

機関番号：13601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21700128

研究課題名（和文） 数値解析による頭部周辺の音場解析と個人性要因の解明

研究課題名（英文） Numerical simulation of acoustic phenomenon around a head and investigation of its individuality

研究代表者

大谷 真 (OTANI MAKOTO)

信州大学・工学部・助教

研究者番号：40433198

研究成果の概要（和文）： 頭部周辺、特に外耳周辺の音響現象を数値シミュレーションにより解析し、耳元で観測される頭部伝達関数の個人性の要因について検討した。その結果、正中面内の様々な位置の音源に対して、耳介キャビティ内で生じる共鳴現象の詳細が明らかになった。さらに、耳介上部の構造が HRTF に大きな影響を持つこと、また、結果として、知覚的にも音像定位に大きな影響を持つことが明らかになった。

研究成果の概要（英文）： A numerical simulation was performed to analyze an acoustic phenomenon around a head, especially an external ear, and subsequently to investigate what causes an inter-individual variation of acoustic signals observed at an ear-canal entrance. Results reveal the features of resonance modes arising in a pinna cavity for sound sources on the median sagittal plane. Furthermore, it is shown that upper details of a pinna play a crucial role in determining physical properties of the acoustic signal and sound localization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ・頭部伝達関数

1. 研究開始当初の背景

U-Japan 政策において、ユニバーサルコミュニケーションの1つの技術として臨場感通信技術が掲げられていると共に、総務省が超臨場感フォーラムを立ち上げるなど、国を挙げて臨場感技術の研究開発の取り組む体制が整えられている。そのうち音響再生技術に関しても、聴覚ディスプレイに関する国際会議が毎年開催されるなど盛んに研究開発が行われている。頭部伝達関数(HRTF)の数

値解析は人体の物理特性と HRTF の関連など聴覚による空間知覚過程を探るツールとして注目されており、フランス国立科学研究センター、英国サザンプトン大、フィンランド ノキアなどで研究が進められているが、未だその妥当性は示されていない。また、人体の物理特性と HRTF の主要な特徴量の関連は明らかにされておらず、申請者と申請者のグループ（信州大・東北大）が検討を始めたばかりであった。

2. 研究の目的

近年、高臨場感を与えるバーチャルリアリティ(VR)システムの実現が期待されているが、真の高臨場感の創出のためには、視覚だけでなく聴覚情報も極めて重要なファクターの一つとなる。しかし、現在主流となっている 5.1ch サラウンドシステムも含めた既存の音響再生技術は物理的に厳密に音響信号を再現するものではなく、高臨場感 VR システムの音響サブシステムとしての性能は貧弱と言わざるを得ない。高い臨場感を呈示可能な再生技術を実現するための一つの有望なアプローチとして、音源から両耳までの音響伝達関数である頭部伝達関数(HRTF: Head-Related Transfer Function)を用いた聴覚ディスプレイがある(Blauert, 1983)が、聴覚ディスプレイの高精度化にはヒトの頭部・耳介の形状や吸音特性の個人差に起因する HRTF の個人差を補償する必要がある(Møller *et al.*, 1996)。本研究では、まず、数値シミュレーションを用いた頭部周辺の音場解析により HRTF を正確に予測する手法の確立を行い、その手法を利用して、人体の形状・寸法と HRTF の関連の解明及び HRTF 及び音空間知覚の個人差の要因となる物理パラメータの解明を行い、聴覚ディスプレイの高精度化・高臨場感化を目指す。

3. 研究の方法

前節で述べた3つの目的を達成するために、下記の方法で研究を行った。

(1) 数値解析による HRTF の予測手法の確立

「胴体の有無」「形状の再現の程度」が予測された HRTF にどのような影響を与えるかを明らかにし、毛髪や皮膚の吸音性の影響を無視できる擬似頭を対象として、数値解析による HRTF シミュレーションの妥当性の検証を行う。

続いて、毛髪や皮膚の吸音性が無視できない実際のヒトの頭部を対象として、「毛髪・皮膚の吸音特性」が予測された HRTF に影響を与えるかを明らかにする。

数値解析の結果の妥当性を検証するために、測定値との比較を行う。この際に、実頭だけでなく、測定の正確性を期するために MRI 及び光造形を用いて作成される個人ことの擬似頭の測定も行う。また、数値解析と測定の双方の HRTF を用いて、音空間知覚に関わる心理量を対象とした心理物理実験を行い、数値解析による HRTF の主観評価を行う。

(2) 人体の形状・寸法と HRTF の関連の解明

耳介の一部の吸音条件に変化を加えることで、様々な耳介モデルを作成し、数値解析によって HRTF を算出し、各部位が HRTF にどのような影響を与えているかを明らかにする。具体的には、耳介の部位のうち、舟状窩と耳甲介艇を完全吸音条件とし、全ての部位を完全反射条件とした場合と比較を行う。また、同様の部位を粘土で充填した場合の HRTF の測定を行い、実測によってもこれを確認する。

(3) HRTF 及び音空間知覚の個人差の要因となる物理パラメータの解明

(2)で検討を行った部位も含めた様々な部位の充填が知覚上どのような影響をもたらすかを音像定位実験によって調べ、人体の形状と HRTF の関連を明らかにする。また、同様の実験を複数の被験者に対して行い、個人差の要因を明らかにする。

4. 研究成果

2節で挙げた3つの目的に対して得られた成果はそれぞれ以下の通りである。

(1) 数値解析による HRTF の予測手法の確立

簡略化された頭部形状を持つ擬似頭の HRTF を境界要素法による数値計算と実測によって取得し、それらを比較することで、「胴体の有無」が HRTF に与える影響について検討を行い、胴体の存在によって主に低域周波数で振幅周波数特性にノッチ(谷)が生じることが明らかになった。また、実際のヒトの頭部の磁気共鳴画像による形状計測と光造形装置を用いて実頭を模した擬似頭を作成するとともに、同様の形状を持つ数値計算用頭部モデルを作成し、数値計算・擬似頭による実測・実頭による実測の三者の結果の比較を行った。

その結果、実頭を対象とした場合にも、前述の「胴体の有無」による影響が生じることが確認され、毛髪や皮膚の吸音特性が HRTF に与える影響は限定的であり、また、胴体の影響は別途考慮する必要があるものの、音像定位に重要な役割を果たすとされる高域の振幅周波数特性上のノッチは概ね再現された。

また、定位実験を行った結果、音像定位精度及び頭外定位率において、計算値と実測値

図2：耳介モデルと部位の名称

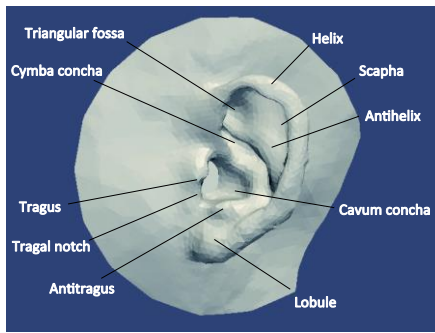
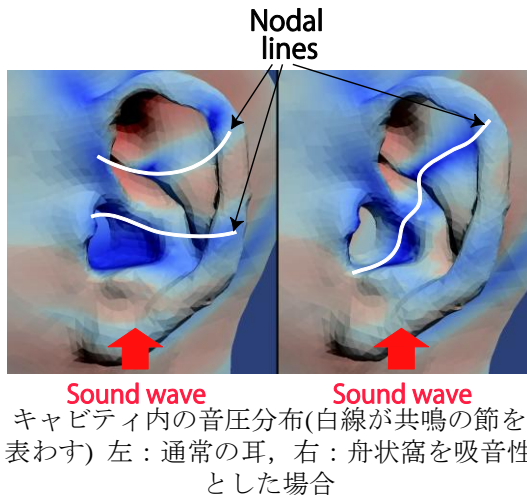


図3：8 kHzにおける下方音源に対する耳介



の間でその結果に違いはほとんどなく、頭部表面を音響的に剛（完全反射）と仮定した境界要素法による数値計算によって、心理的・物理的両面からみて高精度な HRTF の推定が可能であることが明らかになった。

(2) 人体の形状・寸法と HRTF の関連の解明

数値計算において耳介形状に変化を与える際にターゲットとする部位を明らかにするために、予備的検討として実耳の各部位（図2）を充填し、耳介形状を変化させた場合の HRTF 測定及び音像定位実験を行った。その結果、特に仰角方向の音源の定位において耳介上部に位置する部位が重要であることが示唆された。

また、ヒトの頭部・耳介形状が、HRTF の振幅周波数特性に与える影響を明らかにするために、磁気共鳴画像により得られた耳介コンピュータモデルと数値解析を用いて耳介キャビティ内で生じる共鳴現象を観察し、共鳴が周波数特性上に現れる特徴であるノッチの生成にどのように寄与しているのかを検証した。その結果、HRTF の振幅特性にノッチが生じる周波数では、耳介キャビティ内に、1本の節を持つ1次モード、平行な2本の節を持つ2次モード、2本の平行な節とそれに直交する1本の節を持つ(1,2)モードのいずれかが発生しており、ノッチが生じる際

には耳介キャビティ内において発生するモードの次数には共通したパターンが見られることが分かった。また、外耳道入口に共鳴の節が存在する場合に HRTF にノッチが生じるが、節の位置によって決定されるモード形状は、音源位置や周波数によって敏感に変化し、このことが音源位置によって大きく変化する HRTF のノッチの現れ方の原因となっていることが分かった。さらに、耳介の一部（耳甲介艇・舟状窩）を吸音性としたシミュレーションの結果から、耳介上部の形状がノッチ生成に大きな影響を持っていることが分かった（図3）。

(3) HRTF 及び音空間知覚の個人差の要因となる物理パラメータの解明

耳介細部を粘土で充填した場合の HRTF の測定結果や音像定位実験によって同様の結果が得られ、耳介、特にその上部の構造が HRTF の主要な物理的特徴、そして音像定位に大きな影響を与えていることが明らかになった。

以上の成果は、国内の音響技術関連の研究会、発表会で発表を行うとともに、音響学分野の最大の国際会議である国際音響学会議 (International Congress on Acoustics) において発表を行っており、国際学術誌への投稿を準備中である。

耳介周辺において生じる音響共鳴モードの存在については、従来の研究によって定性的に指摘されてきたものの、測定技術やハードウェアの制限により、詳細は不明のままであった。しかし、本研究では高精度の耳介形状モデルと数値シミュレーションの使用により、その詳細が明らかになり、また、耳介各部位の働きの定量的に示された点において国内・国外双方において初めて得られた成果である。また、これまで、音像定位という知覚現象において重要な HRTF の特徴に関する知見は多く報告されているが、それらの HRTF の特徴の生成メカニズム、そして耳介形状のどのような特徴がそのメカニズムに寄与しているのか、についての報告はほとんどなかったが、本研究で得られた成果はこの点に関する知見を与えるものであり、HRTF の個人差を生じさせる要因の一部を明らかにしたものであり、HRTF を用いた VAD の高精度化・汎用化において必要不可欠な技術である HRTF の個人化・推定などの個人性の補償技術の実現に向けて重要な成果であると言える。

本研究で得られた成果は、耳介形状と HRTF の間の関連を明らかにしたものであるが、耳介形状は2次元画像としては容易に取

得できるものであり、また将来的には3次元スキャニング技術の進展により3次元形状取得も容易に行えるようになるものと予想される。今後は、本研究で得られた音響学的知見を3次元形状取得技術や画像処理技術と併せることで、耳介形状からHRTFを推定する技術の実現が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 大谷 真、岩谷幸雄、矢入 聡、バイノーラル技術の基礎と応用、騒音制御、査読無、33巻、2009、197-203

[学会発表] (計5件)

① 大谷 真、HRTFのノッチ周波数における耳介モードの系統的变化、日本音響学会春季研究発表会、2011年3月2日、東京

② 山羽亮輔、耳介部位充填が正中面音像定位およびHRTFに与える影響、電子情報通信学会応用音響研究会、2010年10月14日、金沢

③ 大谷 真、頭部伝達関数における耳介表面音圧の影響、電子情報通信学会応用音響研究会、2010年10月14日、金沢

④ 大谷 真、耳介表面の音圧分布と頭部伝達関数の関連についての考察、日本音響学会秋季研究発表会、2010年9月7日、吹田

⑤ Makoto Otani、Numerical analysis of HRTF spectral characteristics based on sound pressures on a pinna surface、20th International Congress on Acoustics、2010年8月27日、シドニー

⑥ 山羽亮輔、体位及び耳介形状が正中面下方の音像定位に与える影響、電子情報通信学会応用音響研究会、2009年10月22日、長岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 真 (OTANI MAKOTO)

信州大学・工学部・助教

研究者番号：40433198