

4-3 個人に合わせて立体音響を再現するためのシミュレーション技術

4-3 Acoustic Simulation Techniques for Personalized Three-Dimensional Auditory Reproduction

竹本浩典 Parham Mokhtari 西村竜一 加藤宏明

TAKEMOTO Hironori, Parham Mokhtari, NISHIMURA Ryouichi, and KATO Hiroaki

要旨

人間が音を立体的に感じることができるのは、頭や耳介による複雑な反射や回折が生み出す頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function: HRTF)の作用のためである。HRTFは頭や耳介の形状の影響を受けるため、個人差が大きい。立体音響を再生するためにはこの個人差を考慮する必要がある。われわれは、頭や耳介における音響現象を可視化して理解するために、時間領域差分法に基づく音響シミュレータを開発した。このシミュレータによって、頭や耳介の形状とHRTFとの関係が明らかになれば、HRTFの個人性の由来も解明できると思われる。本稿では、まずシミュレータの概要とその計算精度について概説する。次に、このシミュレータによって得られた研究成果のうち、正中面のHRTFのピークやノッチの成因の解明について解説する。

Complex acoustic reflections and diffractions on the human head and pinna generate head-related transfer functions (HRTFs), which contribute to three-dimensional auditory perception. Because HRTFs reflect morphological features of the head and pinna, HRTFs differ among individuals, and the difference should be implemented in three-dimensional auditory reproduction. We developed an acoustic simulator based on the finite-difference time-domain method to visualize and understand acoustic phenomena on the head and pinna. If the relationship between morphological features and HRTFs is clarified using the simulator, individual characteristics of HRTFs could be also revealed. In this article, we outline the acoustic simulator and its accuracy in calculation, and then introduce causal factors of peaks and notches of HRTFs in the median plane, which were obtained as one of the current results using the simulator.

[キーワード]

頭部伝達関数, 立体音響, 音響シミュレータ, FDTD法

Head-related transfer function, Three-dimensional auditory reproduction, Acoustic simulator, FDTD method

1 はじめに

われわれは、さまざまな音に囲まれて生活している。雨音で窓の外を見、人に呼びかけられて振り向く。これは、われわれに音源の位置を立体的に把握する能力が備わっているからである。この能力は、特に音源が後方にあるとき鋭敏であり、視覚を補う働きがある。

音は空気中を伝播して頭や耳介で反射・回折

し、外耳道を通して鼓膜に達する。このうち、音源の位置を立体的に把握するために最も重要な役割を果たすのは、頭や耳介による反射と回折である。これらは伝播してくる音に影響を与え、ある周波数帯域を強めたり、別の帯域を弱めたりする。この周波数と信号強度の関数は、頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function: HRTF)と呼ばれる。HRTFは左右の耳で異なり、また音源の位置によっても変化するが、われわれはその変化

パターンを学習しているので、これを利用して音源の位置を特定することができる。また、HRTFは個人差が大きい。これは、頭や耳介の形状が変われば、その反射や回折のパターンが変化するためである。立体音響を再現するシステムにおいては、その個人差を考慮する必要がある。

しかし、頭や耳介でどのように音が反射・回折するのはあまり良くわかっていない。その1つの原因は音が目に見えないからである。空間上のある1点における音圧の変化は、マイクロホンで測定することができる。しかし、マイクロホン自体に大きさがあること、特性が同じマイクロホンを多数そろえて制御することが難しいことから、同時に測定できる点数は限られており、高々数十から数百点である。そのため、頭部や耳介、とりわけ小さくて複雑な形状をしている耳介(図1参照)で生じる反射や回折の観測は困難である。

そこでわれわれは、音場の時々刻々の変化を可視化できる音響シミュレータを開発した。このシミュレータでは、磁気共鳴画像(MRI)で計測した頭や耳介を立体形状データとして取り込み、これを含む解析空間内のすべての点(数千万点)における音圧と粒子速度の変化を細かい時間間隔で計算できる。そしてこの計算結果から、音場の変化(例えば圧力分布)を可視化することが可能である。

そしてわれわれは、図2に示すように、シミュレーションによる音場の計算とマイクロホンによる実測を相補的に用いることによって、頭部や耳介で起こる複雑な反射や回折を理解するという方針を立て、研究を推進してきた。耳介形状のどの部分でどのような音響現象が発生するかという知見が得られれば、形状とHRTFとの関係が明らかになり、HRTFの個人性の由来を明らかにすることができると思われる。本稿では、まずこのシミュレータとその精度について解説し、次にこのシミュレータを用いることによって始めて明らかになった耳介における反射や回折の作用について報告する。

2 音響シミュレータ

2.1 時間領域差分法

われわれは、時々刻々変化する音場の音圧と粒

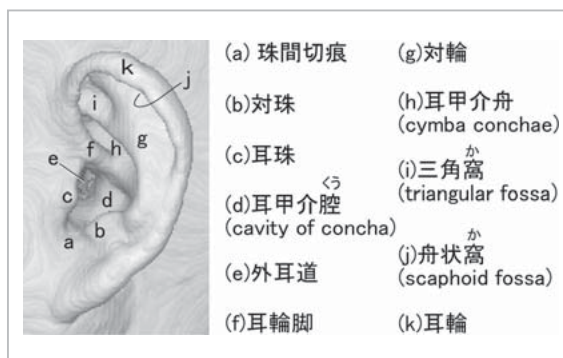


図1 耳介形状

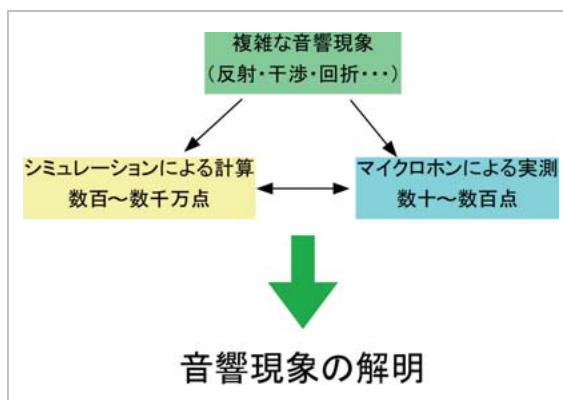


図2 研究方針

子速度の分布をシミュレートしたいと考えたので、時間領域差分法(Finite-Difference Time-Domain method: FDTD法) [1][2]に基づいて音響シミュレータを構築した[3][4]。FDTD法では、解析領域の外縁における反射を防ぐために、解析領域を無反射の境界(吸収境界)で囲む必要がある。この吸収境界として、8層からなるPerfectly Matched Layer (PML) [5]を用いた。

FDTD法の支配方程式は、音圧を p 、粒子速度ベクトルを u 、音速を c 、密度を ρ 、 $\kappa = 1/\rho c^2$ とおくと、

$$-\kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \alpha p = \nabla u, \quad (1)$$

$$-\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \alpha^* u = \nabla p, \quad (2)$$

である。ここで α は剛性比例型減衰係数、 α^* は質量比例型減衰係数で、PMLでは $\alpha^* = \alpha \rho / \kappa$ 、解析領域では $\alpha^* = 0$ である。これを

Yee アルゴリズム [6] で時間的に 2 次、空間的に 4 次の精度の中心差分を行って離散化した。

FDTD 法の特徴は、定常解だけでなく、過渡応答も求めることができること、計算アルゴリズムが単純で並列化しやすいこと、有限要素法や境界要素法に比較して計算量が少ないことである [7]。なお、計算の高速化のために、Message Passing Interface (MPI) を用いて 6 つのコアを持つ CPU が 4 基搭載された 2 台の計算機を InfiniBand で直結することにより、合計 48 コアで並列計算ができるように設定した。

2.2 精度検証

ここでは、FDTD 法による音響シミュレーションの計算精度について検討した結果を示す。図 3 は KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research) [8] の頭部を Yuvi Kahana 博士がレーザースキャナで計測した 3 次元形状データである。KEMAR とは音響実験に用いられる頭部模型で、広く世界で用いられており、その HRTF は計測されて CIPIC のデータベースで公開されている [9]。この検証では、図 3 で示した頭部の形状データから FDTD 法によって HRTF を計算し、実測した HRTF と比較した。

図 4 は、右耳の計算した HRTF (青) と実測した HRTF (赤) を 45 の音源位置に対して比較したものである。座標は左右の耳孔を通る直線を軸と

する極座標であり、方位角 (azimuth) で 0 度が正面、正が右側、負が左側、仰角 (elevation) で 0 度が正面、90 度が真上、180 度が真後ろである。両者は非常によく一致し、平均のスペクトル誤差は 2.3 dB である。この KEMAR は左右対称に作成されているので、右耳と左耳の HRTF は正中面に対して左右対称であるはずだが、その平均スペクトル誤差は 3.1 dB である。この値はおそらく計測誤差によるものと考えられる。すなわち、計算値と実測値の平均誤差 2.3 dB は計測誤差よりも小さいので、FDTD 法によるシミュレーションの精度は音響計測と同等であるという結論が得られた [10]。

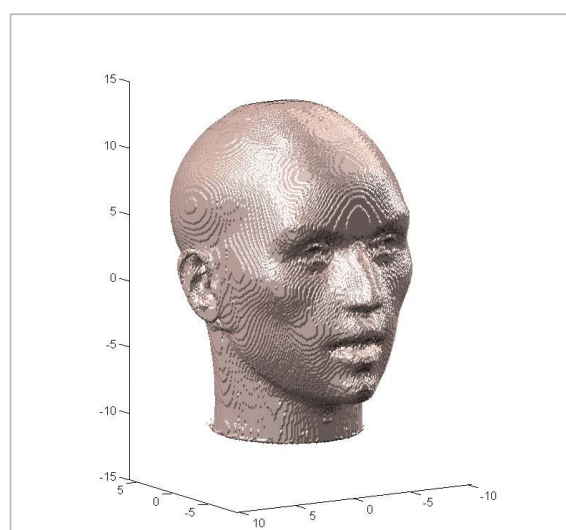


図 3 KEMAR の形状データ

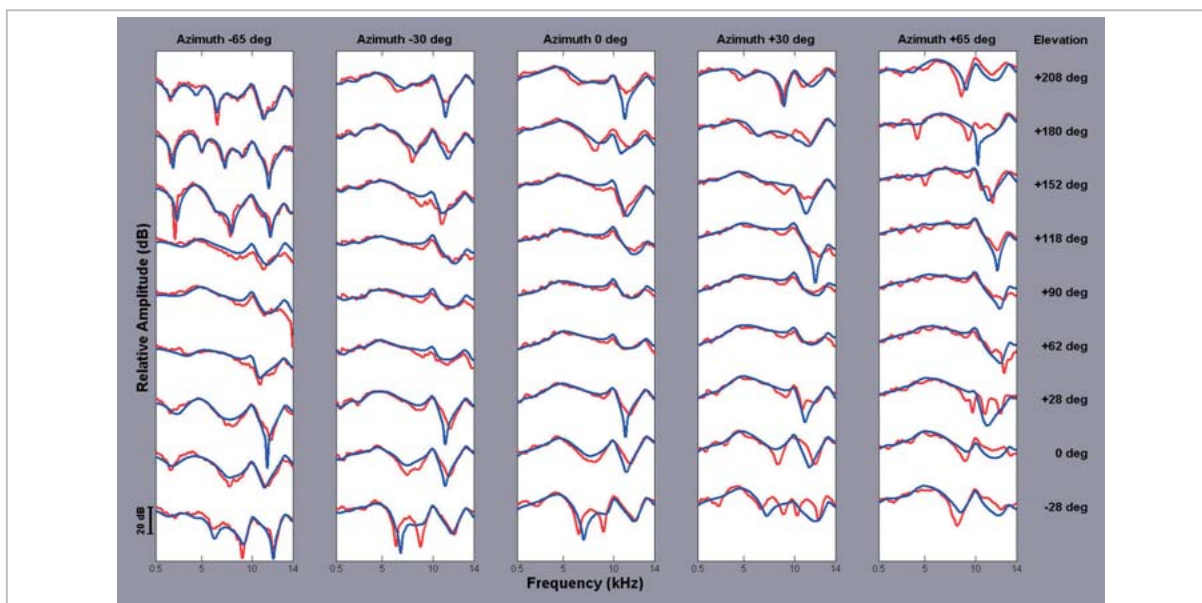


図 4 計算した HRTF (青) と実測した HRTF (赤)

3 解析例

ここでは、音響シミュレータを用いた解析例について述べる。

3.1 仰角方向の音源定位

水平面内における方位角方向の音源定位では、音源に近い方の耳に音が早く到達し、音が大きくなるという特徴量が大きな手がかりとなるが、正中面内における仰角方向の音源定位では、音源から左右の耳までの距離が等しいため、音の到達する時間差や音の大きさの違いは手がかりにはならず、HRTFのピーク(信号が増幅される帯域)とノッチ(信号が抑制される帯域)のパターンが手がかりになっている。

図5は、正中面における仰角方向のHRTFを、横軸を周波数、縦軸を仰角であらわし、ピーク(実線)とノッチ(破線)のパターンを模式的に示したものである。10 kHz以下にはピークが3つ(P1, P2, P3)存在し、これを取り巻くように2つのノッチ(N1, N2)が存在する。ピークは仰角に対して強度は変化するが、周波数は一定である。これに対して、ノッチは仰角に対して強度、周波数とも変化する、特に周波数は系統的な変化をする。ノッチ周波数は、仰角が-90度(真下)から約120度(真上より30度後方)まで次第に上昇し、120度から270度にかけて次第に下降するパターンを取る。これらのピークやノッチのうち、P1とN1、N2が仰角方向の音源知覚の手がかりになっていることが、知覚実験によって明らかにされている[11]。この基本的なパターンは個人によらず普遍的であるが、それぞれのピークやノッチの強度や周波数、ノッチ周波数が最高になる仰角、上昇・下降のパターンには個人差がある。これは、耳介の形状がトポロジー的には共通していても、そのプロポーションに個人差があることを反映していると考えられる。

3.2 仰角方向のHRTFのピーク・ノッチパターン

正中面における仰角方向のHRTFに対する頭部の影響は小さく、耳介周辺の形状のみからその基本的なピーク・ノッチパターンが生成される[12]。図6は4人の被験者(男性:M1、M2、女性:

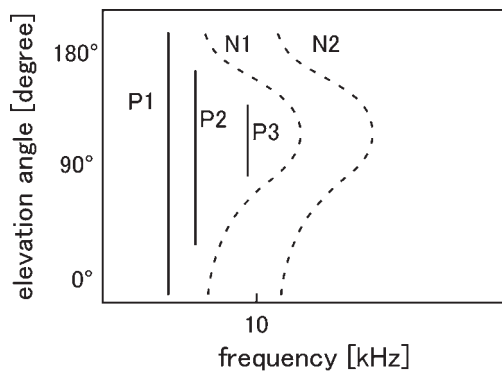


図5 仰角方向のHRTFのピーク・ノッチパターンの模式図

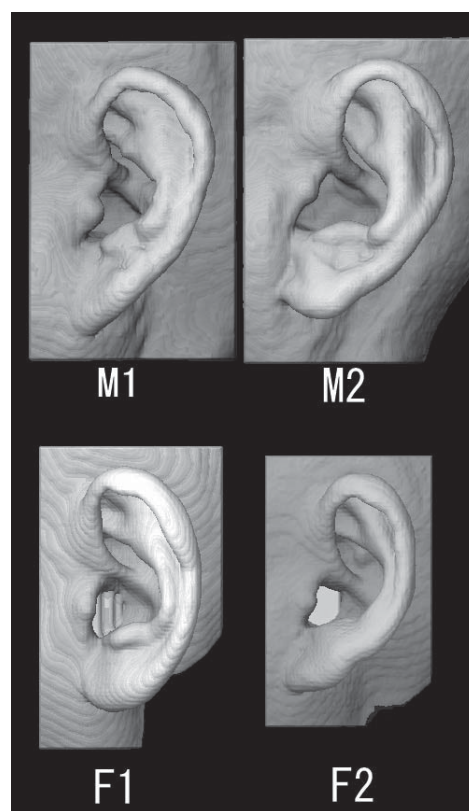


図6 4人の被験者の耳介

F1、F2)のMRIで計測した頭部形状データから切り出した、左の耳介周辺の形状データを同一縮尺で表示したものである。図1に示した耳介各部の形態的要素は4名に共通している。つまり、トポロジー的には等しい。しかし、耳介全体の大きさや耳甲介腔、耳甲介舟、三角窩、舟状窩などの各部の大きさの相対的な関係、すなわちプロポー

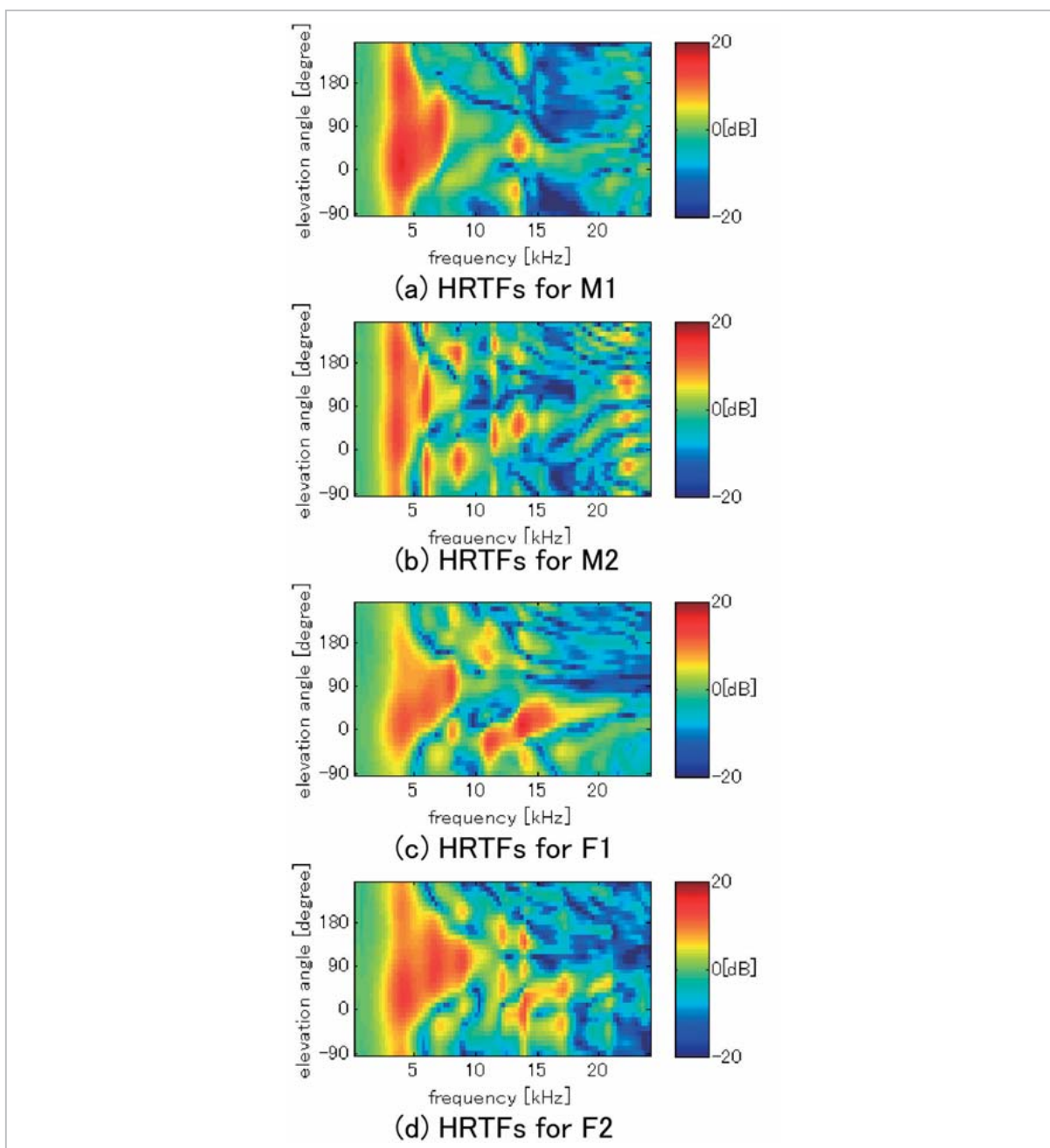


図 7 4人の被験者の仰角方向の HRTF

シヨンは異なっている。図 7 は、これらの形状データから音響シミュレータで計算した HRTF である。N2 のパターンはそれほど明瞭ではないものの、基本的に図 5 で示した HRTF の模式図と同様のピーク・ノッチパターンが見られる。

なお、HRTF の計算は次のようにして行った。外耳道入口に音源点を置き、この点を中心とする矢状面内の半径 10 cm の円周上に 10 度ごとに 36 の観測点を置いた。そして、音源点に Gaussian

Pulse を印加して音響伝播をシミュレートし、観測点における圧力変動を計算して周波数分析することにより HRTF が得られた。なお、HRTF の実測では、音源 (スピーカ) を円周上に置き、外耳道入口に設置したマイクロホンで音圧を記録する。つまり、実測とシミュレーションでは音源点と観測点の位置が逆になる。しかし、音響における相反定理 (可逆則) により、音源点と観測点とを入れ替えても観測される音圧変化は同一であるの

で、どちらの場合も同一の HRTF が得られる。

3.3 ピークの成因

Shaw の実験 [13] [14] や Kahana らの境界要素法によるシミュレーション [15] によって、ピークの成因は明らかにされている。すなわち、ピークとは耳介の腔で発生するさまざまな共鳴モードのうち、外耳道入口を含む耳甲介腔が音圧の腹になるものである。つまり、P1 では耳介の腔全体で1つ、P2 では耳甲介腔で1つと他の部分に1つ、P3 では耳甲介腔で1つと他の部分で2つの音圧の腹が生成される。

われわれは時間領域のシミュレーションでもこの現象を確認するために、ピークと同じ周波数をもつ正弦波で耳介を含む解析領域を励振するシミュレーションを行って音響現象を可視化した。このシミュレーションでは、HRTF の計算で用いた観測点に正弦波を印加して、耳介周辺の音圧変化を計算する。なお、音圧分布はボリュームレンダリングで可視化し、正の大きな音圧を赤、負の大きな音圧を青で示す。つまり、音圧の腹(音圧

変化が極大になる部分)は赤または青で示される。しかし、赤と青の部分は位相が逆である。また、励振シミュレーションによる以下の図は、励振の一周期を4つのフレームで示している。

図8は、被験者 M2 の耳介を P1 周波数 (3.5 kHz) の正弦波で励振したときの音圧分布の変化を示したものである。耳甲介腔、その上部の耳甲介舟、さらに上部の三角窩といった外耳道入口を含む耳介の腔が全体として赤くなったり青くなったりしていることから、これらの部分が同相で音圧の腹になっているといえる。また、これは耳介の内外方向を片側閉管とみなしたときの第1共鳴 (1/4 波長) である。なお、音源点は仰角 0 度の位置においたが、それ以外の仰角に置いたときも同じ音圧変化パターンを示した。

図9は、被験者 M2 の耳介を P2 周波数 (6 kHz) の正弦波で励振したときの音圧分布の変化を示したものである。耳甲介腔に1箇所と、耳甲介舟と三角窩にかけての部分に1箇所、それぞれ位相が逆の音圧の腹が出現している。すなわち、これは耳介の腔の2次の共鳴モードが発生していること

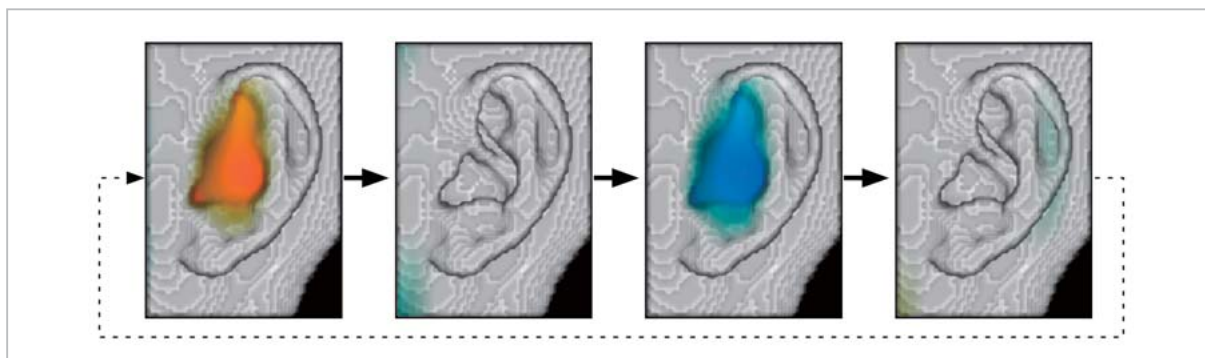


図8 P1 周波数における音圧分布の変化

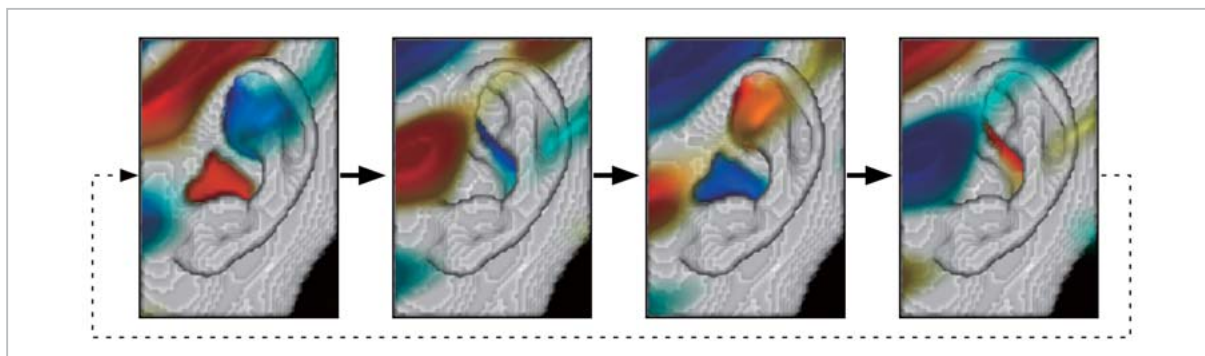


図9 P2 周波数における音圧分布の変化

を示している。このときの音源点は仰角 60 度の位置においたが、P2 が出現する仰角であればどこでも同じパタンの共鳴モードが発生した。

図 10 は、被験者 M2 の耳介を P3 周波数 (8.5 kHz) の正弦波で励振したときの音圧分布の変化を示したものである。耳甲介腔に 1 箇所、耳甲介舟に 1 箇所、三角窩に 1 箇所、合計 3 箇所に音圧の腹が出現している。また、耳甲介腔と三角窩が同相、耳甲介舟が逆相となっている。すなわち、これは耳介の腔の 3 次の共鳴モードが発生していることを示している。このときの音源点は仰角 120 度の位置においたが、P3 が出現する仰角であればどこでも同じパタンの共鳴モードが発生した。

前述した結果は、M2 のものであるが、他の 3 人の被験者でも同様の結果が得られた。よって、ピーク生成に関する知見は、われわれのシミュレータによる時間領域の励振シミュレーションでも確認された。

3.4 ノッチの成因

ノッチの成因については、直接波と耳介による反射波による経路差によるという説 [16][17] が提案されているが、ピークの成因ほどははっきりしていない。特に、耳介後方に音源があるときのノッチの成因は未解明である [17]。そこで、われわれは時間領域で励振シミュレーションを行い、さまざまな仰角に対する N1 の生成過程を可視化して考察した。その結果、仰角によって 3 つの生成メカニズムがあることを発見して報告した [18]。ここではその結果を簡単に紹介する。

まず、音源が仰角で約 0 度以下、あるいは約 180 度以上の方向、つまり水平面より下にあるときは、“counter canceling” という原理により N1 が生成される。これは、音源から伝播する進行波が耳甲介腔より上部の腔で起こる逆相の共鳴により迎え撃つようにして打ち消され、結果として耳甲介腔付近で音圧変化が小さくなるという原理である。

図 11 は被験者 M2 の耳介を用いて音源が仰角 -30 度にあるときの N1 周波数 (5.25 kHz) による

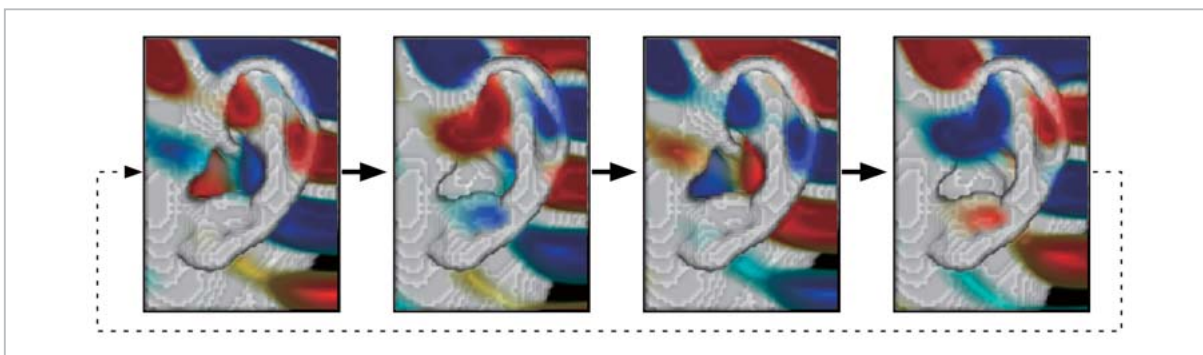


図 10 P3 周波数における音圧分布の変化

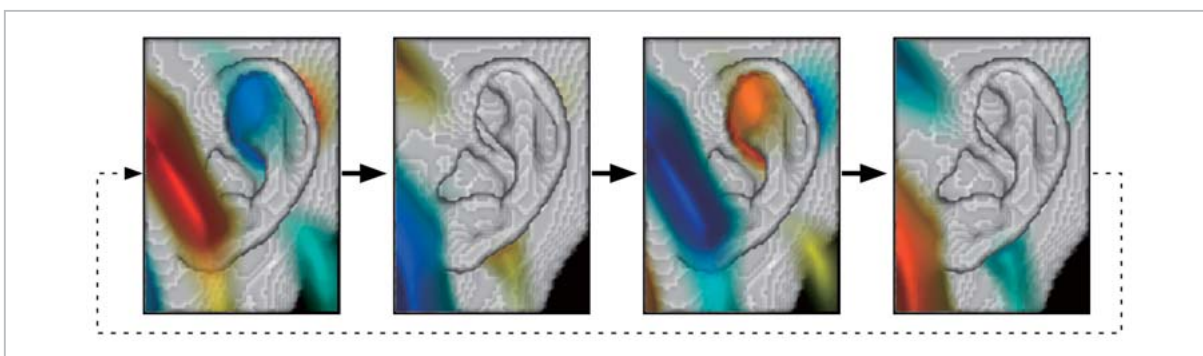


図 11 N1 生成メカニズム: counter canceling

励振を行ったときの音圧分布の変化を示している。第1フレームでは、左下から右上へ向かう進行波は赤、つまり正の音圧を持っている。一方、耳甲介舟、三角窩、舟状窩の部分は青、つまり負の音圧を持つ共鳴を起こしており、これが進行波を耳甲介腔上で打ち消すため、耳甲介腔部分が透明、つまり音圧変化が非常に小さくなる。第2フレームでは、負の音圧を持つ進行波が左下から接近しており、第3フレームでは、これを迎え撃つように耳甲介舟、三角窩、舟状窩の部分が正の音圧を持つ共鳴を起こしている。第4フレームでは、正の音圧を持つ進行波が左下から接近している。この後、第1フレームに戻って同じ現象が繰り返される。

次に、音源が仰角で約0度から90度の方向、つまり前上方にあるときは、“extended counter canceling”という原理によりN1が生成される。これは、“counter canceling”と類似しているが、耳甲介腔より上部の腔だけではなく、耳甲介腔の後縁も進行波の打ち消しに関与している。また、“counter canceling”では、耳甲介腔より上部の腔はすべて同相で共鳴するが、“extended counter canceling”では、耳甲介舟から三角窩にかけての部分は進行波と同相、耳甲介腔の後縁の部分が進行波と逆相となる共鳴が生じ、後者が進行波を迎え撃つように打ち消す。

図12は被験者M2の耳介を用いて音源が仰角60度にあるときのN1周波数(7.25 kHz)による励振を行ったときの音圧分布の変化を示している。第1フレームでは、左上から右下へ向かう音波の正の音圧を持つ波(赤)が、三角窩から耳珠へ到達している。しかし、耳甲介舟から耳甲介腔の後縁

の部分は青くなっており、逆相の共鳴が起こっている。この共鳴により、耳珠部分の正の音圧を持つ波が分断され、結果として外耳道入口のある耳甲介腔の前部では音圧変化が小さくなる。第2フレームでは、負の音圧を持つ進行波が左上から接近しており、第3フレームでは、第1フレームと逆の音圧配置になり、進行波と耳甲介腔の後縁との間で打ち消しが生じていることを示す。第4フレームでは、正の音圧をもつ進行波が左上から接近しており、この後、第1フレームに戻る。

最後に、音源が仰角で約90度から180度の方向にあるときには、“intercept canceling”という原理によりN1が生成される。これは、三角窩が進行波と同相、耳甲介舟が逆相となる共鳴が生じ、後者が耳甲介舟の外側を通過する進行波を打ち消すことによって生じる。上記2つの原理が耳甲介腔を挟んで打ち消しが行われるのに対して、この原理は耳甲介舟上を通過する進行波を耳甲介舟の共鳴が内側から打ち消すことにより耳甲介腔(外耳道入口)に届かなくすることによって生じる点で本質的に異なる。

図13は被験者M2の耳介を用いて音源が仰角150度にあるときのN1周波数(8.25 kHz)による励振を行ったときの音圧分布の変化を示している。上段は耳介の全体図、下段は上段の図中の黄色の点線の位置の断面の音圧を示したものである。なお、下段では、音圧が正のときは赤、負のときは青、零に近いときは緑になるように表示している。第1フレームでは、右上から到来した正の音圧の波が三角窩から耳甲介腔後縁に到達している。このとき、下段で示した断面では、耳甲介舟(図中でcymbaで示した部分)が青くなっており、外側

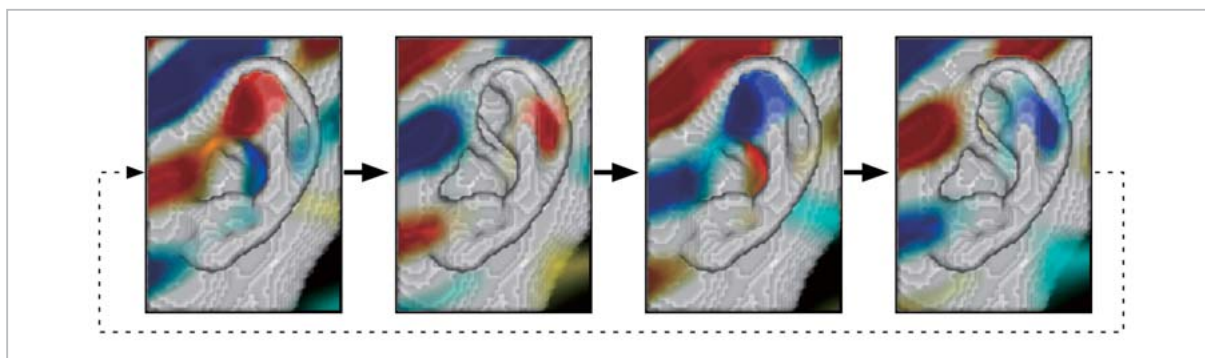


図12 N1生成メカニズム：extended counter canceling

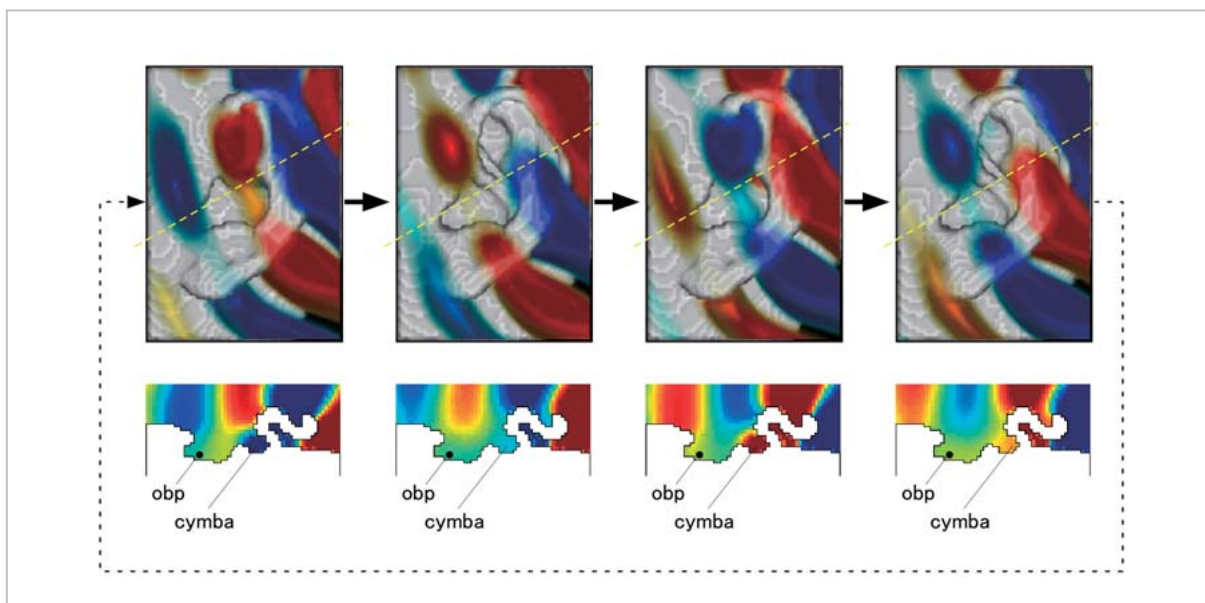


図 13 N1 生成メカニズム：intercept canceling

上段の図中の黄色の点線は、下段の断面の位置を示す。obp：観測点、cymba：耳甲介舟

(図では上方)を通過する音波と逆相になっている。つまり、耳甲介舟の内外で逆相の打消が生じることにより、結果として外耳道入口(図中でobpで示した観測点)での音圧変化が小さくなる。第2フレームでは、負の音圧を持つ進行波が三角窩から耳甲介腔後縁に達しようとしており、第3フレームでは第1フレームと正負が逆の音圧配置になるが、やはり耳甲介舟の内外で逆相の音波が打ち消しあう。第4フレームでは、正の音圧を持つ進行波が右上から到来し、この後、第1フレームに戻って同じ現象が繰り返される。

N1を生成する3つのメカニズムに共通するのは、耳甲介腔より上部の腔、すなわち、耳甲介舟、三角窩、舟状窩で進行波と逆相の共鳴が起こることによって、進行波を打ち消すことである。これらの知見は、時間領域での音の伝播を可視化することによって初めて得られた。

また、N1を生成する3つのメカニズム、すなわち、音源の方向と到来波を打ち消す方法は、4名の被験者で共通していた。これは図6で示したように、4名の被験者の耳介形状がトポロジー的には同じであることに由来すると思われる。一方、同じ仰角に対するN1周波数や強度、N1周波数が最高になる仰角の違いは、耳介各部のプロポーションの違いに由来すると思われる。

4 むすび

本稿では、まず、音響シミュレータとその計算原理であるFDTD法について概説した。次に、その精度検証の結果、音響シミュレータはマイクロホンによる実測と同程度の精度を持っていることを述べた。最後に、このシミュレータを用いて得られた研究成果として、正中面におけるHRTFのピークやノッチの成因について解説した。

本稿で紹介した研究成果は、耳介の共通した形状に由来する音響現象である。すなわち、HRTFのピークやノッチの生成のメカニズムそのものは、耳介のプロポーションの影響を受けないので、個人に依存しない共通性といえる。しかし、同じ仰角に対するピークやノッチの周波数や強度はプロポーションの影響を受ける。そこで現在、耳介各部を微小変形させたとき、ピークやノッチにどれだけの影響が生じるか、という耳介の音響感度分布に関する研究を進めている。この研究によって、HRTFの個人性の要因が解明できると考えている。このような研究を推進することによって、人間が立体的に音を知覚するメカニズムを総合的に解明し、個人に合わせて立体音響を再現することによって、超臨場感を実現したい。

謝辞

KEMAR の形状データを提供して頂いた Yuvi

Kahana 博士に感謝する。なお、本稿で紹介した成果の一部は、千葉工業大学の飯田一博教授との共同研究によるものである。

参考文献

- 1 Yuan, X. and Berggren, M., "Formulation and validation of Berenger's PML absorbing boundary for the FDTD simulation of acoustic scattering," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 44, 816–822, 1997.
- 2 Yokota, T., Sakamoto, S., and Tachibana, H., "Visualization of sound propagation and scattering in rooms," Acoust. Sci. & Tech. 23, 40–46, 2002.
- 3 竹本浩典, Parham Mokhtari, "時間領域差分法による声道の音響解析," 日本音響学会講演論文集(秋), pp. 475–478, 2007.
- 4 Mokhtari, P., Takemoto, H., Nishimura, R., and Kato, H., "Efficient computation of HRTFs at any distance by FDTD simulation with near to far field transformation," in Proceedings of the Autumn-2008 Meeting of the Acoustical Society of Japan, Fukuoka, Japan, Paper 1-8-12, pp. 611–614, 2008.
- 5 Berenger, J. P., "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J. Comput. Phys. 114, 185–200, 1994.
- 6 Yee, K. S., "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE Trans. Antennas Propagat. AP-14, 302–307, 1966.
- 7 千葉修, 柏達也, 霜田英麿, 鏡慎, 深井一郎, "リープフロッグアルゴリズムに基づく時間依存差分法による3次元音場解析," 日本音響学会誌, 49, 551–562, 1993.
- 8 Burkhard, M. D. and Sachs R. M., "Anthropometric manikin for acoustic research," J. Acoust. Soc. Am. 58, 214–222, 1975.
- 9 Algazi, V. R., Duda, R. O., Thompson, D. M., and Avendano, C., "The CIPIC HRTF database," IEEE Workshop on Applic. of Sig. Process. to Audio and Acoustics, 99–102, 2001.
- 10 Mokhtari, P., Takemoto, H., Nishimura, R., and Kato, H., "Computer simulation of KEMAR's head-related transfer functions: verification with measurements and acoustic effects of modifying head shape and pinna concavity," Principles and Applications of Spatial Hearing (in press).
- 11 Iida, K., Itho, M., Itagaki, A., and Morimoto, M., "Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues," Appl. Acoust. 68, 835–850, 2007.
- 12 竹本浩典, Parham Mokhtari, 加藤宏明, 西村竜一, 飯田一博, "頭部伝達関数のピーク・ノッチに対する頭部形状の個人差の影響," 日本音響学会講演論文集(秋), pp. 523–526, 2009.
- 13 Shaw, E. A. G., "The external ear: new knowledge in earmolds and associated problems," in: S. C. Dalsgaard (Ed.), Proceedings of the Seventh Danavox Symposium, Scandinavian Audiology, Suppl.5, 24–50, 1975.
- 14 Shaw, E. A. G., "Acoustical features of the human external ear," in: R. H. Gilkey, T. R. Anderson (Eds.), Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 25–47, 1997.
- 15 Kahana, Y. and Nelson, P. A., "Boundary element simulations of the transfer function of human heads and baffled pinnae using accurate geometric models," J. Sound and Vibration 300, 552–579, 2007.

- 16 Hebrank, J. and Wright, D., "Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane," J. Acoust. Soc. Am., 56, 1829–1834, 1974.
- 17 Raykar, V. C., Duraiswami, R., and Yegnanarayana, B., "Extracting the frequencies of the pinna spectral notches in measured head related impulse responses," J. Acoust. Soc. Am. 118, 364–374, 2005.
- 18 Takemoto, H., Mokhtari, P., Kato, H., Nishimura, R., and Iida, K., "Pressure distribution patterns on the pinna at spectral peak and notch frequencies of head-related transfer functions in the median plane," Principles and Applications of Spatial Hearing (in press).



たけもとひろあき
竹本浩典

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ専攻研究員
博士 (理学)
音響工学



Parham Mokhtari

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ専攻研究員
Ph.D. (Computer Science)
音響工学



にしむらりょういち
西村竜一

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ専攻研究員
博士 (情報科学)
音響工学



かとうひろあき
加藤宏明

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ専門研究員
博士 (工学)
音響工学