喉頭音源特性と軟組織・頭蓋骨での振動特性の両方が含まれると考えられる。したがって、上記と同様に喉頭音源特性のスペクトル傾斜を  $-12$  dB/octave とすると、骨導経路における軟組織・頭蓋骨での振動特性は  $-5$  dB/octave 程度であると推測される。また、外耳道内音声の LTAS における約  $-11$  dB/octave の減衰特性には、喉頭音

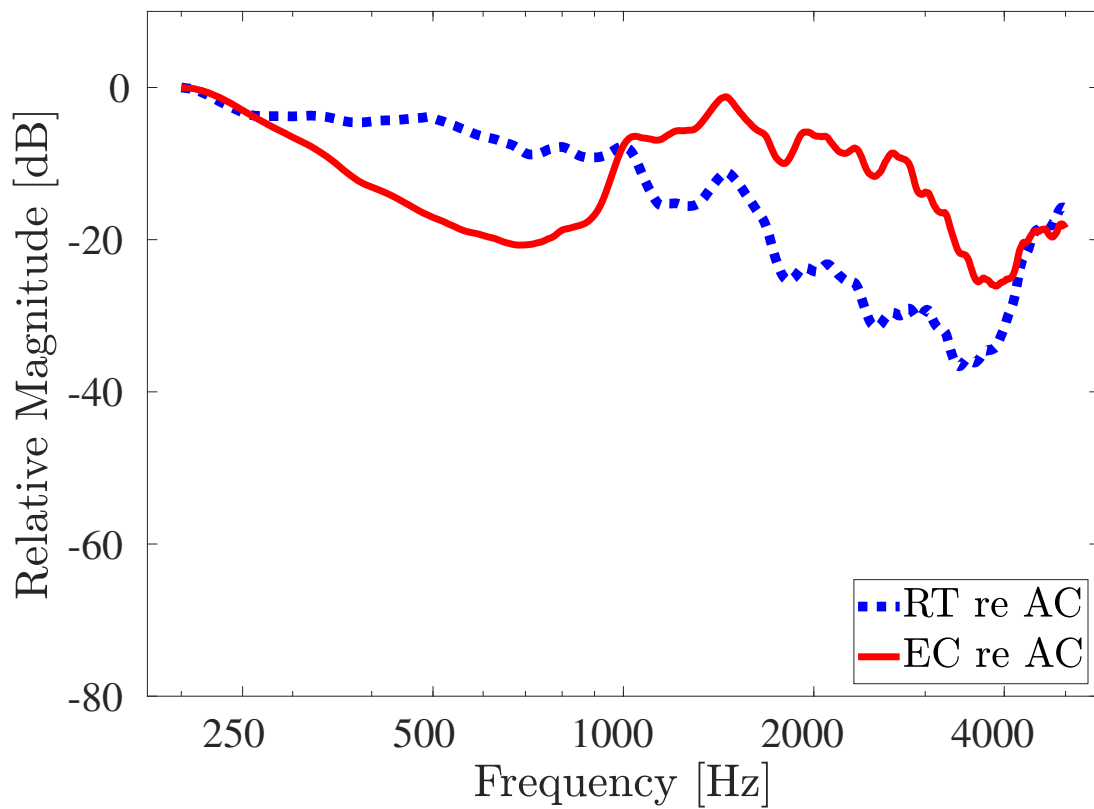


図 3.10: 気導音声と側頭部振動・外耳道内音声との間の LTAS の比

源特性，軟組織・頭蓋骨での振動特性および外耳道での共鳴特性が含まれると考えられる．外耳道内音声の 1 kHz 未満の低域におけるスペクトル傾斜は側頭部振動のスペクトル傾斜と同等であることを踏まえると，外耳道内音声の LTAS における 1 kHz 以上のスペクトル形状は主に外耳道での共鳴特性により特徴づけられる可能性が考えられる．外耳道での伝達特性における 2～3 kHz でのスペクトルピーク [50] により，このことを説明可能であるかもしれない．

Reinfeldt らによる発話中の外耳道内音圧の測定では，有声音（母音）をそれぞれ独立に発話させた際の気導音声と外耳道内音声との間のスペクトル比は概ね 0.7～3 kHz の帯域において大きな値をもつ傾向が見られている [44]．この傾向は，図 3.10 に示す気導音声と外耳道内音声の間の LTAS の比における 0.7～3 kHz での傾向と類似していた．この周波数帯域での振る舞いは，上述した外耳道での伝達特性が関係していると考えられる．一方で，1 kHz 未満での両者の傾向は異なっていた．本研究では閉塞外耳道内の音声を収録した上で耳閉塞効果の特性を補正しているのに対して，Reinfeldt らは気導音を遮断する大型イヤーマフを使用して開放外耳道内の音声を収録している．1 kHz 未満における傾向の違いは，この測定方法の違いにより生じた可能性が考えられる．

Hansen らも本検討と同様に，閉塞外耳道内音声の LTAS を測定した後に耳閉塞効果を補正し，気導音声の LTAS との比を算出することで気導・骨導間の伝達特性を推定している [43]．Hansen らの結果と図 3.10 に示す結果を比較すると，特に 0.5 kHz 以下において両者の形状は異なっていたものの，互いに同程度のレンジを有していた．ただし，Hansen ら [43] の結果は話者 1 名のみから得られたものであり，本研究で得られた結果は話者の個人性に依存しない普遍的なスペクトル比を反映しているものと考えられる．

以上の結果より，図 2.6 に示す伝達過程を踏まえると，軟組織・頭蓋骨の振動は主に 1 kHz 以下の低域成分の伝達に寄与している可能性が示唆される．また，外耳道内放射は主に 1～3 kHz の成分の伝達に寄与している可能性が示唆される．

### 3.4 おわりに

本章では、骨導音声の伝達において観測可能な側頭部振動と外耳道内音声に着目し、母音ごとの短時間的な特徴および長時間的なスペクトル特徴を分析した。

母音発話時のF0分析の結果、側頭部振動と外耳道内音声ともに、気導音声と同様のF0を有することが確認された。また、母音発話時のスペクトル包絡を分析した結果、側頭部振動・外耳道内音声の多くの母音において気導音声のフォルマントに対応するスペクトルピークが見られることが確認された。これらのことから、外耳経路および中耳以降で伝達される骨導音声には、音声知覚に重要な音響的特徴が見られることが明らかになった。

側頭部振動・外耳道内音声の長時間でのスペクトル特徴として、気導音声に比べてパワーが低域に偏る傾向があり、これは側頭部振動において最も顕著であった。これらのことから、骨導音声における低域成分の伝達は中耳以降の伝達経路から担っている可能性が示唆される。

次章では、声帯振動および口腔内音圧伝搬の過程に着目して、観測可能骨導経路の伝達特性を明らかにする。

## 第 4 章

# 観測可能な骨導経路における伝達特性 の物理測定



## 4.1 はじめに

前章では、側頭部振動と外耳道内音声において見られる音響的特徴について検討した。前章の結果から、発話器官から軟組織・頭蓋骨あるいは外耳道内までのおおよその伝達特性を推測することができる。しかし、骨導音声の伝達において声帯振動、口腔内音圧伝搬のどちらが優位であるのかについては、発話音声の分析からでは明らかにできない。また、発話音声では話者個人の音源特性の影響を大きく受けてしまい、伝達経路における普遍的な伝達特性の推定は難しいと考えられる。

そこで本章では、声帯振動および口腔内音圧の伝搬を模擬する励振信号を用いて、外耳経路および中耳以降での骨導経路が有する普遍的な伝達特性を物理測定する。

## 4.2 喉頭付近の振動を基準とした骨導経路の伝達特性

第一に、骨導音声の中でも、声帯の機械的振動が頭蓋骨・軟組織の振動として直接作用する成分に着目し、観測可能な外耳道内音圧までの骨導音声の伝達特性を明らかにする。そこで、首の喉頭付近に励振音源を設定し、喉頭付近の振動を基準としたときの側頭部・外耳道までの伝達関数を測定する。

### 4.2.1 側頭部・外耳道での伝達関数の測定

#### 測定参加者

大学院生7名（男性6名，女性1名）が測定に参加した。参加者の年齢は24～32歳であり、いずれも正常聴力を有する健常話者であった。

#### 測定環境と測定装置

測定は防音室内にて行われた。図4.1に、測定装置の概略を示す。喉頭付近での測定信号の励振には、加振器（Adafruit 1785）を用いた。このとき、加振器の首への接触位置はアームにより自由に調節可能であった。喉頭付近への励振によ

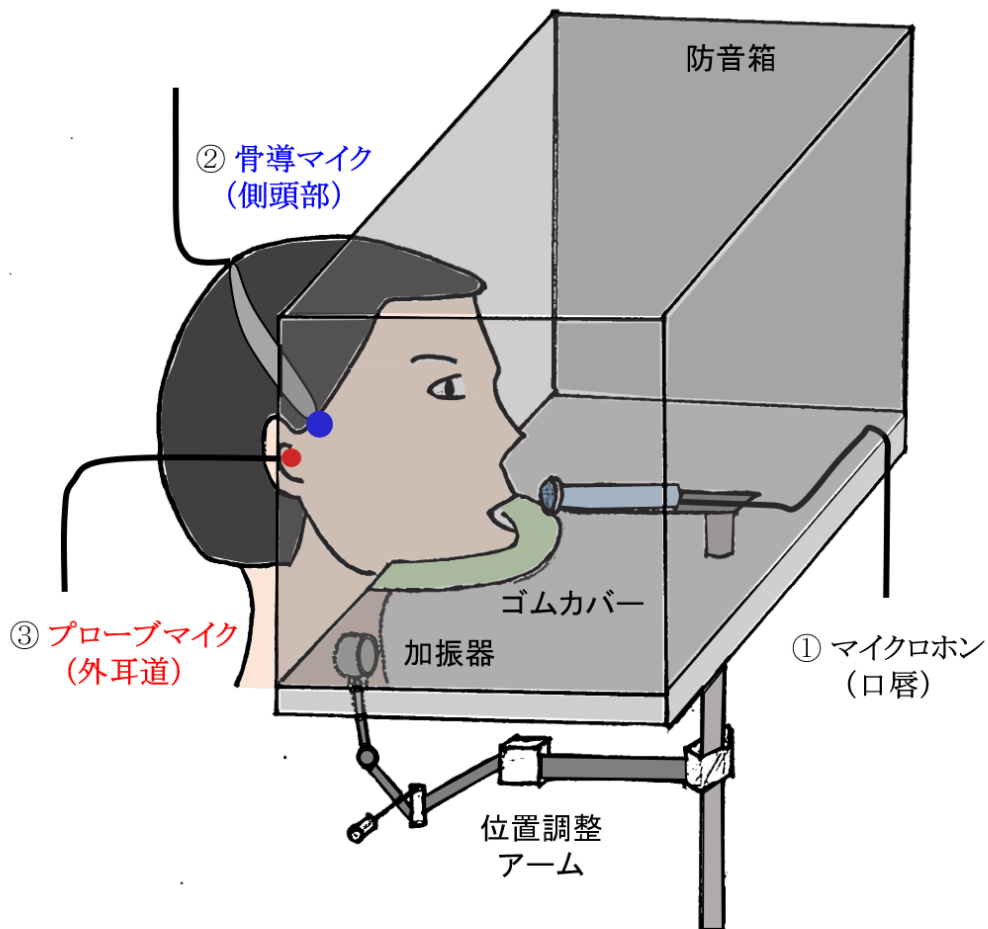


図 4.1: 測定装置の概略

て生じる口唇付近での音圧，側頭部振動，外耳道内音圧を測定するために，マイクロホン（audio-technica AT845Ra），骨導マイクロホン（TEMCO HG70），プローブマイクロホン（ETYMOTIC RESEARCH ER-10C）をそれぞれ用いた．マイクロホンは口唇から水平に 2 cm の距離に，骨導マイクロホンは左側頭部に設置した．プローブマイクロホンは右耳に挿入した．各測定位置において，励振装置から漏れ出る気導音の混入を抑えるために，首の加振部分よりも上の顔面を覆う防音箱を用いた．防音箱には顎を固定するためのゴムカバーを設置した．また，右耳へのプローブマイクロホンの挿入の際には，励振装置から漏れ出る気導音の混入を防ぐために，耳栓型のフォームイヤータップ（ER-10C-14A）を用いて外耳道内を閉塞した．このとき，イヤータップの全長の半分以上（7～14 mm）が外耳道に挿入されていることを確認した．

励振信号は PC のソフトウェア（Adobe Audition）により出力し，付属のアンプにより増幅して加振器により励振した．各測定位置で測定した信号は，A/D コンバータ（MOTU 828mk3）を経由して PC のソフトウェアにより収録した．信号のサンプリング周波数は 44.1 kHz，量子化ビット数は 16 bits とした．

## 測定手続き

最初に，参加者の喉頭付近に加振器を接触させた状態で白色雑音を励振し，発声せずに母音 /a/， /e/， /i/， /u/， /o/ のそれぞれに対応する口腔の構えを保持させた．このとき，励振した白色雑音が調音されて各母音がはっきりと聴き取れるように，加振器の接触位置を任意に調整させた．次に，加振器の接触位置と口腔の構えを保持させた状態で加振器から 15 s の対数スイープ信号を励振した．対数スイープ信号には，立ち上がりと終端の 1 s ずつに対してコサイン窓を用いてテーパ処理しており，定常部の時間長は 13 s とした．このとき，周波数は 0.1～7 kHz の範囲で遷移した．なお，測定に用いた各マイクロホンの有効な周波数帯域を考慮し，0.2～5 kHz の範囲を分析対象とした．励振と同時に，測定参加者の側頭部振動および外耳道音圧を測定した．測定は，参加者 1 人につき 1 母音あたり 10 回ずつ，計 50 回行なった．各測定の間には休憩を入れ，測定を再開する際には加振器の接触位置の確認を上記と同様の手順で逐次行なった．休憩を含め，測定に要した時間は参加者 1 人あたり合計約 45 分であった．

## 分析

励振信号（対数スイープ信号）および、各測定位置（AC, RT, EC）での観測信号をそれぞれ  $x(t)$ ,  $y_P(t)$  ( $P = \{AC, RT, EC\}$ ) とする。このとき、励振信号を基準とした各測定位置でのインパルス応答  $h_P(t)$  を次式に従って算出した。

$$h_P(t) = y_P(t) * x_{inv}(t) \quad (4.1)$$

ここで、 $x_{inv}(t)$  は対数スイープ信号  $x(t)$  を時間反転・振幅調整した信号を表す [64]。また、 $*$  は畳み込み演算を表す。励振信号を基準とした各測定位置での観測信号のスペクトル  $H_P(f)$  を次式に従って算出した。

$$H_P(f) = \mathcal{F}[h_P(t)] \quad (4.2)$$

ここで、 $\mathcal{F}[\cdot]$  は Fourier 変換を表す。得られた振幅スペクトル  $|H_P(f)|$  について、10 回の測定結果を参加者ごとに平均した。

## 補正

側頭部振動の振幅スペクトル  $|H_{RT}(f)|$  に対しては、前章 3.2.4 項と同様に図 3.2 に示す骨導マイクロホンの加速度応答特性を補正した。さらに、前章の式 (3.1) と同様に、励振信号を基準とした側頭部での観測信号の加速度特性  $|H_{RT}(f)|$  を次式に従って変位特性  $|H_{RT,d}(f)|$  に変換し、比較評価に用いた。

$$|H_{RT,d}(f)| = \frac{|H_{RT}(f)|}{(2\pi f)^2} \quad (4.3)$$

外耳道内音圧の振幅スペクトル  $|H_{EC}(f)|$  に対しては、前章 3.2.4 節と同様に図 3.3 に示す耳閉塞効果の周波数特性を補正した。

加振器自体の振動特性、および喉頭付近の皮膚・軟組織等の振動から喉頭内部への音圧への伝達特性はそれぞれ個別に測定することが困難である。本測定では、Bretschneider により喉頭付近の物理モデルを用いて測定された喉頭加振に伴う喉頭内部での音圧特性（加振器の振動特性と、喉頭付近の振動から喉頭内部の音圧への伝達特性の両方を含む）[65] のデータを用いて、加振器の振動特性および喉頭付近の振動から喉頭内部への伝達特性を補正した。図 4.2 に、Bretschneider により測定された喉頭加振に伴う喉頭内部での音圧特性を示す。

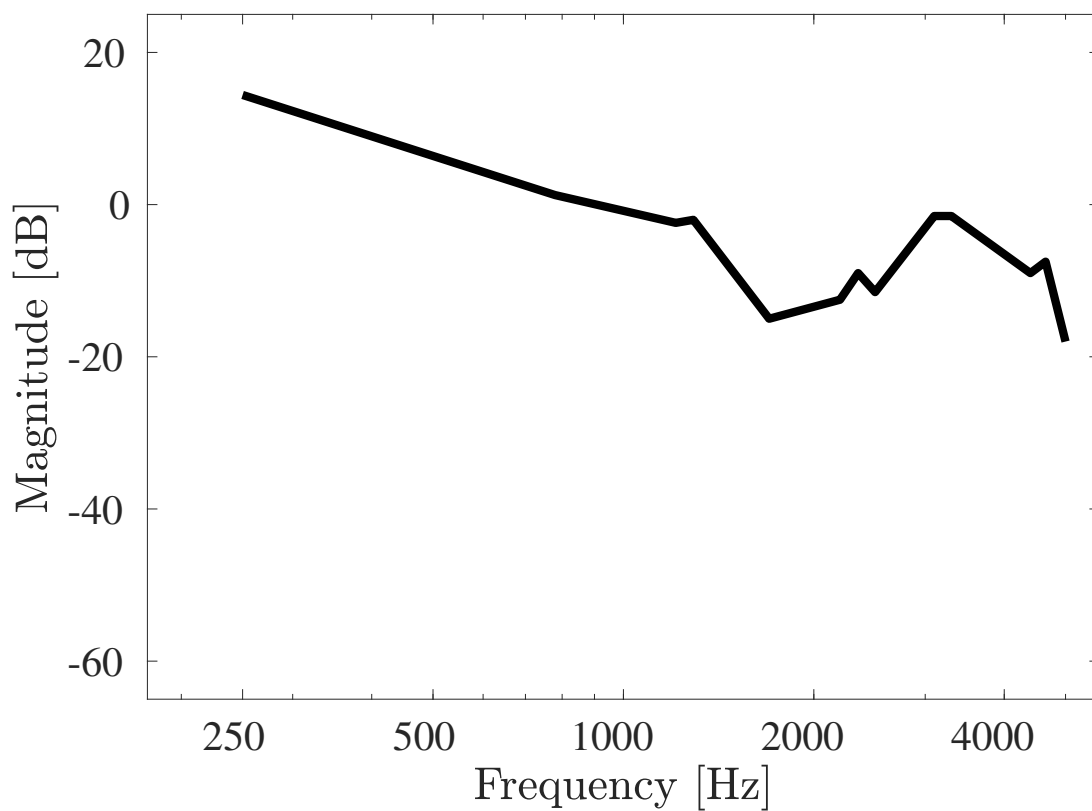


図 4.2: Bretschneider [65] により測定された喉頭加振に伴う喉頭内部での音圧特性: 加振器 (Adafruit 1785) の振動特性と, 喉頭付近の振動から喉頭内部の音圧への伝達特性の両方の影響を含む

上記の補正を施した下で，喉頭付近の振動を基準とした口唇付近の音圧の振幅スペクトル  $|H_{AC}(f)|$ ，側頭部振動の振幅スペクトル  $|H_{RT,d}(f)|$ ，および外耳道内音圧の振幅スペクトル  $|H_{EC}(f)|$  を比較評価に用いた． $|H_{AC}(f)|$ ， $|H_{RT,d}(f)|$  および  $|H_{EC}(f)|$  はそれぞれのパワーの最大値を 0 dB として正規化し，正規化された振幅スペクトルを所望の伝達関数とした．今後，正規化された 3 つの伝達関数をそれぞれ  $|H_{lxac}(f)|$ ， $|H_{lxrt}(f)|$ ， $|H_{lxec}(f)|$  と表す．

## 4.2.2 測定結果

喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ )，側頭部振動への伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ )，および外耳道内音圧への伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) について，測定参加者 F1 (女性) および M1~M6 (男性) に対する測定結果をそれぞれ図 4.3 および図 4.4~図 4.9 に示す．各図の (a)~(e) はそれぞれ母音 /a/, /e/, /i/, /u/, /o/ に対する 10 回の測定結果の平均を表す．各図の (a)~(e) における薄い塗りつぶしは標準偏差を表す．

$|H_{lxac}(f)|$  の測定結果では，従来より知られている声道伝達関数と同様に，多くの参加者において各母音の第一・第二フォルマントに対応するピークが観察された．この傾向は参加者 M1 (図 4.4) および M2 (図 4.5) において特にはっきりと観察された．一方で，多くの参加者において第三フォルマント以降の高次のフォルマントに対応するピークははっきりとは見られなかった．

$|H_{lxrt}(f)|$  の測定結果では，参加者 M1, M2 のすべての母音 (図 4.4, 図 4.5) および他の参加者の一部の母音において第一フォルマントに対応するピークが観察された．加えて，参加者・母音の違いに依らず，2 kHz 以上の高域成分がそれ以下の低域成分よりも最大約 50 dB 減衰するという共通の傾向が見られた．

$|H_{lxec}(f)|$  の測定結果では，いずれの参加者・母音においてもフォルマントに対応するピークは観察されなかった．参加者・母音の違いに依らない共通の傾向として，2~3 kHz の周波数帯域にピークを有していた．

各参加者における  $|H_{lxac}(f)|$ ， $|H_{lxrt}(f)|$  および  $|H_{lxec}(f)|$  の母音間での平均を図 4.10 に示す． $|H_{lxac}(f)|$  の母音間での平均は，いずれの参加者においても約 40 dB のレンジを有し，2 kHz 付近にピークを有していた． $|H_{lxrt}(f)|$  の母音間での平均

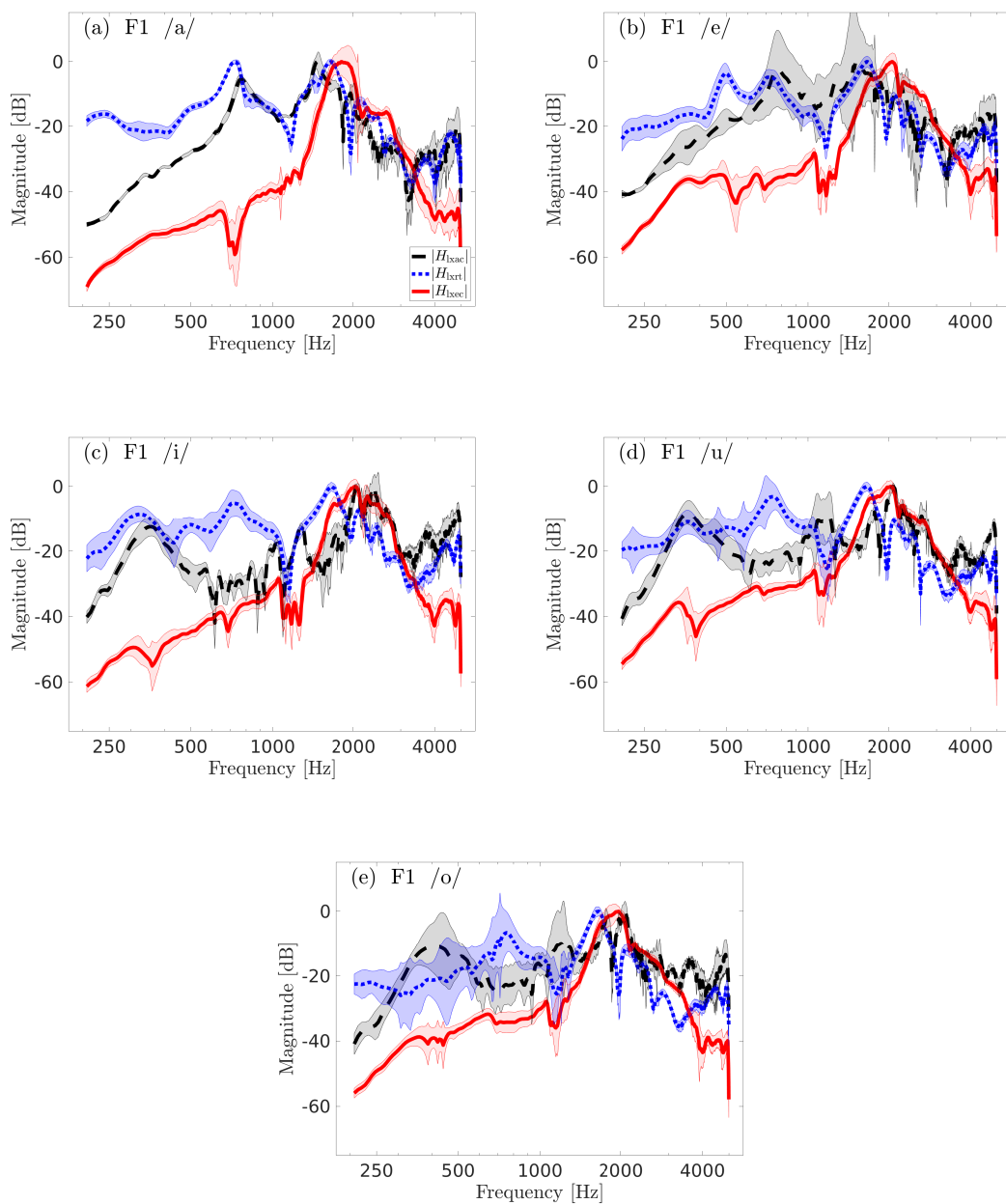


図 4.3: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ), 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 F1 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

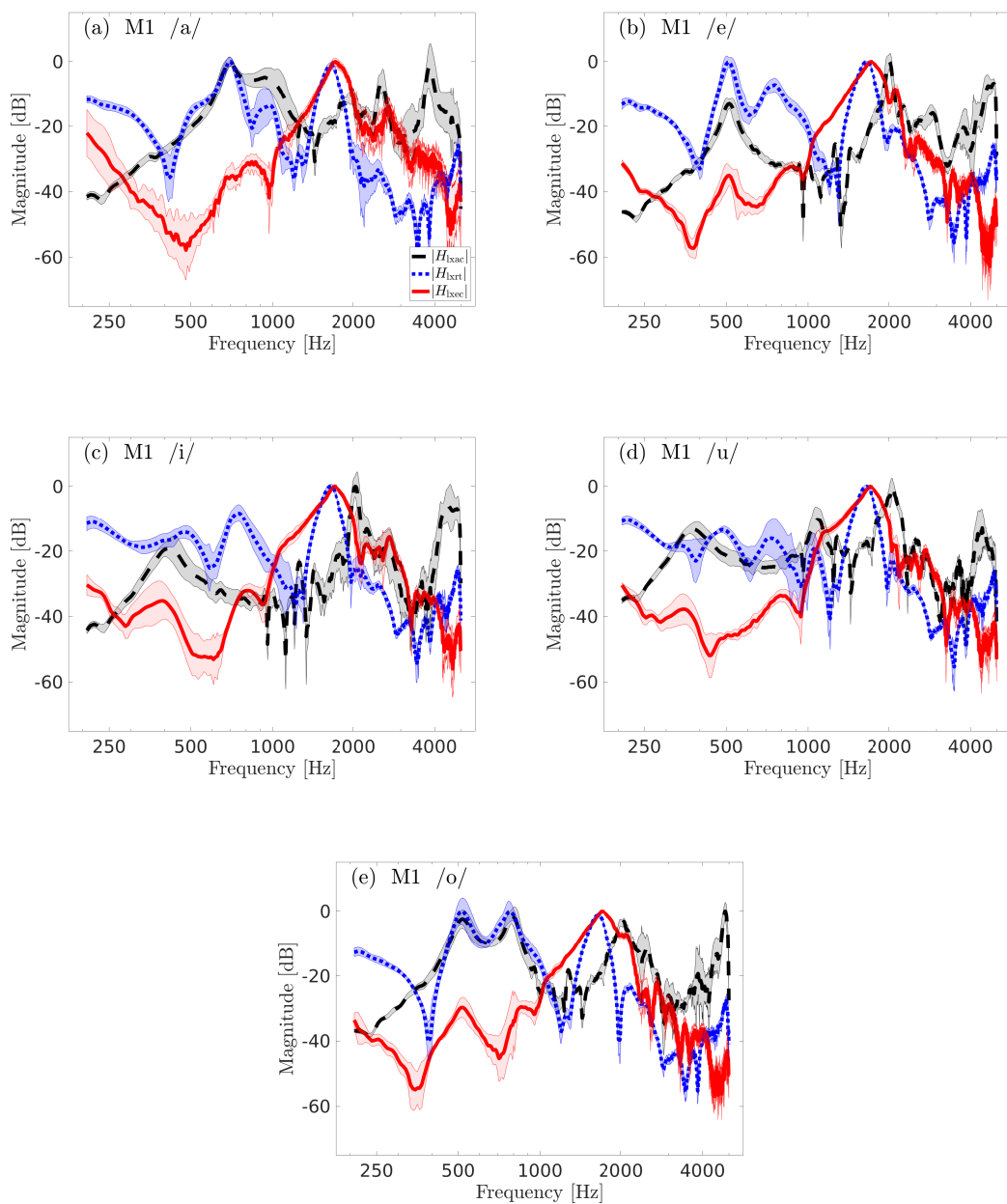


図 4.4: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M1 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)



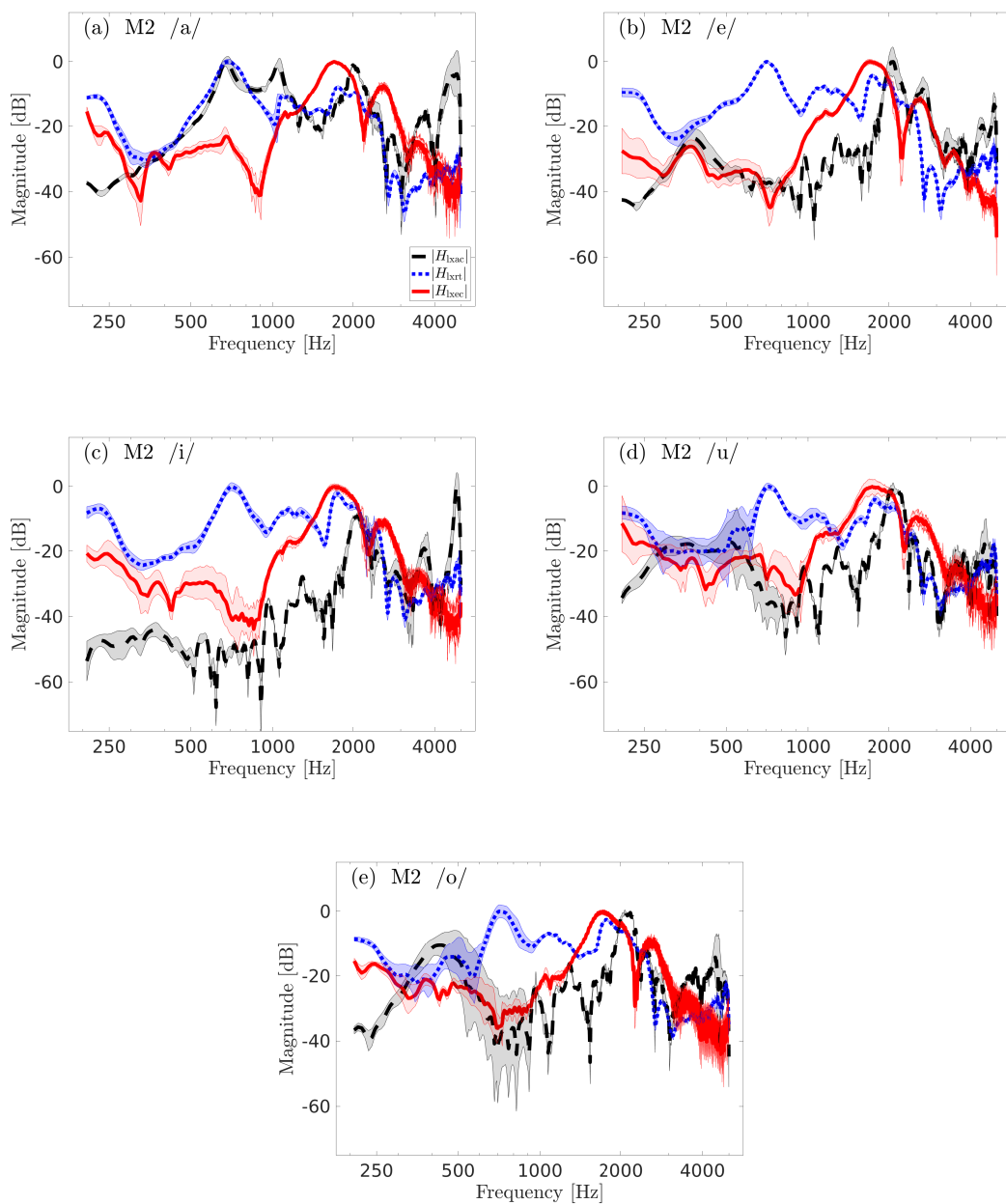


図 4.5: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M2 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

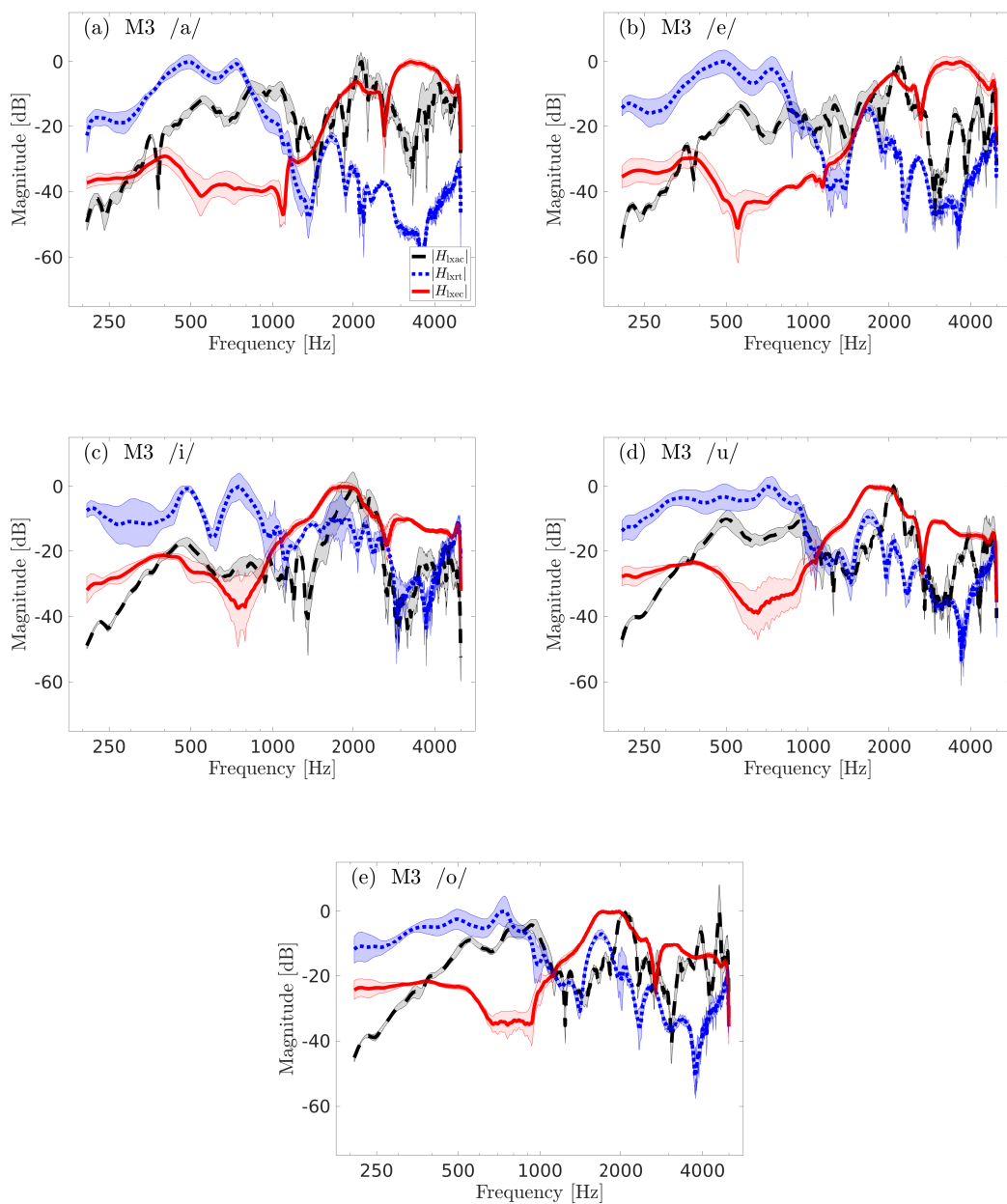


図 4.6: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M3 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

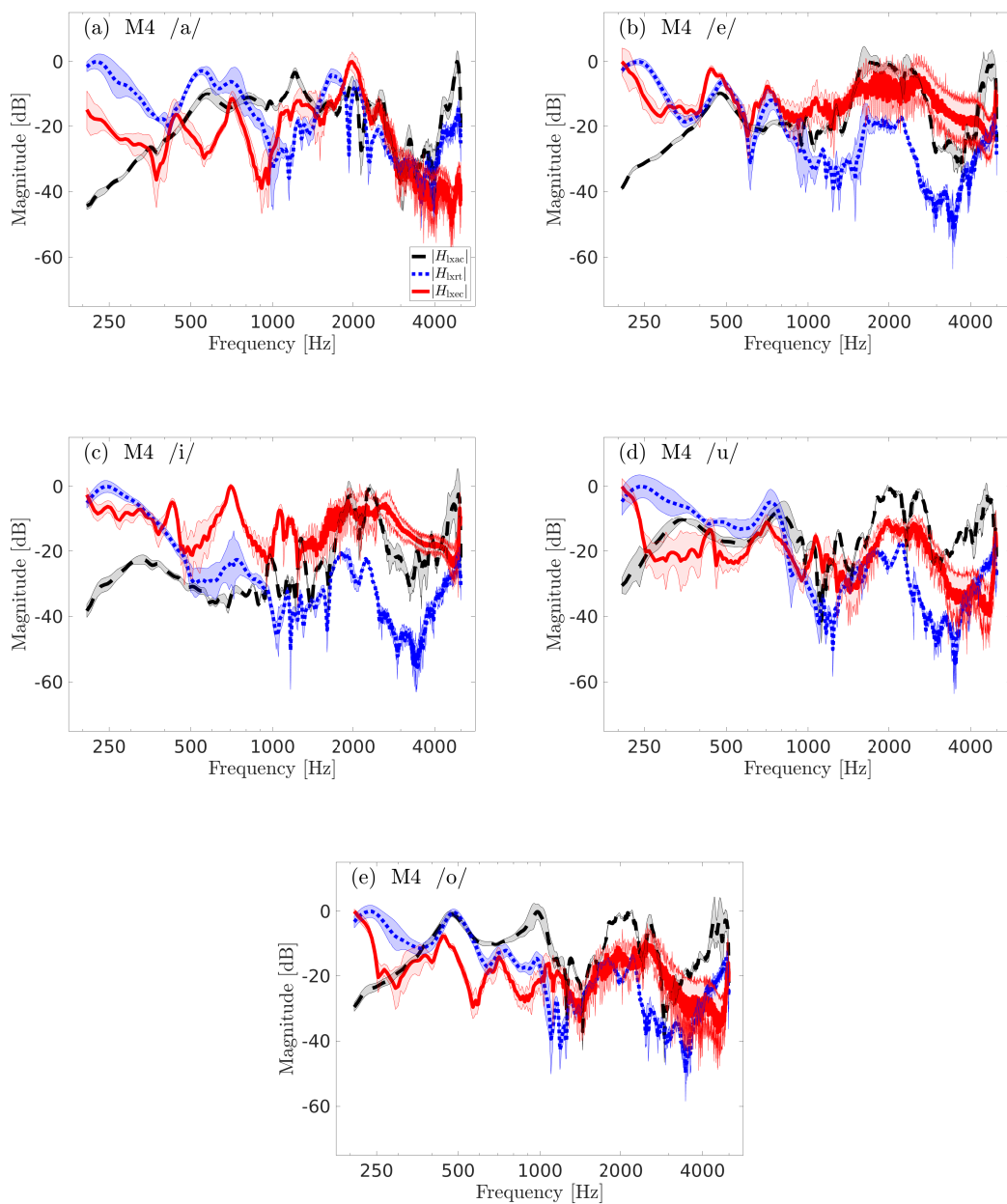


図 4.7: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M4 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

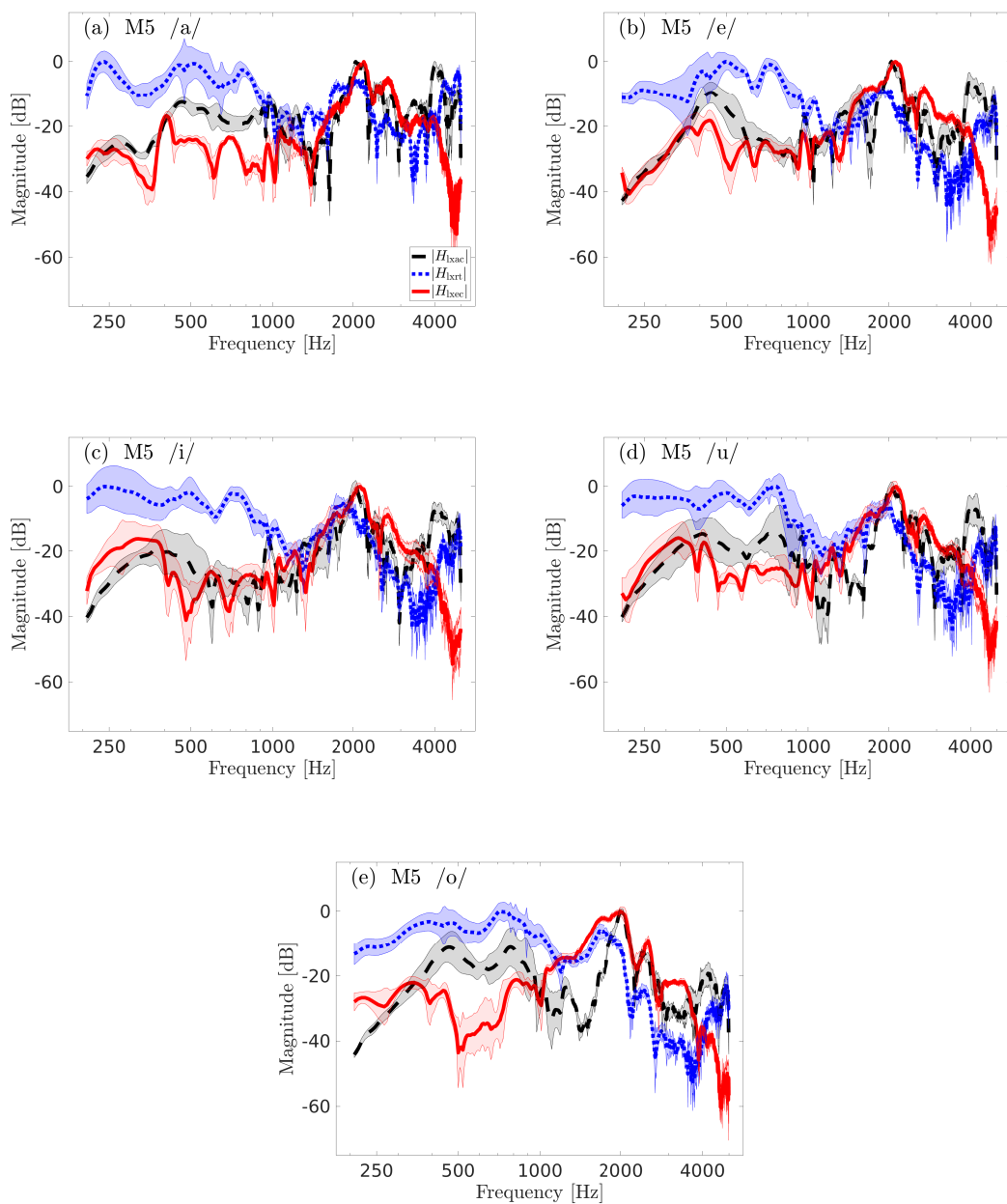


図 4.8: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M5 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

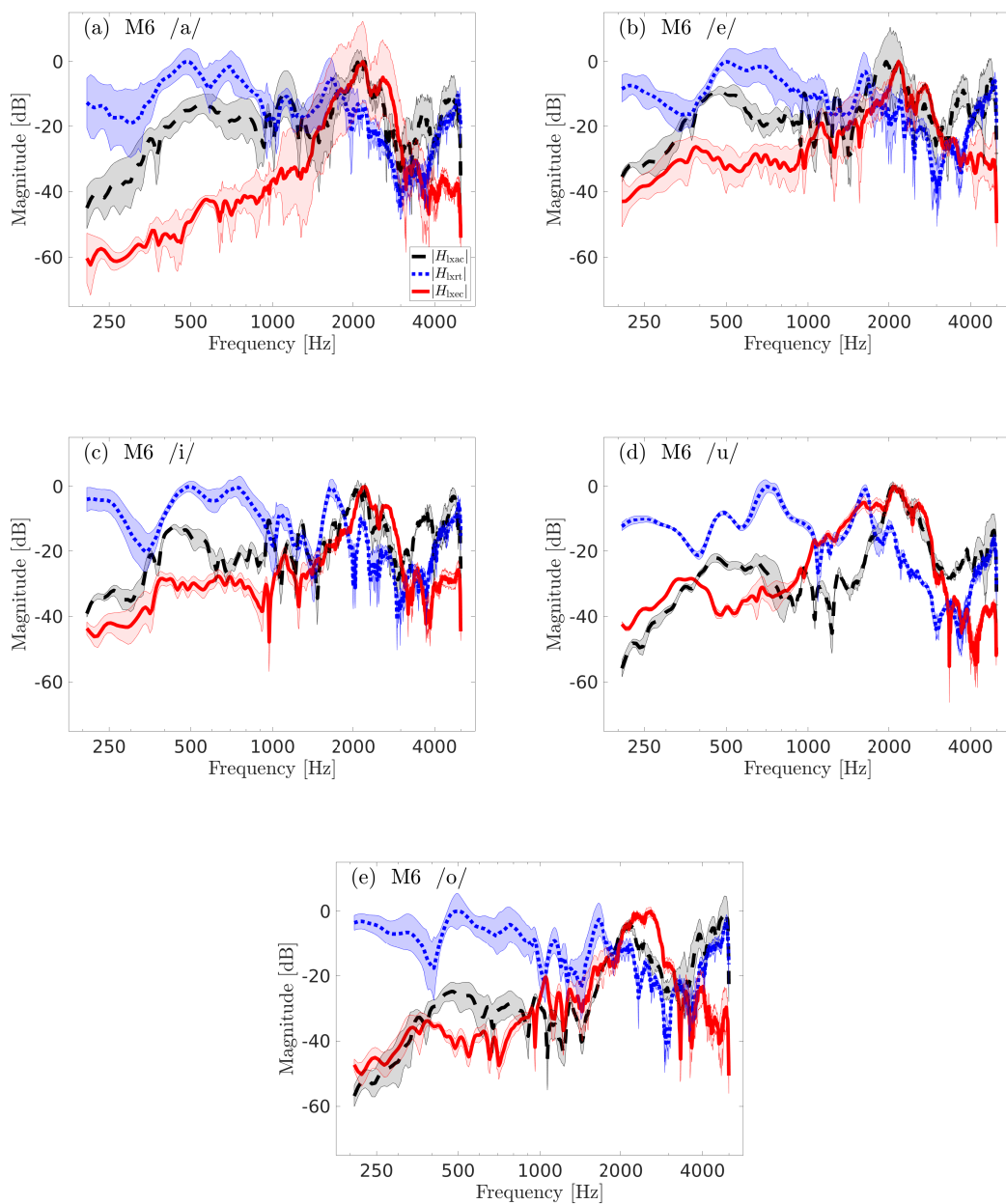


図 4.9: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の参加者 M6 における測定結果: (a) 母音/a/, (b) 母音/e/, (c) 母音/i/, (d) 母音/u/, (e) 母音/o/ (鎖線・点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す)

表 4.1: 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) に見られる参加者共通のピーク周波数の平均

伝達関数	ピーク周波数の平均 [Hz]	参加者
$ H_{lxrt}(f) $	493	M1, M3~M6
	723	全員
	1718	全員
$ H_{lxec}(f) $	1946	全員
	2638	全員

は、いずれの参加者においても約 40 ~ 50 dB のレンジを有し、2 kHz よりも低域に 2 つまたは 3 つの共通したピークを有していた。  $|H_{lxec}(f)|$  の母音間での平均は、いずれの参加者においても約 40 ~ 50 dB のレンジを有し、1.5 ~ 3 kHz の周波数帯域において 2 つの共通したピークを有していた。  $|H_{lxrt}(f)|$  および  $|H_{lxec}(f)|$  に見られる参加者間共通のピーク周波数の平均を表 4.1 に示す。

### 4.2.3 考察

口唇付近の音圧の測定では、励振信号が声道の共鳴特性の影響を受けて口唇付近で観測される。したがって、図 4.3~4.9 における  $|H_{lxac}(f)|$  の測定結果は、原理的には従来より知られている声道伝達関数に対応するものである。図 4.3~4.9 における  $|H_{lxac}(f)|$  の測定結果では、多くの場合で第一・第二フォルマントに対応するスペクトルピークが見られたことから、本測定結果には声道での伝達特性の影響が反映されているものと考えられる。一方で、図 4.10 に示すように、  $|H_{lxac}(f)|$  は母音によらず 2 kHz 付近に共通のピークを有していた。これは、加振器や防音箱などの測定装置に起因する特性の影響により生じた可能性が考えられる。

一部の参加者（特に参加者 M1 (4.4) と M2 (4.5) ) における  $|H_{lxrt}(f)|$  には、母音の第一フォルマントに対応するスペクトルピークが見られた。このことから、  $|H_{lxrt}(f)|$  には声道での伝達特性の影響が含まれていることが示唆される。また、表

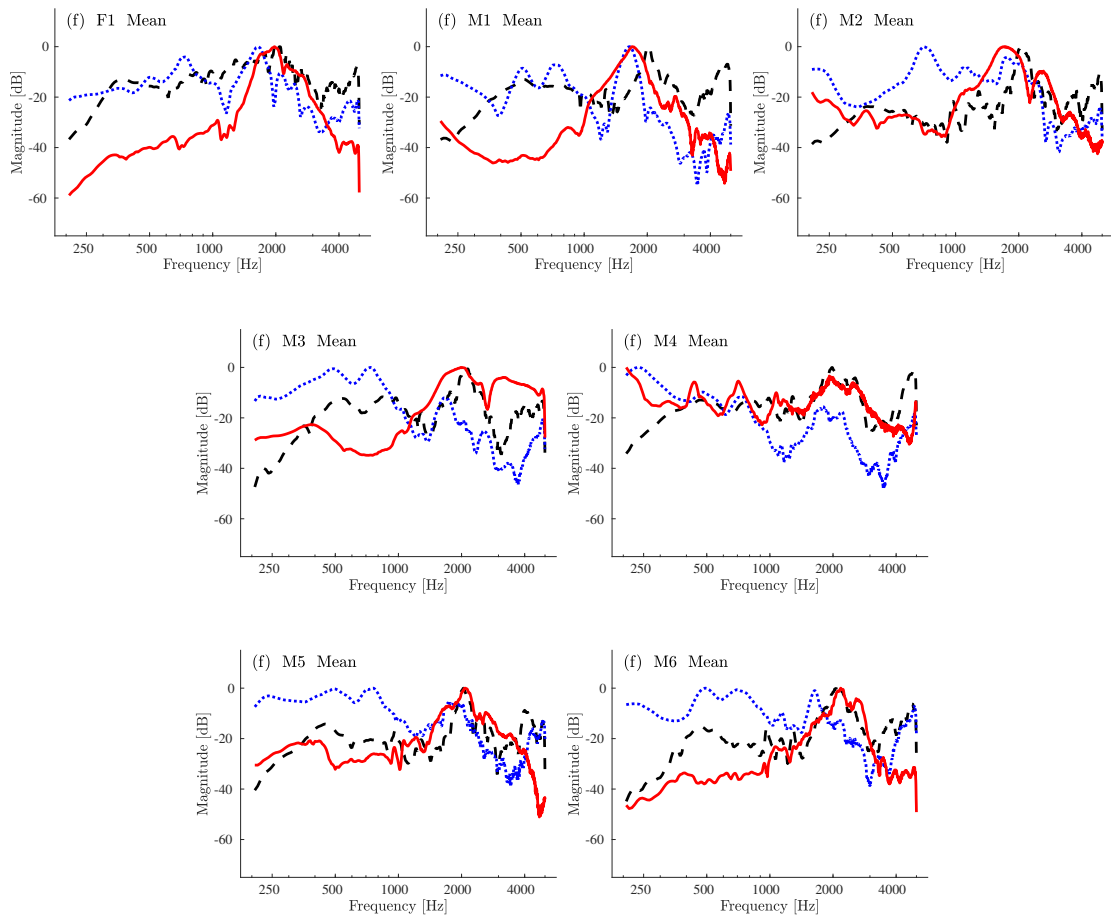


図 4.10: 喉頭付近の振動から口唇付近の音圧への伝達関数 ( $|H_{lxac}(f)|$ ) , 喉頭付近の振動から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{lxrt}(f)|$ ) および喉頭付近の振動から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{lxec}(f)|$ ) の母音間での平均: (a) 参加者 F1, (b) 参加者 M1, (c) 参加者 M2, (d) 参加者 M3, (e) 参加者 M4, (f) 参加者 M5, (g) 参加者 M6

4.1に示すように、 $|H_{\text{lxrt}}(f)|$ の母音間平均（図4.10）には参加者共通の3つのピークが観察された。頭蓋骨の共振周波数は約0.8～1.2 kHzである [66] ことを考慮すると、参加者共通のピークのうち700 Hz付近に表れたものは頭蓋骨自体の振動における一次の共振に対応している可能性が考えられる。さらに、測定位置に接する側頭骨は耳小骨を囲むように位置しており、耳小骨の共振周波数が1000～1500 Hz付近であると報告されている [67] ことを考慮すると、参加者共通のピークのうち1700 Hz付近に表れたものは耳小骨の共振特性と無関係ではないかもしれない。

表4.1に示すように、 $|H_{\text{lxec}}(f)|$ の測定結果の平均（図4.10）では母音・参加者の違いによらず2600 kHzの周波数帯域にピークを有していた。前述の通り、 $|H_{\text{lxec}}(f)|$ の測定時には外耳道を閉塞した上で、耳閉塞効果の周波数特性を補正することにより外耳道開放時の特性を推定している。ここで、気導音における外耳道の伝達関数は2～3 kHz付近にピークを有することが知られている [50, 68]。Stenfeltらの測定から、側頭部への骨導刺激に伴う外耳道内音圧においても、2～3 kHz付近に類似のピークが形成されることが分かっている [53]。これらのことを踏まえると、 $|H_{\text{lxec}}(f)|$ における参加者共通の2600 Hz付近のピークは、開放時の外耳道の伝達特性の影響が反映されたものであると考えられる。

## 4.3 口腔内音圧を基準とした骨導経路の伝達特性

第二に、骨導音声の中でも喉頭音源から声道内の圧力伝搬を経て聴覚系に伝達される成分に着目し、測定可能な外耳道内音圧までの骨導音声の伝達特性を明らかにする。そこで、口腔内（声道内）の硬口蓋付近に励振音源を設定し、口腔内の音源を基準としたときの側頭部・外耳道までの伝達関数を測定する。

### 4.3.1 側頭部・外耳道での伝達関数の測定

ここでは、喉頭音源から声道内の圧力伝搬を経て聴覚系に伝達される経路と、声道内を経由しない経路とに切り分けて考え、前者の経路のみの影響を考慮するものとする。そこで、声道内の音圧を基準としたときの側頭部振動および外耳道内音圧までの伝達関数を測定する。



## 測定参加者

大学院生 5 名（男性 3 名，女性 2 名）が測定に参加した．参加者の年齢は 23 ～ 27 歳であり，いずれも正常聴力を有する健常話者であった．

## 口腔内での励振装置

図 4.11 に，口腔内での励振装置を示す．口腔内での測定信号の励振には，小型スピーカー（VECO 32KC08-1）を用いた．スピーカーはゴム製のマウスピースによって固定し，硬口蓋下部にマウスピースおよびスピーカーで囲われた閉空間ができるようにした．マウスピースは，歯科技工士により予め作成された測定参加者の上顎を 3D スキャンし，硬口蓋の形状に合わせて作成した鋳型にシリコンゴムを注入することで自作した．マウスピースの縦横長は測定参加者に依らずそれぞれ 39 mm であり，高さは測定参加者により異なったがいずれも 30 ～ 35 mm 程度であった．また，マウスピースのゴムの厚さは 4 mm であった．ゴムの硬度はショア 30 A であった．マウスピースとスピーカーで囲われた硬口蓋下部の閉空間は，準静的音場であると仮定した．プローブマイクロホン（ETYMOTIC RESEARCH ER-10C）のイヤータップ部（ER-10C-03）を挿入し，励振により閉空間内に生じる音圧を測定した．

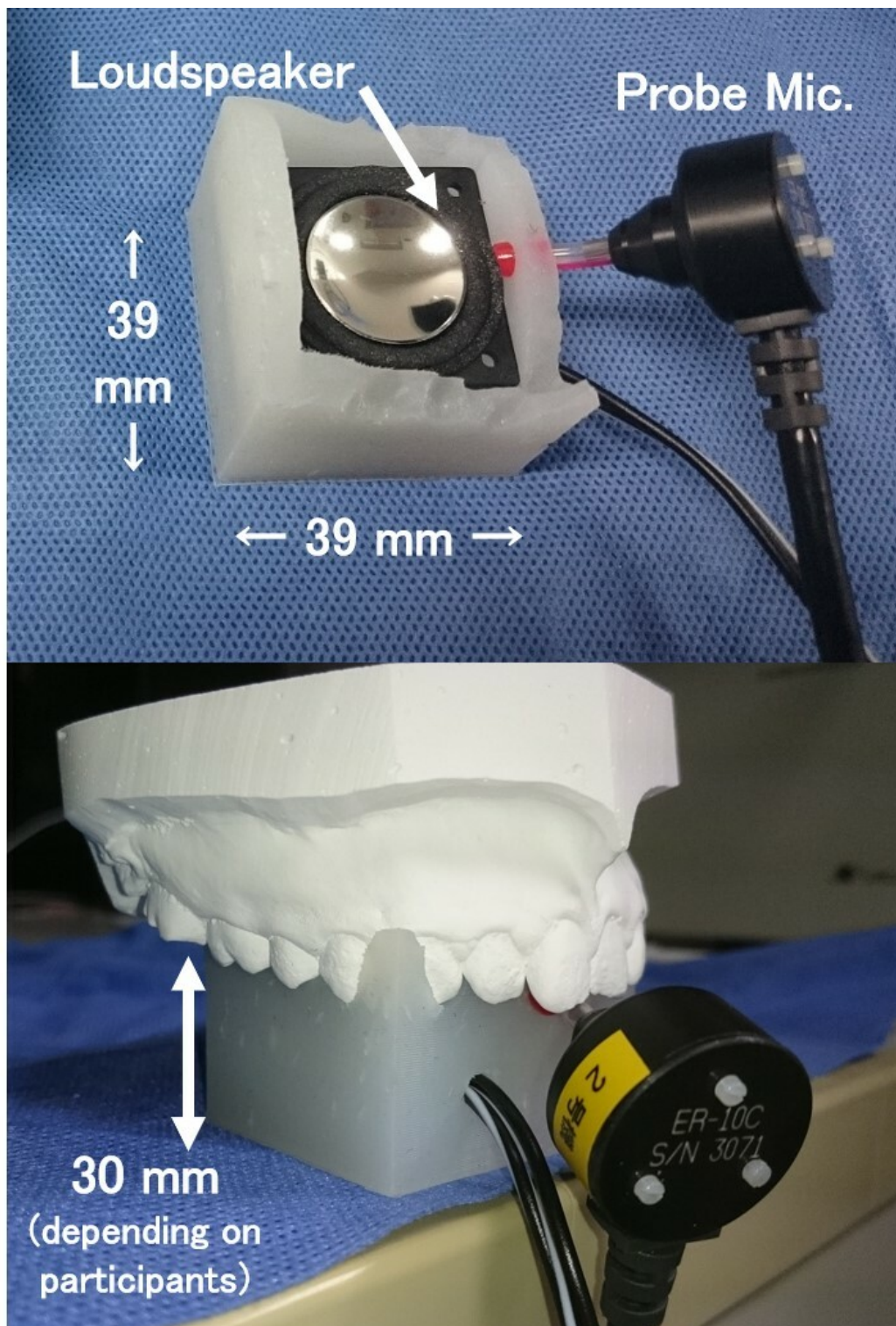


図 4.11: 口腔内での励振装置

## 測定環境と測定装置の概略

図 4.12 に、測定環境と測定装置の概略を示す。測定は防音室内にて行われた。励振信号は PC (LG Sharkoon, Windows 10) のソフトウェア (Steinberg Cubase Pro 9) より、A/D コンバータ (Steinberg UR44) を通じて、マウスピース内のスピーカーから出力された。励振信号によって生じる側頭部振動を測定するために、骨導マイクロホン (TEMCO HG70) を左側頭部に設置した。また、励振信号により生じる外耳道内音圧を測定するために、硬口蓋に挿入したものと同型のプローブマイクロホンを右耳に挿入した。図 4.13 に、スピーカーと各マイクロホンの装着位置を示す。側頭部への骨導マイクロホンの固定には、付属のベルトアタッチメントを用いた。プローブマイクロホンを右耳に挿入する際には、励振装置から漏れ出る気導音の混入を防ぐために、耳栓型のフォームイヤータップ (ER-10C-14A) を用いて外耳道内を閉塞した。このとき、イヤータップの全長の半分以上 (7 ~ 14 mm) が外耳道に挿入されていることを確認した。各マイクロホンで測定された信号はアンプで増幅された。信号のサンプリング周波数は 44.1 kHz, 量子化ビット数は 16 bits とした。

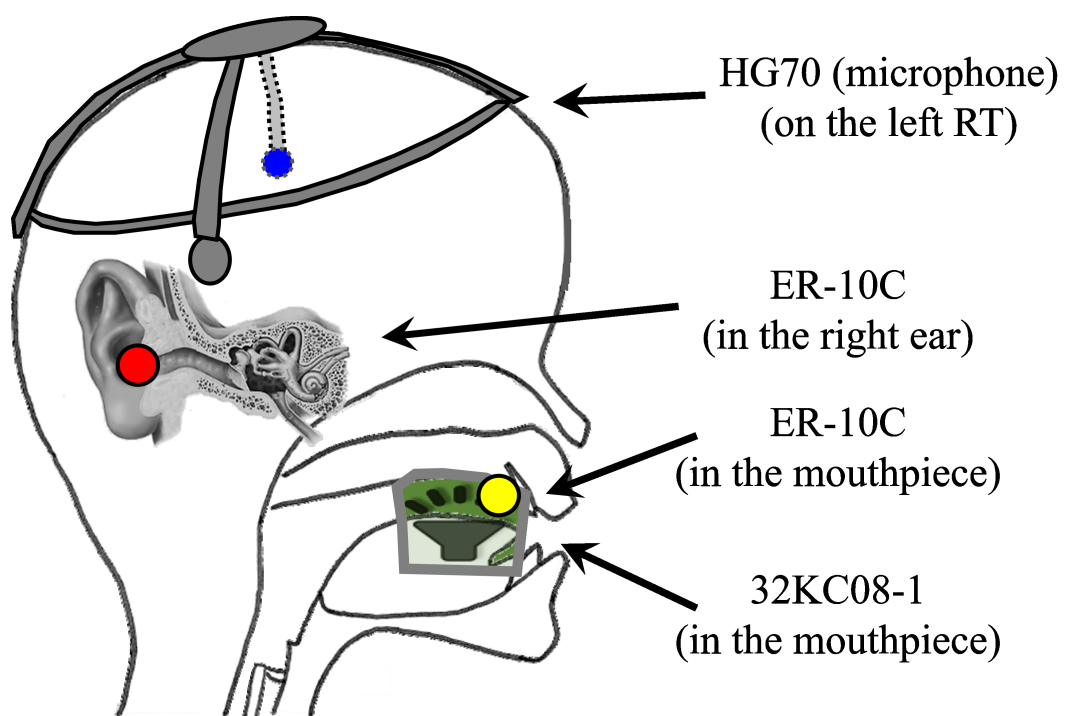


図 4.12: 測定環境と測定装置の概略

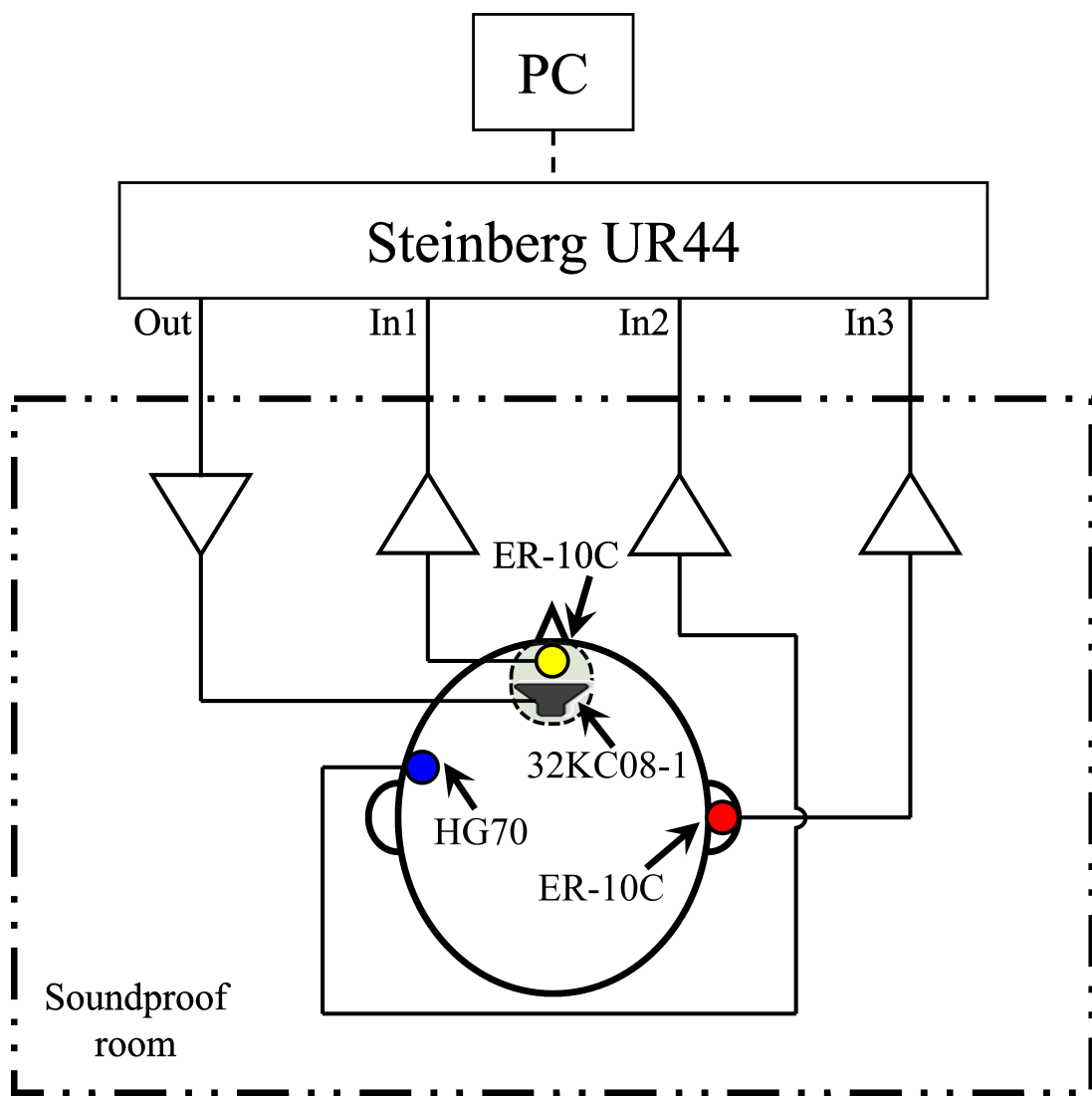


図 4.13: スピーカーとマイクロホンの装着位置

## 測定手続き

参加者には，上下顎でマウスピースを挟むように口を閉じるよう指示した．励振信号として，15 s の対数スイープ信号を用いた．立ち上がりと終端の 1 s ずつに対してコサイン窓を用いてテーパ処理し，定常部の時間長は 13 s とした．このとき，周波数は 0.1 ~ 7 kHz の範囲で遷移した．なお，測定に用いた各マイクロホンの有効な周波数帯域を考慮し，0.2 ~ 5 kHz の範囲を分析対象とした．励振と同時に，測定参加者の側頭部振動および外耳道音圧を測定した．測定は，参加者 1 人あたり 10 回行なった．各測定の間には休憩を入れ，測定を再開する際にはマウスピースが硬口蓋の形状に合わせて固定されていることを逐次確認した．休憩を含め，測定に要した時間は参加者 1 人あたり合計約 20 分であった．

## 分析

励振信号（対数スイープ信号）および，各測定位置（OC, RT, EC）での観測信号をそれぞれ  $x(t)$ ,  $y_P(t)$  ( $P = \{OC, RT, EC\}$ ) とする．このとき，励振信号を基準とした各測定位置でのインパルス応答  $h_P(t)$  を，前節 (4.1) 式に従って算出した．励振信号を基準とした各測定位置での観測信号のスペクトル  $H_P(f)$  を前節 (4.2) 式に従って算出した．得られた振幅スペクトル  $|H_P(f)|$  について，10 回の測定結果を参加者ごとに平均した．

平均された振幅スペクトルに対して，前章 3.2.4 項と同様にして骨導マイクロホンの応答特性（図 3.2）および外耳道閉塞に伴う耳閉塞効果の周波数特性（図 3.3）を補正した．さらに，前節の (4.3) 式に従い，励振信号を基準とした側頭部での観測信号の加速度特性  $|H_{RT}(f)|$  を変位特性  $|H_{RT,d}(f)|$  に変換した．このとき，(4.3) 式で得られた振幅特性  $|H_{RT,d}(f)|$  は，分析対象とする周波数帯域（0.2 ~ 5 kHz）内でのパワー  $|H_{RT,d}(f)|^2$  がこの帯域での元信号のパワー  $|H_{RT}(f)|^2$  と等しくなるように調整し，比較評価に用いた．

## 伝達関数の算出

口腔内音圧と側頭部振動および外耳道内音圧の間の振幅スペクトルの比により，口腔内音圧から側頭部振動までの伝達関数  $|H_{ocrt}(f)|$  および口腔内音圧から外耳道

内音圧までの伝達関数  $|H_{\text{ocec}}(f)|$  を次式に従って算出した。

$$|H_{\text{oert}}(f)| = \frac{|H_{\text{RT-d}}(f)|}{|H_{\text{OC}}(f)|} \quad (4.4)$$

$$|H_{\text{ocec}}(f)| = \frac{|H_{\text{EC}}(f)|}{|H_{\text{OC}}(f)|} \quad (4.5)$$

これらの伝達関数を参加者ごとに比較した。さらに、外耳道内放射による伝達特性を推定するために、参加者間で平均した伝達関数の間の比を算出した。

### 4.3.2 測定結果

#### 励振による口腔内の音圧

励振に伴う口腔のマウスピース内の音圧レベルを図4.14に示す。図4.14(a)~4.14(e)はそれぞれ参加者 P01~P05 に対する測定結果の平均を、図4.14(f)は参加者5名の間での平均を示す。図4.14(a)~4.14(e)における実線周囲の塗りつぶしは標準偏差を、破線は最大音圧レベルおよび最大より  $-10$  dB での音圧レベルを表す。また、音圧レベルが最大に対して  $-10$  dB を下回る周波数帯域を、薄く塗りつぶした領域で表す。図4.14(f)において薄く塗りつぶされた領域は、図4.14(a)~4.14(e)における塗りつぶし領域の和集合を表す。

P05を除き、3 kHz以下の周波数帯域において口腔内音圧レベルは概ね90~100 dBの間であった。一方で、3 kHz以上の周波数帯域では局所的に音圧レベルが約20 dB低下した。P05においては、2.5 kHz以下の帯域において口腔内音圧レベルが72.8~100 dBの間で変化した。これらの音圧レベルの増減（特に3 kHz以上の帯域に見られる谷）は、後述する伝達関数の測定結果に影響を与えた可能性がある。図4.14の口腔内音圧の測定結果から、口腔内の準静的音場の仮定は概ね3 kHz以下でのみ成立したことが示唆される。

#### 口腔内音圧から側頭部振動・外耳道内音圧までの伝達関数

口腔内音圧から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{\text{oert}}(f)|$ ) および、口腔内音圧から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{\text{ocec}}(f)|$ ) の測定結果を図4.15に示す。図4.15(a)~4.15(e)はそれぞれ参加者 P01~P05 に対する測定結果の平均を、図4.15(f)は参加

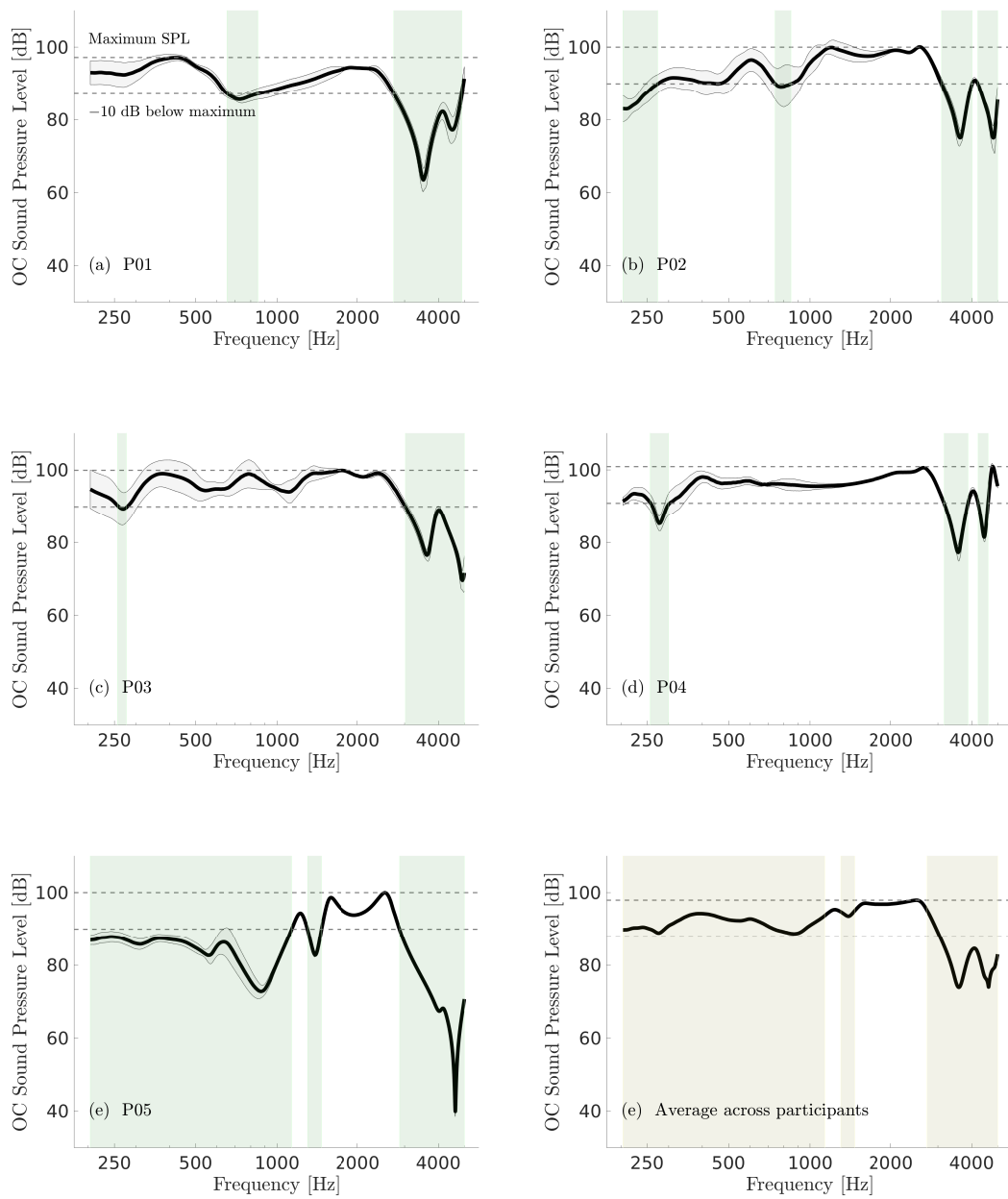


図 4.14: 励振による口腔内の平均音圧レベル: (a) 参加者 P01, (b) 参加者 P02, (c) 参加者 P03, (d) 参加者 P04, (e) 参加者 P05, (f) 参加者 5 名の平均。実線周囲の塗りつぶしは標準偏差を、破線は最大音圧レベルおよび最大より  $-10$  dB での音圧レベルを表す。(a)–(e) において薄く塗りつぶされた領域は、音圧レベルが最大に対して  $-10$  dB を下回る周波数帯域を表す。(f) において薄く塗りつぶされた領域は、(a)–(e) における塗りつぶし領域の和集合を表す。



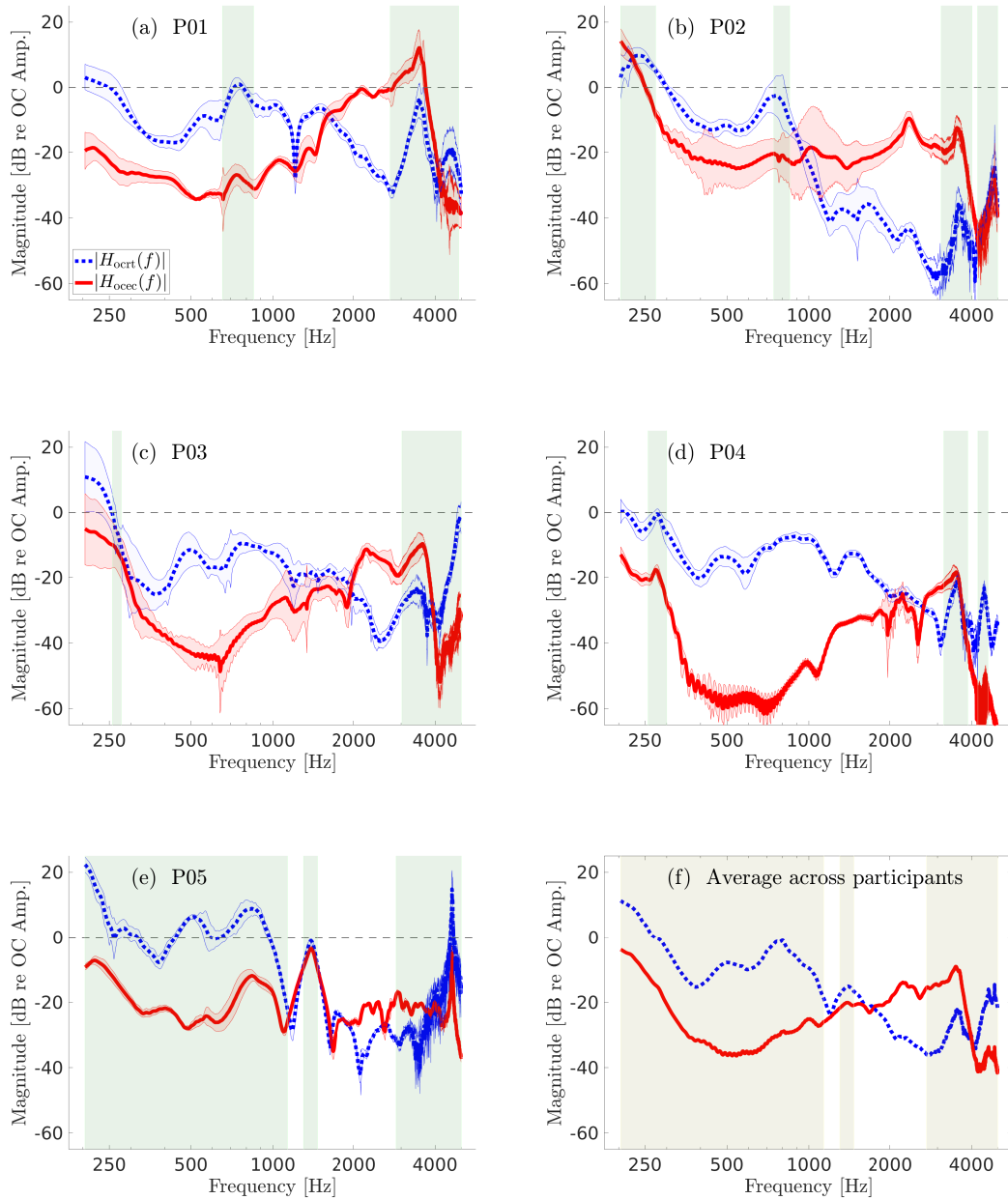


図 4.15: 口腔内音圧から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{ocrt}(f)|$ ) および口腔内音圧から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{occc}(f)|$ ) : (a) 参加者 P01, (b) 参加者 P02, (c) 参加者 P03, (d) 参加者 P04, (e) 参加者 P05, (f) 参加者 5 名の平均。点線は口腔内音圧から側頭部振動までの、実線は口腔内音圧から外耳道内音圧までの伝達関数の平均を表す。(a)–(e) における点線・実線の周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す。薄く塗りつぶされた領域は、図 4.14(a)~4.14(f) における塗りつぶし領域と同様。

者5名の間の平均を示す。図4.15(a)~4.15(e)における実線周囲の塗りつぶしは標準偏差を表す。また、薄く塗りつぶされた領域は、図4.14(a)~4.14(f)における塗りつぶし領域と同様である。

$|H_{\text{ocrt}}(f)|$  は概ね  $-40 \sim 20$  dB の間のゲインを有しており、250 Hz 以下の周波数成分が局所的に強調される一方、1 kHz 以上の周波数成分は周波数の増加とともに徐々に減衰する傾向を有していた。また、0.7 kHz および 1.4 kHz 付近にそれぞれピークを形成する傾向が見られた。これらの傾向は、概ねすべての測定参加者の結果に共通に見られた。

$|H_{\text{occc}}(f)|$  は概ね  $-50 \sim 0$  dB の間のゲインを有しており、500 Hz 以下の周波数成分は周波数の増加とともに徐々に減衰する一方、1 ~ 3 kHz の間の周波数成分が強調される傾向を有していた。図4.15(f)を見ると、 $|H_{\text{occc}}(f)|$  は平均的に 3 kHz 付近にピークを形成することが分かった。加えて、参加者 P02~P04 (図4.15(b)~4.15(d)) の  $|H_{\text{occc}}(f)|$  には 2.5 kHz 付近にもピークが見られた。参加者 P05 (図4.15(e)) の  $|H_{\text{occc}}(f)|$  には、上記のようなピークを形成する傾向は見られなかった。

口腔内音圧から側頭部振動までの伝達関数 ( $|H_{\text{ocrt}}(f)|$ ) のおよび、口腔内音圧から外耳道内音圧までの伝達関数 ( $|H_{\text{occc}}(f)|$ ) のそれぞれの測定結果の平均の比を、図4.16に示す。 $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  に対する  $|H_{\text{occc}}(f)|$  の比は概ね  $-30 \sim 20$  dB のゲインを有し、0.4 ~ 1 kHz の間の周波数成分が強調される一方で 2 ~ 4 kHz の間の周波数成分が減衰する傾向が見られた。本測定において口腔内の準静的音場が仮定される周波数帯域 (3 kHz 以下) に限定すれば、 $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  に対する  $|H_{\text{occc}}(f)|$  の比は 2.5 kHz 付近で最大となることが分かった。

### 4.3.3 考察

図4.14から、本測定での励振による口腔内音圧レベルは 3 kHz 以下の周波数帯域において安定していた一方で、3 ~ 5 kHz の周波数帯域において局所的に約 20 dB 減衰する2つの谷を有していた。これらの音圧レベルの減衰は、図4.15の伝達関数に見られる 3.5 kHz 付近の主要なピークに概ね対応している。音圧レベルの減衰は、図6.1の励振装置におけるゴム製マウスピース自体の振動がプローブマイクロホンの入力に影響して生じたものである可能性が考えられる。例として、マ

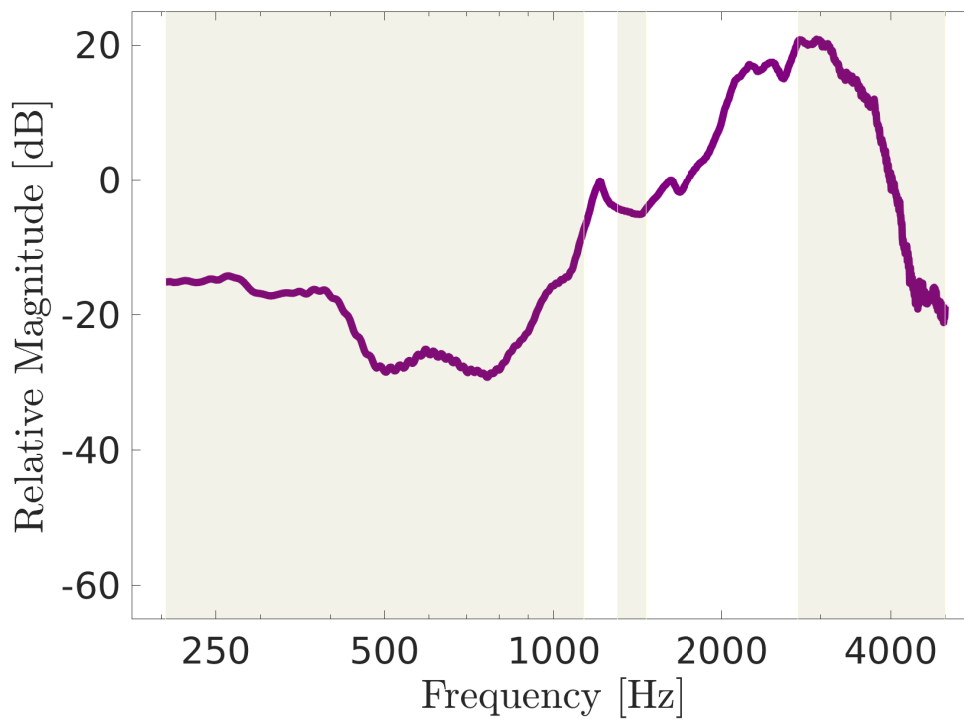


図 4.16: 口腔内音圧を基準とした，側頭部振動への伝達関数 ( $|H_{\text{oert}}(f)|$ ) の平均と外耳道内音圧への伝達関数 ( $|H_{\text{ocec}}(f)|$ ) の平均の間の比（薄く塗りつぶされた領域は，図 4.14(f) および図 4.15(f) における塗りつぶし領域と同様）

ウスピーース内に生じた定在波とプローブマイクロホン入力干渉し、互いの位相特性によりプローブマイクロホン入力の局所的な周波数成分が相殺された可能性が考えられる。マウスピーースの両端の囲いの間の幅は 39 mm であり、ゴムの柔軟性により幅に若干の増減があったと仮定すると、音圧レベルの局所的な減衰は定在波の一次の固有周波数（約 3.5 ~ 4.5 kHz）に対応していると考えられる。この減衰量をオフセットすることで、測定対象の伝達関数の正確な周波数特性を推定できるものと考えられる。

図 4.15 より、 $|H_{\text{oert}}(f)|$  は全体として周波数の増加とともに約  $-7.8$  dB/oct. の割合で減衰していることがわかる。この減衰は、主に軟組織のもつ低域通過特性に起因していると考えられる。また、頭蓋骨の共振周波数は約 0.8 ~ 1.2 kHz である [66] ことを考慮すると、 $|H_{\text{oert}}(f)|$  の 0.7 ~ 1 kHz における局所的なピークは、頭蓋骨自体の振動における一次の共振に対応している可能性が考えられる。

図 4.15 より、2 ~ 2.5 kHz 付近において  $|H_{\text{ocec}}(f)|$  のゲインが局所的に増加していることがわかる。このゲインの増加は、耳閉塞効果の補正に伴う開放外耳道の共振特性に起因していると考えられる。気導音における外耳道の伝達関数は、2 ~ 3 kHz 付近にピークを有することが知られている [50,68]。Stenfelt らの測定から、側頭部への骨導刺激に伴う外耳道内音圧においても、2 ~ 3 kHz 付近に類似のピークが形成されることが分かっており [53]、これは  $|H_{\text{ocec}}(f)|$  に見られるゲインの局所的増加と対応しているものと考えられる。

気導・骨導音声によるマスキング閾値から骨導伝達特性を求めた Pörschmann の検討により、骨導全体の伝達特性は 0.7 ~ 1.2 kHz 周辺でゲインが最大となる一方、外耳経由の骨導伝達特性は周波数の増加とともに概ね単調にゲインが減少すると推定されている [45]。 $|H_{\text{oert}}(f)|$  の形状は、Pörschmann により推定された骨導全体の伝達特性の形状とほぼ同様であった。このことから、口腔内音圧から軟組織・頭蓋骨の振動への伝達関数により骨導音声の知覚的性質を説明できる可能性が示唆される。一方で、 $|H_{\text{ocec}}(f)|$  の形状は、Pörschmann により推定された外耳経由の骨導伝達特性の形状と異なっていた。Pörschmann の検討 [45] では、骨導全体での伝達特性は参加者の発話した音声によるマスキング閾値から得られたのに対し、外耳経由の骨導伝達特性は気導提示された収録音声によるマスキング閾値から得られている。いずれも耳閉塞効果を抑制するためにイヤーマフを装着した状態で

測定されているが、収録音声の気導提示もイヤーマフの内部で行われるため、イヤーマフ自体の閉塞による低域強調・高域減衰の影響を無視できない可能性がある。  $|H_{\text{occc}}(f)|$  の 2 ~ 3 kHz 付近の特徴的な形状は Pörschmann の結果には見られないものの、この特徴は前述の通りいくつかの生理学的知見と対応しており、外耳経由の骨導音声伝達に大きく関与するものと考えられる。

図 2.6 に示す伝達経路より、図 4.16 に示す  $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  と  $|H_{\text{occc}}(f)|$  の間の比は、外耳道内で受ける伝達特性に対応する。図 4.16 の伝達関数の比は従来より知られている外耳道の伝達特性 [50,68] に比べてパワーのレンジが大きいものの、両者の 1 kHz 以上での形状が類似している。このことから、 $|H_{\text{occc}}(f)|$  は  $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  に対して気導の外耳道伝達特性を乗じたものとほぼ同等である可能性が示唆される。

図 4.15 および図 4.16 の結果を踏まえると、発話により生じた声道内音圧が軟組織・頭蓋骨を振動させる伝達過程は、1 kHz 以下の低域通過特性を有することが示唆される。さらに、軟組織・頭蓋骨の振動から外耳道内音圧が生じる伝達過程は、2 ~ 3 kHz の帯域通過特性を有することが示唆される。

## 4.4 骨導経路における声道内音圧伝搬の貢献

図 2.6 に示す骨導音声の伝達経路に基づき、側頭部で測定された伝達関数が軟組織・頭蓋骨の振動による伝達特性の影響を、外耳道内で測定された伝達関数が軟組織・頭蓋骨の振動と外耳道内放射による伝達特性の影響を反映しているとする。この下で、4.2 節の測定結果から次のことが示唆される。

- (1) 喉頭付近から聴覚末梢系周辺への軟組織・頭蓋骨の振動伝達は、主に 2 kHz 以下の周波数成分を通過させる低域通過特性を有すること。
- (2) 喉頭付近の振動から軟組織・頭蓋骨の振動を経て外耳道内音圧が生じる過程では、主に 2 ~ 3 kHz 付近の周波数成分を通過させる帯域通過特性を有すること。

また、4.3 節の測定結果から次のことが示唆される。

- (3) 声道内の音圧から聴覚末梢系周辺への軟組織・頭蓋骨の振動が生じる過程では、主に 2 kHz 以下の周波数成分を通過させる低域通過特性を有すること。

(4) 声道内の音圧から軟組織・頭蓋骨の振動を経て外耳道内音圧が生じる過程では、主に 2 ~ 3 kHz 付近の周波数成分を通過させる帯域通過特性を有すること。

4.2 節の母音ごとの測定結果から、喉頭付近の振動を基準とした場合の側頭部振動・外耳道内音圧への伝達特性の一部には、2 kHz 以下の低域で各母音に対応する声道伝達特性に類するピークが確認された。これらのことを踏まえると、骨導音声の伝達において声帯振動が直接的に軟組織・頭蓋骨の振動に作用するだけでなく、喉頭音源から声道内への音圧伝搬も軟組織・頭蓋骨の振動に作用していると推測される。

図 4.17 に、喉頭付近の振動および口腔内音圧を基準とした伝達関数の平均を再掲する。喉頭付近の振動を基準とした場合 ( $|H_{lxrt}(f)| \cdot |H_{lxec}(f)|$ )、および口腔内の音圧を基準とした場合 ( $|H_{lxrt}(f)| \cdot |H_{lxec}(f)|$ ) のいずれの測定結果においても、側頭部の振動および外耳道内音圧までの大域的な伝達特性が類似していることが分かる。これらの結果の比較から、骨導音声のスペクトル特性は気導音声と共通の喉頭音源スペクトルおよび声道伝達特性に対して、口腔内音圧を基準とした伝達関数 ( $|H_{ocrt}(f)| \cdot |H_{occc}(f)|$ ) を乗じることにより模擬できる可能性が示唆された。

## 4.5 おわりに

本章では、骨導音声が発話器官から聴覚末梢系へ伝達される際の経路とその伝達特性について検討するために、喉頭付近の振動と口腔内音圧を基準としたときの骨導経路の伝達特性の物理測定を行なった。測定の結果、喉頭付近の振動および口腔内音圧のどちらを基準としても、軟組織・頭蓋骨への伝達で 2 kHz 以下の低域通過特性を有し、軟組織・頭蓋骨を介して外耳道内に至る伝達で 2 ~ 3 kHz 付近の帯域通過特性を有するという共通の性質が見られた。また、喉頭付近の振動から軟組織・頭蓋骨の振動への伝達には、各母音に対応する声道伝達特性の影響が含まれることが分かった。

これらの結果から、骨導音声は喉頭音源から声道内への音圧伝搬を経て、軟組織・頭蓋骨の低域通過特性の影響を受けて聴覚末梢系の各部（外耳・中耳・内耳）

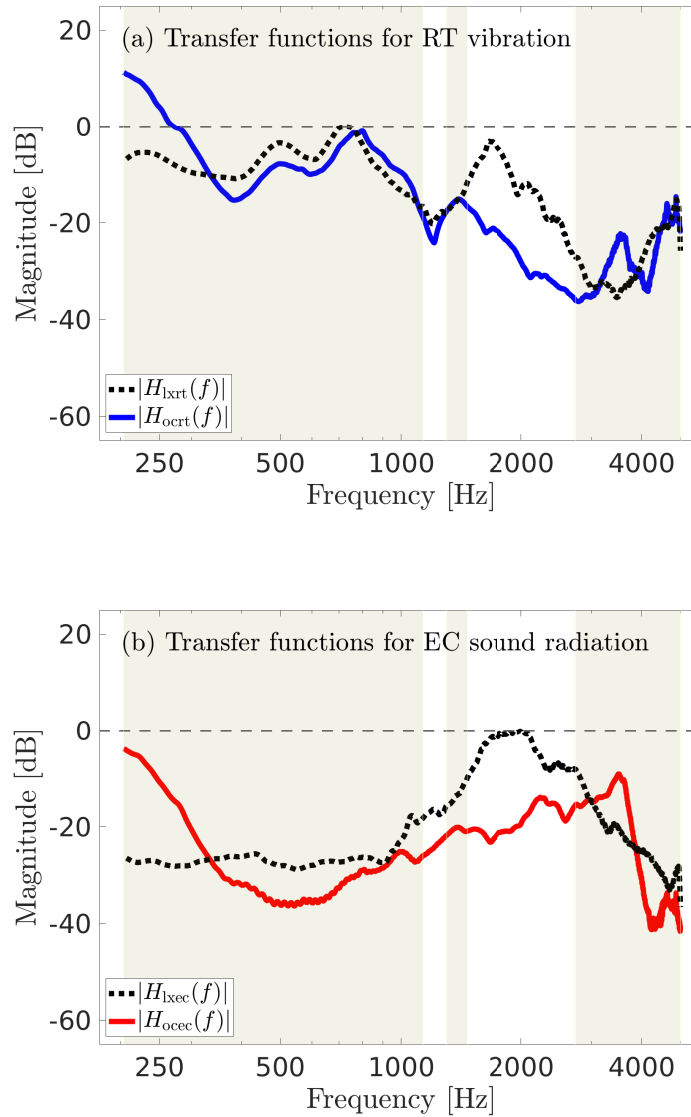


図 4.17: 喉頭付近の振動を喉頭付近の振動および口腔内音圧を基準とした伝達関数の比較: (a)  $|H_{lxrt}(f)|$  と  $|H_{ocrt}(f)|$ , (b)  $|H_{lxec}(f)|$  と  $|H_{ocec}(f)|$ . いずれも全測定参加者の間の平均.

にそれぞれ伝達される可能性が示唆される。さらに、軟組織・頭蓋骨の振動が外耳道内に漏れ出て気導音声に重畳される際に2～3 kHzの帯域通過特性の影響を受ける可能性が示唆される。

これらの考察を踏まえ、気導音声と共通の喉頭音源スペクトルおよび声道伝達特性に対して、測定された口腔内音圧から外耳道内音圧あるいは側頭部振動への伝達関数を乗じることにより、外耳経由の骨導音声および中耳以降に直接伝達される骨導音声のスペクトルを模擬する。次章では、これら二つのスペクトルから模擬骨導音声を作成し、外耳経由および内耳以降への骨導音声伝達のそれぞれが知覚に与える寄与について検討する。



## 第 5 章

# 外耳・中耳以降の骨導経路の知覚への 寄与

## 5.1 はじめに

自己聴取音声を用いた von Békésy の知覚実験により，気導音声と骨導音声のパワーの関係には発話する音韻によりやや差があるものの，両音声は互いに同程度の振幅を有することが示唆されている [41]．このことは，第2章で定義した気導音声，外耳経由の骨導音声，中耳以降での骨導音声 ( $P_a$ ,  $P_{b1}$ ,  $P_{b2}$ ) の間に概ね次式の関係が成り立つことを意味する．

$$L_{ab} = 10 \log_{10} \frac{(P_{b1} + P_{b2})}{P_a} = 0 \text{ (dB)} \quad (5.1)$$

ここで， $L_{ab}$  は気導音声と骨導音声の間のパワー比 (dB) を表す．同様に，外耳道内音声と軟組織・頭蓋骨振動との間のパワー比  $L_{b1b2}$  を

$$L_{b1b2} = 10 \log_{10} \frac{P_{b2}}{P_{b1}} \quad (5.2)$$

とするとき，(5.1) 式を満たした上で  $L_{b1b2}$  がどのような値となるかを知覚的に検討することで，聴覚フィードバックによる自己聴取音声の知覚に対して中耳以降の伝達がどの程度寄与している可能性があるかを明らかにする．

本検討では前章において明らかとなった口腔内から外耳道内および側頭部振動への伝達特性をもとに，外耳を経由する骨導音声および中耳以降に直接伝達される骨導音声のそれぞれのスペクトル特徴を模擬し，二種類の音声信号（模擬骨導音声）を作成する．そして，気導音声および二種類の模擬骨導音声を混合し自己聴取音声に聴感上最も類似するときの各信号のパワー比  $L_{ab}$ ,  $L_{b1b2}$  の条件を検討する．

## 5.2 外耳・中耳以降の伝達経路を考慮した模擬骨導音声

### 5.2.1 気導音声から骨導音声を模擬するためのスペクトル変形

図2.7の伝達経路に基づくと，外耳を経由する骨導音声が内耳に到達する時点でのスペクトル特徴は，気導音声のスペクトル特徴に対して口唇での放射特性 (+6 dB/octave) を補正し，前章で実測した  $|H_{\text{occc}}(f)|$  (口腔内音圧から外耳道内音圧への伝達関数) および中耳の伝達特性を乗じることで得られる．

中耳以降に直接伝達される骨導音声は、第2章で述べたように厳密には中耳・内耳の両方へ作用するが、慣性振動や圧縮において特定の周波数成分の大きな変形を受けないと推測する。この下では、気導音声のスペクトル特徴に対して口唇での放射特性 (+6 dB/octave) を補正し、前章で実測した  $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  (口腔内音圧から側頭部振動への伝達関数) を乗じることで、内耳に到達する時点でのスペクトル特徴が得られる。

内耳に到達する時点で上記二種類のスペクトル特徴となるよう、気導聴取の形で (外耳道入口より) 信号を提示するためには、気導聴取に伴う外耳道、鼓膜および中耳の伝達特性を予め補正する必要がある。生理学的知見 [50,69] から知られている外耳道と鼓膜、および中耳の伝達関数を図5.1に示す。

以上のことを踏まえ、外耳経由の骨導音声スペクトル ( $|X_{\text{b1}}(f)|$ ) および中耳以降に直接伝達される骨導音声スペクトル ( $|X_{\text{b2}}(f)|$ ) は、気導音声スペクトル ( $|X_{\text{a}}(f)|$ ) を基準として次式のように表現できる。

$$|X_{\text{b1}}(f)| = |M^{-1}(f)||H_{\text{occc}}(f)||R^{-1}(f)||X_{\text{a}}(f)| \quad (5.3)$$

$$|X_{\text{b2}}(f)| = |O^{-1}(f)||M^{-1}(f)||H_{\text{ocrt}}(f)||R^{-1}(f)||X_{\text{a}}(f)| \quad (5.4)$$

ここで、 $|O^{-1}(f)|$ 、 $|M^{-1}(f)|$  はそれぞれ図5.1に示す外耳道、鼓膜と中耳の伝達特性に対する逆特性、 $|R^{-1}(f)|$  は放射特性 (+6 dB/octave) に対する逆特性を表す。

## 5.2.2 伝達特性を近似するフィルタの設計

(5.3) 式と (5.4) 式に基づいて、模擬骨導音声を作成するためのフィルタを構築する。

(5.3) 式より、気導音声から外耳経由の骨導音を模擬するための伝達関数を  $|H_{\text{b1}}(f)| = |M^{-1}(f)||H_{\text{occc}}(f)||R^{-1}(f)|$  として求めた。同様に、(5.4) より、気導音声から中耳以降に直接到達する骨導音を模擬するための伝達関数を  $|H_{\text{b2}}(f)| = |O^{-1}(f)||M^{-1}(f)||H_{\text{ocrt}}(f)||R^{-1}(f)|$  として求めた。ここで、それぞれの伝達関数を 0 ~ 22.05 kHz の範囲で定義するため、 $|H_{\text{occc}}(f)|$  および  $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  における測定範囲外の周波数帯域 (0.25 kHz 未満および 5 kHz 以上) はフラットな振幅特性を持つとして計算した。

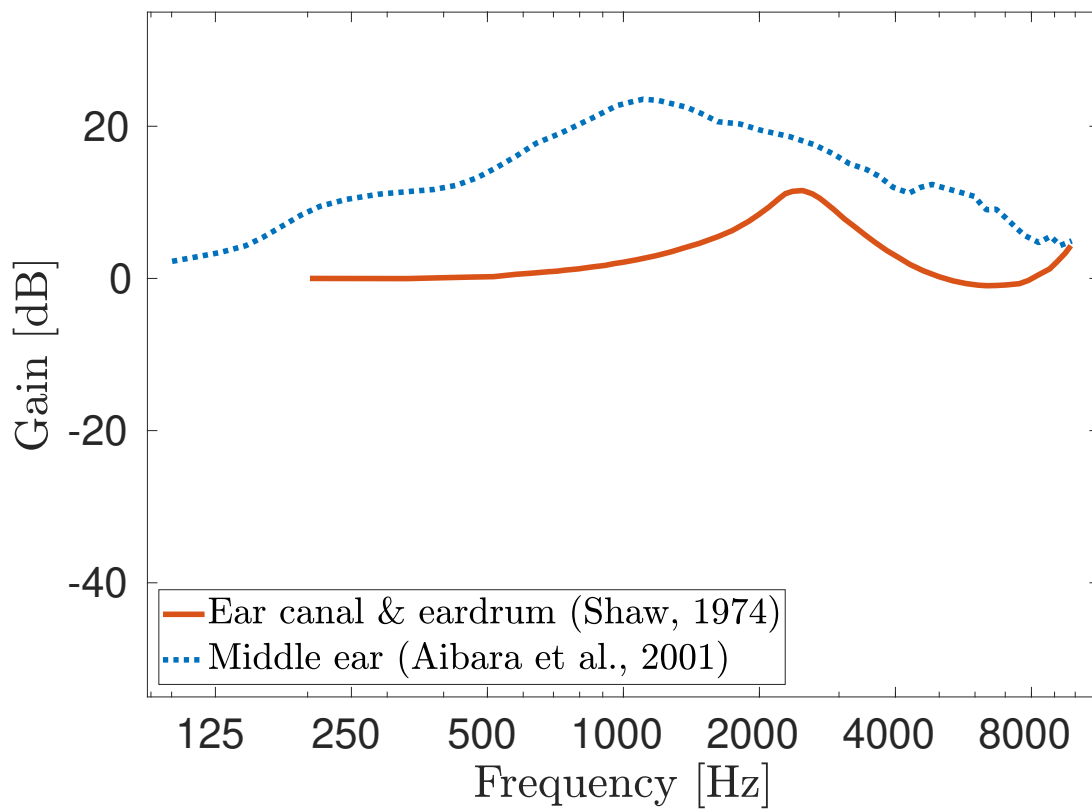


図 5.1: 生理学的知見から知られている外耳道・鼓膜と中耳の伝達関数（実線: Shaw, 1974 [50], 点線: Aibara *et al.*, 2001 [69] による測定結果

上記で求めた振幅特性  $|H_{b1}(f)|$ ,  $|H_{b2}(f)|$  に対する二乗誤差を最小とするような FIR フィルタをそれぞれ設計した。フィルタの設計は MATLAB 上で行い、サンプリング周波数は 44.1 kHz, フィルタ次数は 8192 とした。ここで,  $H_{b1}(f)$  と  $H_{b2}(f)$  における位相特性は未知であるため, FIR フィルタは直線位相特性を持つように設計された。図 5.2 に, 設計した FIR フィルタの振幅特性と位相特性を示す。

### 5.3 自己聴取音声を用いた気導音声と模擬骨導音声のパワー比の主観評価実験

骨導音声知覚において, 中耳以降に直接伝達される経路の寄与がどの程度であるかを明らかにするために, 前節において設計されたフィルタを用いて骨導音声を模擬し, 自己聴取音声に占める気導音声および二種類の模擬骨導音声の間のパワー比を知覚的に検討する。

#### 5.3.1 気導音声の収録

話者

大学院生 7 名 (男性 5 名, 女性 2 名) の音声を収録した。話者の年齢は 22 ~ 29 歳であり, いずれも正常聴力を有する健常話者であった。

収録環境と収録装置

収録は防音室内にて行った。音声収録の制御は PC (LG Sharkoon, Windows 10) 上のソフトウェア (MATLAB) で行なった。音声の収録は, 話者の口唇から水平に約 10 cm の距離に設置したマイクロホン (Rode NT1-A) により行なった。マイクロホンからの出力をオーディオインタフェース (Steinberg UR44) を通じて PC に入力した。収録音声のサンプリング周波数は 44.1 kHz, 量子化ビット数は 16 bits とした。

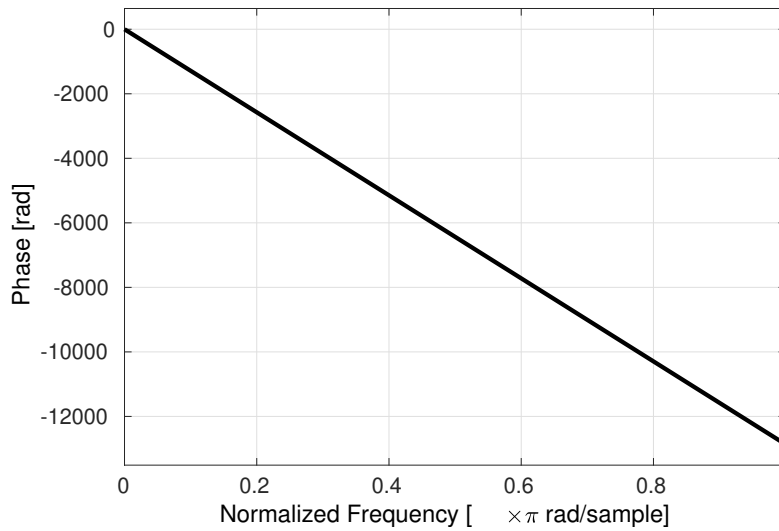
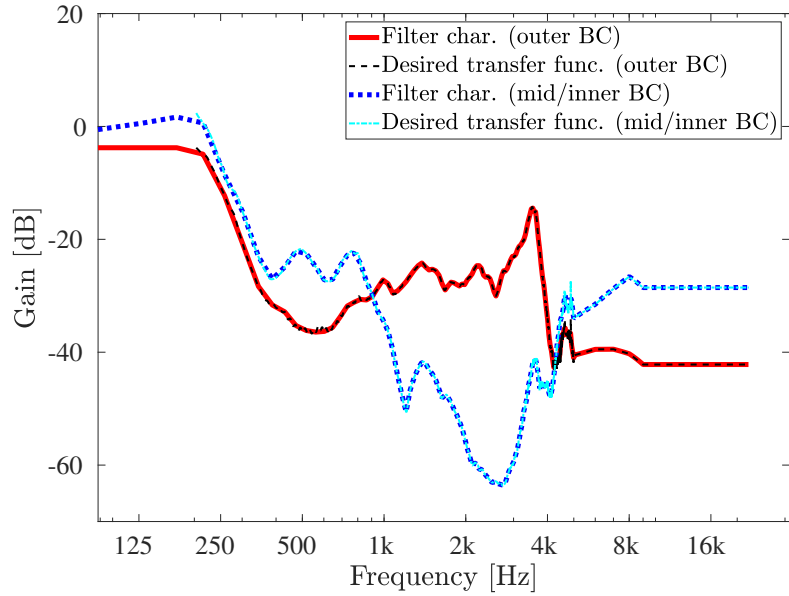


図 5.2: 模擬骨導音声のための FIR フィルタの振幅・位相特性 (上: 直線・破線はそれぞれ  $|H_{b1}(f)|$  に対するフィルタ特性とその真値, 点線・鎖線はそれぞれ  $|H_{b2}(f)|$  に対するフィルタ特性とその真値)

## 収録内容

話者には，母音/a/を約 2.5 sec の時間長で発話させた．

### 5.3.2 実験方法

#### 参加者

上述した気導音声の収録話者が実験に参加した．

#### 実験装置

図 5.3 に示す実験装置を用いて実験を行なった．実験刺激の提示には，参加者自らが発話した音声を実験中に聴取できるようにするために開放型ヘッドホン（STAX SR-L700）を用いた．実験刺激の提示制御は，PC（LG Sharkoon, Windows 10）上のソフトウェア（MATLAB）で行なった．実験刺激は PC より，オーディオインタフェース（Steinberg UR44）を経由してヘッドホンに入力された．参加者の反応の取得には MATLAB 上の GUI を用いた．

#### 実験刺激

実験刺激として，自己聴取音声を模擬した信号を用いた．自己聴取音声を模擬した信号は，次の 3 種類の信号すべてを後述する条件に応じて混合させた信号とした．

- 5.3.1 項で収録した母音/a/（気導音声）
- 気導音声に対して 5.2.2 項で設計した  $|H_{b1}(f)|$  フィルタを適用した信号（模擬骨導音声 b1）
- 気導音声に対して 5.2.2 項で設計した  $|H_{b2}(f)|$  フィルタを適用した信号（模擬骨導音声 b2）

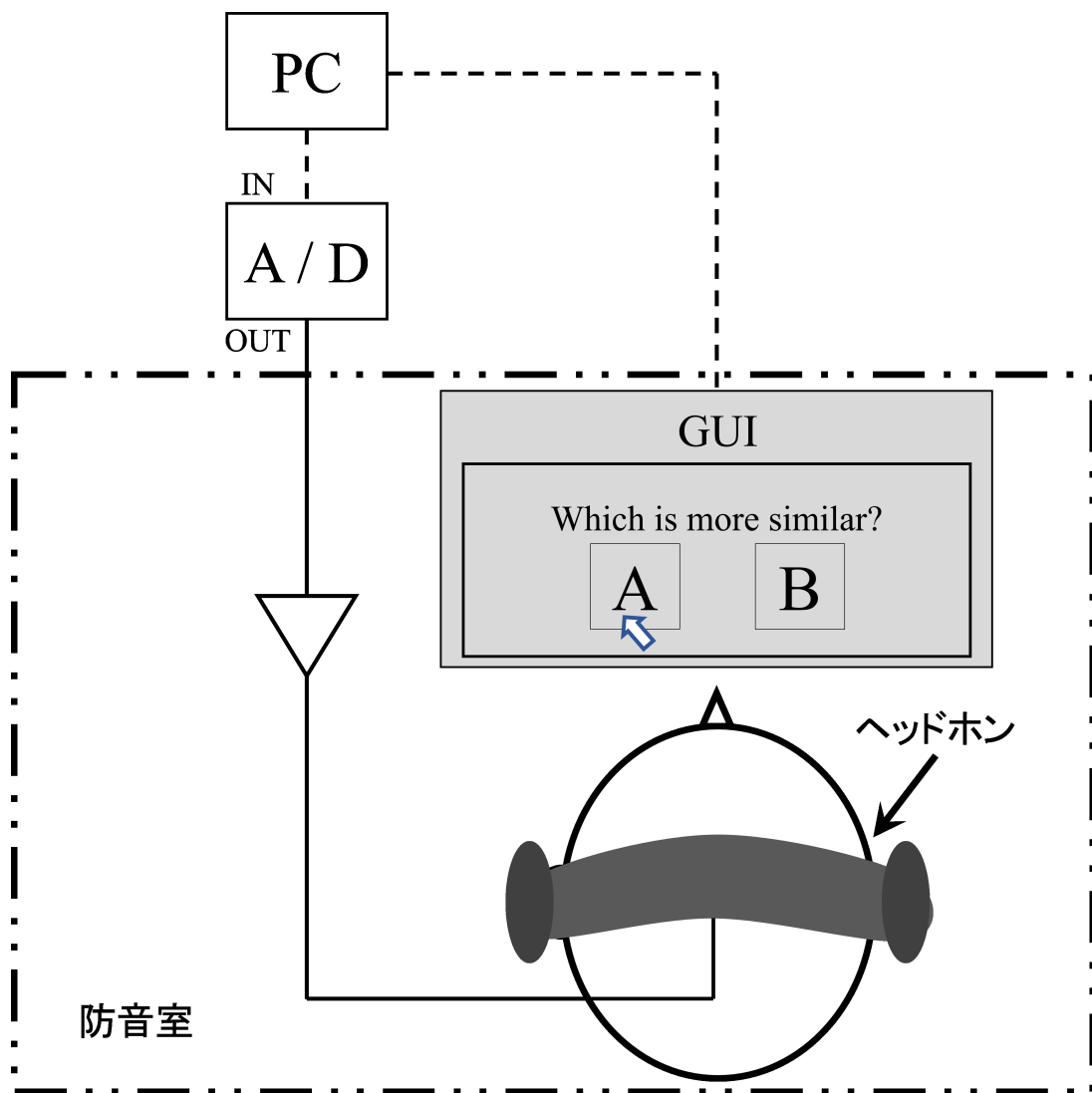


図 5.3: 気導音声と模擬骨導音声のパワー比の主観評価実験のための実験装置の概略



提示制御において、気導音声のパワー  $P_a$  は単独で提示した場合にヘッドホンで A 特性音圧レベルが約 60 dB となるように予め決定した。この下で、(5.1) 式および (5.2) 式で定義した  $L_{ab}$ ,  $L_{b_1b_2}$  が次の値を満たすように模擬骨導音声  $b_1$  と模擬骨導音声  $b_2$  のパワーを調整し、気導音声と混合した。

- $L_{ab}$ : -10 dB, 0 dB, 10 dB (3 通り)
- $L_{b_1b_2}$ : -6 dB, -3 dB, 0 dB, 3 dB, 6 dB (5 通り)

これらの  $L_{ab}$  と  $L_{b_1b_2}$  の条件の組み合わせとして、15 パターンの自己聴取音声を実験刺激とした。さらに、自己聴取音声を模擬しない例外刺激として、次の 5 種類の音声信号を加えた。

- 気導音声のみの信号 (原音声)
- 気導音声に対してカットオフ周波数 1 kHz の低域通過フィルタを適用した信号 (low-1)
- 気導音声に対してカットオフ周波数 4 kHz の低域通過フィルタを適用した信号 (low-4)
- 気導音声に対してカットオフ周波数 1 kHz の高域通過フィルタを適用した信号 (high-1)
- 気導音声に対してカットオフ周波数 4 kHz の高域通過フィルタを適用した信号 (high-4)

したがって、実験刺激の合計は 20 であった。

なお、 $L_{ab}$  は (5.1) 式で示すとおり約 0 dB となる可能性が Békésy の検討から既に示唆されるが、気導・骨導音声の間の振幅比には個人差が大きく、両者の比が約 10 dB 程度であった例も見られている [41]。このため、本検討においても  $L_{ab}$  に対して  $\pm 10$  dB の条件を設定した。

## 手続き

実験は防音室内で行なった。参加者には、前述した 20 刺激の中から組まれた刺激のペア (A, B) を聴取させ、二つのうちどちらが自己聴取音声に聴感上類似し

ているかを二肢強制選択するように求めた。刺激 A と B はそれぞれ何度でも聴き直しが可能とした。回答の際には、参加者自らが母音/a/を発話することを許し、実際に発話して聴取する自己聴取音声と提示刺激 A, B を適宜聴き比べることを可能とした。1回の試行で、刺激 A と B のうち参加者が選択したほうの刺激を勝者刺激 (winner)、選択しなかったほうの刺激を敗者刺激 (loser) として、全 20 刺激の中で聴感上最も自己聴取音声に近いと判断される刺激をトーナメント方式で決定した。トーナメント方式による主観評価は、仮想聴覚ディスプレイにおける個人性の検討 [70] などでも用いられている方法であり、全刺激の総当たりを行わずに最適な条件を決定する有効な方法のひとつと考えられている。

トーナメント方式における刺激提示、回答取得の流れを図 5.4 に示す。最初に、全 20 刺激に対してランダムな組み合わせで刺激 A, B のペア (10 対) を決定した。これらのすべての刺激対に対して 1 回ずつ二肢強制選択の試行を行ない、winner と loser の刺激を決定した。次に、winner の刺激に対して再度ランダムな組み合わせで刺激 A, B のペアを決定し、同様に各刺激対に対して 1 回ずつ二肢強制選択の試行を行なった。ここで、winner の刺激数が (3 以上の) 奇数となる場合には loser の刺激から無作為に 1 刺激を決定して winner に追加した上で、同様の操作を行なった。以上の操作を、winner の刺激数が 1 となるまで繰り返した。最後に、winner に勝ち残った刺激を、自己聴取音声に聴感上最も近いと判断された刺激として決定した。

トーナメント方式の 1 サイクルにつき、合計 21 対の二肢強制選択試行を含んだ。この間の所要時間は約 10 ~ 15 分であった。参加者 1 人あたり、この 1 サイクルを 5 セット行なった。参加者 7 名 × 5 セットのトーナメントで 1 位・2 位・4 位以内に出出された件数を、提示刺激ごとに比較した。

### 5.3.3 実験結果

表 5.1 に、各提示刺激においてトーナメントで 1 位・2 位・4 位以内に出出された件数を示す。1 位に出出された件数は、 $(L_{ab}, L_{b1b2}) = (0, -3)$  dB の条件の刺激で最も多く (7 件)、次点で  $(L_{ab}, L_{b1b2}) = (0, 0)$  dB および  $(-10, -3)$  (5 件) であった。2 位に出出された件数は、 $(L_{ab}, L_{b1b2}) = (0, 0)$  で最も多かった。4 位以内

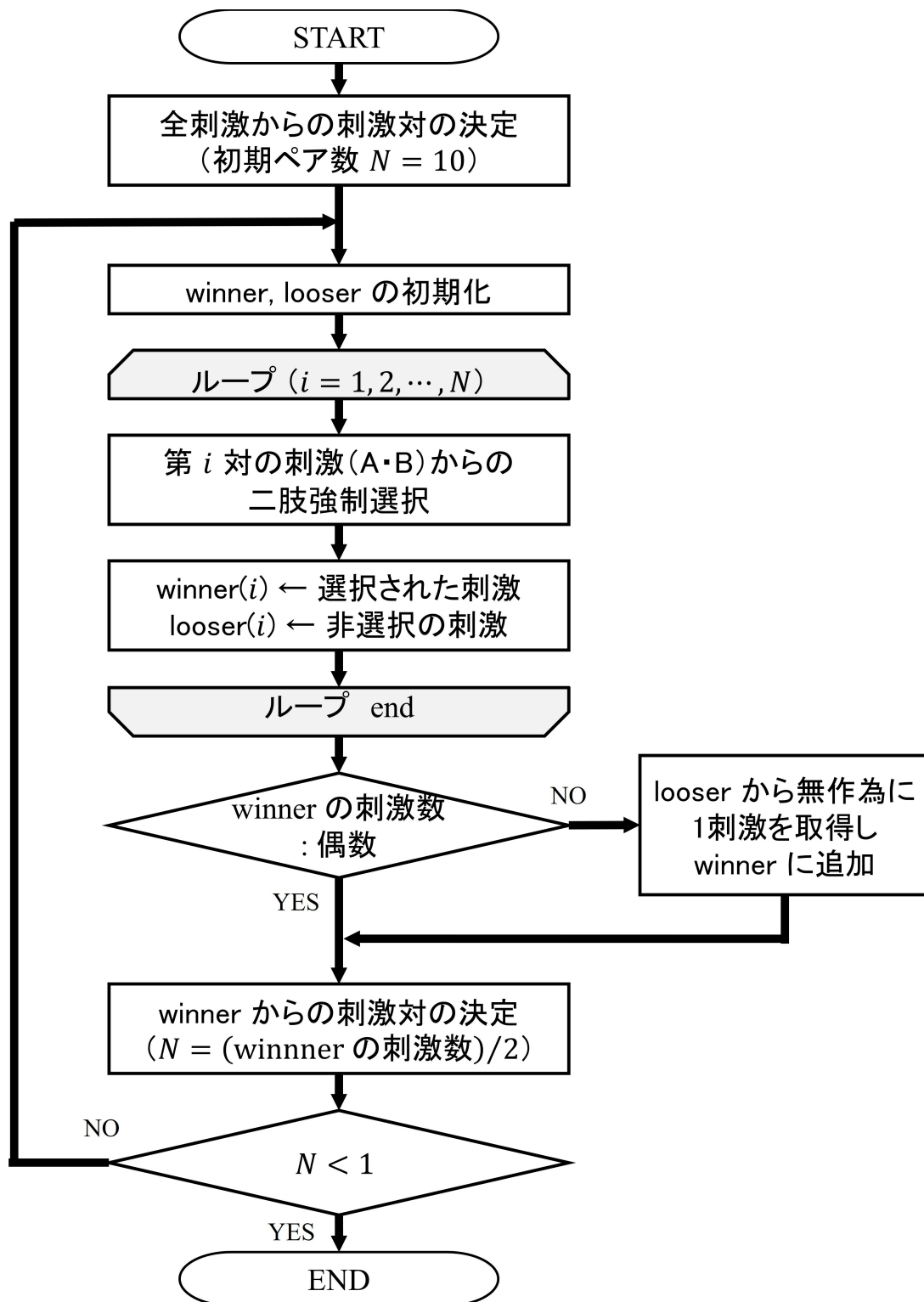


図 5.4: トーナメント方式における刺激提示・回答取得の流れ

表 5.1: 各提示刺激においてトーナメントで1位・2位・4位以内に出選された件数

$L_{ab} \setminus L_{b_1b_2}$		-6 dB	-3 dB	0 dB	3 dB	6 dB
10 dB	1位	0	0	2	2	0
	2位	3	1	1	0	2
	B4	6	4	6	10	7
0 dB	1位	0	7	5	2	4
	2位	2	4	6	4	4
	B4	10	16	17	9	10
-10 dB	1位	3	5	0	3	1
	2位	0	0	4	1	1
	B4	8	8	9	9	7
		low-1	low-4	原音声	high-1	high-4
	1位	0	0	1	0	0
	2位	0	0	2	0	0
	B4	0	1	3	0	0

に出選された件数は、 $(L_{ab}, L_{b_1b_2}) = (0, -3)$  dB と  $(0, 0)$  dB においてとくに多くなった。全体として、 $L_{ab}$  が 0 dB である刺激において、トーナメントで1位、2位、4位以内に出選された件数が増える傾向が見られた。

### 5.3.4 考察

気導音声と骨導音声の間のパワー比  $L_{ab}$  が 0 dB である刺激において、1位、2位、4位以内の出選件数が増える傾向は、von Békésy の検討 [41] による示唆を支持する結果であると言える。この下で、模擬骨導音声 b1（外耳経由の骨導音声の模擬）と模擬骨導音声 b2（中耳以降に直接伝達される骨導音声の模擬）の間のパワー比  $L_{b_1b_2}$  が -3 dB である刺激において、トーナメントで1位に出選された件数が大きかった。このことは、骨導音声において中耳以降への直接伝達が外耳経由での伝達に対してパワーで約 -3 dB の関係にある可能性があるとして解釈できる。2位および4位以内での出選件数は、 $L_{b_1b_2}$  が 0 dB 以上での刺激においても比較的

多い傾向があることも踏まえると、骨導音声知覚においては中耳以降への直接伝達が外耳経由での伝達に対して最低でも 1/2 程度の寄与を有しているという可能性が示唆される。

本検討において模擬骨導音声 b1 と模擬骨導音声 b2 を作成する際には、前章で測定した口腔内音圧から外耳道内音声への伝達関数  $|H_{\text{occc}}(f)|$  および口腔内音圧から側頭部振動への伝達関数  $|H_{\text{ocrt}}(f)|$  における測定参加者間平均を用いた。したがって、厳密には主観評価実験の参加者個人ごとに対して最適な骨導音声のスペクトル特性を模擬できているかどうかには疑問の余地がある。しかし、前章での測定結果において伝達関数の大域的な形状は参加者間で類似していることを考慮すると、話者個人ごとの模擬骨導音声のスペクトル特性の違いは骨導での伝達特性の違いというよりも喉頭音源特性と声道伝達特性の違いに大きく影響しているはずである。実験参加者からは、自ら発話したときに聴取される音声と同等の聴感をもつ実験刺激は存在しなかったが、自己聴取音声の聴感に類似しているかどうかを相対的には比較することができたという内観を得た。このため、本検討での模擬骨導音声は話者個人ごとの大域的なスペクトル特性を概ね模擬できていると考えられる。

Pörschmann による骨導伝達特性の心理物理的な推定では、知覚に対して外耳経由の骨導伝達の寄与は主要なものではない可能性が示唆されている [45]。本検討においても、中耳以降の骨導音声の伝達の寄与が無視できないものであることが Pörschmann とは別の見地から示されたと言える。

## 5.4 おわりに

本章では、骨導音声知覚に対するそれぞれの伝達経路の寄与を明らかにすることを目的に、外耳経由の伝達および中耳以降への直接伝達に対応する二種類の模擬骨導音声を気導音声に対してどの程度のパワー比で加算することで自己聴取音声に聴感上類似するかを検討した。検討の結果、気導音声と骨導音声のパワーを同程度に保った上で、外耳経由の伝達に対応する模擬骨導音声に対して中耳以降の直接伝達に対応する模擬骨導音声を約  $-3 \sim 0$  dB のパワー比で加算したときに自己聴取音声に聴感上類似する可能性が明らかになった。この結果から、発話中

の骨導音声知覚において、中耳以降への直接伝達の寄与は外耳経由の伝達の寄与に対して少なくとも 1/2 程度、あるいは両者の寄与が同程度であるという可能性が示唆された。

第3章～本章（第5章）にかけて、観測可能な二種類の骨導音声伝達（側頭部振動と外耳道内音声）において表れる音響的特徴と、発話器官を基準とした両者の伝達経路の伝達特性を明らかにした上で、両者の伝達経路の知覚への寄与を検討した。次章では、これまでの検討で明らかにしたことを総括し、聴覚フィードバックとして骨導音声がどのような情報伝達を担っている可能性があるかを考察する。

## 第 6 章

### 骨導音声による情報伝達の様相

## 6.1 はじめに

本章では、第3章で明らかにした骨導音声の音響的特徴、第4章で明らかにした口腔内音圧を基準とした骨導音声の伝達特性、および第5章で推測された外耳経由および中耳以降の伝達経路の知覚的寄与を総括し、聴覚フィードバックとして骨導音声がどのような情報伝達を担っている可能性があるかを考察する。

## 6.2 内耳でのスペクトル表現

第3章～第5章の検討によって、気導音声、外耳経由で伝達される骨導音声および中耳以降に直接伝達される骨導音声のそれぞれが内耳に到達する時点で有する特徴やパワーの関係性を論じた。本節では、これら3つの音声聴覚フィードバックとして担っている情報伝達の様相を考察する。前章で推測された知覚的寄与に基づき、男性話者1名（母音/a/）における次の4つの音声：

- 気導音声（音圧レベル 60 dB）
- 模擬骨導音声 b1 ( $(L_{ab}, L_{b1b2}) = (0, -3)$  [dB] を満たすようにパワーを調整)
- 模擬骨導音声 b2 ( $(L_{ab}, L_{b1b2}) = (0, -3)$  [dB] を満たすようにパワーを調整)
- 上記3つを加算（気導音声 + 模擬骨導音声 b1 + 模擬骨導音声 b2）して模擬した自己聴取音声

が内耳で基底膜振動を経て神経活動として統合したときの、マスキング特性等を考慮した最終的な聴覚抹消系のスペクトル表現を推定する。

内耳による周波数分析機能のモデルの一つであるガンマトーンフィルタバンクを用いた聴覚フィルタ [71] を用い、上記4つの音声から抽出した0.5秒間の信号を入力として帯域分割した。なお、帯域分割前には3つのすべての音声に対して気導聴取での外耳・中耳の伝達特性に対応したフィルタリングが施された。模擬骨導音声 b1 および模擬骨導音声 b2 のスペクトルには、前章で実験刺激を気導聴取することを考慮して外耳・中耳の伝達に対する逆特性が既に含まれているため、ここで外耳・中耳の伝達特性とその逆特性が相殺されることで所望の伝達過程を模擬



できていることに注意されたい。帯域分割数は、 $ERB_{N-number}$  の 1.8 ~ 38.9 Cam (0.1 Cam 刻み) に対応する 372 個であった。帯域ごとの聴覚フィルタ出力に対してそれぞれ半波整流・二乗・漏洩積分処理を順に施す [72] ことで聴神経の興奮を算出し、0.5 秒間に渡る興奮を平均した。得られた興奮のレベルを、各帯域での聴覚フィルタの中心周波数の関数として表し、気導音声、模擬骨導音声 b1、模擬骨導音声 b2 の単独およびそれらの加算信号に対する内耳でのスペクトル表現を比較した。

図 6.1 に、上記 4 つの音声に対して得られた内耳でのスペクトル表現を示す。4 つの音声すべてにおいて、F0 付近での興奮レベルにピークが見られた。気導音声および自己聴取音声全体のスペクトルでは、母音/a/の第一・第二フォルマント (F1・F2) が位置する 0.7 ~ 1.3 kHz 付近の興奮レベルが高くなった。一方で、模擬骨導音声 b1 および模擬骨導音声 b2 における 0.7 ~ 1.3 kHz 付近の興奮レベルは気導音声のものに比べ約 25 dB 以上下回っていた。

### 6.3 骨導音声による情報伝達に関する考察

自己聴取音声 (気導音声 + 模擬骨導音声 b1 + 模擬骨導音声 b2) の内耳でのスペクトル表現では、F0 付近の興奮レベルが気導音声に比べて高い一方、F0 付近よりも高域での興奮レベルは気導音声に比べて低くなっていることがわかる。これは、自己聴取音声が気導音声に対して相対的に低域強調・高域減衰の特性を有していることを示しており、従来の心理物理学的知見 [39, 40] と対応する。

模擬骨導音声 b1 の内耳でのスペクトル表現は、発話者自身の音声が入耳経路の骨導伝達により単独で聴覚にフィードバックされた場合のスペクトル表現である。それに対して、模擬骨導音声 b2 の内耳でのスペクトル表現は、発話者自身の音声が入耳の中耳以降への直接伝達により単独で聴覚にフィードバックされた場合のスペクトル表現である。両者のスペクトル表現から、聴覚フィードバックにおける音高情報および音韻情報の伝達の様相を考察する。

2 つの模擬骨導音声の F0 付近での興奮レベルが気導音声のものと同程度に高いことから、外耳経路・中耳以降のいずれの骨導経路による聴覚フィードバックにおいても気導音声と同程度の音高情報が伝達されているものと考えられる。実際

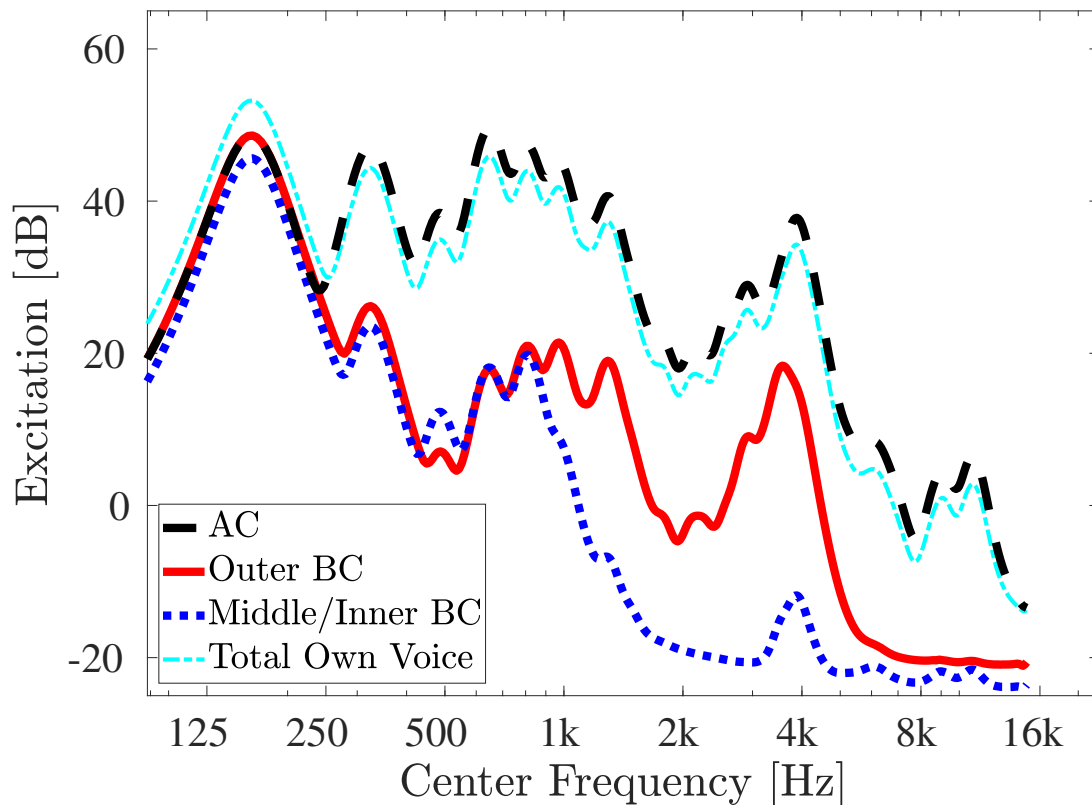


図 6.1: 聴覚モデルから算出された気導音声と模擬骨導音声（外耳経由の伝達と中耳以降への直接伝達）のスペクトル表現（男性話者1名，母音/a/）．ガンマトーンフィルタバンクを用いた聴覚抹消モデル [71] の出力から算出された聴神経の興奮レベルを，フィルタバンクの各帯域の中心周波数の関数として表した．

に、第3章で分析された外耳道内音声および側頭部振動のF0は気導音声のF0と一致していた。このことを踏まえると、骨導音声の聴覚フィードバックによって伝達される音高情報は気導音声の聴覚フィードバックによるものと同一であることが示唆される。ただし、音高の知覚は厳密には基本周期やF0だけでなくスペクトル形状の違いにも影響を受けるため [62]、気導・骨導音声間のスペクトル形状の違いが聴覚フィードバックにおける音高情報のやりとりにどのように影響するかについては、今後の更なる検討が期待される。

第3章における母音のスペクトル分析から、外耳道内音声および側頭部振動の信号そのものにはF1、F2に対応する特徴があることがわかる。しかし、2つの模擬骨導音声のF1、F2付近(0.7~1.3 kHz)での興奮レベルを見ると、気導音声のものに比べ約25 dB以上低くなっている。このことを踏まえると、外耳経由・中耳以降のいずれの骨導音声にも音韻情報は含まれてはいるものの、聴覚フィードバックとしての音韻情報伝達の貢献は気導音声より少ないと考えられる。さらに、F2付近(約1.3 kHz)において模擬骨導音声b2の興奮レベルは模擬骨導音声b1のものよりも20 dB以上低いことを考慮すると、中耳以降への直接伝達による聴覚フィードバックでは外耳経由の聴覚フィードバックに比べ音韻情報伝達への貢献は少ないかもしれない。

以上の考察より、骨導音声は聴覚フィードバックとして、主に生成・知覚間の音高情報のやりとりに寄与している可能性が推測される。また、外耳経由で伝達される骨導音声は、気導音声に比べれば寄与は小さいとしても、生成・知覚間の音韻情報のやりとりにも寄与を果たしている可能性が推測される。もしも気導の聴覚フィードバックが外界の雑音等からのマスキングを受けたとしても、外耳経由で伝達される骨導音声により音韻情報を、外耳経由・中耳以降の両方で伝達される骨導音声により音高情報をモニタリングしているかもしれない。

## 6.4 おわりに

本章では、聴覚モデルに基づいた気導音声と模擬骨導音声の内耳でのスペクトル表現の特徴から、外耳経由・内耳以降での骨導の聴覚フィードバックの音高情報・音韻情報伝達の様相を考察した。

内耳でのスペクトル表現の特徴を踏まえ，外耳経由・内耳以降での骨導の聴覚フィードバックは主に生成・知覚間の音高情報のやりとりに寄与している可能性が示唆された。すなわち，発話器官から内耳以降への骨導伝達は音高情報のモニタリングという観点から，骨導音声知覚において無視できないものであると考えられる。

## 第 7 章

### 結論

## 7.1 本論文で明らかにされたことの要約

本論文では、「骨導音声の伝達において中耳や内耳に直接到達する伝達経路の影響を無視できない」という立場のもと、聴覚フィードバックにおける骨導音声の伝達過程の解明に向けて発話器官を出発点とする骨導音声伝達の様相を明らかにした。中耳以降に直接到達する骨導音声のスペクトル形状は、軟組織・頭蓋骨（側頭部）振動のスペクトル形状によって特徴づけられることに着目し、(1) 骨導音声に含まれる音声的特徴、(2-1) 骨導の伝達経路とその伝達特性、(2-2) 各々の伝達経路の知覚的寄与を明らかにした上で、骨導音声を通じて音高・音韻情報が伝達されているかどうかを内耳でのスペクトル表現により論じた。

結論として、発話器官を出発点とする骨導音声伝達の様相として次のことを明らかにした。

- (1) 軟組織・頭蓋骨の振動には  $F_0$  および 2 kHz 以下に位置する低次のフォルマントの情報が含まれ、外耳道内放射により伝達される骨導音声には母音に関わる  $F_0$  および  $F_1$  と  $F_2$  の情報が含まれること。
- (2-1) 発話器官から外耳道内までの伝達は 1 ~ 3 kHz 付近の帯域通過特性を有し、発話器官から中耳以降への伝達は 2 kHz 以下の低域通過特性を有すること。
- (2-2) 中耳以降に到達する骨導音声の伝達は、外耳経由の骨導音声の伝達と概ね同程度に骨導音声の知覚に寄与すること。

この上で、骨導の聴覚フィードバックを通じて主に音高情報（あるいは低次のフォルマントによる音韻情報）が、外耳経由・中耳以降での伝達の両方から伝達される可能性を示した。本論文を通じて、骨導音声の知覚において中耳以降に伝達される骨導経路の寄与を無視できない可能性が示唆された。

## 7.2 今後の展望

以下に、本研究の今後の展望を列挙する。

## 7.2.1 骨導音声の聴覚フィードバックとしての役割の解明に向けて

### 本研究成果の直接的貢献

骨導音声の伝達過程に関するこれまでのアプローチからは、外耳を経由する伝達に限定した場合の知覚への寄与、あるいは骨導経路の全体に渡る知覚への寄与が明らかにされつつあった。しかし、骨導伝達に関する生理学的知見から推測される中耳への伝達（慣性骨導）や内耳への伝達（リンパ液慣性振動や圧縮骨導）の個々が聴覚フィードバックとしてどのような役割を担っているかについては明確になっていなかった。本研究ではこの点を明確にするための足がかりとして、骨導音声伝達を「外耳道内放射を経由する伝達」と「中耳以降への直接伝達」という2種類に分割して考え、後者の特性は軟組織・頭蓋骨の振動特性により近似できているという前提で検討を進めることで、両者の経路において互いに異なる周波数特性を有する成分が同程度の強度で伝達されることを示唆した。得られた発見は、複数の伝達経路に渡る骨導音声知覚のメカニズムについて、その少なくとも外耳経由での伝達とそれ以外での伝達における貢献の違いを明らかにしたという点で発話における「話者自身の聴覚からの情報」に関する知見の深化につながった。

### 本研究で採用した測定手法による利点と限界

本研究では、発話器官を基準とする骨導の伝達特性を、喉頭付近への加振および口腔内の人工音源を用いて測定した。本測定手法の利点として、主に発話中に口腔内に生じる音圧の骨導音声伝達への貢献を、声帯振動の伝達とは独立して明らかにできたことが挙げられる。声道内の音圧伝搬を経由した伝達が骨導音声の知覚に関与していることはこれまでも推測されており [47]、この推測は経皮的に収録された骨導音声に低次のフォルマントの情報が含まれること（第3章の結果）からも支持される。本測定手法により、骨導音声伝達の中で声帯からの機械的振動および声道内音圧伝搬のそれぞれの寄与をスペクトル形状の観点から比較することで、主に声道内音圧伝搬が骨導音声伝達に大きく貢献していることが示唆された。

本研究における測定手法での限界として、発話器官からの励振信号を側頭部から経皮的に観測することで、骨導音声の中耳以降への直接伝達の特性をひとつの

合成システムとして推測しており，中耳以降でのサブシステムの特徴については議論できないという点が挙げられる．骨導音知覚に関するこれまでの生理学的検討から，特に側頭骨の振動と中耳耳小骨の振動との関連性が示されており [55]，側頭部振動の観測によって実際に中耳や内耳に到達する振動の大域的な周波数特性を模擬できているものと考えられる．しかし，中耳の慣性骨導における耳小骨の 1～3 kHz 付近での共振特性や，内耳への骨導伝達における前庭窓と蝸牛窓の間の不均等な体積変化 [73,74] が骨導音声伝達に対して個別にどのように寄与しているかを結論付けるには，更なる検討が必要であると考えられる．今後，発話器官から側頭部への伝達特性と，気導経路において既知である耳小骨の共振特性という二つのシステムの線形結合として，中耳への骨導伝達を表現可能であるかどうかを明らかにする．このことにより，骨導音声の伝達過程を詳細に理解できるものと考えられる．また，とくに内耳への骨導伝達については生理学的知見の拡充や計算機シミュレーションによる伝達メカニズムの解明が期待されるが，これらの進展により，発話器官からの励振に対する乳様突起での観測を通して内耳に直接到達する骨導音声の伝達特性を明らかにできるかもしれない．

#### 骨導音声伝達を考慮したマスキングと聴覚フィードバック実験

聴覚フィードバックに関するこれまでの検討では，おそらく骨導音声気導音声に対して相対的に高域減衰特性を有するという一点から，骨導音声のマスカとしてピンク雑音や低域通過雑音等を用いて実験を行っていたものと推察される．本研究で明らかになった，外耳経由・中耳以降での骨導音声の周波数成分ごとの寄与の違い（第6章）を考慮すると，聴覚フィードバック実験において単に低域に成分の偏ったノイズを用いるだけでは骨導音声のマスキングに有効であるとは断言できない．高々 $-3$  dB/oct. の高域減衰特性を有するピンク雑音では，中耳以降で伝達される骨導音声の急峻な高域減衰特性にフィットしているとは言えない．また，ピンク雑音のような単調減衰特性では，外耳経由で伝達される骨導音声の 0.5～4 kHz での周波数成分に対して効率的にマスキングできない可能性がある．本研究で明らかになった外耳経由・中耳以降の2種類の骨導音声を加算して推測される骨導音声全体での内耳のスペクトル表現は，ピンク雑音に比べて遥かに急峻なスペクトル傾斜を有することになる．聴覚フィードバック実験においては，本研究



で明らかになった骨導音声のスペクトル形状をもとに各周波数成分が均一にマスクされるようにデザインされたマスキング雑音が有効であると考えられる。ここで、図 1.1 で示すように、発話においては多感覚の情報が統合され、頭蓋骨や軟組織の振動に起因する振動覚によっても情報伝達が行われる可能性がある。上記のように、本研究で得られた骨導音声のスペクトル形状により聴覚情報をマスキングすることで、軟組織や頭蓋骨の振動から生じる振動覚の情報伝達の役割を、骨導の聴覚情報とは切り分けた形で検討できるかもしれない。

本研究では、骨導音声知覚は聴覚フィードバックとして、主に音高情報のモニタリングに寄与しているのではないかという示唆を与えたが、それを聴覚フィードバック実験により検証することが望まれる。第 1 章で述べた通り、将来的に骨導音声の聴覚フィードバックとしての性質を議論する上では、骨導音声の音響的特徴を操作する手法が確立されなければならない。本研究の成果から、あくまでスペクトル特徴のみの模擬ではあるが、外耳経由・中耳以降のそれぞれの伝達に対応する模擬骨導音声を用いた聴覚フィードバック実験を通じて、それぞれの経路における聴覚フィードバックの性質を議論できるかもしれない。また、今後の骨導音声知覚に関する生理学・心理物理学的知見の深化とともに、音の気導提示あるいは経皮的な骨導提示によりある特定の周波数成分の強調や遮断などの操作が可能になり、骨導音声伝達を考慮した聴覚フィードバック実験の手法を確立できることが期待される。

### 7.2.2 伝達特性の精緻化

声帯振動から頭部振動への直接伝達と、口腔内での音圧伝搬から頭部振動への伝達の両方が骨導音声知覚に関わっていることは示唆されていたが [47]、とくに口腔内音圧から軟組織・頭蓋骨振動や外耳道内音圧への伝達特性の実態は明らかでなかった。本研究において、口腔内音圧を基準とした骨導伝達特性を声帯振動からの直接伝達とは切り分けた形で明らかにしており、この結果は骨導音声の知覚を通じた調音動作のモニタリングが（気導音声ほど効率的ではないとしても）可能であることを示したものである。これは、生成・知覚の相互作用の更なる解明に向けて重要な知見である。

本研究で測定した口腔内音圧から外耳道内音圧への伝達関数は、閉塞外耳道で測定した後に耳閉塞効果の補正を行なっている。厳密には、耳閉塞効果の特性はプローブの挿入長に依存して変化する [75] ため、耳を閉塞せずに外耳経由の骨導音声を観測するイヤーマフ [45] などを用いることでさらに正確な伝達特性が得られる。

頭蓋骨振動の入出力特性は入力レベルに依存せず線形性を有することが示唆されていることから [76]、図 2.6 に示す伝達経路において、軟組織・頭蓋骨の伝達システムについては線形システムとみなすことができる。ただし、聴覚系において音圧レベル約 90 dB 以上の入力に対しては耳小骨筋反射 (Middle ear muscle reflex, MEMR) が生じるため [77]、高い音圧レベルの発話を想定する場合には MEMR による非線形特性を考慮する必要がある。

### 7.2.3 骨導音声伝達における位相特性の検討

本研究では、骨導音声伝達の様相を振幅特性から議論した。実際の発話で聴取する音声 (自己聴取音声) は、気導音声および複数の経路からの骨導音声 が最終的に統合されて知覚される。このとき、それぞれの位相関係によって聞こえは変化する可能性がある。本研究で着目した伝達過程を対象に、振幅特性だけでなく位相特性にも着目することで、気導および骨導経路から複数のフィードバックを受けたときの様相を明らかにできるかもしれない。とくに内耳以降の伝達経路については、位相特性の変化に対する気導・骨導音の知覚特性を調べることでその伝達メカニズムを探る試みが期待されている [78]。

### 7.2.4 他の研究分野への波及効果

骨導聴取および骨導音声の工学的応用は注目を集めており、骨導デバイスは外界の騒音等に影響されにくいウェアラブルな音声コミュニケーションツールとして期待される。第 1 章において述べたように、骨導デバイスを用いる際の課題として骨導収録音声は気導収録音声に比べて明瞭性が著しく低下することが挙げられる [36]。本研究で得られた外耳経由および中耳以降での骨導伝達特性は、上述のような骨導収録音声における明瞭性低下の要因を内包している可能性がある。本

研究の成果は、骨導デバイスにおける明瞭性低下を抑制するような信号処理方法に対して有益な知見を与えると考えられる。

本研究を通じて骨導音声知覚の様相を明らかにすることはヒトの音声生成・音声知覚の相互作用の理解に欠かせないものである。相互作用の中での骨導音声伝達の役割が明確になれば、上記の工学的応用に関連して、これまでの骨導デバイスによる補聴技術だけでなく骨導提示による発話障害者支援などの臨床分野にも応用することができるかもしれない。

発話中に知覚される自己聴取音声の特徴は、仮想現実（VR）の工学や認知科学においても注目されており、気導音声から自己聴取音声を再現するフィルタ形状の検討が行われている [38, 39, 79, 80]。本研究は自己聴取音声の声質を特徴づける骨導音声の音響的特徴やその伝達特性を生理学的あるいは心理物理的に検討するものであり、本研究の成果から上記のような研究分野への応用も期待される。

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、約7年間にわたり情熱溢れる多大な御指導御鞭撻を賜りました北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 鷗木祐史 教授に深甚なる感謝の意を表します。研究者として至らぬ点の多い私ではありますが、鷗木先生には私の研究の着想・取り組みを尊重して下さった上で、必要な知力・体力・気力などのあらゆる面での力を叩き込んで頂きました。本学での研究生活・学生生活において幾度となく困難に直面した際にも、常に前進を後押しして頂きました。本論文の執筆に至ることができたのは、鷗木先生に御指導・サポートを頂いたからに他なりません。

本研究を遂行するにあたり、熱心な御指導・御助言を賜りました北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 赤木正人 教授に深甚なる感謝の意を表します。研究室会議や研究室合宿等の場において、多様な見地から丁寧に、温かな御助言を頂きました。研究において私の視野が凝り固まってしまったときには、赤木先生からのお言葉により視野を広げることができたように思います。

本研究に関連する副テーマの遂行にあたり、貴重な御指導・御助言を賜りましたドレスデン工科大学 音響・音声コミュニケーション研究所 (Institute of Acoustics and Speech Communication, Technische Universität Dresden) Peter Birkholz 教授, Steffen Kürbis 博士に深甚なる感謝の意を表します。Birkholz 教授には、主に音声生成や音響物理に関する視点から大変貴重な御助言を頂きました。また Birkholz 教授と Kürbis 博士には、ヒトを対象とした物理測定のノウハウを学ばせて頂いただけでなく、必要な実験装置などについて「自分で作れるものは自分で作る」という取り組みの基本を教えてくださいました。海外での貴重な研究遂行の経験ができたことは、私の大きな財産です。

本論文を執筆するにあたり、草稿の段階から貴重な御助言を賜りました千葉大学フロンティア医工学センター 中川誠司 教授, 新潟大学大学院自然科学研究科 岩

城護 准教授，北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 党建武 教授に深甚なる感謝の意を表します。中川教授，岩城准教授には，学会発表において貴重な御助言を頂き，研究遂行において大きな助けとなりました。党教授には，博士前期課程在学中より研究室合宿等で貴重な御助言を頂き，研究遂行において大きな助けとなりました。

本研究を遂行するにあたり，日頃から熱心に御討論頂き，また有益な御助言を賜りました北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 木谷俊介 助教，小林まおり 博士に深甚なる感謝の意を表します。木谷先生，小林博士には，心理実験の計画やデータ分析等について貴重な御助言を頂きました。

博士前期課程の頃より熱心な御討論や激励を頂きました，富山県立大学工学部（前北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科助教）森川大輔 講師，国立研究開発法人情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター（前北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科）久保理恵子 博士 および 前北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科助教 宮内良太 博士に心より感謝いたします。また，日頃より熱心な御討論や激励を頂きました札幌保健医療大学保健医療学部（前北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教）末光厚夫 教授，聴覚研究会の諸先生方，北陸先端科学技術大学院大学 赤木・鶴木研究室の諸先輩方，諸氏に感謝いたします。

本研究の第3章～第5章におけるヒトを対象とした音声収録，物理測定および聴取実験は，北陸先端科学技術大学院大学ライフサイエンス委員会の承認を受けて行われた（承認番号: 30-009）。本研究における収録や測定，実験のために貴重な時間を割いて下さった，測定・実験参加者の方々に感謝いたします。

本研究の成果は，科研費・特別研究員奨励費（No. 17J03679），新学術領域（No. 18H05004）の支援を受けて得られた。

最後に，大学院に進学して研究するという我儘な人生選択を尊重し，約7年間にわたる学生生活を応援し支えてくれた両親に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] C. A. Fowler, “Listeners do hear sounds, not tongues,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 3, pp. 1730–1741, 1996.
- [2] A. M. Liberman and I. G. Mattingly, “The motor theory of speech perception revised,” *Cognition*, Vol. 21, pp. 1–36, 1985.
- [3] 廣谷定男他, 聞くと話すの脳科学, コロナ社, 東京, 2017.
- [4] P. B. Denes and E. N. Pinson, *The speech chain, 2nd Ed.*, W. H. Freeman and Co., New York, 1993.
- [5] A. Postma, “Detection of errors during speech production: a review of speech monitoring models,” *Cognition*, Vol. 77, pp. 97–131, 2000.
- [6] X. Wang, K. Honda, J. Dang, and J. Wei, “Vocal responses to frequency modulated composite sinewaves via auditory and vibrotactile pathways,” In *Proc. ICASSP2015*, pp. 4355–4359, 2015.
- [7] S. Okazaki, K. Mori, and C. Cai, “Effect of delayed auditory feedback on the vocal time-reproduction,” *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 31, No. 6, pp. 408–409, 1950.
- [8] D. Keough and J. A. Jones, “The sensitivity of auditory-motor representations to subtle changes in auditory feedback while singing,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 126, No. 2, pp. 837–846, 2009.
- [9] P. Madaure, “Listening and singing,” *NATS Journal of Singing*, Vol. 57, No. 5, pp. 15–20, 2001.

- [10] M. Unoki and K. Nishimoto, “Improvements to creativity in singing abilities based on perspectives of studies on interaction between production and auditory perception,” *Proc. KICSS2012*, pp. 157–160, 2012.
- [11] 古井貞熙, 音声情報処理, 森北出版, 東京, 1998.
- [12] S. Stenfelt and R. L. Goode, “Transmission properties of bone conducted sound: Measurements in cadaver head,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, No. 4, pp. 2373–2391, 2005.
- [13] 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, pp. 105–116, 2007.
- [14] E. Lombard, “Le signe de l’elevation de la voix,” *Annales des Maladies de l’Oreille, du Larynx, du Nez et du Pharynx*, Vol. 37, No. 2, pp. 101–119, 1911.
- [15] 河原英紀, “聴覚フィードバックの発声への影響,” 音響学会誌, Vol. 59, No. 11, pp. 670–675, 2000.
- [16] B. S. Lee, “Effects of delayed speech feedback,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 22, No. 6, pp. 824–826, 1950.
- [17] J. V. Borsel, G. Reunes, and N. V. den Bergh, “Delayed auditory feedback in the treatment of stuttering: clients as consumer,” *Int. J. Lang. Comn, Dis.*, Vol. 38, No. 2, pp. 119–129, 2003.
- [18] 重野純, 聴覚・ことば, 新曜社, 東京, 2006.
- [19] T. A. Burnett, M. B. Freedland, C. R. Larson, and T. C. Hain, “Voice F0 responses to manipulations in pitch feedback,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 113, No. 6, pp. 3153–3161, 1998.
- [20] D. W. Purcell and K. G. Munhall, “Compensation following real-time manipulation of formants in isolated vowels,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 119, No. 4, pp. 2288–2297, 2006.

- [21] S. Cai, S. S. Ghosh, F. H. Guenther, and J. S. Perkell, “Focal manipulations of formant trajectories reveal a role of auditory feedback in the online control of both within-syllable and between-syllable speech timing,” *J. Neuroscience*, Vol. 31, No. 45, pp. 16483–16490, 2011.
- [22] 松岡理絵, X. Lu, 党建武, 赤木正人, “調音情報を考慮した聴覚系と発話系の相互作用に関する検討,” 聴覚研資料, Vol. 34, No. 8, pp. 585–590, 2004.
- [23] D. Mürbe, F. Pabst, G. Hofmann, and J. Sundberg, “Significance of auditory and kinesthetic feedback to singer’s pitch control,” *J. Voice*, Vol. 16, No. 1, pp. 44–51, 2002.
- [24] H. Kawahara, H. Kato, and J. C. Williams, “Effects of auditory feedback on  $F_0$  trajectory generation,” *Spoken Language*, Vol. 1, pp. 287–290, 1996.
- [25] S. H. Chen, H. Liu, Y. Xu, and C. R. Larson, “Voice  $F_0$  responses to pitch-shifted voice feedback during english speech,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, No. 2, pp. 1157–1163, 2007.
- [26] G. von Békésy, “Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung,” *Ann. Phys.*, Vol. 405, No. 1, pp. 111–136, 1932.
- [27] 日本音響学会, 新版 音響用語辞典, コロナ社, 東京, 2003.
- [28] 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,” 聴覚研資料, Vol. 39, No. 8, pp. 587–592, 2009.
- [29] A. Tjellström and B. Håkanson, “The bone-anchored hearing aid. Design principles, indication, and long-term clinical results,” *Otolaryngol. Clin. North Am.*, Vol. 28, No. 1, pp. 53–72, 1995.
- [30] G. C. Dahlin, “Bone-conduction thresholds of human teeth,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 53, No. 5, p. 1434, 1973.
- [31] 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.



- [32] K. Ito and S. Nakagawa, “Bone-conducted ultrasonic hearing assessed by tympanic membrane vibration in living human beings,” *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 34, No. 6, pp. 413–423, 2013.
- [33] 中川誠司, “骨伝導による超音波聴覚とその応用,” 日本音響学会誌, Vol. 76, No. 11, pp. 654–659, 2020.
- [34] M. S. Rahman and T. Shimamura, “Amplitude variation of bone-conducted speech compared with air-conducted speech,” *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 40, No. 5, pp. 293–301, 2019.
- [35] P. K. Tran, T. Letouski, and M. McBride, “The effect of bone conduction microphone placement on intensity and spectrum of transmitted speech items,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 133, No. 6, pp. 3900–3908, 2013.
- [36] M. Gripper, M. McBride, B. Osafo-Yeboah, and X. Jiang, “Using the Callsign Acquisition Test (CAT) to compare the speech intelligibility of air versus bone conduction,” *Int. J. Ind. Ergon.*, Vol. 37, pp. 631–641, 2007.
- [37] H. C. Nguyen and M. Unoki, “Improvement in bone-conducted speech restoration using linear prediction and long short-term memory model,” *J. Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 175–178, 2020.
- [38] 中山一郎, 岡田稔枝, 中川みかほ, “発声者が知覚する音声の音色 —その客観的評価—,” 音楽情報科学, Vol. 29, No. 2, pp. 5–8, 1999.
- [39] I. Nakayama, “Voice timbre in autophonic production compared with that in extraphonic production,” *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, Vol. 18, No. 2, pp. 67–71, 1997.
- [40] L. I. Shuster and J. D. Durrant, “Toward a better understanding of the perception of self-produced speech,” *J. Communication Disorder*, Vol. 36, pp. 1–11, 2003.
- [41] G. von Békésy, “The structure of the middle ear and the hearing of one’s own voice by bone conduction,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 21, pp. 217–232, 1949.

- [42] S. Stenfelt, “Acoustic and physiological aspects of bone conduction hearing,” *Advances on Oto-rhino-Laryngology*, Vol. 71, pp. 10–21, 2011.
- [43] M. Ø. Hansen and M. R. Stinson, “Air conducted and bone conducted sound produced by own voice,” *Canadian Acoustics*, Vol. 26, No. 2, pp. 11–19, 1998.
- [44] S. Reinfeldt, P. Ostli, B. Håkansson, and S. Stenfelt, “Hearing one’s own voice during phoneme vocalization — Transmission by air and bone conduction,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 128, No. 2, pp. 751–762, 2010.
- [45] C. Pörschmann, “Influences of bone conduction and air conduction on the sound of one’s own voice,” *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 86, No. 6, pp. 1038–1045, 2000.
- [46] J. Sundberg, *The science of the singing voice*, Northern Illinois University Press, Illinois, 1987.
- [47] P. Howell, “Auditory feedback of the voice in singing,” in P. Howell, I. Cross, and R. West (Eds.), *Musical Structure and Cognition*. Academic Press, London, 1985.
- [48] J. Tonndorf, “Bone conduction,” in W. D. Keidel-William and D. Neff (Eds.), *Auditory System, Handbook of Sensory Physiology*, Vol. 5/3, pp. 37–84. Springer, Berlin, Heidelberg, 1976.
- [49] S. Stenfelt and R. L. Goode, “Bone-conducted sound: Physiological and clinical aspects,” *Otology & Neurotology*, Vol. 26, No. 6, pp. 1245–1261, 2005.
- [50] E. A. G. Shaw, “The external ear,” in W. D. Kaidel and W. D. Neff (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. 5, pp. 455–490. Springer, Berlin, 1974.
- [51] D. P. Goldstein and C. S. Hayes, “The occlusion effect in bone conduction hearing,” *J. Speech & Hear. Res.*, Vol. 8, No. 2, pp. 137–148, 1965.
- [52] M. A. Fagelson and F. N. Martin, “The occlusion effect and ear canal sound pressure level,” *Am. J. Audiology*, Vol. 7, No. 2, pp. 50–54, 1998.

- [53] 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.
- [54] C. J. Plack, *The Sense of Hearing, 3rd Ed.*, Routedledge, New York, 2018.
- [55] S. Stenfelt, N. Hato, and R. L. Goode, “Factors contributing to bone conduction: The middle ear,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 111, No. 2, pp. 947–959, 2002.
- [56] J. Tonndorf, “Bone conduction. Studies in experimental animals,” *Acta Otolaryngol., Suppl*, Vol. 213, p. 132, 1966.
- [57] J. Tonndorf, “Compressional bone conduction in cochlea models,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, No. 8, p. 1127, 1962.
- [58] M. Yoshida and T. Uemura, “Transmission of cerebrospinal fluid pressure changes to the inner ear and its effect on cochlear microphones,” *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.*, Vol. 248, No. 3, pp. 139–143, 1991.
- [59] B. Håkansson, A. Tjellström, and U. Rosenhall, “Acceleration levels at hearing threshold with direct bone conduction versus conventional bone conduction,” *Acta Otolaryngol.*, Vol. 100, pp. 240–252, 1985.
- [60] M. Watanabe, K. Mita, K. Akataki, and Y. Itoh, “Mechanical behavior of condenser microphone in mechanomyography,” *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 39, No. 2, pp. 195–201, 2001.
- [61] S. Simizu, M. Otani, and T. Hirahara, “Frequency characteristics of several non-audible murmur (nam) microphones,” *Acoust. Sci & Tech.*, Vol. 30, No. 2, pp. 139–142, 2009.
- [62] 石田舞, “調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する音の高さに関する研究,” 北陸先端科学技術大学院大学 修士論文, 2010.

- [63] R. D. Kent and C. Read, *The acoustic analysis of speech*, Singular Publishing Group, Inc., California, 1992.
- [64] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” *Proc. Audio Engineering Society Convention 108*, pp. 1–24, 2000.
- [65] S. Bretschneider, “Vergleich und Anwendung von Wandlern zur externen Anregung des Vokaltrakts für die Messung der Übertragungsfunktion,” Studienarbeit, Technische Universität Dresden, 2017.
- [66] B. Håkansson, A. Brandt, P. Carlsson, and S. Stenfelt, “Resonance frequencies of the human skull *in vivo*,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 1471–1481, 1994.
- [67] 小池卓二, “ヒトの聴覚器官における振動伝達,” *比較生理学化学*, Vol. 24, No. 3, pp. 122–125, 2007.
- [68] S. Mehrgardt and V. Mellert, “Transformation characteristics of the external human ear,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, No. 6, pp. 1567–1576, 1977.
- [69] R. Aibara, J. T. Welsh, S. Puria, and R. L. Goode, “Human middle-ear sound transfer function and cochlea input impedance,” *Hear. Res.*, Vol. 152, pp. 100–109, 2001.
- [70] Y. Iwaya, “Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: Listening with other’s ears,” *Acoust. Sci & Tech.*, Vol. 27, No. 6, pp. 340–343, 2006.
- [71] R. D. Patterson, I. Nimmo-Smith, J. Holdsworth, and P. Rice, “An efficient auditory filterbank based on the gammertone function,” *Proc. A meeting of the IOC Speech Group on Auditory Modeling at RSRE*, 1988.
- [72] L. M. van Immerseel and J. Martens, “Pitch of voiced/unvoiced determination with an auditory model,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, pp. 3511–3527, 1992.

- [73] 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, pp. 797–812, 2003.
- [74] S. Stenfelt, “Inner ear contribution to bone conduction hearing in the human,” *Hear. Res.*, Vol. 329, pp. 41–51, 2015.
- [75] S. Stenfelt and S. Reinfeldt, “A model of the occlusion effect with bone-conducted stimulation,” *International J. Audiology*, Vol. 46, No. 10, pp. 595–608, 2007.
- [76] 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, pp. 2239–2243, 1996.
- [77] A. R. Møller, “Acoustic reflex in man,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1524–1534, 1962.
- [78] 山本克彦, “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 課題研究報告書, 2015.
- [79] Y. Yamaoka and H. Ando, “Simulation of pseudo inner reading voices and evaluation of effect on human processing,” in C. Stephanidis and M. Antoda (Eds.), *HCI International 2020*, Vol. 1224, pp. 594–602. Springer, Cham, 2020.
- [80] M. Kimura and Y. Yotsumoto, “Auditory traits of “own voice”,” *PLoS ONE*, Vol. 13, No. 6, pp. 1–16, 2020.

# 本研究に関する発表論文

## ジャーナル論文

- [1] Teruki Toya, Peter Birkholz and Masashi Unoki, “Measurements of transmission characteristics related to bone-conducted speech using a sound source in the oral cavity,” *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, Vol. 63, No. 12, pp. 1–13, Dec. 2020.
- [2] Teruki Toya, Daisuke Ishikawa, Ryota Miyauchi, Kazushi Nishimoto and Masashi Unoki, “Study on effects of speech production during delayed auditory feedback for air-conducted and bone-conducted speech,” *Journal of Signal Processing*, Vol. 20, No. 6, pp. 197–200, 2016.

## 著書（チャプター論文）

- [3] Teruki Toya, Peter Birkholz and Masashi Unoki, “Estimates of transmission characteristics related to perception of bone-conducted speech using real utterances and transcutaneous vibration on larynx,” in A. A. Salah, A. Karpov and R. Potapova (Eds.), *Speech and Computer*, LNAI 11658, pp.491–500, Springer Nature Switzerland, AG, Cham, Switzerland, 2019.

## 国際会議

(査読有・口頭発表)

- [4] Teruki Toya, Peter Birkholz and Masashi Unoki, “Estimates of transmission characteristics related to perception of bone-conducted speech using real utterances and transcutaneous vibration on larynx,” *Proc. 21st International Conference on Speech and Computer (SPECOM 2019)*, pp. 491–500, Istanbul, Turkey, Aug. 2019.
- [5] Teruki Toya, Daisuke Ishikawa, Ryota Miyauchi, Kazushi Nishimoto and Masashi Unoki, “Study on effects of speech production during delayed auditory feedback for air-conducted and bone-conducted speech,” *Proc. RISP International Workshop in Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16)*, pp. 197–200, Honolulu, USA, Mar. 2016.

(査読無・ポスター発表)

- [6] Teruki Toya, Peter Birkholz and Masashi Unoki, “Analysis of spectral and transmission characteristics of bone-conducted speech using real utterances and transcutaneous vibration,” *Proc. 176th Meeting of Acoustical Society of America*, Vol. 144, No. 3, pp. 1838, Victoria, Canada, Nov. 2018.
- [7] Teruki Toya and Masashi Unoki, “Presentation method as air- and bone-conducted speech for delayed auditory feedback,” *Proc. Acoustics'17 (ASA & EAA)*, Vol. 141, No. 5, pp. 3820, Boston, US, Jun. 2017.

## 国内発表

### 研究会

- [8] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “自己聴取音声に占める気導・骨導音声の混合比の主観評価,” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 50, No. 3, H-2020-29, pp. 153–158, 石川, 2020年6月
- [9] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “声道での圧力伝搬を経た骨導音声の伝達特性の分析,” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 49, No. 2, H-2019-19, pp. 95–100, 東京, 2019年5月
- [10] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “発話音声を用いた骨導音声の伝達特性の分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 515, EA2017-167, pp.355–360, 石垣島, 2018年3月
- [11] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “加振信号を用いた骨導音声の伝達特性の分析,” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 48, No. 2, H-2018-34, pp.169–174, 沖縄, 2018年3月
- [12] 鳥谷輝樹, 鷓木祐史, “気導・骨導の遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 246, EA2016-34, pp. 19–24, 石川, 2016年10月

### 国内学会

- [13] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “話者自身が知覚する音声における骨導音声の伝達割合,” 日本音響学会 2020年春季研究発表会講演論文集, pp. 799–800, 1-P-4, 埼玉, 2020年3月
- [14] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鷓木祐史, “骨導音声の外耳道内放射特性の推定,” 日本音響学会 2019年秋季研究発表会講演論文集, pp. 595–596, 1-R-8, 滋賀, 2019年9月



- [15] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鵜木祐史, “口腔内の音源を用いた骨導音声の伝達特性の分析,” 日本音響学会 2019 年春季研究発表会講演論文集, pp. 835–836, 1-R-20, 東京, 2019 年 3 月
- [16] 鳥谷輝樹, Peter Birkholz, 鵜木祐史, “長時間平均スペクトルに着目した骨導音声の伝達特性の分析,” 日本音響学会 2018 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1297–1300, 3-P-5, 埼玉, 2018 年 3 月
- [17] 鳥谷輝樹, 鵜木祐史, “話者が知覚する骨導音声の音響的特徴の検討,” 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 345–348, 3-P-10, 愛媛, 2017 年 9 月
- [18] 鳥谷輝樹, 鵜木祐史, “気導・骨導の遅延聴覚フィードバックにおける呈示方法の検討,” 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1529–1532, 3-Q-46, 神奈川, 2017 年 3 月

# 本研究以外の発表論文

## 国際会議

(査読無・ポスター発表)

- [1] Shota Morita, Daiki Kawamoto and Teruki Toya, “Voice conversion model for estimation of transfer characteristic in auditory feedback,” *Proc. 23rd International Congress for Acoustics (ICA 2019)*, pp. 6630–6636, Aachen, Germany, Sep. 2019.

## 国内発表

### 研究会

- [2] 森田翔太, 川本大貴, 鳥谷輝樹, “聴覚フィードバック時の気導音と骨導音を考慮した音声合成モデルの検討,” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 49, No. 5, H-2019-59, pp. 301–305, 宮城, 2019年8月

### 国内学会

- [3] 森田翔太, 川本大貴, 鳥谷輝樹, “気導音と骨導音を考慮した音声合成モデルの検討,” 日本音響学会2019年秋季研究発表会講演論文集, pp. 597–600, 1-R-9, 滋賀, 2019年9月