

近接共鳴管による音知覚効果の解明と口笛声道模型 の音域拡張に関する研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2025-03-28
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 岡本, 雅弘, Okamoto, Masahiro
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/0002000444

令和6年度

福井大学大学院 工学研究科 博士研究論文

近接共鳴管による音知覚効果の解明と口笛声道模型の音域拡張に関する研究

総合創成工学専攻

知識情報システム分野

令和4年入学 22950061

岡本 雅弘

指導教員 森 幹男

内容梗概

本論文では,解明されていない身近な音に関する現象に着目して行った研究として,前半 では,近接共鳴管による音知覚効果の解明について,後半では,口笛声道模型の音域拡張に 関する研究などについて述べる。

前半の近接共鳴管による音知覚効果の解明では,被験者 10 名に対して,クント管(片側 閉管の円筒管)や貝殻を耳に近付けたときの耳内音を耳内プローブマイクで測定し,共振だ けでなく反共振が生じていることを明らかにした。このとき,専用治具の作製やレーザ光に よる位置合わせを行うなどの工夫により実験時の貝殻固定の再現性を担保した。次に独自 に作製した人工耳を用いた同様の実験によって,耳介に近接共鳴管による効果を増大させ る作用があることを示した。また,反共振の知覚への影響を聴取実験で調べ,半数の被験者 が反共振の効果を知覚できることを明らかにした。このようにして明らかとなった音知覚 効果や耳介の作用は高音質なヘッドホン開発への応用も期待できる。

後半の口笛声道模型の音域拡張に関する研究では、代表的な2種類の口笛に着目し、これ まで発生音の音高や口唇開口部の大きさで分類されていた Pucker whistle と Hollow whistle を共鳴方式の違いで分類する方法を提案し、声道の容積を一定として複数プレートを交換 したときの発生音の基本周波数の変化から2者を判別できることを示すことにより、提案 方法の有効性を確認した。また、2個のパラメータで声道形状を近似する放物線型モデルを 口笛声道模型に適用することにより、これまで1/3 オクターブ程度であった連続した音階と して観測できる音域を、1 オクターブ以上に拡張できることを実証した。このとき、口腔側 の声道断面積は、音高が高くなると狭くなるが、物理的な限界を超えると対応する共振周波 数が高次の共振周波数に移行して最大となり、さらに音高が高くなると再び狭くなること を明らかにした。この現象はフルートなどの管楽器と似ており、実際の口笛でもオーバーブ ローイングによって基本周波数が大きく変化する現象として説明できる。なお、検証にあた っては、口笛声道模型の発生音を自動で測定する装置を製作し、効率的に測定を行うことに よって測定数を増やしデータの信頼性を高めた。口笛アンサンブルなど口笛演奏において 表現の幅を広げるためには口笛の低音域拡大が不可欠であるが、本研究の結果はそれを実 現するための具体的な方法を示唆している。

目次

第1章	序諸	a	1
	1.1	はじめに	1
	1.2	本論文の構成・・・・・	2
第2章	耳内	対音とその測定方法	
	2.1	聴覚器官について	4
	2.2	耳内プローブマイクロホン	6
	2.3	耳内プローブマイクロホンの使用方法	7
	2.4	耳内プローブマイクロホンの周波数特性	
第3章	近接	送共鳴管としてクント管を用いた耳内音測定	9
	3.1	概要	10
	3.2	使用機器	10
	3.3	クント管の共振周波数	11
	3.4	測定方法	12
	3.5	測定結果	14
	3.5	.1 騒音環境における測定結果	14
	3.5	.2 静音環境における測定結果	19
	3.6	まとめと考察	20
第4章	近接	安共鳴管として貝殻を用いた耳内音測定	21
	4.1	概要	22
	4.2	使用機器	22
	4.3	貝殻の共振周波数	23
	4.4	測定方法	24
	4.5	貝殻の固定・位置調整	26
	4.6	測定結果	27
	4.6	.1 騒音環境における測定結果	27
	4.6	.2 静音環境における測定結果	
	4.7	まとめと考察	
第5章	近接	丧共鳴管による音知覚効果における耳介・耳珠の影響	34
	5.1	概要	35
	5.2	使用機器	35
	5.2 5.3	使用機器	······35 ······36
	5.2 5.3 5.4	使用機器作製した人工耳測定方法	······35 ·····36 ·····37
	 5.2 5.3 5.4 5.5 	使用機器 作製した人工耳 測定方法 別定結果	······35 ·····36 ·····37 ·····38

5.5.		耳介を取り外した場合の測定結果	39
5.5.3		耳珠がない場合の測定結果	40
5.6	ま	とめと考察・・・・・・	41
反判	、振	による知覚への影響	42
6.1	概	要	43
6.2	使	用機器	43
6.3	実	験に用いた音源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
6.4	実	験方法	44
6.5	実	験結果	45
6.6	ま	とめと考察	45
口僅	育	道模型と発生音の測定方法	46
7.1	口 <i>′</i>	笛	47
7.2	Pu	cker whistle ······	48
7.3	Но	llow whistle ······	48
7.4	声	首模型	49
7.5	口 <i>′</i>	笛声道模型	50
7.6	声	道の伝達関数	51
7.7	\sim	ルムホルツ共振周波数	53
7.8	Π′	笛声道模型の発生音	54
7.9	発	生音の測定	54
7.10	自真	動測定装置	55
7.1	0.1	自動測定装置の概要	55
7.1	0.2	流量の制御	56
7.1	0.3	発生音の解析	56
7.1	0.4	流量の測定	56
7.1	0.5	制御基板	56
PW	と	HW の再定義と判別法	57
8.1	PW	/とHWの再定義	58
8.2	実	験	58
8.2	.1	声道模型の構成・・・・・・	58
8.2	.2	実験の手順	58
8.3	<u>П</u> ,	唇部プレートの内径 5 mm のときの実験結果	59
8.3	.1	測定結果	59
8.3	.2	fl と FH, f2 と F _{R2} の比較	50
8.4	П,	唇部プレートの内径 6 mm のときの実験結果	51
8.4	.1	測定結果	51
	5.5 5.6 反其 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.9 7.10 7.11 7.10 7.11 7.12 8.1 8.2 8.3 8.3 8.4	5.5.2 5.5.3 5.6 京王振 6.1 6.2 6.3 第 6.4 第 6.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.10.1 7.10.2 7.10.3 7.10.4 7.10.5 PW 8.1 8.2 8.3.1 8.3.2 8.3.1 8.4 8.4 8.4	5.5.2 耳介を取り外した場合の測定結果 5.5.3 耳珠がない場合の測定結果 5.6 まとめと考察 反共振による知覚への影響 6.1 概要 6.2 使用機器 6.3 実験に用いた音源 6.4 実験方法 6.5 実験結果 6.6 まとめと考察 口笛声道模型と発生音の測定方法 7.1 7.1 口笛 7.2 Pucker whiste 7.3 Hollow whiste 7.4 声道模型 7.5 口笛声道模型 7.6 声道の伝達関数 7.7 ヘルムホルツ共振周波数 7.8 口笛声道模型の発生音 7.9 発生音の測定 7.10.1 自動測定装置の 7.10.2 流量の制御 7.10.3 発生音の 7.10.4 流量の調査 7.10.5 制御基板 PW と HW の再定義と判別法 8.1 PW と HW の再定義 8.2 実験 8.3.1 測定結果 8.3.1 測定結果 8.3.1 測定結果 8.3.2 自 と FH2 の比較 8.3.1 測定結果 <t< th=""></t<>

	8.4.2 fl と FH, f2 と F _{R2} の比較	52
	8.5 口唇部プレートの内径 7 mm のときの実験結果	53
	8.5.1 測定結果	53
	8.5.2 fl と FH, f2 と F _{R2} の比較	53
	8.6 PW と HW の再定義のまとめ	54
	8.7 PW と HW の判別法の実験の概要	55
	8.8 PW と HW の判別法	55
	8.8.1 声道模型の構成	55
	8.8.2 実験の手順	55
	8.9 PW と HW の判別法の実験結果	56
	8.10 PW と HW の判別法まとめ	56
第9章	口笛声道模型の音域拡張	57
	9.1 実験の概要	58
	9.2 声道近似モデル	58
	9.3 音高変化口笛声道模型の形状計算	59
	9.3.1 計算方法	59
	9.3.2 計算結果	59
	9.4 音高変化口笛声道模型の発生音の測定	71
	9.4.1 測定方法	71
	9.4.2 測定結果	72
第 10 i	章 結論	73
	10.1 本研究の要約	74
	10.2 今後の課題	75
参考文	薪 ······	76
謝辞…		78

第1章

序論

1.1 はじめに

科学が高度に発展した現在においても、科学的に解明されていない現象が数多く存在す る。例えば、浴槽の水を排出するときに生じる「バスタブ渦」という現象は完全には解明 されていない[1]。他にも、ガラスは固体ではなく動きが凍結した液体といわれているが、 どのような物質がガラス転移するのかはいまだ解明されていない[2]。このように、身近な 現象においても解明されていないものが多く存在し、それらを解き明かすことは、科学の さらなる発展に繋がると考えられる。

そこで、本論文では、解明されていない身近な音に関する現象のうち「貝殻を耳に近づけると音が聞こえる現象」と「口笛」に着目し、これらの現象について、定量的な測定と 原理の解明を試みた研究について述べる。前半では、近接共鳴管による音知覚効果の解明 について、後半では、口笛声道模型の音域拡張に関する研究などについて述べる。

貝殻を耳に近づけると海の音が聞こえるといわれているが[3][4], この現象については完 全には解明されておらず,内耳の蝸牛で発生する音が貝殻で共鳴するなどの説も散見され る[5]。最近では,大学研究者の指導を受けながら,外耳道を空洞としてモデル化し,実測 した高校生による課題研究があるが[5],音響的に大きな影響を与えることが知られている 耳介の影響が考慮されていないなどの問題点がある。また,これまで研究室で行ってきた 実験では用いた共鳴管が竹筒であることやその固定方法など測定系に改善の余地がある [6][7]。そこで前半の近接共鳴管による音知覚効果の解明では,防音室内に再現した騒音環 境で,貝殻や共振周波数を計算で求められる共鳴管[8]を耳穴に近づけたときの耳内音を実 測し,耳内音のスペクトルの変化を調べることで,近接共鳴管による音知覚効果の解明を 行った。次に,3Dプリンタで作製した耳介を取り外せるようにした簡易的な人工耳を用い て,耳介付き人工耳・耳介無人工耳・耳介付き人工耳(耳珠無し)の耳内音を実測すること で,耳介・耳珠が近接共鳴管による音知覚効果に及ぼす影響を調べた。また,反共振の知 覚への影響を調べるための聴取実験も行った。 また、口笛の教則本などには口笛の吹き方についての論理的で明解な記述は少なく、口 笛音楽教室においても経験に基づく指導が試行錯誤で行われている。このことから、口笛 の発音原理の解明が口笛音楽教室の指導者や生徒から期待されている。本研究グループで は口笛吹鳴時における声道の CT 撮影データと口笛吹鳴時の口唇開口部面積データを用い て口笛声道模型を構成し、実際の口笛の音高変化に従った口腔内形状変化をプレートの組 み替えで再現できる口笛音高変化モデルを作成した。先行研究では口笛音高変化モデルに 圧縮空気を流入し、口笛音の基本周波数と流速を測定する実験を行い、基本周波数と流速 の関係から口笛発音原理の解明を試みた。また、そのときの声道断面積を用いて伝達関数 を求め、理論値を計算し比較した。そこで後半の笛声道模型の音域拡張に関する研究で は、代表的な2種類の口笛に着目し、これまで発生音の音高や口唇開口部の大きさで分類 されていた Pucker whistle と Hollow whistle を共鳴方式の違いで分類方法を提案する。そし て、声道形状を容積一定で複数プレートを交換したときの発生音の基本周波数の変化から Pucker whistle と Hollow whistle を共鳴方式の違いで分類方法を提案する。そし て、声道形状を容積一定で複数プレートを交換したときの発生音の基本周波数の変化から Pucker whistle と Hollow histle を判別する方法を提案する。さらに、これまで 1/3 オクター ブ程度であった声道模型の音域を拡張するために、2 つのパラメータで声道形状を近似す る放物線型モデルを用いて 500~4000 Hz の 3 オクターブの音域実現を試みた。

1.2 本論文の構成

第1章では本論文で取り扱う研究の背景及び研究の目標について述べる。また,第2章 では耳内音とその測定方法について述べる。そして,第3章では共鳴管としてクント管を用 いた耳内音測定について,第4章では共鳴管として貝殻を用いた耳内音測定について述べ る。さらに,第5章では耳介・耳珠が音知覚効果に及ぼす影響について,第6章では反共振 による知覚への影響について述べる。第7章では口笛声道模型と発生音の測定方法につい て述べる。そして,第8章ではPWとHWの再定義と判別法について述べる。第9章では 口笛声道模型の音域拡張について述べる。最後に,第10章では本論文の要約と今後の課題 について述べる。

第2章

耳内音とその測定方法

本章では、本研究で行った耳内音についてとその測定方法について述べる。2.1節では聴 覚器官について、2.2節では使用する耳内プローブマイクロホンについて、2.3節では耳内プ ローブマイクロホンの使用方法について、2.4節では耳内プローブマイクロホンの周波数特 性について述べる。

2.1 聴覚器官について

聴覚器官の概略図を図 2-1 に示す。外部から伝達された音(空気の圧力変化)は外耳道を 通って鼓膜を振動させる。外耳道は管になっているので共振特性があり,共振周波数は 3.5 kHz 付近である。中耳には空気の満たされた鼓室があり,その中には槌骨,砧骨及び鐙骨と 呼ばれる 3 つの耳小骨があり,小骨筋などで保持されている。槌骨は鼓膜に接し,鐙骨の一 端,鐙骨底は蝸牛の前庭窓に陥入している。これらの耳小骨連鎖によって,鼓膜の振動は鐙 骨底を介して蝸牛内のリンパ液に伝えられる。内耳は蝸牛,前庭及び三半規官の 3 つの部分 から成っており,互いに交流する外リンパ液で満たされている。内耳の骨の開口部としては 前庭窓と蝸牛窓(鼓室窓ともいう)があり,前者は鐙骨底によって蓋をされ,後者は薄い膜 によって閉じられている。聴覚に関与する部分は蝸牛で,約2と3/4回転のかたつむりの殻 に似た形をした骨性の管である。管の長さは約35 mmで,内部は薄い骨の板と基底膜によ って二分されている。



図 2-1 聴覚器官

蝸牛を引きのばすと図 2-2 のようになる。下部の管は鼓室階と呼ばれ一端は蝸牛窓で中耳 に接している。上部の管は前庭階と呼ばれ、その一端は前庭窓で鐙骨と接している。鼓室階 と前庭階は螺旋管の先端にある蝸牛孔でつながっているため、中の外リンパ液は両階間を 自由に流通できる。前庭階の一部は薄いライスネル膜によって仕切られ、蝸牛管を形作って いる。蝸牛管は内リンパ液で満たされており、その中には複雑な働きをする聴覚受容器のコ ルチ器がある。蝸牛管と鼓室階を分けている基底膜の上には、三角状の柱細胞の両側に1列 の内毛細胞と3~4列の外毛細胞が並んでいる。基底膜が振動すると、網状板はコルチ柱に 支持されているため、基底膜は蝸牛軸骨との接続部を軸として動くが、蓋膜は螺旋縁との接 続部を軸として動くので、その間に機械的なずれが生じる。有毛細胞の先端の一部は網状板 を通り、蓋膜に食い込んでいるため、毛が曲げられることになる。この毛の撓みが有毛細胞 を刺激して,電気生理学的な電位の形で聴神経の興奮をもたらす。外耳,中耳を通って来た 機械振動がここで初めて電気的信号に変換され,聴覚神経系への入力信号が発生すること になる。内毛細胞の発生電位は基底膜の振動の速度に比例し,一方向の毛の撓みに対しての み電位を発生する。

基底膜は、前庭窓から蝸牛頂へ行くにつれてその幅は増加する。高周波入力音の場合に は、基底膜の最大変位は前庭窓近くで生じ、基底膜の残りの部分はほとんど振動しない。 一方低周波の音を入力した場合は、変位は蝸牛頂側で増大し、基底膜の末端の直前で最大 となる。このように、基底膜の共振周波数は奥に行く程低くなる。つまり、基底膜は入力 音の周波数分析を行う機能を持っている。蝸牛内では、前庭窓側(入口側)の有毛細胞が 高周波数域の電気的信号への変換を、蝸牛頂側(奥側)の有毛細胞が低周波数域の電気的 信号への変換を行っている。加齢とともに入口側から有毛細胞が損傷するため、加齢によ って高周波数域から音が聞こえにくくなるといわれている。



2.2 耳内プローブマイクロホン

本研究では防音室内で白色雑音を受聴した際の外耳道内に生じる気導音の音圧を測定する。その際, Etymotic Research が販売している「ER-7C Probe Microphone」を使用した。この耳内プローブマイクロホンの写真を図 2-3 に示す。この耳内プローブマイクロホンを用いて、外耳道内に発生する気導音の音圧を測定する。



⊠ 2-3 ER-7C Probe Microphone

2.3 耳内プローブマイクロホンの使用方法

本研究では耳内音の測定に当たって,被験者の右耳に外径 0.95 mm のシリコン製プローブ チューブを鼓膜に接触する寸前の位置まで挿入した。耳内プローブマイクロホンで測定し た気導音は専用プリアンプを通し, PCM レコーダで収録した。

このときに使用したプローブチューブを図 2-4 に、装着図を図 2-5 に示す。



図 2-4 実験に使用したプローブチューブ



図 2-5 プローブマイクロホン装着図

2.4 耳内プローブマイクロホンの周波数特性

耳内プローブマイクロホン(Etymotic Research ER-7C)の周波数特性を図 2-6 に示す。上の 曲線はプローブチューブの開口部が開いている場合,下の曲線はプローブチューブの開口 部は閉じている場合のゲイン特性である。図 2-6 より,プローブチューブの開口部が開いて いる場合には,耳内プローブマイクロホンのゲイン特性(共振特性)は 200~10000 [Hz]の範囲 で平坦であることが保障されているため,周波数特性による音信号への影響は考えないも のとする[9]。



図 2-6 耳内プローブマイクロホンの周波数特性

第3章

近接共鳴管としてクント管を用いた耳内音測定

本章では,近接共鳴管としてクント管を用いた場合の耳内音測定について述べる。3.1節では測定の概要,3.2節では使用する機器,3.3節ではクント管の共振周波数,3.4節では測 定方法,3.5節では測定結果,3.6節ではまとめと考察について述べる。

3.1 概要

はじめに、本研究では貝殻や瓶のような共鳴管を耳に近接させたときに音が聞こえる現 象のことを近接共鳴管による音知覚効果と呼ぶ。ここでは、近接共鳴管としてクント管(長 さを調整できる片側閉管円筒管)を用いて耳内音を測定することで、クント管を耳に近接さ せたときの音知覚効果について調べる。

3.2 使用機器

本実験で使用する機器は以下の通りである。

- ・耳内プローブマイク: ER-7C Series B Clinical Probe Microphone System
- ・騒音計 : ACO TYPE 6236
- ・スピーカ: Roland MA-15D
- ・PCM レコーダ: SONY PCM-D50
- ・クント管(長さ 8 cm, 開口部直径 2 cm, 計算で求めた共振周波数 1 kHz)

図 3-1,図 3-2 に実験に使用したプローブチューブ,共鳴管の写真をそれぞれ示す。 クント管の共振周波数の算出には,後述の式(3.3.2)を用いた。



図 3-1 実験に用いたプローブチューブ



図 3-2 実験に用いた共鳴管

3.3 クント管の共振周波数

クント管を片側閉管の円筒管と考え, 共振周波数 *f* [Hz] は, *c* を音速 (340 [m/s]), *L* を 管の長さ [m], *r* を開口部の半径 [m]として, 式(3.3.1)で計算できる[8]。

$$f = \frac{c}{4L} \tag{3.3.1}$$

また、開口端補正を考慮した共振周波数は式(3.3.2)で計算できる[8]。

$$f = \frac{c}{4(L+0.6133r)} \tag{3.3.2}$$

開口端補正は参考文献[10]の理論値を用いた。

クント管の寸法のイメージを図 3-3 に示す。



図 3-3 クント管の寸法のイメージ図

3.4 測定方法

防音室内で白色雑音を再生することによって再現した騒音環境で、被験者 10名(22~24歳 男性 9名,女性1名)の右耳の耳内音を耳内プローブマイクで測定する。このとき、プロー ブマイク(Etymotic Research ER-7C)のプローブチューブ(図 3-1)を被験者の右耳の外耳道内に 20 mm 挿入し、共鳴管を右耳の耳穴に近接させたときの耳内音測定を行った。また、同条件 下で共鳴管を近接させる前の耳内音も測定した。被験者の耳穴の位置に設置した騒音計で 50 dB(A 特性)になるように白色雑音の音量を調節した。防音室内の暗騒音は 23 dB(A 特性) であった。測定耳(右耳)と騒音再生用スピーカとの距離を1m とした。収録には PCM レコ ーダを用い、サンプリング周波数 22.05 kHz、量子化ビット数 16 ビットで耳内音をディジ タル化し、60 秒間収録した。耳内音スペクトルを求める際には、測定した耳内音の定常部 19 ヶ所に対して Hamming 窓を掛け、66536 ポイントで FFT を行った。測定結果にはこれら の平均値を用いる。測定中に角度や高さが変化しないように共鳴管をマイクスタンドに固 定した。また、マイクスタンドを床と平行になるように図 3-4 に示すように固定し、共鳴管 を前後に動かせるようにした。前後に動かしたときの耳穴との距離が測定できるように、デ ジタルノギスを図 3-5 に示すようにマイクスタンドのブームに固定した。測定器具の配置を 図 3-6 に示す。





3.5 測定結果

3.5.1 騒音環境における測定結果

防音室内で白色雑音を再生することにより再現した騒音環境で耳内音を測定し、クント 管を耳穴に近接させる前後の耳内音スペクトルの差分を求めた。ここで、耳穴を完全に塞が ないようにクント管を耳穴に近接させた状態を 0 mm とし、クント管と耳穴との距離を 0~50 mm の間で 10 mm ずつ変化させて測定を行い、クント管を耳穴に近接させる前後の耳内音 スペクトルの差分を求め、クント管と耳穴との距離が及ぼす音知覚効果への影響を調べた。

先行研究[6]で被験者ごとの耳内音の相違について調べた結果から,測定結果は10名の平均を示す。クント管と耳穴との距離が0~50mmのときの耳内音の対数パワースペクトルの差分(10名の平均)を図3-7~図3-12に示す。また,クント管と耳穴の距離を変化させたとき(0mm, 20mm, 40mm)の耳内音の対数パワースペクトルの差分(10名の平均)を図3-13に示す。



図 3-7 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 0 mm)



図 3-8 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 10 mm)



図 3-9 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 20 mm)



図 3-10 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 30 mm)



図 3-11 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 40 mm)



図 3-12 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳穴との距離 50 mm)



図 3-13 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均)

図 3-7 から,共鳴管として用いたクント管の共振周波数の奇数倍(1000 Hz, 3000 Hz, 5000 Hz)付近で共振・反共振両方のスペクトル変動が生じていることがわかる。また,図 3-8~図 3-13 から,共鳴管と耳穴の距離が近いほど,共振・反共振のスペクトル変動が顕著に生じていることがわかる。

3.5.2 静音環境における測定結果

体内(内耳の蝸牛)で発生する音が貝殻で共鳴し,海の音が聞こえるという説[5]を検証する ために,静音環境(防音室内)で3.5.1と同様の測定を行った。

クント管と耳穴との距離が 0 mm のときの耳内音の対数パワースペクトルの差分(10 名の 平均)を図 3-14 に示す。図 3-14 から, 3.5.1 で得られたような, 共振周波数付近に共振・反 共振のスペクトル変動が生じていないことがわかる。これより,体内で発生する音が貝殻で 共鳴し,音が聞こえるという説を否定する結果が得られた。



図 3-14 静音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均)

3.6 まとめと考察

防音室内で白色雑音を再生することによって再現した騒音環境下で耳に片側閉管円筒管の開口部を近づけたときの耳内音のスペクトルの変化を調べた。その結果,片側閉管円筒管を耳に近づけた場合,最低共振周波数 fo の奇数倍の周波数において,先行研究[5]で述べられていた共振だけでなく,共振・反共振の両方が生じることが確認できた。また,静音環境の場合,片側閉管円筒管を耳穴に近づけても音が知覚されないことがわかった。

第4章

近接共鳴管として貝殻を用いた耳内音測定

本章では,近接共鳴管として貝殻を用いた場合の耳内音測定について述べる。4.1節では 測定の概要,4.2節では使用する機器,4.3節では貝殻の共振周波数,4.4節では測定方法, 4.5節では共鳴管の固定・位置調整,4.6節では測定結果,4.7節ではまとめと考察について 述べる。

4.1 概要

近接共鳴管としてサザエの貝殻を用いて耳内音を測定することで, 貝殻を耳に近接させ たときの音知覚効果について調べる。

4.2 使用機器

本実験で使用する機器は以下の通りである。

- ・耳内プローブマイク: ER-7C Series B Clinical Probe Microphone System
- ・騒音計 : ACO TYPE 6236
- ・スピーカ: Roland MA-15D
- PCM レコーダ: SONY PCM-D50
- ・レーザポインタ(Logicool R700)
- ・水平器(AL-120)
- ・貝殻(サザエ, 共振周波数 1030 Hz)

貝殻の共振周波数の求め方は,4.3 節に示す。 図 4-1,図 4-2 に実験に使用したプローブチューブ,貝殻の写真をそれぞれ示す。



図 4-1 実験に用いたプローブチューブ



図 4-2 実験に用いたサザエの貝殻

4.3 貝殻の共振周波数

測定に用いる貝殻の開口部に,空気を送ることで発生した音をマイク(SHURE SM58)で測定し,スペクトラムアナライザを用いてスペクトルを調べた。図 4-3 に貝殻の開口部に空気を送ることで発生した音のスペクトルを示す。



図 4-3 貝殻に空気を送ることで発生した音のスペクトル

図 4-3 から, スペクトルの第1ピークが 1030 Hz であるため, 実験で用いた貝殻の共振 周波数は 1030 Hz とする。

4.4 測定方法

防音室内で白色雑音を再生することによって再現した騒音環境で、被験者 10 名(21~24 歳 男性9名、女性1名)の右耳の耳内音を耳内プローブマイクで測定する。このとき、プロー ブマイク(Etymotic Research ER-7C)のプローブチューブ(図 4-1)を被験者の右耳の外耳道内に 20 mm 挿入し、共鳴管を右耳の耳穴に近接させたときの耳内音測定を行った。また、同条件 下で共鳴管を近接させる前の耳内音も測定した。被験者の位置に設置した騒音計で 50 dB(A 特性)になるように白色雑音の音量を調節した。防音室内の暗騒音は 23 dB(A 特性)であった。 測定耳(右耳)と騒音再生用スピーカとの距離を1m とした。収録には PCM レコーダを用い、 サンプリング周波数 22.05 kHz、量子化ビット数 16 ビットで耳内音をディジタル化し、60 秒間収録した。耳内音スペクトルを求める際には、測定した耳内音の定常部 19 ヶ所に対し て Hamming 窓を掛け、65536 ポイントで FFT を行った。測定結果にはこれらの平均値を用 いる。測定中に角度や高さが変化しないように共鳴管をマイクスタンドに固定した。また、 マイクスタンドを床と平行になるように図 4-4 に示すように固定し、共鳴管を前後に動かせ るようにした。前後に動かしたときの耳穴との距離が測定できるように、デジタルノギスを 図 4-5 に示すようにマイクスタンドのブームに固定した。測定器具の配置を図 4-6 に示す。



図 4-4 マイクスタンドに固定した共鳴管



図 4-5 マイクスタンドのブームに固定したデジタルノギス





4.5 貝殻の固定・位置調整

貝殻はクント管とは異なり、開口部に凹凸があるため、水平器(AL-120)を用い、板が地面 と垂直になるように固定した。

各被験者の耳に対して同様の位置になるよう,レーザポインタ(Logicool R700)をマイクス タンドに固定し,被験者の測定耳付近にレーザを照射することで,貝殻の位置の調整を行っ た。被験者の測定耳付近にレーザが照射されるように貝殻の位置を調整した。共鳴管の位置 調整の様子を図 4-7 に示す。



4.6 測定結果

4.6.1 騒音環境における測定結果

防音室内で白色雑音を再生することにより再現した騒音環境で耳内音を測定し, 貝殻を 耳穴に近接させる前後の耳内音スペクトルの差分を求めた。ここで, 貝殻と耳珠の距離が 10 mm で, 貝殻が耳に触れている状態を 0 mm とし, 貝殻と耳との距離を 0~50 mm の間で 10 mm ずつ変化させて測定を行い, 貝殻を耳穴に近接させる前後の耳内音スペクトルの差分を 求め, 貝殻管と耳穴との距離が及ぼす音知覚効果への影響を調べた。

貝殻と耳穴との距離が 0~50 mm のときの耳内音の対数パワースペクトルの差分(10 名の 平均)を図 4-8~図 4-13 に示す。また、貝殻と耳穴の距離を変化させたとき(0 mm, 20 mm, 40 mm)の耳内音の対数パワースペクトルの差分(10 名の平均)を図 4-14 に示す。



図 4-8 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 0 mm)



図 4-9 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 10 mm)



図 4-10 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 20 mm)



図 4-11 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 30 mm)



図 4-12 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 40 mm)



図 4-13 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均, 耳との距離 50 mm)


図 4-14 騒音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均)

図 4-8 から,共鳴管として用いたクント管の共振周波数整数倍付近で共振・反共振両方の スペクトル変動が生じていることがわかる。また,図 4-14 から,共鳴管と耳穴の距離が近 いほど,共振・反共振のスペクトル変動が顕著に生じていることがわかる。

4.6.2 静音環境における測定結果

3.5.2 と同様で、体内(内耳の蝸牛)で発生する音が貝殻で共鳴し、音が聞こえるという説[5] を検証するために、静音環境(防音室内)で測定を行った。

貝殻と耳穴との距離が0mmのときの耳内音の対数パワースペクトルの差分(10名の平均) を図 4-15 に示す。図 4-15 から、4.6.1 で得られたような、共振周波数付近に共振・反共振の スペクトル変動が生じていないことがわかる。これより、3.5.2 で用いたクント管を用いた 場合と同様に、体内で発生する音が貝殻で共鳴し、音が聞こえるという説を否定する結果が 得られた。



図 4-15 静音環境における耳内音スペクトルの差分(10 名の平均)

4.7 まとめと考察

防音室内で白色雑音を再生することによって再現した騒音環境下で耳に貝殻の開口部を 近づけたときの耳内音のスペクトルの変化を調べ,貝殻を耳に近づけた場合,貝殻の最低共 振周波数 foの奇数倍の周波数で共振・反共振が生じることが確認できた。また,静音環境の 場合,貝殻を耳穴に近づけても音が知覚されないことがわかった。

片側開管の共鳴管が条件を満たしていると両側閉管と等価になる原理を図 4-16 に示す。 片方の開口部が広がっているテーパー付き片側開管の共鳴管は、図 4-16 のように開口部の 少し先で節が生じるため、開口側が閉管と等価になる[11]。使用した貝殻は条件を満たして いるため、両側閉管と等価である。図 4-8 から、貝殻を用いた場合に fo の整数倍付近で共 振・反共振が生じるため、貝殻は両側閉管や両側開管の円筒管と同様な共振特性であると考 えられる。



図 4-16 閉管になる原理

第5章

近接共鳴管による音知覚効果における

耳介・耳珠の影響

本章では、人工耳を用いて耳内音を測定した結果と人工耳から耳介・耳珠を取り外した場合の耳内音を測定した結果の違いから、近接共鳴管による音知覚効果における耳介・耳珠の影響について述べる。5.1節では測定の概要、5.2節では使用する機器、5.3節では、作製した人工耳、5.4節では測定方法、5.5節では測定結果、5.6節ではまとめと考察について述べる。

5.1 概要

人工耳を用いた場合の耳内音と人工耳から耳介・耳珠を取り外したものを用いた場合の 耳内音を測定することで,音知覚効果における耳介・耳珠の影響について調べる。

5.2 使用機器

本実験で使用する機器は以下の通りである。

- ・耳内プローブマイク: ER-7C Series B Clinical Probe Microphone System
- ・騒音計 : ACO TYPE 6236
- ・スピーカ: Roland MA-15D
- ・PCM レコーダ: SONY PCM-D50
- ・貝殻(サザエ, 共振周波数 1030 Hz)
- ・人工耳

図 5-1, 図 5-2 に実験に使用したプローブチューブ, 貝殻の写真をそれぞれ示す。



図 5-1 実験に用いたプローブチューブ



図 5-2 実験に用いた貝殻

5.3 作製した人工耳

近接共鳴管による音知覚効果における耳介・耳珠の影響を明らかにするために, 耳介を取 り外せるようにした簡易的な人工耳を光造形 3D プリンタ(Form 3)で作製した。作製に用い た耳介の 3D データには, Artec 3D 社の無料サンプルを用いた[12]。作製した耳介模型 2 種 を図 5-3 に示す。また,外耳道の再現は,先行研究[13]を参考に,内径 10 mm,長さ 25 mm を円形の穴の開いたプレート 3 枚(厚さ 5 mm,内径 10 mm 1 枚,厚さ 10 mm,内径 10 mm 2 枚)を用いた。図 5-4 に示すように外耳道を模した内径 10 mm,長さ 25 mmのプレートと 作製した耳介を接続した構造になっている。





図 5-3 作製した耳介模型 (左:耳珠なし 右:耳珠あり)



図 5-4 実験に用いた人工耳

5.4 測定方法

防音室内で白色雑音を再生することにより再現した騒音環境で、共鳴管を人工耳の耳穴 に近づけたときの耳内音を測定した。また、同条件下で共鳴管を近づける前の耳内音も測定 した。そして、共鳴管を人工耳の耳穴に近接させる前後の耳内音スペクトルの差分を求めた。 共鳴管として貝殻(サザエ)を用いた。人工耳の位置に設置した騒音計で 50 dB(A 特性)にな るように白色雑音の音量を調節した。防音室内の暗騒音は 23 dB(A 特性)であった。人工耳 と騒音再生用スピーカとの距離を 1 m とした。収録には PCM レコーダを用い、サンプリン グ周波数 22.05 kHz、量子化ビット数 16 ビットで耳内音をディジタル化し、60 秒間収録し た。耳内音スペクトルを求める際には、測定した耳内音の定常部 19 ヶ所に対して Hamming 窓を掛け、65536 ポイントで FFT を行った。人工耳と共鳴管をスタンドとマイクスタンドに 固定し、測定中に角度や高さが変化しないようにした。測定結果にはこれらの平均値を用い る。また、耳介無人工耳についても同様の測定を行った。耳介付人工耳、耳介無人工耳にお ける、人工耳と共鳴管の配置と固定の様子をそれぞれ図 5-5、5-6 に示す。測定器具の配置 を図 5-7 に示す。



図 5-5 耳介付人工耳と共鳴管の配置と固定の様子



図 5-6 耳介無人工耳と共鳴管の配置と固定の様子



図 5-7 測定器具の配置

5.5 測定結果

5.5.1 耳介の影響を考慮した場合の測定結果

外耳道を模したプレートと貝殻との距離が20mmのときの耳内音スペクトルの差分(近接後-近接前)の3回分の平均値を図5-8に示す。図中の青色の縦線は貝殻の最低共振周波数fo(1030Hz)の倍数部分を示している。図5-8から、貝殻のfoの倍数付近で共振・反共振が生じることがわかる。このように、実耳の場合と同様の傾向があることが確認できた。



図 5-8 耳介付人工耳の耳内音スペクトルの差分 (プレートと貝殻との距離 20 mm)

5.5.2 耳介を取り外した場合の測定結果

耳介無人工耳で、5.5.1 で述べた方法で測定を行った結果を図 5-9 に示す。図中の青色の 縦線は貝殻の f_0 の倍数を示している。図 5-9 から貝殻の f_0 の倍数付近で共振・反共振が生 じるが、耳介を取り外す前(図 5-8)と比較して、生じ方が減少していることがわかる。



図 5-9 耳介無人工耳の耳内音スペクトルの差分 (プレートと貝殻との距離 20 mm)

5.5.3 耳珠がない場合の測定結果

耳介付人工耳(耳珠無し)で、5.5.1 で述べた方法で測定を行った結果と5.5.1 の結果を図5-10 に示す。図中の青色の縦線は貝殻の foの倍数を示している。図5-10 から貝殻の foの倍数 付近で共振・反共振が生じ、耳珠がある場合と比較して、スペクトルの変動がほとんど変わ らないことがわかる。



図 5-10 耳介付人工耳の耳内音スペクトルの差分の比較 (プレートと貝殻との距離 20 mm)

5.6 まとめと考察

人工耳を作製し、実耳と同様の測定を行った。図 5-8~図 5-10 から、貝殻の f₀の倍数付近 で共振・反共振が生じることがわかる。これは、実耳を用いた場合と同様の傾向があること が確認できた。外耳道を模したプレートと貝殻との距離 20 mm のとき、耳介の有りの場合 の方が共振・反共振は顕著に生じることから、耳介が近接共鳴管による音知覚効果を顕著に させる働きがあると考えられる。また、耳珠がない耳介の場合では、耳珠がある場合と比較 して顕著な変化は見られなかった。これより、耳珠の有無によって近接共鳴管による音知覚 効果への影響は小さいことが考えられる。

第6章

反共振による知覚への影響

本章では,共鳴管を耳に近づけることで確認できた反共振の知覚への影響を調べるため に聴取実験を行った結果について述べる。6.1節では聴取実験の概要,6.2節では使用する機 器,6.3節では聴取実験に用いた音源,6.4節では聴取実験の方法,6.5節では実験結果,6.6 節ではまとめと考察について述べる。

6.1 概要

共鳴管を耳に近づけた際の耳内音スペクトルの差分から,共振だけでなく,反共振も生 じていることが確認された。この反共振が知覚にどう影響を与えているかを,聴取実験を行 うことで調べる。

6.2 使用機器

本実験で使用する機器は以下の通りである。

- ・ヘッドホン(STAX SR-303)
- ・レコーダ(TASCAM DR-05)

6.3 実験に用いた音源

Audacity というフリーの音声編集ソフトの機能で作成した白色雑音に対して, 同ソフト上の機能である Filter Curve EQ を用い,2音作成した。Filter Curve EQ はイコライゼーション ツールであり,FFT フィルタである。Filter Curve EQ の機能を用いて,1000 Hz の倍音の12 dB の強調・抑制するフィルタを作製し,白色雑音に適用することで,図 6-1 に示すスペク トルの音源を作成した。1000 Hz の倍音付近を強調した音(赤線)を①,1000 Hz の倍音付近 を強調・抑制した音(黒線)を②とする。



図 6-1 実験に用いた音源のスペクトル

6.4 実験方法

被験者(21~24 歳 9 名)に対し,実験を行う。被験者にヘッドホン(STAX SR-303)を装着させ,上記の作製した2音を順番に呈示し,2音の1対比較を行う。1音(3 秒)呈示後1秒の間隔を空け,次の音を呈示する。

2 音呈示後,被験者は評価用紙に違いを知覚したかどうかを記入する。また,その違いが 言語化・文章化可能であれば,もう一度2音を呈示し,違いを記入させた。実験の流れを図 6-2 に示す。

1対比較は下記に示すi~ivのパターンで行った。

- i. $1 \rightarrow 2$
- ii. $2 \rightarrow 1$
- iii. $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{1}$
- iv. ② → ②



図 6-2 聴取実験の流れ

6.5 実験結果

聴取実験の結果を表 6-1 に示す。表 6-1 の結果より、同じ音を呈示した際は、被験者全員 が違いなしと回答していることがわかる。また1名を除きiかiiのどちらかで違いありと回答 した。

違いありと回答した被験者には違いを文章で記入させた。その結果,①に比べて②の方が こもった音、低音に聞こえたという意見が多かった。

表 6-	1 聴取実験の結果	見 [人]
呈示音	違いあり	違いなし
i (①→②)	7	2
ii (②→①)	5	4
iii (①→①)	0	9
iv (②→②)	0	9

表 6-1 聴取実験の結果

6.6 まとめと考察

反共振の音の知覚への影響について調べるために、1対比較の聴取実験を行った。1000Hz の倍音のみを強調した音源(①)と、1000 Hzの倍音を強調・抑制した音源(②)を作製し、被験 者に呈示した。その結果,9名中8名が①と②の音では,違いがあると回答した。違いがあ ると回答した被験者からは、①に比べ②の方がこもった音、低音に聞こえたという意見があ った。これらの知見は高音質ヘッドホン開発などに応用できると思われる。

第7章

口笛声道模型と発生音の測定方法

本章では口笛声道模型と発生音の測定方法について簡潔に説明する。7.1 節では口笛について、7.2 節では Pucker whistle について、7.3 節では Hollow whistle について述べる。また、7.4 節では 声道模型 について、7.5 節では口笛声道模型について、7.6 節では声道の伝達 関数について、7.7 節ではヘルムホルツ共振周波数について、7.8 節では口笛声道模型の発生音について、7.9 節では発生音の測定について、7.10 節では自動測定装置について述べる。

7.1 口笛

音声に比べて口笛の研究は少なく,発音原理も完全には解明されてはいないが,口笛の 発音原理はオカリナと同じヘルムホルツ共鳴であると報告されている[14]。唇から噴き出 す噴流の近傍では,いくつもの渦輪が下流方向に規則的に並んでおり,この規則的な渦輪 の形成が周期的な速度擾乱を与え加振元になるといわれている[15]。

口笛のピッチ周波数はヘルムホルツ共鳴の周波数で決まるとすると、声道の体積でピッ チ周波数が決まる。舌を喉の奥へ引っ込めて共鳴腔を広げると低い音が、舌を上あごの方 に近づけ共鳴腔を狭くすると高い音が出る。このとき低い音では、息の速度を遅く、高い 音では、息の速度を速くする必要がある。しかし、オーバーブローイングによって1オク ターブ高い音などを出すことができることから口笛吹鳴がヘルムホルツ共鳴とはかならず しも一致しないと考えられる。

オーバーブローイングとは息の速度・圧力を変化させることによってピッチ周波数を変 化させる管楽器の演奏法である。フルートのような気柱共鳴で音を出している楽器では、 オーバーブローイングを行うと同じ運指のまま1オクターブ高い音などを出すことができ る。一方、オカリナのようなヘルムホルツ共鳴で音を出している楽器では、息の速度を変 化させるとピッチ周波数は半音程度変化するが、1オクターブ高い音を出すことはできな い。口笛でオーバーブローイングを行うと、1オクターブ高い音などを発生させることも 可能であり、一概にヘルムホルツ共鳴で音を出しているとは考え難い。

口笛音の音圧波形は,基本周波数の揺らぎが存在するものの純音(正弦波)に近い。しか し,正弦波発振器の音は口笛音には聞こえない。これは口笛音が純音と異なり,口笛音に は基本周波数の揺らぎが存在しているためである。

また本研究グループでは、発音できる最低音のピッチ周波数は 500 Hz 程度、最高音のピッチ周波数は訓練次第で広げることが可能で、3000 Hz 以上のピッチ周波数で吹くことができることを実測によって明らかにした[16]。現在、口笛音として発音できるピッチ周波数のほとんどは 500~5000 [Hz]の範囲で変化させることができると報告されており[17]、通常の楽曲演奏時のピッチ周波数は 650~4000 [Hz]程度で、約3 オクターブの範囲内に収まっている。

47

7.2 Pucker whistle

口笛音として出すことのできる基本周波数の範囲はほとんどが 500 Hz~5 kHz の範囲に 収まっているという報告がある[17]。このような一般的な口笛は, Pucker whistle と呼ばれ, 口唇部をすぼめて吹鳴される(図 7-1)。



図 7-1 Pucker whistle 吹鳴時の口唇部

7.3 Hollow whistle

Harvest は動画で 45 種類の口笛吹鳴法を紹介しており, Pucker whistle より低い 400 Hz 程度の基本周波数の音を Hollow whistle で発生させている[18]。この Hollow whistle は, ヒューマンビートボックス(Human beatbox)で用いられる口笛吹鳴法で Pucker whistle より口唇の開きが大きい(図 7-2)。



図 7-2 Hollow whistle 吹鳴時の口唇部

7.4 声道模型

本実験で用いる声道模型は,2001年に Arai によって提案されたプレート型モデル[19](図 7-3)である。円形の穴(内径 2 mm 刻み)のあいた厚さ 10 mm のプレートによって日本語 5 母 音に対応する声道形状を模擬し,発音させることができる。ロ唇側から順にプレートの番 号を 1, 2, ..., 16 としたときの日本語 5 母音のプレート構成を表 7-1 に示す。



図 7-3 プレート型声道模型

表 7-1 日本語 5 母音のプレート構成

1-1	プレート番号	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	11	12	13	14	15	(16)
/a/	内径 [mm]	32	28	30	34	38	38	34	30	26	20	14	12	16	26	12	12

1.1	プレート番号	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	11	12	13	14	15	16
/1/	内径 [mm]	24	14	12	10	10	10	16	24	32	32	32	32	32	32	12	12

[m]	プレート番号	\bigcirc	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	11	12	13	14	15	(16)
/u/	内径 [mm]	16	14	20	22	24	26	22	14	18	26	30	30	30	30	12	12

101	プレート番号	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10		12	13	14	(15)	16
/e/	内径 [mm]	24	22	22	20	18	16	16	18	24	28	30	30	30	30	12	12

101	プレート番号	\bigcirc	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	11	12	13	14	15	16
/0/	内径 [mm]	14	22	26	32	38	38	34	28	22	16	14	16	22	30	12	12

7.5 口笛声道模型

本研究グループでは口笛発音原理解明のため、口笛吹鳴時の声道の CT 撮影データを基 に、口笛吹鳴時の声道形状を模擬した口笛声道模型の作成を行っている。CT 撮影した 1 mm スライス画像から生成した 3D 画像を図 7-4 に示す。また声道中心線に対して垂直方向に 10 mm 刻みで声道断面積を求め、口笛吹鳴時の声道形状をプレート型声道模型で再現した。口 唇側から順に声道番号 0, 1, ..., 17 としたときの声道断面積と、それら声道断面積に対応 するプレートの穴の内径を表 7.2 に示す。口唇部による狭めの部分は 10 mm より短いと考 えられるため、プレート番号 0 には、内径 4 mm、厚さ 5 mm のプレートを用いる。

本来, 声道模型には声帯の役割を果たすゴム膜のついた管を接続して用いるが, 実際の口 笛では声帯による音源を必要としないことから, 声帯の役割を果たすゴム膜のついた管は 取り外した。



図 7-4 口笛発音時の声道における CT 撮影データから生成した 3D 画像

	プレート番号	0	\bigcirc	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	(1)	12	(13)	14	(15)	(16)	(17)
whistle	断面積 [mm ²]	13	95	96	120	122	139	120	100	163	509	675	713	652	530	311	276	152	69
	内径 [mm]	4	10	12	12	12	14	12	12	14	26	30	30	28	26	20	18	14	10

表 7-2 声道断面積とプレートの穴の内径(①は口唇部)

7.6 声道の伝達関数

声道の共振周波数は声道を音響管としたときの伝達関数を計算することで求めることができる。声道は Kelly の声道モデルと呼ばれる円筒管の連結として考えることができる。

N 個の無損失音響管が図 7-5 のように連結していて、声門側から断面積 $A_1, A_2, ..., A_N$ であるとすると、k 番目と(k+1)番目の管の間の反射係数は、式(7.1)に示すように計算される。

無損失音響管それぞれの長さを a_1 , a_2 , ..., a_N とし, A_1 から A_N までを含めた長さはLであるとすると, 無損失音響管モデルの出力側から内部の方向(声門側)へと向かって順次計算することで連結された無損失音響管全体の伝達関数は式(7.2), 式(7.3)で求めることができる。 声門反射係数 r_G を算出するとき, 声門開口部の面積は 80 mm²とした。また, 導出のための細かい計算は参考文献[20][21]を参照されたい。



図 7-5 長さが均一な N本の無損失音響管の連結

$$r_k = \frac{A_{k+1} - A_k}{A_{k+1} + A_k} \tag{7.1}$$

$$V(z) = \frac{0.5\left\{1 + r_G \prod_{k=1}^{N} (1 + r_k) z^{-\frac{N}{2}}\right\}}{D(z)}$$
(7.2)

$$D(z) = \begin{bmatrix} 1 & -r_{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -r_{1} \\ -r_{1}z^{-a_{1}} & z^{-a_{1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -r_{2} \\ -r_{2}z^{-a_{2}} & z^{-a_{2}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} 1 & -r_{N} \\ -r_{N}z^{--a_{N}} & z^{-a_{N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(7.3)

$$A_k: 声道模型のプレート穴の面積 $r_G: 声門反射係数$$$

本論文では計算によって求めた共振周波数を低い順から F_{R1}, F_{R2}...と表すことにする。 ロ唇部の厚さを 4 mm, 穴の内径を 4 mm としたときの口笛吹鳴時の声道の共振周波数を 表 7-3 に, 振幅特性を図 7-6 に示す。





表 7-3 口笛吹鳴時の声道の共振周波数 [Hz]

図 7-6 口笛吹鳴時の声道の振幅特性

7.7 ヘルムホルツ共振周波数

Wilson らは円筒管を用いた物理的な実験で口笛の基本周波数がヘルムホルツ共振周波数 に近いことを示している[14]。

ヘルムホルツ共鳴器は図 7-7 のように、空洞の容器と口の空いた細い管で構成されており、ヘルムホルツ共振周波数 f はヘルムホルツ共鳴器の体積を V、開口部の断面積を S、ネック部の長さを l、音速を c とすると、式(7.4)で計算できる。また、開口端補正を考慮した場合のヘルムホルツヘルムホルツ共振周波数 FH は式(7.5)で計算できる。

 $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{Vl}} \tag{7.4}$

$$FH = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+1.7a)}}$$
(7.5)

a:開口部の半径



図 7-7 ヘルムホルツ共鳴器

声道模型をヘルムホルツ共鳴器とし共振周波数を計算するとき,図 7-8 のように口唇部に 対応するプレートをネック部とし,音速を 340 m/s として計算した。



図 7-8 声道模型をヘルムホルツ共鳴器と考えた場合

7.8 口笛声道模型の発生音

口笛声道模型の声門側から空気を流入させると、特定の流量において口笛音が発生する。 また、模型から発生する口笛音として、Pucker whistle と Hollow whistle の2種類が確認さ れている。そして、Pucker whistle の発生音の基本周波数は声道の共振周波数に近いことが わかっている。また、Hollow whistle の発生音の基本周波数は声道の共振周波数とは一致せ ず、ヘルムホルツ共振周波数に近いことが示唆されている。

7.9 発生音の測定

本研究では口笛声道模型の声門側から空気を流入させ,発生した口笛音の基本周波数を 測定する。このとき,一定の流量を保つために,コンプレッサとエアタンクを用いて圧縮空 気を流入させる。

声道模型の声門側に接続したチューブから送り込む圧縮空気の流量を徐々に変化させて いき、口笛音のような純音に近い音が発生したら流量を固定し、そのときの発生音の基本周 波数を測定する。また、口笛音が発生した流量から、さらに流量を上げることで異なる周波 数の口笛音が発生する場合はその基本周波数も記録する。

先行研究および8章における測定では、減圧弁(図7-9)を用い、手動で流量を調整し実験を行った。9章における測定では、7.10節で述べる自動測定装置を使用した。各実験における測定方法の詳細は、それぞれ対応する章内で後述する。



図 7-9 減圧弁

7.10 自動測定装置

音域拡張した音高変化口笛声道模型は、形状数が多くなったため、測定の負担軽減のために自動測定装置を作成した。

7.10.1 自動測定装置の概要

作成した自動測定装置では、口笛声道模型に流入する流量の増減、発生音の解析、流量の 測定を自動で行うことができる。測定装置は、制御装置、流量計、流量制御用の比例制御弁、 発生音解析用のマイク、エアコンプレッサと補助タンクで構成される。測定装置の操作は制 御装置の液晶画面のタッチパネル、もしくは、Wi-Fi 接続した PC やスマートフォンなどの 端末から行うことができる。流量の操作では、増加、減少、停止、増減速度の変更ができる。 発生音の解析結果、及び流量の測定データは、テキストファイルとして出力することができ る。この測定データは、MicroSD カードに保存され、Wi-Fi 接続した端末からダウンロード することもできる。流量の調整や、測定データ出力の開始および停止は、手動入力での操作 が可能だが、自動計測開始ボタンを押すことで、流量をゆっくり減少させていきそのときの 発生音と流量を記録する一連の動作を自動で行う。これによりボタン一つで測定実験を完 了させることができる。図 7-10 は Wi-Fi 接続した端末から操作するための Web フォーム、 図 7-11 は制御装置の外観である。



図 7-10 制御用 Web フォーム



図 7-11 制御装置

7.10.2 流量の制御

流量は比例制御弁(SMC PVQ-30)を用いて制御する。比例制御弁は,電流量に応じて, 弁の開きを連続的に制御することができる。本装置では,比例制御弁の制御に PWM 制御を 用いる。

7.10.3 発生音の解析

発生音は、MEMS マイク(INMP441)を用いて録音し、基本周波数、音量、歪み率を求める。INMP441 はディジタル出力の全指向性マイクであり、60 Hz~15 kHz までフラットなゲイン特性を持っている[22]。発生音の基本周波数は、FFT パワースペクトルが最大となる周波数として求め、音量は、基本周波数におけるスペクトルのピーク値として計測する。サンプリング周波数は 22.05 kHz とし、サンプル数 8192 に対してハニング窓をかけて FFT を行う。歪み率は、全高調波歪+ノイズ(Total Harmonic Distortion Plus Noise, *THD*+*N*)として式(7.6)を用いて求める。*V*1は基本周波数におけるパワー、*V*total は全ての周波数のパワーの合計値である。

$$THD + N = \frac{\sqrt{V_{total}^2 - V_1^2}}{V_1}$$
(7.6)

7.10.4 流量の測定

流量は、流量計(SMC PFM711-02-c)を用いて計測する。PFM711-02-c は 100 L/min までの流量を測定することができる。測定結果は電圧値でのアナログ出力として出力される。流量計から出力された電圧は制御装置内の電圧計 ADS1115 を用いて記録する。

7.10.5 制御基板

磁弁の制御,発生音の解析,流量計の記録にはマイコンボード ESP32 を用いた。ESP32 で は、80 MHz のクロックタイマをもとに PWM 波形を出力することができ、80 MHz のクロ ックで表現可能な範囲内において PWM 波形の分解能と周波数を設定することができる。今 回は分解能 13 ビット,周波数 9765 Hz とした。また,ESP32 には Wi-Fi 接続機能が搭載さ れており,Wi-Fi 接続した端末を用いての操作,端末へのファイルのダウンロードなどを行 うことができる。

第8章

PW と HW の再定義と判別法

本章では、Pucker whistle (PW)と Hollow whistle (HW)を発音原理で再定義し、その結果を もとにした判別法を提案する。8.1 節では PW と HW の再定義の概要について、8.2 節では 実験方法について、8.3~8.5 節では実験結果について、8.6 節では PW と HW の再定義の実 験で得られた知見についてまとめる。8.7 節では、PW と HW の判別法の実験の概要につい て、8.8 節では PW と HW の判別法の実験方法について、8.9 節では、PW と HW の判別法 の実験結果について、8.10 節では PW と HW の判別法のまとめについて述べる。

8.1 PW と HW の再定義

45種の広義の口笛の分類[23]において, PWとHWは口唇の開きや,基本周波数によっ て分類されている。基本周波数 500 Hz 以上を PW, 500 Hz 未満を HW と定義し, PW の口 唇の開きを基準として, HW の口唇の開きは大きいと述べている。しかし実際の口笛音で は PW の基本周波数は 500 Hz 以下でも観測される。HW の基本周波数は 400 Hz 付近であ るが,音域は詳しくわかっていない。そこで, PWと HW を発音原理によって再定義を行 う。

8.2 実験

8.2.1 声道模型の構成

本実験で用いた声道模型のプレートの組み合わせを表 8-1 に示す。この時口唇側から順に プレートの番号を ①, ①, …, ⑮ とする。① ~ ⑯ 番のプレートには厚さ 10 mm のプレ ートを用い, 口唇部プレートである① 番のプレートには厚さ 4 mm, 内径 5, 6, 7 [mm]のプ レートを用いた。使用した声道形状は, 母音/a/発声時の声道形状に構成した口笛声道模型と, それに対して, 口腔と比べ断面積が大きく変化しないと考えられる咽頭に相当するプレー ト番号⑩~⑯を固定して, ①~⑨を無作為に並べ替えたものを 5 種類用いた。

形状	0	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	1	12	(13)	14	15	(16)
/a/ (baseline)	5-7	32	28	30	34	38	38	34	30	26	20	14	12	16	26	12	12
Type I	5-7	38	30	34	28	26	30	38	32	34	20	14	12	16	26	12	12
Type II	5-7	30	32	34	38	30	26	38	34	28	20	14	12	16	26	12	12
Type III	5-7	28	38	32	38	30	30	34	26	34	20	14	12	16	26	12	12
Type IV	5-7	34	28	34	26	32	38	30	38	30	20	14	12	16	26	12	12
Type V	5-7	26	30	32	30	34	38	34	28	38	20	14	12	16	26	12	12

表 8-1 使用した声道模型のプレート構成

[mm]

8.2.2 実験の手順

口笛声道模型の声門側から送り込む空気の流速を減圧弁(ANEST-IWATA MP9148)で 徐々に上げていき、口笛音のような純音に近い音が発生したら、減圧弁をその前後で微調 整し、音量が最大となる点で減圧弁を固定し、このときの基本周波数を測定した。さらに 流速を上げていって、さらに高い音が出る場合は、その基本周波数も計測した。これらの 基本周波数を、周波数の低い方から順に fl, f2,...とし、fl と f2 について記録した。口笛音 は純音に近いことから、FFT でパワースペクトルを求め、そのピーク値における周波数か

ら容易に基本周波数を求めることができる。基本周波数は、サンプリング周波数44.1 kHz, 量子化ビット数16ビットとして定常部の中央16384ポイントに対してハニング窓を かけて求めた FFT パワースペクトルのピーク値における周波数から求める。測定は5回行 い, 流速計(Honeywell AWM5104)を用いて流速もあわせて測定した。また、口唇側から 10 cm 離して置いた騒音計(ACO TYPE6226)を使用して,3秒間の等価平均音圧レベル

(Leq)を測定した。また、理論値にはヘルムホルツ共振周波数と声道の共振周波数 FRI, F_{R2}を用いて比較した。

ロ唇部プレートの内径5mmのときの実験結果 8.3

8.3.1 測定結果

表 8-2, 図 8-1 に f1, f2 の平均値と共振周波数 FH と FR1, FR2 を示す。

	表 8-2	$f1, f2 \mathcal{O}^{\underline{1}}$	平均値と理	論値	[Hz]
	fl	f2	FH	F_{R1}	F _{R2}
/a/ (baseline)	356.4	2239.4	278.5	1064.1	2228.9
Type I	340.2	1748.4	278.5	1132.1	1783.8
Type II	324.6	1892.2	278.5	1088.2	1965.2
Type III	341.2	1918.6	278.5	1080.2	1984.3
Type IV	342.9	1866.4	278.5	1116.5	1939.1
Type V	337.0	2038.1	278.5	1111	2089.1



2500 \square f1 \square f2 × FH **○**F_{R1} ΔF_{R2} Δ 2000 [ZH] 1500 1000 Ο Ο 0 Ο Ο Ο 500 0 /a/ Type I Type II Type III Type IV Type V (baseline) 形状

図 8-1 f1, f2 の平均値と理論値

8.3.2 f1とFH, f2とF_{R2}の比較

表 8-3 に, fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率,表 8-4 に,f2 の平均値と共振周波数 FR2と誤差率を示す。

表 8-3 より、f1の平均値とFHの各形状の誤差率は16.6~28.0 [%]であることがわかる。 また表 8.4 より,f2の平均値とFHの各形状の誤差率は-3.8~0.5 [%]であることがわかる。 このことから, fl は FH に対応しており,f2 は FR2 に対応していることがわかった。さら にfl はすべて 400 Hz 以下であることから HW,f2 はすべて 2000 Hz 付近であることから PWであることがわかる。

表 8-3 fl の平均	旭と共振	同次级F	H と誤差率 [H
	f1	\mathbf{FH}	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	356.4	278.5	28.0
Type I	340.2	278.5	22.2
Type II	324.6	278.5	16.6
Type III	341.2	278.5	22.5
Type IV	342.9	278.5	23.1
Type V	337.0	278.5	21.0

表 8-3 fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率 [Hz]

	f2	\mathbf{F}_{R2}	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	2239.4	2228.9	0.5
Type I	1748.4	1783.8	-2.0
Type II	1892.2	1965.2	-3.7
Type III	1918.6	1984.3	-3.3
Type IV	1866.4	1939.1	-3.8
Type V	2063.4	2110.6	-2.4

表 8-4 f2の平均値と共振周波数 FR2 と誤差率 [Hz]

8.4 口唇部プレートの内径 6 mm のときの実験結果

8.4.1 測定結果

表 8-5, 図 8-2 に fl, f2 の平均値と共振周波数 FH と F_{R1}, F_{R2} を示す。

	表 8-:	5 f1, f2 の	平均値と理	論値	[Hz]
	fl	f2	FH	F _{R1}	F _{R2}
/a/ (baseline)	371.6	2171.4	318.2	1079.3	2248.5
Type I	367.1	1767.3	318.2	1144.3	1788.2
Type II	366.6	1895.4	318.2	1101.4	1973.5
Type III	362.9	1930.4	318.2	1093.0	1991.9
Type IV	355.8	1883.0	318.2	1129.4	1949.5
Type V	351.5	2051.6	318.2	1124.2	2106.1



図 8-2 fl, f2 の平均値と理論値

8.4.2 f1とFH, f2とF_{R2}の比較

表 8-6 には、fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率、表 8-7 には、f2 の平均値と共振周 波数 F_{R2} と誤差率を示す。

表 8-6 より, fl の平均値と FH の各形状の誤差率は 10.5~16.8 [%]であることがわかる。 また表 8-7 より,f2 の平均値と FH の各形状の誤差率は-4.0~-1.2 [%]であることがわか る。

	fl	FH	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	371.6	318.2	16.8
Type I	367.1	318.2	15.4
Type II	366.6	318.2	15.2
Type III	362.9	318.2	14.1
Type IV	355.8	318.2	11.8
Type V	351.5	318.2	10.5

表 8-6 fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率 [Hz]

表 8-7 f2 の平均値と共振周波数 FR2 と誤差率 [Hz]

	f2	F _{R2}	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	2171.4	2248.5	-3.4
Type I	1767.3	1788.2	-1.2
Type II	1895.4	1973.5	-4.0
Type III	1930.4	1991.9	-3.1
Type IV	1883.0	1949.5	-3.4
Type V	2051.6	2106.1	-2.6

8.5 口唇部プレートの内径 7 mm のときの実験結果

8.5.1 測定結果

表 8-8, 図 8-3 に f1, f2 の平均値と共振周波数 FH と F_{R1}, F_{R2} を示す。

	[Hz]				
	fl	f2	FH	F _{R1}	F _{R2}
/a/ (baseline)	355.8	2245.4	355.0	1089.4	2258.9
Type I	387.1	1779.2	355.0	1152.9	1781.7
Type II	385.4	1910.6	355.0	1110.2	1974.8
Type III	383.3	1934.2	355.0	1101.3	1993.8
Type IV	364.5	1891.1	355.0	1138.6	1974.4
Type V	375.2	2063.4	355.0	1133.6	2110.6



図 8-3 fl, f2 の平均値と理論値

8.5.2 f1とFH, f2とFR2の比較

表 8-9 に fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率,表 8-10 に f2 の平均値と共振周波数 F_{R2} と誤差率を示す。

表 8-9 より, fl の平均値と FH の各形状の誤差率は 0.2~9.0 [%]であることがわかる。また表 8-10 より,f2 の平均値と FR2 の各形状の誤差率は-4.2~-0.1 [%]であることがわかる。このことから,fl は FH に対応しており,f2 は FR2 に対応していることがわかる。さらにfl はすべて 400 Hz 以下であることから HW,f2 はすべて 2000 Hz 付近であることから PW であることがわかる。

	fl	FH	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	355.8	355.0	0.2
Type I	387.1	355.0	9.0
Type II	385.4	355.0	8.6
Type III	383.3	355.0	8.0
Type IV	364.5	355.0	2.7
Type V	375.2	355.0	5.7

表 8-9 fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率 [Hz]

表 8-10 f2 の平均値と共振周波数 F_{R2} と誤差率 [Hz]

	f2	F _{R2}	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	2245.4	2258.9	-0.6
Type I	1779.2	1781.7	-0.1
Type II	1910.6	1974.8	-3.3
Type III	1934.2	1993.8	-3.0
Type IV	1891.1	1974.4	-4.2
Type V	2063.4	2110.6	-2.2

8.6 PW と HW の再定義のまとめ

本実験では、ヘルムホルツ共振周波数が容積の関数となっていることに着目し、声道模型 の容積を変化させずに複数のプレートを交換することで、共鳴腔の容積一定のまま声道形 状を変化させ、Pucker whistle と Hollow whistle と思われる発生音の基本周波数をそれぞれ 測定し、理論値と比較した。その結果、Pucker whistle と呼ばれる口唇部をすぼめて吹鳴さ れる一般的な口笛は、声道の共振周波数に近く、ヘルムホルツ共鳴器として計算できるのは、 Hollow whistle であったということが複数の声道形状で確認できた。よって、発生音の基本 周波数がヘルムホルツ共振周波数に対応する場合を Hollow whistle、声道を円筒管の連結と して考えた場合の声道の共振周波数に対応する場合を Pucker whistle とそれぞれ再定義する。

8.7 PW と HW の判別法の実験の概要

HW はヘルムホルツ共振周波数に対応しているため, 声道形状を変化させても容積一定な ら基本周波数は変化しないことがわかっている。それに対し, PW は声道の共振周波数に対 応しているため容積一定でも声道形状が変化しているなら基本周波数は変化する。つまり, 容積一定で構成した複数の声道模型から発生する音の基本周波数を測定し, それぞれの基 本周波数の変化率を調べることで, PW と HW を判別する。

8.8 PW と HW の判別法

8.8.1 声道模型の構成

本実験で用いた声道模型のプレートの組み合わせを表 8.11 に示す。この時口唇側から順 にプレートの番号を ①, ①, …, ⑮ とする。① ~ ⑯ 番のプレートには厚さ 10 mm のプ レートを用い, 口唇部プレートである① 番のプレートには厚さ 4 mm, 内径 7 [mm]のプレ ートを用いた。使用した声道形状は, 母音/a/発声時の声道形状に構成した口笛声道模型と, それに対して, 容積一定で並べ替えて構成した声道形状を用いた。

								[11	mn]								
形状	0	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10	1	12	13	14	15	16
/a/ (baseline)	7	32	28	30	34	38	38	34	30	26	20	14	12	16	26	12	12
Type I	7	38	30	34	28	26	30	38	32	34	20	14	12	16	26	12	12

表 8-11 使用した声道模型のプレート構成

[mm]

8.8.2 実験の手順

8.2.2 同様に実験を行い,その後,容積一定で形状の異なる声道模型の fl と f2 の変化率 を調べる。

8.9 PW と HW の判別法の実験結果

表 8-12 に f1 と f2 の平均値と理論値,表 8-13 に f1 の平均値と FH と誤差率,表 8-14 に f2 の平均値と FH と誤差率を示す。

表 8-12 fl, f2 の平均値と理論値

[Hz]

	f1	f2	FH	F _{R1}	F _{R2}
/a/ (baseline)	355.8	2245.4	355.0	1089.4	2258.9
Type I	387.1	1779.2	355.0	1152.9	1781.7

表 8-13 fl の平均値と共振周波数 FH と誤差率 [Hz]

	f1	FH	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	355.8	355.0	0.2
Type I	387.1	355.0	9.0

表 8-14 f2 の平均値と共振周波数 F_{R2} と誤差率 [Hz]

	f2	F _{R2}	誤差率 [%]
/a/ (baseline)	2245.4	2258.9	-0.6
Type I	1779.2	1781.7	-0.1

表 8-13 より, /a/から Type I の fl の変化率は 8.8 %, 表 8-14 より, /a/から Type I の f2 の 変化率は-20.8 %である。つまり fl に比べ f2 の変化率が大きいことが分かる。また, fl と FH, f2 と FR2 が対応している。このことから fl は HW であると判別できる。

8.10 PW と HW の判別法まとめ

本実験では容積一定で形状が異なる声道模型を 2 種類構成し,それぞれの基本周波数と その変化率を調べることにより, PW と HW を判別する方法を提案した。その結果,ヘルム ホルツ共振周波数に対応する f1 の変化率は声道の共振周波数に対応する f2 の変化率に比べ 小さいことがわかった。そのことから f1 は HW, f2 は PW であると判別できた。また口唇 部プレートの内径 5, 6 [mm]でも確認できた。
第9章

口笛声道模型の音域拡張

本章では、本研究で行った口笛声道模型の音域拡張の検討について述べる。9.1節では実験の概要について、9.2節では声道近似モデルについて、9.3節では音高変化口笛声道模型の 形状計算について、9.4節では音高変化口笛声道模型の発生音の測定について述べる。

9.1 実験の概要

口笛吹鳴時の声道の CT(Computed Tomography) データを用いて声道模型を構成し,声道 模型のプレートを音高変化に伴う声道形状の変化を想定して入れ替えることにより,音高 変化を想定した口腔内形状変化に対して期待通りの音高変化を確認している[24]。しかし, 連続した音高変化として観測された音域は 1/3 オクターブ程度で実際の口笛と比較すると 音域が狭いという問題点があった。そこで,本実験では音高変化モデルの音域を拡張するた めの形状の計算方法と,拡張した音高変化モデルを用いたときの計測結果について述べる。

9.2 声道近似モデル

声道形状の変化には肉体的な構造による制約が存在するため、それを利用して声道形状 を近似することができると考えられる。

そのような手法の一つとして,いくつかの基本的な調音パラメータの関数として声道の形 を近似する手法が提案されており,その代表的なものとして,放物線型モデルと懸垂線型モ デルの二つがあげられる。ここでは,本研究で用いた放物線型モデルについて述べる。

放物線型モデルでは、舌による狭めが発生する区間における、声門からの距離*x*(cm)の 点での声道の半径を式(9.1)であらわす。

$$r = a(R - r_0)(x - d_0)^2 + r_0, \ r_0 \le R$$
(9.1)

ここで d_0 (cm) は声門から測った調音点の位置, r_0 (cm) は調音点でのせばめの等価半径, $a \ge R$ は放物

線の曲率と声道の最大半径に関係した定数であり Stevens らのモデルでは a=0.025, R=1.2(cm) と与えられている[25][26]。また、舌による狭めが発生しない区間 ($r \ge R$ となる x の 区間) では r=R とする。そして、式(9.1)で求めた区間に喉頭部および口唇部を加えたもの が声道全体の形状となる。 $d_0=8$ (cm)、 $r_0=0.5$ (cm)、口唇部を除く声道長 17 cm としたと きの放物線型モデルによる声道形状を図 9-1 に示す。



図 9-1 放物線型モデルによる声道形状の一例

9.3 音高変化口笛声道模型の形状計算

口笛声道模型の発生音は模型の共振周波数に対応しているため、特定の基本周波数の音 を発生させたい場合、その周波数を共振周波数に持つ形状の模型を構成すればよいと考え られる。しかし、1つの共振周波数に対応する形状は一意には定まらない。また、特に条件 を設けずに共振周波数のみから形状を決定した場合、声道の形状としてふさわしくない形 状となることも考えられる。そのため、共振周波数のみから声道模型の形状を決定すること は難しい。そこで本研究では、少ないパラメータから声道形状を近似するモデルを用いるこ とで音高変化に対応する形状の計算を試みた。

9.3.1 計算方法

500~4000 Hz の音域において、ゲインが最大となる声道形状を 100 Hz 刻みで計算によって求める。

計算は次のような条件で行った。口唇部を除く声道長を 17 cm (そのうち喉頭部 2 cm) と した。そして、Stevens らの放物線型モデルにおいて、 $d_0=2\sim16$ (cm)、 $r_0=4\sim7$ (cm)の範 囲で d_0 、 r_0 をそれぞれ 1 cm 刻みで変化させ、声道形状を生成する。このとき、口唇部の厚 さを 4 mm、口唇部の直径を 4 mm、喉頭部の直径を 12 mm としたそして生成した形状を 1 cm ごとに 0 次近似し、0 次近似した各等価半径が 1 cm 刻みとなるように丸め、共振周波数 を計算する。声道の共振周波数は、断面が円形であると考え、式(9.2)、式(9.3)で計 算する。500~4000 Hz において 100 Hz 刻みとなる周波数の前後 50 Hz の範囲内に共振周 波数を持つ声道形状のうち、共振周波数におけるゲインが最大となる声道形状を記録する。 例えば、450 Hz 以上かつ 550 Hz 未満の範囲内でゲイン最大時の声道形状を記録する。

9.3.2 計算結果

9.3.1 で述べた条件で計算した各音高における声道形状を表 9-1 に示す。共振周波数の低い方から順に形状 1, 2, ... とし,各形状は声道模型を構成するプレートの穴の直径[mm]であらわしている。また, F_{Rn}のnは,その共振周波数に対応する次数を示している。

形状	共振周波数	F_{Rn}						プ	レー	ト番	号	(口)	唇部	が①))					
	[Hz]		0	1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	9	10		12	13	14	15	16	(17)
1	491	F _{R2}	4	24	24	24	22	18	16	12	10	10	10	10	10	12	16	18	12	12
2	643	F_{R2}	4	24	24	22	18	16	12	10	10	10	10	10	12	16	18	22	12	12
3	715	F_{R2}	4	24	24	24	22	20	16	14	12	12	12	12	12	14	16	20	12	12
4	795	F_{R2}	4	24	24	22	20	16	14	12	12	12	12	12	14	16	20	22	12	12
5	900	F_{R2}	4	24	24	22	20	18	16	14	14	14	14	14	16	18	20	22	12	12
6	1034	F_{R2}	4	22	20	18	16	14	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	12	12
7	1158	F_{R2}	4	20	18	16	14	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	24	12	12
8	1295	F_{R2}	4	18	16	14	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	24	24	12	12
9	1416	F_{R2}	4	16	14	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	24	24	24	12	12
10	1508	F_{R2}	4	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	24	24	24	24	24	12	12
11	1607	F_{R2}	4	12	12	12	12	12	14	16	20	22	24	24	24	24	24	24	12	12
12	1741	F_{R2}	4	10	10	10	10	10	12	16	18	22	24	24	24	24	24	24	12	12
13	1846	F_{R2}	4	10	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	24	12	12
14	1928	F_{R3}	4	24	24	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	8	12	12
15	1956	F _{R3}	4	24	24	24	24	24	24	24	22	18	16	12	10	10	10	10	12	12
16	2078	F _{R3}	4	24	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	8	10	12	12
17	2240	F_{R3}	4	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	8	10	12	12	12
18	2344	F_{R3}	4	14	14	14	14	16	18	20	22	24	24	24	24	24	24	24	12	12
19	2375	F_{R3}	4	12	12	12	12	14	16	20	22	24	24	24	24	24	24	24	12	12
20	2523	F_{R3}	4	10	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	24	12	12
21	2620	F _{R3}	4	10	10	10	12	16	18	22	24	24	24	24	24	24	24	24	12	12
22	2652	F _{R3}	4	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	24	24	12	12
23	2936	F _{R4}	4	24	24	24	24	24	22	18	16	12	10	10	10	10	10	12	12	12
24	3000	F _{R4}	4	24	24	24	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	12	12
25	3065	F _{R4}	4	24	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	8	10	12	12
26	3195	F_{R4}	4	24	24	24	24	22	18	16	12	10	10	10	10	10	12	16	12	12
27	3333	F_{R4}	4	16	12	10	10	10	10	10	12	16	18	22	24	24	24	24	12	12
28	3434	F_{R4}	4	12	10	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	12	12
29	3490	F_{R4}	4	14	12	12	12	12	12	14	16	20	22	24	24	24	24	24	12	12
30	3560	F _{R4}	4	10	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	24	12	12
31	3746	F _{R4}	4	8	8	8	10	12	14	18	22	24	24	24	24	24	24	24	12	12
32	3876	F _{R5}	4	24	24	24	24	24	24	24	22	20	16	14	12	12	12	12	12	12
33	4008	F_{R5}	4	24	24	24	24	24	24	24	24	22	18	14	12	10	8	8	12	12

表 9-1 各音高における声道形状

表 9-1 のように 1100 Hz, 2800 Hz, 3800 Hz 付近以外の周波数では, 500~4000 Hz の範囲 で 100 Hz 刻みとなる各周波数付近に共振周波数を持つ形状を求めることができた。 音高が高くなると口腔側の声道断面積が狭くなり,物理的な限界を超えると対応する共振 周波数が高次の共振周波数に移行して声道断面積が最大となり,再び音高が高くなると口 腔側が狭くなることがわかった。形状 1~13 では,対応する共振周波数が F_{R2} となっている が,音高を上げていくと,形状 14, 23, 32 から対応する共振周波数がそれぞれ F_{R3} , F_{R4} , F_{R5} に移行し,高次の共振周波数に変化していることがわかる。

9.4 音高変化口笛声道模型の発生音の測定

9.4.1 測定方法

声道模型の声門側に接続したチューブから送り込む圧縮空気の流量を徐々に変化させて いき,発生音の基本周波数を測定する。測定には7.10節で述べた自動測定装置を用いる。

本実験では、まず、流量 30 L/min となるように弁の開きを調整した後、 0.5 秒間隔で 0.012%ずつ弁を閉じていき流量を減少させた。そして、各流量における発生音の基本周波 数と流量をそれぞれ測定した。流量は比例制御弁を用いて変化させた。発生音の測定は口唇 側から 10 cm 離しておいたマイクで行った。口笛音は純音に近いため、基本周波数はパワー スペクトルのピーク値として求められる[5]。音量はパワースペクトルのピーク値における パワーとして求めた。このとき、サンプリング周波数 22.05 kHz、量子化ビット数 16 ビット、サンプル数 8192 ポイントに対してハニング窓をかけて FFT を行った。

そして,各流量における発生音の測定結果から,安定した音が発生する流量区間内で音量 が最大となる周波数をそれぞれ求めた。安定した音が発生する区間が複数ある場合は,声道 形状の計算に用いた周波数に最も近い区間における発生音の基本周波数とした。測定は各 形状5回ずつ行い,5回の測定における基本周波数の平均値と標準誤差をそれぞれ求めた。

71

9.4.2 測定結果

各形状における,声道模型の共振周波数と安定した音が発生する区間内で音量が最大と なるときの基本周波数との関係を図 9-4 に示す。形状 1,14~17,23~26,32,33 において は、F_{R1} と F_{R2} が融合した(図 9-5)。



図 9-4 各形状における共振周波数と発生音の基本周波数



図 9-5 形状1における声道模型の振幅特性

図 9-4 のように,形状 1~6,27,28 以外では,表9-1 に示した通りの音高で音が発生し ていることがわかる。1200~2500 Hzの範囲では連続した音高変化を確認することができた。 しかし,一部の形状では,想定した共振周波数付近の音が発生しなかった。そのため,口笛 音の発生には共振周波数以外にも条件があると考えられる。特に,低い音においては,実際 の口笛吹鳴時には口唇部の開きが高音吹鳴時に比べて大きくなる傾向があるため[27],口唇 部プレートの直径を4mmで固定した今回の形状では発生しなかった可能性がある。

第10章

結論

10.1節では本研究における要約,10.2節では今後の課題について述べる。

10.1 本研究の要約

本論文では,解明されていない身近な音に関する現象に着目して行った研究として,前半 では,近接共鳴管による音知覚効果の解明について,後半では,口笛声道模型の音域拡張に 関する研究などについて述べた。

前半の近接共鳴管による音知覚効果の解明では、被験者 10 名に対して、クント管(片側 閉管の円筒管)や貝殻を耳に近付けたときの耳内音を耳内プローブマイクで測定し、共振だ けでなく反共振が生じていることを明らかにした。このとき、専用治具の作製やレーザ光に よる位置合わせを行うなどの工夫により実験時の貝殻固定の再現性を担保した。次に独自 に作製した人工耳を用いた同様の実験によって、耳介に近接共鳴管による効果を増大させ る作用があることを示した。また、反共振の知覚への影響を聴取実験で調べ、半数の被験者 が反共振の効果を知覚できることを明らかにした。このようにして明らかとなった音知覚 効果や耳介の作用は高音質なヘッドホン開発への応用も期待できる。

後半の口笛声道模型の音域拡張に関する研究では, 代表的な2種類の口笛に着目し, これま で発生音の音高や口唇開口部の大きさで分類されていた Pucker whistle と Hollow whistle を 共鳴方式の違いで分類する方法を提案し、声道の容積を一定として複数プレートを交換し たときの発生音の基本周波数の変化から 2 者を判別できることを示すことにより,提案方 法の有効性を確認した。また,2個のパラメータで声道形状を近似する放物線型モデルを口 笛声道模型に適用することにより、これまで1/3オクターブ程度であった連続した音階とし て観測できる音域を、1オクターブ以上に拡張できることを実証した。このとき、口腔側の 声道断面積は, 音高が高くなると狭くなるが, 物理的な限界を超えると対応する共振周波数 が高次の共振周波数に移行して最大となり、さらに音高が高くなると再び狭くなることを 明らかにした。この現象はフルートなどの管楽器と似ており, 実際の口笛でもオーバーブロ ーイングによって基本周波数が大きく変化する現象として説明できる。なお, 検証にあたっ ては, 口笛声道模型の発生音を自動で測定する装置を製作し, 効率的に測定を行うことによ って測定数を増やしデータの信頼性を高めた。口笛アンサンブルなど口笛演奏において表 現の幅を広げるためには口笛の低音域拡大が不可欠であるが、本研究の結果はそれを実現 するための具体的な方法を示唆している。このように、測定装置の固定方法の工夫や模型を 用いた実験を行うことで、身近な音に関する未解明な現象の定量的な測定を実現できるこ とを示した。

10.2 今後の課題

本論文中では外耳道による影響についての考察は行っていない。外耳道による共振反共 振への影響は、今後詳細な実験によって明らかにする必要がある。具体的な方法としては、 人工耳において外耳道がない場合の測定を行うことなどが挙げられる。また、近接音響管の 音知覚効果において、反共振の知覚への影響をより詳細に調べる必要がある。

また,声道模型を用いて口笛の音域拡張の検討を行った結果,連続した音階として観測された発生音の音域は,1200~4000 Hzと実際の口笛と比較して低音域の方が狭くなっている。 今後の課題は,1200 Hz 以下の音域における音高変化を実現することである。そのために今 回4 mm で固定していた口唇開口部の直径について検討を行う必要がある。Stevens らのモ デルに基づき声道の直径を最大 24 mm としているが,口笛に適応した声道近似モデルにつ いても検討を行う必要がある。

参考文献

[1] 川久保達之, "物理学はこんなこともわからない", 22世紀アート, (2018)

[2] "物理学 70 の不思議",日本物理学会誌,72 (9),付録,(2017)

[3] "貝殻から聞こえる「ゴー」という音にせまる",中高生の科学研究実践活動推進プログラム(平成28年度採択)終了報告書 SG160035,(2017)

[4] D.Bercito, "Problem #5: SEA-SHELL", 17th IYPT AUSTRALIA Brisbane 24th June to 1st July, (2004)

[5] H.Stefan, "SEASHELL SOUND", Cabinet ISSUE 48 Trees, (2012-2013)

[6] 橋本直紘, "近接共鳴管による音知覚効果", 令和4年度福井大学修士論文, (2022)

[7] 結城大輔,森幹男,"円筒管を用いた近接共鳴管による音知覚効果の解明",電気・情報関係学会北陸支部連合大会,G-16,(2022)

[8] 阪上公博,"音響学講座 3", コロナ社, (2019)

[9] ER-7C Series B Microphone System Data Sheet

[10] H.Levine, J.Schwinger, Phy. Rev.73 (4), 383-406, (1948)

[11] 安藤由典, "新版楽器の音響学", 音楽之友社, (1996)

[12] Artec 3D, "Ear", https://www.artec3d.com/3d-models/ear

[13] 本田学, "耳珠のはたらき", 福島県立医科大学博士論文, (1985)

[14] T. A. Wilson, G. S. Beavers, M. A. Decoster, D. K. Holger, and M. D. Regenfuss, "Experiments on the Fluid Mechanics of Whistling", J. Acoust. Soc. Am., 50, 366-372, (1971)

[15] 望月修, 丸田芳幸, "流体音工学入門―ゆたかな音環境を求めて―", 朝倉書店, (1996)

- [16] 森 幹男, 荻原慎洋, 邱 添, 谷口秀次, 加藤省三, 荒木睦大, "圧電素子を用いた骨伝 導による口笛音カウント装置の試作", 電学論C, 131 (4), 246-250, (2011)
- [17] Mikael Nilsson, Josef Ström Bartunek, Jörgen Nordberg, and Ingvar Claesson, "Human Whistle Detection and Frequency Estimation", 2008 Congress on Image and Signal Processing, 737-741, (2008)

[18] K. Harvest, "Theory of Whistling", https://youtu.be/JRP3jsZOZz4 (2020)

[19] T. Arai, "Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract", Acoustical Science and Technology, 28, 190-201, (2007)

[20] M. Mori and S. Fukuda, "Frequency Response of the Vocal Tract considering the Glottis Opening Area during Human Whistling", IEEJ Trans. EEE, 103, 3-8, (2020)

[21] L. R. Rabiner and R. W. Schafer, "Digital processing of speech signals", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., (1978)

[22] TDK Product Center: "Detailed Information:INMP441", https://product.tdk.com/en/search/sw_piezo/mic/mems-mic/info?part_no=INMP441 (Viewed on 2024/8/13)

[23] 森 幹男,前澤 卓哉,"広義の口笛の物理的特徴に基づく体系化",電気学会論文誌 A, 142, 413-418, (2022)

[24] 重川直紀,森 幹男,"声道模型を用いた口笛の音高変化モデルの検討",電気学会論文誌 A, 134, 354-355, (2014).

[25] K. N. Stevens and A. S. House, "Developmellt of a Quantitative Description of Vowel Articulation", J. Acoust. Soc. Am., 27, 484-493, (1955)

[26] 角川靖夫,中田和男,"声道の形 (vocal tract configuration) による音声の分析",日本音 響学会誌, 22, 10-20, (1966)

[27] M. Okamoto and M. Mori, "Opening area and circularity of the lips during whistling", Proc.2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics, 450-451, (2020)

謝辞

本研究の遂行及び本論文の執筆に際し,指導教員としてご助言・ご助力を戴きました福 井大学学術研究院工学系部門情報・メディア工学講座の山田徳史教授,森幹男准教授に深 く感謝いたします。そして,本論文を御査読して頂きました藤元美俊教授,竹本拓治教授 に深く感謝いたします。

最後に、本研究を遂行するにあたり、日頃より多数のご助言・ご協力を戴いた森幹男研 究室の大学院生、卒業研究生諸氏に御礼申し上げます。