頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題

Issues on HRTF Measurements and Binaural Reproduction

平原達也 Tatsuya HIRAHARA 大谷 真 Makoto OTANI
戸嶋巖樹 Iwaki TOSHIMA

アブストラクト 音源信号に頭部伝達関数が畳みこまれたバイノーラル信号によって立体音像空間を再現する場合に、頭部伝達関数やバイノーラル信号再生系の音響的な厳密さが重要視されている。しかし、受聴者の頭部運動に追従する動的バイノーラル信号を用いると、頭部伝達関数やバイノーラル信号再生系に要求される音響的な厳密性を緩和できる。本解説では、複数箇所でも多数回計測した実頭とダミーヘッドの頭部伝達関数を精査し、頭部伝達関数の音響計測の問題点、頭部形状の変形に伴う頭部伝達関数の変化、および、頭部伝達関数の比較尺度について論じる。また、様々なバイノーラル信号を用いた一連の音像定位実験の結果に基づいて、静的バイノーラル信号と動的バイノーラル信号が再現する立体音像空間の差異についても論じる。これらを通じて、頭部伝達関数の計測とバイノーラル信号の再生にかかわる諸問題について論考する。

キーワード 頭部伝達関数, HRTF, バイノーラル方式, 音響計測, 動的バイノーラル信号

1. はじめに

頭部伝達関数(HRTF: Head Related Transfer Function)は、自由空間における音源と受聴者の鼓膜近傍あるいは外耳道入口に置いた受音点の間の音響伝達関数で、主として受聴者の体と頭部の三次元形状およびそれらの音響インピーダンスによって規定される。このHRTFは、通常、頭部がある場合の位置 S にある音源から外耳道入口 E に置いたマイクロホンまでの音響伝達関数 $H_E(S, \omega)$ を、頭部がない場合の位置 S にある音源から頭部中心位置 O に置いたマイクロホンまでの音響伝達関数 $H_O(S, \omega)$ で除した伝達関数 $H_E(S, \omega)/H_O(S, \omega)$ 、あるいは、それを離散フーリエ逆変換したHRIR (Head Related Impulse Response)と呼ばれるインパルス応答として与えられる(図1)。HRTF計測の歴史についてはBlauertの *Spatial Hearing* のTable. 2.2に詳しくまとめられている⁽¹⁾。これまでに数多くの実頭やダミーヘッド(擬似頭)のHRTFが計測され、それらの一部は東北大学電気通信研究所^{(2), (3)}、名古屋大学^{(4)~(6)}、長岡技術科学大学⁽⁷⁾、MIT Media Lab.^{(8), (9)}、IRCAM⁽¹⁰⁾、UC-Davis^{(11), (12)}などのWebサイトで公開されている。また、境界要素法(BEM: Boundary Element Method)、有限要素法(FEM: Finite Element Method)、時間領域有限差分法(FDTD: Finite Difference Time Domain Method)などを用

いて、三次元頭部形状データからHRTFを数値計算することもできる^{(13)~(16)}。

一方、バイノーラル信号(binaural signal)とは、音源から放射された音波を左右の耳に装着した二つのマイクロホンで収録した二チャンネルの音響信号のことで、音源信号に左耳と右耳のHRTFがそれぞれ畳みこまれたものとして規定される(図2)^{(17)~(19)}。もっとも、実世界では、壁などからの反射波成分が加わることになる。私たちの脳は、このバイノーラル信号を再生した音に含まれている音源の位置に依存する複数の音響的特徴を聴覚系で抽出し、それらを実世界でのマルチモーダルな経験に基づいて解釈することによって、聴こえた音像の位置を計算している。バイノーラル録音再生技術の歴史は古く、Clément Aderが1881年のパリ万国博覧会で展示し

図1 頭部伝達関数 $HRTF_E(S, \omega)$ は、頭部がある場合の音源 S から外耳道入口 E までの音響伝達関数 $H_E(S, \omega)$ を、頭部がない場合の音源 S から頭部中心 O までの音響伝達関数 $H_O(S, \omega)$ で除した伝達関数。 $HRTF_E(S, \omega)$ を離散フーリエ逆変換したものがHRIR

平原達也 正員 富山県立大学工学部/東北大学電気通信研究所
大谷 真 正員 東北大学電気通信研究所
戸嶋巖樹 NTTコミュニケーション科学基礎研究所
Tatsuya HIRAHARA, Member (Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, Izumi, 939-0398/ Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, 980-8577 Japan)
Makoto OTANI, Member (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, 980-8577 Japan)
Iwaki TOSHIMA, Non member (NTT Communication Science Laboratories, Atsugi, 243-0198 Japan)
Fundamentals Review Vol.2 No.4 pp.68-85 2009年4月

図2 バイノーラル信号は、音源信号に左耳と右耳のHRTFがそれぞれ畳みこまれたものとして規定される

たシステムがその始まりといわれている。それは、パリのオペラ座のステージに10個の電話送話器(カーボンマイク)を並べて集音し、電話回線を通じて数km離れた場所にある5組の電話受話器に配信するものであった。ダミーヘッドを用いたバイノーラルシステムの実験は1920年代にベル研究所で開始された。Harvey Fletcherらは頬に二つのマイクロホンを埋めこんだOSCARと呼ばれるダミーヘッドを1932年に開発し、指揮者のLeopold Stokowskiとともに実験的なバイノーラル録音も行った⁽²⁰⁾。OSCARは1939年のニューヨーク世界博覧会に展示され脚光を浴びたという。その後、ダミーヘッドや実頭を用いたバイノーラル録音・再生は1970年代後半から1980年代前半にかけて流行し、Pink Floyd等のアーティストもバイノーラル録音を行った。しかし、録音・再生方式としての主流の座は得られず、廃れていった。これは、録音に手間をかけた割に、受聴者が立体音場感を期待したほど味わえなかったためと推測される。

市販のダミーヘッドで収録したバイノーラル信号や、音源信号に上記WebサイトからダウンロードしたHRTFを畳みこんで合成したバイノーラル信号をイヤホンで聴くと、確かに頭の中や耳元で音が鳴るモノラル信号やステレオ信号とは異なり、立体的な音像が頭の外から聴こえるが、その立体音像空間はしばしばひずむ。例えば、前方から出したはずの音像が頭の中や、顔のすぐ近くや、後方から聴こえたりする。また、斜め上や下から出したはずの音像の高さがいまいであったり、真上から出したはずの音が頭の中から聴こえたりする。

バイノーラル信号によって再現される立体音像空間がこのようにひずむ理由として、三つの原因が挙げられている。第1の原因は、畳みこまれたHRTFが受聴者自身のHRTFではないことである。すなわち、物理的形状が異なる他人の頭や市販のダミーヘッドで計測されたHRTFは、受聴者のHRTFとは細部が異なるためである。その証拠に、適切に計測された自分自身のHRTFが畳みこまれたバイノーラル信号を再生すると、再現される立体音像空間のひずみは減る。しかし、HRTFの計測には大がかりな装置と長時間を要するために、自分のHRTFの数値データを持っている人は少ない。そのため、頭部形状の個人差によって生じるHRTFの個人差の解析や、個人差を解消する代表的あるいは汎用的なHRTFの作成

方法や選択方法、他人のHRTFを自分のHRTFに近づける適応化方法などが探求されている^{(21)~(26)}。

第2の原因は、音響再生系の不完全さである。すなわち、HRTFを計測した系の收音点(マイクロホンの位置)とバイノーラル信号を再生する系における再生点(イヤホンの位置)とが一致していない、外耳道の伝達特性を補正していない、イヤホンの周波数特性を補正していない、イヤホンがFEC(Free air Equivalent Coupling to the ear)でない、などの理由である^{(18), (19), (27)}。そのため、HRTF計測時のマイクロホン設置方法、イヤホンや外耳道特性の補正法、適切なFEC特性を持つイヤホンの探索などが行われてきている。そして、イヤホンや外耳道の伝達特性を適切に補正したり、FEC特性が優れたイヤホンを用いたりして、音響的により正確なバイノーラル信号を再現することによって再現される立体音像空間のひずみは低減することが示されている^{(28)~(31)}。

第3の原因は、受聴者の頭部運動が反映されていない静的バイノーラル信号が用いられていることである。すなわち、脳が音像の位置を計算するハードウェアとアルゴリズムは静止した音源や固定された頭部で学習されたものではないので、静的バイノーラル信号は音像位置を計算するのに不十分な情報しか持たない、という考え方である。頭部運動が音像定位に貢献することは古くから知られており^{(32)~(39)}、受聴者の頭部運動に追従して畳みこむHRTFが刻々と切り替わる動的HRTFを用いたり、空間的に移動する音源を用いたりすることによって、バイノーラル信号による再生音像空間のひずみは低減することが示されている^{(40)~(43)}。

これら三つの原因を解明することは、いずれも、いかに「リアル」な立体音像空間をバイノーラル信号から再現するかという問題を解決する糸口となり得る。これらに共通する視点は、バイノーラル信号を物理的に正確に再生するにはどうすればよいかという音響的な視点である。すなわち、HRTFをいかに高精度に計測するか、時不変あるいは時変なバイノーラル信号をいかに高精度に得るか、電気的なバイノーラル信号をいかに高精度に音信号として再生するか、といった視点である。もう一つの視点は、立体音像の妥当な聴こえを生じさせるために必要な手がかりはなにか、どのようなメカニズムでそれらの手がかりから聴覚系は音像の位置を計算しているのかという心理・神経生理的な視点である。すなわち、HRTFに含まれるどのような時間的・スペクトルの特徴が音像の再生に寄与しているのか、どの程度その特徴を変化させても再生音像空間はひずまないのか、頭部運動や視覚情報との相互作用はどの程度あるか、被験者の経験や慣れや音を聴く能力はどの程度影響するのか、といった視点である^{(44)~(52)}。

しかしながら、HRTF計測系の信頼性や計測されたHRTFの精度等についてはあまり公にされていない。これは、HRTFの計測は基本的にはインパルス応答の計測というあまりに基本的な音響計測なのであって問題にされないためと、計測に比較的長い時間を要するので反復してHRTFを計測することが少ないためと考えられる。その結果、あまり正確でないHRTFを用いたことに起因するバイアスのかかった結論

が導き出されている可能性もあろう。また、これまでの音像定位実験は被験者の頭を固定した静的バイノーラル信号を用いたものが多く、動的バイノーラル信号を用いた実験は少ない。これは、頭部を固定した条件での受聴実験が好まれてきたためと、適切な動的バイノーラル信号を合成することが易しくはなかったためと考えられる。その結果、静的バイノーラル信号を用いたことに起因するバイアスのかかった結論が導き出されている可能性もあろう。更に、被験者の経験や慣れや音を聴く能力を統制した音像定位実験はこれまであまりなされていない。これは、実験条件の統制が難しいことと、健康診断で行われる聴力検査以上の検査を行わずに被験者として20歳代の学生を「健聴者」として用いることが多いためと考えられる。その結果、やはり、様々なバイアスのかかった結論が導き出されている可能性もあろう。

そこで、本稿では、まず、複数のHRTF計測系を例にとり音響計測にかかわる諸問題について述べるとともに、多数回計測した実頭とダミーヘッドのHRTFの計測精度について述べる。次に、ダミーヘッドの頭部形状の変形に伴うHRTFの変化およびHRTFの比較尺度について述べる。そして、様々なバイノーラル信号に対する一連の音像定位実験の結果について述べる。これらを通じて、HRTFの計測とバイノーラル信号による立体音像再生にかかわるいくつかの問題について論考する。

2. HRTFの計測にかかわる諸問題

音波は媒質の圧力変化という物理的な現象であり、様々な物理量に影響を受ける。空気の圧力変化を検出するセンサであるマイクロホンには十分に感度が高く、それらの影響を検出できる。そのために、音響計測は測定系の物理的な状態が正確に反映され、手を抜けば手を抜いたなどの計測データが、細心の注意を払えば払ったなどの計測データが得られる。

HRTFは、頭部中心を原点とした極座標系で表すと、音源から外耳道入口までの距離を r 、音源の水平角を θ 、音源の仰角を φ 、角周波数を ω として、次式で与えられる。

$$HRTF_E(r, \theta, \varphi, \omega) = \frac{H_E(r, \theta, \varphi, \omega)}{H_O(r_0, \theta, \varphi, \omega)} \quad (1)$$

ここで、添え字の E はRまたはLで右耳か左耳を表し、 H_E は音源から各耳の外耳道入口までの伝達関数、 H_O は音源から頭部中心位置までの頭部がない場合の伝達関数である r_c は音源から頭部中心位置までの距離であるが、両耳間距離を0.15 mとすると、 $r_c = 1$ mのとき $r = 1.0028$ mであり、 $r_c = r$ として差し支えない。 H_E を H_O で除するのは音響系と電気系の諸特性を相殺するためである。また、マイクロホンは無指向性と仮定して $H_O(r_0, \theta, \varphi, \omega)$ は真正面、すなわち $(\theta, \varphi) = (0, 0)$ の1点で代用する場合が多い。

本稿では、正面方向を $\theta = 0^\circ$ として時計回りに水平角 θ をとり、両耳の外耳道入口を横切る水平面を $\varphi = 0^\circ$ として仰角 φ をとっている。頭部の姿勢は、両耳の外耳道入口と鼻尖

図3 HRTF計測システムの基本部分と問題になりやすい箇所

で構成される面が水平面になるような姿勢を基準とした。そして、ある φ に対して θ をぐるりと一周させて計測した水平面座標系のHRTFを対象とする。しかし、極座標系のとり方にはこのほかに矢状面座標系と前額面座標系があり、中堂らはこれらの座標系でもHRTFを計測している⁽⁵³⁾。また、森本らは矢状面間のHRTF振幅スペクトルが類似していることから矢状面座標系の利用を提案している^{(54), (55)}。

いずれにせよHRTFを計測するシステムの基本部分は図3に示すようなもので、音源となるラウドスピーカから頭部中心位置および外耳道入口においたマイクロホンまでの音響伝達関数すなわち音響インパルス応答を正確に測るということに尽きる。周知のとおり、音響計測には電気信号系とともに被計測物が置かれた空間の音響的な環境が大きな影響を与える。つまり、音響計測には電気音響機器と電気音響変換器のダイナミックレンジを考慮した適切な電圧信号のレベル配分と、ハム等の電磁雑音の低減に加えて、計測空間の暗騒音を下げることと可能な限り反射物体を除去することが、最低限必要である。これに加えて、HRTFの計測には正確な音源と受音点の相対位置の設定が必要となる⁽⁵⁶⁾。本章では、三つのサイトで計測したHRTFデータを元にして、HRTFの計測にかかわる諸問題について議論する。

2.1 HRTF計測システム

計測サイト1はNTTコミュニケーション科学基礎研究所の無響室である(図4(a))。無響室の有効寸法は $5.4 \times 4.8 \times 3.7$ mで、暗騒音レベルは空調運転時で10 dB以下である⁽⁵⁷⁾。音源は1個の小形の密閉型スピーカ(Vifa, MG10SD)で、半円弧状のトラバース装置に沿って移動させて、位置を仰角 $\varphi = -45^\circ \sim 90^\circ$ 、水平角 $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ の間で任意に設定できる。スピーカから頭部中心位置までの距離 r は1.2 mである。被測定物は座面の高さを変えられる椅子に設置する。椅子には背もたれはあるが、頭部固定器具などはない。

マイクロホンは直径6 mmのエレクトレット・コンデンサ・マイクロホン(Panasonic, WM62AT102)で、これを外耳道の入口附近に充填した補聴器用のシリコン印象材に埋めこみ、各被験者の両耳についてそれぞれ耳栓マイクを作成する。この耳栓マイクの作成方法は、千葉工業大学の飯田一博教授から御指導頂いた。耳栓マイクを用いているので、HRTFは外耳道を閉塞(ブロック)した状態で計測される。

インパルス応答の計測には32,768点のOATSP信号⁽⁵⁸⁾を14回出力し、そのうち5回目以降の10回について加算平均を取

図4 3箇所のHRTF計測サイトの様子。(a) NTT-CS研(厚木市), (b) 東北大通研(仙台市), (c) 富山県立大(射水市)

る。最初の5回を捨てるのは、移動したスピーカの位置が安定するのを待ためである。OATSP信号の音圧レベルは頭部中心位置で70 dB SPLである。HRTFの測定点は、正中面と水平面は 10° ごとに、その他の点は隣り合う測定点との間の仰角または水平角が最大でも 20° 以内に収まるように設定した143点とした。この143点のHRTF計測時間は約95分であった。また、頭部中心位置でのマイクロホンのインパルス応答 $H_o(r_o, \theta, \varphi, \omega)$ は、マイクロホンが無指向性と仮定して、真正面 $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ からの1点でのみ計測した。

計測サイト2は東北大学電気通信研究所の無響室である(図4 (b))。無響室の有効寸法は $7.5 \times 7.5 \times 4.3$ mで、空調停止時の暗騒音レベルは18 dBである。音源は水平面と正中面の二つの円弧状フレームに 10° 間隔に並べた多数の密閉型スピーカ(FOSTEX, FE83E)で、この球状スピーカアレーを回転させて、音源の位置を仰角 $\varphi = -80^\circ \sim 90^\circ$ の間で 10° ごと、水平角 $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ の間で任意に設定できる。スピーカと頭部中心までの距離 r は1.5 mである。被測定物は、座面の高さを変えられる椅子に座らせる。椅子には背もたれと後頭部を保持する金属フレームがついている。被測定物がダミーヘッドの場合は、椅子の背もたれ、座面、後頭部の保持フレームを外し、椅子の脚部に差した金属棒の先端にダミーヘッドを装着する。マイクロホンは、サイト1で使用したのと同じ耳栓マイクを用いる。

インパルス応答の計測には8,192点のOATSP信号を4回出力し、その加算平均を取る。OATSP信号の音圧レベルは中心位置において約60 dB SPLである。HRTFの測定には真上の1個と正中面にある17個のスピーカだけを用い、それらを 10° ごとに回転させた613点をHRTFの測定点とした。計測に要する時間は約60分であった。頭部中心位置でのマイクロホンのインパルス応答 $H_o(r_o, \theta, \varphi, \omega)$ は、椅子を取り外して設置したマイクスタンドに一個ずつ耳栓マイクを正面に向けて装着し、真上と正中面前側にある17個のスピーカ $(\theta, \varphi) = (0^\circ, -80 \sim 90^\circ)$ についてそれぞれ計測した。

計測サイト3は富山県立大学の実験室である(図4 (c))。実験室の有効寸法は $4 \times 3.4 \times 3$ mで、通常の部屋の床・壁・天井にポリエステル不織布吸音材(ササクラ, 厚さ50 mm, 密度 22 kg/m^3)を貼りつけただけの部屋である。空調停止時の暗騒音レベルは53 dBである。この実験室の中央に、密閉型スピーカ(Vifa, MG10SD)をスピーカスタンドに設置し、その

位置を手動で変えることによって計測を行う。スピーカと頭部中心までの距離 r は1.0 mである。被測定物がダミーヘッドの場合は、ダミーヘッドをテレヘッドの上に置く。被測定物が実頭の場合は、被験者を椅子に座らせる。椅子には背もたれはあるが頭部保持器具はつけていない。マイクロホンは、サイト1で使用したのと同じ耳栓マイクを用いる。インパルス応答の計測には16,384点のOATSP信号を測定点ごとに10回出力し、それらの加算平均を取る。TSP信号の音圧レベルは中心位置で80 dB SPLである。また、頭部中心位置でのマイクロホンのインパルス応答は、真正面からのみ計測した。

2.2 音響インパルス応答の計測結果

図5 (a) は、サイト1において、真正面から出したTSP信号を、頭部中心位置に設置したある被験者の右耳用の耳栓マイクで受音し加算平均したTSP応答信号の音圧波形とそのスペクトログラムである。TSP応答信号波形の最大値はフルビット振幅と比較して13.4 dBの余裕がある。また、スペクトログラムから三次の高調波ひずみ成分が出ていることが分かるが、そのレベルは主成分と比較して-55 dB以下である。図6 (a) はこのTSP応答信号から算出したインパルス応答波形で、インパルス応答は最大値からすぐに収束しているが、200点(4.2 ms)ほど尾を引いていることが分かる。

図5 (b) は、サイト2で同じ耳栓マイクを用いて測定した結果である。TSP応答信号波形の最大値はフルビット振幅と比較して13.6 dBの余裕がある。また、スペクトログラムからは、三次の高調波ひずみは主成分と比較して-60 dB以下であること、2つ以上の反射波成分と、20 kHz附近に雑音成分が重畳していること、高域のSN比が低いことが分かる。なお、收音系を改善することによってこの雑音成分はなくなり高域のSN比も改善された。

図6 (b) に示すインパルス応答波形を見ると、その最大値から100点(2.1 ms)ほど振幅の大きな成分があると同時に、300～500点(6.3～10.4 ms)後に二つ、800点(16.7 ms)後に一つ、反射波成分があることが分かる。直接波との行路差から、これらの反射波成分はスピーカアレーのフレームやそこに取付けられているスピーカのコーンからの反射と考えられる。HRIRとして用いられているインパルス応答の長さは512点程度なので、遅延時間の長い反射波成分の影響は受けない

図5 3箇所のHRTF計測サイトにおけるTSP応答信号の音圧波形とそのスペクトログラム

が、48 kHzでサンプリングしている場合10 ms以下の短い遅延時間を持つ反射波成分はインパルス応答長に含まれてしまう。このような反射波成分があるといわゆるカラーレーションが生じ、HRTFの振幅スペクトルは波打つ。その結果、水平面HRTFの方位周波数パターンを描くと縦縞が現れ縞々になる。

図5 (c)は、種々の対策をとる前に、サイト3で同じ耳栓マイクを用いて測定した結果の一例である。TSP信号波形の最大値はフルビット振幅と比較して14.3 dBの余裕がある。また、スペクトログラムからは、二次、三次、四次の高調波ひずみがあり最もレベルが高い三次高調波ひずみ成分は主成分と比較して-50 dB以下であること、17.5 kHz附近に定常的な狭帯域雑音成分が重畳していることが分かる。なお、測定室の蛍光灯を消灯することによりこの狭帯域雑音成分はなくなる。図6 (c)に示すインパルス応答波形は200点(4.2 ms)ほど尾を引いているが、遅延時間の長い反射波は少ないことが分かる。

このように、頭部中心位置に置いた耳栓マイクのTSP応答信号とインパルス応答を見れば、計測系の状態は概ねわかるし、対処しなければならない問題点も明らかになる。特に、被測定物の周囲にある反射物の影響は無視できない。頭部中心位置での耳栓マイクのインパルス応答を計測する際に、被験者を座らせる椅子の上に約80 cmのマイクロホンスタンドを立て、その椅子を吸音材で覆わずに測定してしまったことがある。椅子の座面からの数msの遅延を持つ大きな反射波がインパルス応答に混入し、結果は惨憺たるものとなり、再計測を余儀なくされた。

2.3 頭部伝達関数の計測における位置決めの重要性

HRTFの計測時にマイクロホンや頭部の位置を正確に定めるのは容易ではない。筆者らは次のようにして頭部中心位置のマイクロホンや頭部の位置を決めてきた。まず、水平面を合わせて正面と左右に3本のレーザポイントを設置し、その3本のレーザ光が交わる点を頭部中心位置とする。そして、実頭やダミーヘッドを置いた場合、正面からのレーザ光が鼻尖

に、両側からのレーザ光が左右の耳珠に当るように実頭やダミーヘッドの位置を調整する。最近では、水平線と鉛直線を同時に描くレーザ墨出し器を用いて、一連の位置合わせ作業を短時間で確実に行っている。実頭でもこのようにHRTFの計測を開始する前に位置合わせを行うが、計測終了時に頭部位置を再確認することはまれで、HRTFの計測中に頭部位置をモニタして位置を修正させることは行っていない。

長時間を要するHTRFの計測において頭部の動きが問題になることは周知のことである。しかし、音を聴いたりHRTFを計測している間に頭部がどの程度動いているかというデータはほとんどない。矢入らは音を聴いている5分間の頭部の動きを計測し、被験者の頭部はわずかではあるが常に動いていること、ロールとピッチ方向の動きが大きくヨー方向の動きは少ないことを報告している⁽⁵⁹⁾。一方、相良らは95分という長時間にわたるHRTF計測時の頭部の動きを計測し、被

図6 3箇所のHRTF計測サイトでの $H_0(s, \omega)$ のインパルス応答波形

図7 サイト2でのHRTF計測には60分かかる。この最初(青線)と最後(赤線)に計測した真正面のHRTFを比較すると、実頭では差異が生じる。

験者の頭部はピッチとヨー方向に大きく動き、ロール方向の動きは少ないこと、95分間の最初と最後ではピッチとヨー方向が最大10°、ロール方向は1°程度動くことを報告している⁽⁶⁰⁾。

種々の視覚実験でも頭部の動きはアーティファクトを生むために、横に渡した棒や歯型を噛んだり顎台などを用いたりして頭部を固定する⁽⁶¹⁾。これらの道具を用いれば確実に頭部位置を固定できるが、頭部の周囲に物体を置かねばならないために音の反射を生じ、HRTFの計測には流用できない。そこで、HRTFの計測では、椅子の背もたれにヘッドレストを装着して被験者の後頭部を固定したり、首の固定具などを用いたりして被験者の頭部の動きを防止することが多い。しかし、ヘッドレスト等の装着による音響的な影響は、個々の計測サイトでは確認されていることと思われるが、きちんと評価されていない。また、後頭部にヘッドレストを当てた状態でも、長時間にわたって同じ頭部位置が保たれているかどうかは確認が必要である。

そのため、多くの場合、計測中に頭部が動く状態やヘッドレスト等を利用した状態で計測されたHRTFを、暗黙の了解あるいは無批判のうちに利用している。すなわち、音響的に見ると、低い精度の伝達関数を用いていることになる。もっとも、計測精度が何dB必要かという点については計測するHRTFの使用目的によって議論が分かれるだろう。少なくとも音圧の較正などで用いられている0.1 dB以下の精度は不要で、音の強さの弁別しきいに相当する0.5～1 dBが確保されれば十分ではないかと考える。次節では、計測されたHRTFの精度についてスペクトル距離を用いて検証する。

2.4 HRTFの計測精度

二組のHRTFの差は式(2)に示すHRTFの平均振幅スペクトル距離 SD (Spectral Distance) を尺度として評価される場合が多く、本稿でもこれを用いて精度を評価する。この SD を利用する妥当性については後に議論する。

$$SD = \frac{1}{M} \sum_{\theta, \varphi} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(20 \log_{10} \left| \frac{HRTF_j(f_i)}{HRTF_k(f_i)} \right| \right)^2} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

ここで、 $HRTF_j(f_i)$ と $HRTF_k(f_i)$ は比較する j と k 二組の

HRTF スペクトル、 f_i は HRTF スペクトルを構成する i 番目の周波数、 N は 256 で HRTF スペクトルを算出した FFT 長の半分、 M は計測した音源位置 (θ, φ) の組合せの総数である。

まず、計測サイト1において、測定系もダミーヘッド (DH1a) の位置も全く変化させずに95分にわたるHRTFの計測を連続して2回行った。その結果、143個の音源位置で計測した2組のHRTFの SD は0.45 dBであった⁽⁶²⁾。この差は、スピーカを移動させるトラバース装置の位置決め誤差によるものといえる。また、計測サイト2において、四つのダミーヘッドを用いて60分間の計測の最初 ($\theta = 0^\circ$) と最後 ($\theta = 360^\circ$) に真正面のHRTFを2回測定した結果、それらの SD は0.16～0.53 dBであった。これらの差もスピーカアレーを移動させる回転装置の位置決め誤差によるものといえる。このように、物理的な設置位置を変えない限り、ダミーヘッドのHRTFは0.5 dB程度の精度で計測できる。

次に、計測サイト1において、同じ日に無響室内の状態を変えずに1時間空けて別のダミーヘッド (Brüel & Kjær, 4128C) (DH0) を設置し直して計測した2組のHRTFの SD は1.6 dBであった。ダミーヘッドを設置し直さずに測定した場合と比較すると SD は約1 dB増加しており、これはダミーヘッドの物理的な設置位置の誤差によるものといえる。また、異なる日に同じダミーヘッド (DH1a) を設置し直して計測した2組のHRTFの SD は2.6 dBであった⁽⁶²⁾。ダミーヘッドを設置し直さずに測定した場合と比較すると SD は約2 dB増加しており、これは設置位置の誤差に加えて耳栓マイクを取りつけ直した影響と推測される。このように、レーザポインタを利用してダミーヘッドの位置決めを細心の注意を払って行ったつもりでも、それらがいかに音響的にいい加減であったかを、計測結果は示している。

更に、計測サイト1において、異なった日に複数回計測した実頭のHRTFの SD は、被験者によって異なるが、平均すると3.6 dB ($\sigma = 0.78$ dB)であった。この値はダミーヘッドを再設置した場合より約1 dB大きい。これは実頭の物理的な設置位置の誤差と、HRTF計測中の頭部の動きに起因するものと考えられる。RH2のHRTFの SD はダミーヘッドを再設置した場合と同程度で、HRTF計測中の頭部運動が小さかったためと推測される。逆にRH3のHRTFの SD が大きいのは、HRTF計測中の頭部運動が大きかったためと推測される。ま

た、計測サイト2において、頭部保持具を用いた4名の実頭について60分間の計測の最初 ($\theta = 0^\circ$) と最後 ($\theta = 360^\circ$) に真正面のHRTFを2回測定した結果、それらのSDは1.7～4.1 dBであった。図7 (a) はSDが小さかった被験者の真正面HRTFスペクトルで、スペクトルの深さが変動しているだけである。一方、図7 (b) はSDが大きかった被験者の真正面HRTFスペクトルで、スペクトルの位置が変わっている。この計測においては頭部保持具を用いたが、60分を隔てて計測したHRTFのSDはダミーヘッドよりも大きく、頭部が動いていたことを示している。

サイト1での比較結果をまとめると図8のようになる。二つのHRTFを比較する場合には、計測系の誤差、位置決め誤差、頭部運動による誤差が混在したSDに、頭部形状の差に起因するHRTFの差が載ることになる。位置決め誤差は低減できるが、私たちは頭部の位置を長時間保持できないために、頭部運動による誤差の低減は難しい。そのため、従来のように、頭部位置の統制をとらないまま時間がかかるHRTF計測法を用いる限り、実頭のHRTFの計測精度はダミーヘッドのような高い精度を望めない。第1の解決法は、その影響をあらかじめ評価した上で、きちんと頭部を固定する治具を利用することである。第2の解決法は、HRTFの計測中に頭部位置をモニターして頭部位置のずれを補正し続けることである。実際、これらの頭部固定具を用いずに、被験者の頭部位置をビデオカメラでモニターし、被験者が頭部位置を随時補正しながらHRTFを計測している例^{(63), (64)}もあるが、気の遠くなるような時間がかかる。第3の解決法は、Zotkinらのように、音源を外耳道入口に置きマイクロホンを頭部の周囲に配置して複数位置のHRTFを短時間のうちに同時計測することである⁽⁶⁵⁾。外耳道に埋めこむことができる大きさで、計測に必要な音圧を出す小形スピーカは少なく、このような新しいHRTF計測法の有効性の検証は今後の課題である。

2. 5 計測サイトによる頭部伝達関数の差異

図9はサイト1とサイト2で計測したある実頭の水平面HRTFの方位周波数パターンである。両HRTFの概形は似ているが、音源位置が測定耳と同側の1 kHz周辺のピークとノッチ

図8 サイト1において複数回計測した実頭とダミーヘッドのHRTFのSD

図9 サイト1とサイト2で計測した実頭の水平面HRTFの比較

チ、両側の5～10 kHzにあるノッチの挙動、対側の12 kHzのノッチ、対側後方の16～19 kHzのノッチなどが異なっている。またサイト2のHRTFの高域には縦縞がある。この右耳のHRTFから算出した二つの計測サイト間のSDは5.7 dBであった⁽⁵⁶⁾。

両サイトで計測した3名の実頭のHRTFから算出した両計測サイト間の平均SDは5.3 dB ($\sigma = 0.78$ dB)であった。一方、両サイトで計測した二つのダミーヘッドのHRTFから算出した両計測サイト間の平均SDは6.3 dB ($\sigma = 0.53$ dB)であった⁽⁵⁶⁾。

このように、同じ「頭部」のHRTFを計測しても計測サイトによって異なるHRTFが得られる。この原因はいろいろ考えられるが、音響的観点からは、一体全体何を測っているのかという批判を免れない。Katzらが進めているようなHRTFのラウンドロビンテスト⁽⁶⁶⁾のように、同じ「頭部」を用いて複数の計測サイトでできる限り注意を払ったHRTFの計測を行い、それらを相互比較することが必要である。そうすることによって、HRTFの差異を生む要因を特定し、その要因を除去し、正確なHRTFを測ることができると考える。そうして初めて、HRTFのリファレンスが得られるし、数値計算で求めたHRTFについても正当な評価ができるようになる。更に、正しい実測結果と数値計算結果との整合が取れたならば、角張らが述べたように⁽¹⁵⁾、数値計算結果を基にして計測系の問題点を検証することも可能となる。

2. 6 HRTFの比較尺度あるいは物差し

2. 4で述べたように、二組のHRTFの差はSDを用いて評価されることが多い。このSDは音声情報処理の分野でも用いられている距離尺度で、認識・合成・符号化技術には欠かせない。音声信号のスペクトルは、声道という閉じた音響管の音響伝達関数の極によって特徴づけられ、その違いをSDで測る有効性はこれまでの多数の音声データによって裏づけられている。

これに対して、HRTFのスペクトルは頭部の周囲にある開いた空間の音響伝達関数の零点によって特徴づけられる。HRTFスペクトルと音声スペクトルとはスペクトルという表

図10 (a) リニア周波数軸, (b) 対数周波数軸, (c) 聴覚フィルタを通してERB-rate上に描いた真正面HRTFの振幅スペクトル. (b)の赤線は(c)を対数周波数軸上にマッピングしたもの

現形式は同じだが、その性質はだいぶ違う。電気音響研究会を母体とする人々は、HRTFスペクトルを線形周波数軸上に描くことが多く、HRTFは10 kHz以上の高域周波帯にあるスペクトルの山（ピーク）と谷（ノッチ）で特徴づけられる（図10 (a)）。聴覚研究会を母体とする人々は、HRTFスペクトルを対数周波数軸上に描くことが多く、同じHRTFは10 kHz以下の周波帯域にあるスペクトルの山と谷が目立ち、10 kHz以上のスペクトルの変化はあまり気にならなくなる（図10 (b)）。聴覚生理をかじった人々は、HRTFスペクトルを聴覚フィルタの帯域幅⁽⁶⁷⁾を考慮した周波数スムージング処理をした上で、聴覚系の周波数軸であるERB-rate上に描きたくなる。音声スペクトルはこのような聴覚フィルタ処理を施すと、線形周波数軸上に描いた物理的なスペクトルとは様相が大きく変化する⁽⁶⁸⁾。しかし、HRTFスペクトルは低ケフレンシー（quefrensy）成分が主なので、図10 (c)に示すように、聴覚フィルタ処理を施しても対数周波数軸上に描いたHRTFスペクトルとほとんど変わらない。

式(2)では周波数 f_i を線形周波数軸上で等間隔にとって SD を算出しているが、これを対数周波数軸あるいはERB-rate上で等間隔にとった $SD_{\log}$ や SD_{erb} も算出できる。しかし、実測したHRTFから算出される SD は4～8 dBと狭い範囲の値しかとらないし、変化に乏しい低域周波数が強調される $SD_{\log}$ やスペクトルが平滑化される SD_{erb} では、いずれも3～5 dBと SD より狭い範囲の値しかとらない。このように、 SD という物差しを当てるとHRTFは似たり寄ったりなのである。

飯田らは、HRTFに現れる第1および第2スペクトルノッチ周波数とその間にあるスペクトルピーク周波数を用いてHRTFの違いを表す物差しとすることを提案している⁽⁶⁹⁾。ノッチやピークの周波数という特徴抽出が必要となるが、このようなHRTFスペクトルの構造を踏まえた物差しの検討は重要である。正中面という特殊な平面を除けば、バイノーラル信号に含まれている音源の位置を反映する音響的特徴は、HRTFの振幅スペクトルだけに含まれているのではなく、よく知られている両耳間時間差（ITD）と両耳間音圧差（ILD）というグローバルな量もある。ILDはHRTFの振幅スペクトルに含まれるが、ITDは含まれない。音声信号の聴こえは位相を無視して振幅スペクトルだけで語ることができるが、音像の位置の聴こえは左右のHRTFの位相差であるITDを無視できないので、HRTFの違いを表す物差しにはITDの違いを反

映させる必要がある。更に、HRTFの差を生む頭部形状の差とも直接結びつくような、あるいは、強い相関を持つようなHRTFの物差しを見いだすことは今後の課題である。それらが得られるまでは、その性質を知った上で、振幅スペクトル距離である SD を用いてHRTFの差を評価することも致し方ないと思う。

3. 頭部形状の変形に伴うHRTFの変形

HRTFは頭部の形状や胴体の有無によって変形する。本章では、ダミーヘッドの形状を種々に変形させた場合に、HRTFがどのように変形するかについて述べる。

3.1 頭部の影響

ある実頭の实測形状を基にして再現したそっくりダミーヘッドの両耳間距離である165 mm離して設置した二つのマイクロホン（ステレオマイクロホン）でHRTFを計測した⁽⁷⁰⁾。このステレオマイクロホンは、図11 (a)に示すようにマイクロホンホルダにECMを埋めこんでテレヘッドに装着しているので、マイクロホンの周囲には遮へい物や反射物がある。図12は、計測したHRTFから算出したステレオマイクロホンのITDとILDを、ダミーヘッドのものと比較したものである。同図に示されるように、頭部があることでITDとILDは大きく増加する。

水平角に応じてILDは変化し、その変化量は頭部がないステレオマイクロホンでは±6 dB、ダミーヘッドでは±15 dBであった。また、ステレオマイクロホンでもダミーヘッドで

図11 (a) サイト1で使用したステレオマイクロホン, (b) サイト3で使用したステレオマイクロホン

図12 サイト1で計測したステレオマイクロホンとダミーヘッドの両耳間時間差と両耳間音圧差

も、音波の干渉によりILDは±90度で最大とならず、少し減少する。この現象についてはBlauertが純音でシミュレートしているが⁽⁷¹⁾、広帯域音のインパルス応答から算出したILDでも同じ現象が確認された。なお、0度と180度でILDが0になっていない。この理由は、ステレオマイクロホンでは幾何学的配置が不完全であったため、ダミーヘッドでは頭部自身の対称性が不完全であったため、および、計測時の頭部運動に伴う位置ずれによるものと考えられる。

水平角に応じてITDは変化し、その変化量はステレオマイクロホンでは右側で500 μs、左側で560 μs、ダミーヘッドでは左右ともに720 μsであった。165 mmの直線距離から算出される時間差は480 μs、直径165 mmの球の測地線距離から算出される時間差は750 μsである。Fs = 48 kHzであるからサンプリング間隔は20.8 μsで、実測値と計算値の違いは誤差範囲といえよう。

3.2 胴部の影響

実頭のHRTFは胴部の上に頭部が載った状態で計測されるが、ダミーヘッドのHRTFは必ずしもHATS (Head and Torso Simulator) のように胴部があるわけではなく、頭部だけで計測される場合もある。図13はサイト2で計測したある被験者の実頭(RH2)とそのダミーヘッド(DH2c)の右耳の水平面

図13 サイト2で計測した実頭とそのダミーヘッドの右耳の水平面HRTF

HRTFの方位周波数パターンである⁽⁵⁶⁾。同図に示されるように、胴部がついている実頭のHRTFでは $\theta = 0^\circ \sim 110^\circ$ にかけて1.2 kHz近傍にスペクトルノッチがあるのに対して、さらに首状態のダミーヘッドのHRTFではそのようなノッチはない。1.125 kHzの波長 λ は約0.3 mで、この $\lambda/2$ はおおむね直接音と肩からの反射音の行路差に相当し、音源と耳が同側の場合にノッチが顕著であることから、このノッチの成因は肩からの反射波と考えられる。被験者が座っている場合脚部からの反射も考えられるが、反射音の行路差から考えるとその影響は数百Hz以下に現れる。

3.3 頭頂部への異物装着の影響

ダミーヘッドの頭頂に三次元位置姿勢計測器 (Polhemus, Fastrak) のプラスチック製の箱に収納された接続ケーブル付きのセンサ (25×30×16 mm) を装着したときとしないときのHRTFをサイト1で計測し、両者のHRTFを比較した。その結果、センサ装着の有無に伴うHRTFの変化はわずかで、両者のSDは0.7 dBであった⁽⁶²⁾。

3.4 後頭部の開口部の影響

ダミーヘッドDH1aは、後頭部の一部 (80×70 mm) が保守のため着脱できるようになっている。この後頭部にある開口部の有無が、HRTFに及ぼす影響をサイト1で測定した。HRTFの測定時には、着衣させたFRP樹脂製の胴体にダミーヘッドを装着した。なお、ダミーヘッドの内部は中空で、胴体の下側は音響的に開放されている。その結果、図14に示すように、後頭部に比較的大きな開口部があっても、ダミーヘッドの水平面HRTFのSDは計測耳の対側後方で最大で3.9 dBしか変わらず、143点の音源位置を平均すると、後頭部の穴の有無によるSDは0.9 dBであった⁽⁷²⁾。

3.5 ダミーヘッド形状の再現精度の影響

実頭1と2 (RH1, RH2) については、石膏を用いて取った実頭の型から作成した、2種類のダミーヘッドがある。一つは、FRP樹脂とシリコンを別々に型に流しこんで骨格部分と

図14 サイト1で計測した実頭とダミーヘッドと穴開きダミーヘッドの間のSD

表皮部分を作成し、FRPの骨格にシリコン表皮をかぶせた2層構造の精密ダミーヘッド(DH1a, DH2a)である。このダミーヘッドには頭髪をつけてある。もう一つは、硬質発泡ポリウレタンを型に流しこんで作成した簡易ダミーヘッド(DH1b, DH2b)である。このダミーヘッドはスキンヘッド状である⁽⁷³⁾。

サイト1で計測した実頭と2種類のダミーヘッドおよびB&KのHATS(DH0)のHRTFのSDを図15に示す。実頭とその2種類のダミーヘッドの3者間のSDは、ダミーヘッドの材質等が異なっても頭髪があってもスキンヘッドでも約4.5 dB, 異なる「頭」の間のSDは約6 dB, Brüel & KjærのHATSと実頭の間のSDは約7 dBであった^{(56), (62), (73), (74)}。

ダミーヘッドの物理的形状の再現精度については光計測装置を用いて別途調べたところ、型取りをしたにもかかわらず、形状は最大で10 mm程度異なっていた⁽⁷³⁾。これは、重い石膏を柔らかな頬部などに附着させると、重力の影響で形状がひずんでしまうことと、ダミーヘッドを構成する物質が硬化する際に収縮することなどが原因である。

実頭2(RH2)については、MRIで頭部の三次元形状を計測し、そのデータから光造形装置で成型したエポキシ製のダミーヘッド(DH2c)および石膏製のダミーヘッド(DH2d)もある。サイト2で計測した実頭2とこれらのダミーヘッドのHRTFのSDは5.4 dB(水平面と正中面)、2種類のダミーヘッド間のSDは3.4 dBであった。形状が同じDH2cとDH2dの間のSDは小さい。

図15 サイト1で計測した実頭と2種類のダミーヘッドおよびB&KのHATSの間のSD

3. 6 耳介の左右対称性

実頭の形状は左右対称ではない。特に、耳介と耳甲介腔の形状は左右で大きく異なる場合もある。また、市販のダミーヘッドの形状はほぼ左右対称であるが、よく見ると耳介と耳甲介腔の形状は左右対称ではない。そのため、実頭でもダミーヘッドでも、測定された左右の耳のHRTFは対称にはならない。図13に示したRH2とDH2cの左右のHRTFのSDはそれぞれ5.7 dBと6.3 dB(水平面と正中面)であった。なお、最近、完全な左右対称性を持つダミーヘッドが開発されたが^{(75), (76)}、このようなダミーヘッドを用いれば、HRTF計測系の問題点の発見も容易になる。

このようなヒトの左右の外耳の非対称性は偶然によるもので、メンフクロウのように左右の外耳道入口の高さを違って高い木の枝から地面を駆け回る小動物が出す音を高精度に定位しやすくしている⁽⁴⁷⁾、といった積極的な理由はないと思われる。左右の外耳の非対称性が聴こえにどのように影響しているのかについては後述する。

4. バイノーラル信号による音像定位

本章では、様々なHRTFが畳みこまれたバイノーラル信号を用いた音像定位実験の結果について述べる。特に、従来あまり行われてこなかった、頭部運動を反映した動的バイノーラル信号との比較について述べる。

4. 1 実験方法

音像定位実験は実頭受聴、ダミーヘッド受聴、聴覚ディスプレイ受聴の3種類の方法で行った(図16)。実頭受聴は、計測サイト1あるいは計測サイト3の中に設置したスピーカアレーの中心に被験者自身が座り自分の耳で直接提示音を聴く方法である。ダミーヘッド受聴は、テレヘッド(TeleHead)^{(62), (73), (77), (78)}と呼ばれる高速かつ静粛に被験者の頭部運動に追従するダミーヘッドをスピーカアレーの中心に置き、そのダミーヘッドの両耳に設置したマイクロホンの出力を別室でイヤホンを通じて提示音を聴く方法である。なお、ダミーヘッドは被験者自身の頭部形状に基づいて作成したそっくりダミーヘッドである。聴覚ディスプレイ受聴は、頭部運動に追従して時々刻々と変化するHRTFを畳みこんで合成した動的バイノーラル信号^{(79), (80)}をイヤホンを通じて聴く方法である。

いずれの場合も、被験者に頭部運動を許さない頭部静止条件と、積極的に頭部運動を許す頭部運動条件での比較を行った。実頭受聴では頭部静止は被験者への教示だけで被験者の頭部は完全に静止していない。一方、ダミーヘッド受聴および聴覚ディスプレイ受聴では、被験者の頭部に設置したモーションセンサを遮断したので、ダミーヘッドは完全に静止した状態となり、被験者は静的バイノーラル信号を受聴することになる。頭部運動条件では、被験者に自発的に頭部を動か

図16 3種類の音像定位実験の概略 (a) 実頭受聴, (b) ダミーヘッド受聴, (c) 聴覚ディスプレイ受聴.

すように教示するだけで、動かし方などに制約は与えていない。しかし、大多数の被験者は頭部をゆっくりと±数十°程度振るだけで、音像が正面や真横に来るように頭部方向を合わせてはいない。つまり、頭部が持つ指向性パターンの最大利得点やヌルポイントを利用しているわけではない。

刺激音は持続時間3秒ないし5秒の白色雑音で、約70 dB SPLないし80 dB SPLで呈示した。使用したイヤホンはHDA200^{(81), (82), (83)}で、周波数特性の補正も外耳道特性の補正も行っていない。1セッションの実験では各方向から5回ずつランダムな順序で刺激音を呈示した。また、セッションごとに刺激音の呈示順序は変えた。各被験者は、各実験条件について、それぞれ4セッションの実験を行った。したがって、被験者一人当たり各方向20回の呈示音について回答を得た。被験者の応答は水平面、正中面ともに30°ごとの強制選択で、頭内定位と頭外定位を区別して回答させた。詳細な各実験システムと実験条件については以下の各節に示す文献を参照されたい。

4.2 実頭受聴

実音源を自分の耳で聴いて水平面および正中面の音像定位を行う実頭受聴は、諸条件での実験結果を評価するリファレンスとして不可欠である。音像定位実験の経験がないナイーブな被験者にとって音像が聴こえてくる方向を回答することは必ずしも容易なものではなく、音像定位そのものが苦手な被験者もいる。そのため、被験者のスクリーニングを兼ねた、頭内定位と頭外定位の違いや音像が聴こえてくる方向の違いを確認させる実頭による受聴実験の実施は重要である。

図17は実頭受聴の結果の一例である。横軸は提示した音像の角度、縦軸は知覚された音像の角度で、赤線は正しい定位、青線は前後誤りに対応する位置を示す。同図に示されるように音像はすべて頭外に定位しているが、定位正解率は100%ではない。また、頭部静止条件と頭部運動条件の差は少ない。これは、上述したように、頭部静止条件でも頭部が完全に静止していないことも影響しているためと考えられる。

図17 実頭受聴による水平面と正中面音像定位実験結果の一例 頭部静止条件(still)と頭部運動条件(move)を示す。正中面での呈示仰角は正面下方(-30°)から真上(90°)までである。

4.3 ダミーヘッド受聴による音像定位

まず、二つのマイクロホンを距離 D だけ離してテレヘッドに装着し、実音源から呈示した刺激音をこのステレオマイクロホンで収音したバイノーラル信号をイヤホンで呈示して水平面の音像定位実験を行った⁽⁷⁰⁾。頭部がないので、バイノーラル信号に含まれる方位情報は主としてITDだけになる。なお、この実験で用いたステレオマイクロホンは図11(b)に示すもので、図11(a)と比べてマイクロホンの周囲の構造物を少なくしてある。なお、実験時にはフレーム等は吸音材で覆った。

水平面の音像定位実験結果の一例を図18に示す。同図および以降の図で、青色部分は頭内定位、赤色部分は頭外定位した回答数に比例している。ステレオマイクロホンの間隔を両耳間距離の $D = 165 \text{ mm}$ とした場合、静止条件ではほとんどの音像は頭内定位し前後誤りも多かった。運動条件でもほとんどの音像は頭内定位したが、前後誤りは減少した。一方、ステレオマイクロホンの間隔を両耳間の測地線距離である $D = 300 \text{ mm}$ とした場合、静止条件でも頭外定位する音像が大半を占めたが、前後誤りは多かった。運動条件では真正面と真後ろ以外の音像は頭外定位し、前後誤りは激減した。ただし、これらの音像は水平面ではなく、水平面よりも高い位置に定位した。このように、頭部がないステレオマイクロホンであっても、適切なITDがあり頭部運動に追従させれば、音像は頭外に出てそこそこ正しく定位する。

次に、テレヘッドに装着したダミーヘッドの両耳に二つのマイクロホンを設置し、実音源から呈示した音をマイクロホンで収音したバイノーラル信号をイヤホンで呈示して音像定位実験を行った。使用したダミーヘッドは、実頭を型取り

図18 ステレオマイクロホンによる水平面音像定位実験結果の一例 青色は頭内定位, 赤色は頭外定位した応答。

したりMRIで計測した実頭形状から光造形システムで作成した、そっくりダミーヘッドである。ダミーヘッドという物理的な実体があるので、バイノーラル信号にはITDもILDもHRTFも含まれるし、デジタル信号処理を介していないのでそれらは計算上の省略もない。実頭受聴との違いは、頭部形状の差、頭部表面の音響反射率の差、胴部形状の差、および、ヘッドホン周波数特性と外耳道特性である。また、テレヘッドは制御系と機械系における約100 msの運動遅延があるために、頭部運動条件ではこの遅延時間も実頭受聴との違いとなる。知覚可能な遅延時間は60～80 ms以上といわれており⁽⁵⁹⁾、⁽⁸⁴⁾、⁽⁸⁵⁾、この遅延が定位感を低下させる可能性はある。

自分のダミーヘッドを用いた場合の水平面および正中面の音像定位実験結果の一例を図19に示す。頭部静止条件では正中面の定位誤りが多く、水平面でも前後誤りがある。一方、頭部運動条件では正中面も水平面も大幅に定位精度が向上する⁽⁷³⁾、⁽⁸⁶⁾。

他人のダミーヘッドを用いた場合の水平面および正中面の音像定位実験結果の一例を図20に示す。頭部静止条件では、自分のダミーヘッドを用いた場合よりも正中面の定位誤りが多く、水平面での前後誤りも多い。一方、頭部運動条件では、自分のダミーヘッドを用いた場合と同程度に、正中面も水平面も大幅に定位精度が向上する⁽⁷³⁾、⁽⁸⁶⁾。

3. 4で述べた後頭部に開口部がある自分のダミーヘッドを用いた場合の水平面の音像定位実験結果の一例を図21に示す。頭部静止条件では真横から斜め後方にかけての定位誤りがやや増加しているのに対して、頭部運動条件では開口部がないダミーヘッドと同程度に正しい定位精度であった。つまり、後頭部の開口部の影響はほとんど認められない⁽⁷²⁾。

全体の形状を一様に縮小したダミーヘッドを用いた場合の水平面の音像定位実験結果の一例を図22に示す。この被験者は、自分のダミーヘッドを用いた頭部静止条件では、正面と±30°から呈示した音像のいくつかは頭内に定位している。

図19 自分のダミーヘッドによる水平面と正中面音像定位実験結果の一例

図20 他人のダミーヘッドによる水平面と正中面音像定位実験結果の一例

図21 後頭部に開口部がある自分のダミーヘッドによる水平面音像定位実験結果の一例

図22 縮小ダミーヘッドによる水平面音像定位実験の一例
青色は頭内定位, 赤色は頭外定位した応答。

しかし、頭部運動条件では音像は全て頭外に定位し、定位精度も向上している。また、70%に縮小した自分のダミーヘッドを用いた場合、頭部静止条件では頭外定位する割合が多く、前後誤りが多数見られ定位精度も低い。しかし、頭部運動条件では、頭外定位する割合が減るとともに、定位精度も向上している。また、内観報告によれば、70%縮小ダミーヘッドで収録した音像は、あたかも耳が頭の上部についているかのごとく、どの水平角でも水平面よりも高い位置に定位した⁽⁸⁷⁾。

このように、頭部を静止したままでは、自分のそっくりダミーヘッドを用いても定位誤りが多く発生し、真正面の音像は頭内に定位する。一方、ダミーヘッドを頭部運動に追従させて動的バイノーラル信号を聴くと、他人のダミーヘッドであっても、後頭部に穴が開いたダミーヘッドでも、70%縮小したダミーヘッドでも、音像は頭外に出てそこそこ正しく定位する。すなわち、受聴者の頭部運動に追従したHRTFを畳みこんだ動的バイノーラル信号を用いる場合は、これまでに指摘されているような受聴者自身の正確なHRTFを畳みこんだ正しいバイノーラル信号が必要であるという音響的要請はあまり強くないことが分かる。

4.4 聴覚ディスプレイ受聴による音像定位

本節では、実測した実頭のHRTFをデジタル的に畳みこんで合成したバイノーラル信号を用いた音像定位実験について述べる。ダミーヘッドによって収録されたバイノーラル信号は、物理的な形状を持つダミーヘッドのHRIRが全く省略なしに音源信号に畳みこまれた完全なバイノーラル信号であるのに対して、合成バイノーラル信号は不完全である。なぜならば、HRIRの長さは有限であり、頭部運動に伴うHRTFの切替えは1°ごとと離散的であり、それらは10°ごとに実測したHRTFから補完した値を用いているし、有限長のHRIRを切り替えることによって雑音が生じているためである⁽⁸⁸⁾。ま

図23 聴覚ディスプレイ受聴による水平面と正中面音像定位実験結果の一例 正中面での表示仰角は真正面(0°)から真後ろ(180°)までである。イヤホンはHDA200で、実耳応答特性は補正していない。

た、Windows PCで動作させた聴覚ディスプレイは約50~60msの遅延があり⁽⁸⁰⁾、頭部運動条件ではこの遅延時間も実頭受聴との違いとなる。更にドップラー効果も含まれない。

自分のHRTFを畳みこんだ合成バイノーラル信号を用いた水平面および正中面の音像定位実験結果の一例を図23に示す。頭部静止条件の水平面定位では、正面の刺激は頭内定位するとともに前後誤りも生じたがほぼ水平角の定位誤りはなかったのに対し、正中面定位では頭内定位が多く仰角の定位はあいまいであった。一方、頭部運動条件の水平面定位では前後誤りはなくなり正面の頭内定位も激減した。また、正中面定位も真上方向(90°)の近傍を除いて音像は頭外に定位し、定位誤りも減った。このような状況は他人のHRTFを畳みこんだ場合も同様であった⁽⁸⁷⁾、⁽⁸⁸⁾。

これらの結果も、動的バイノーラル信号を用いる場合は、バイノーラル信号に対する音響的要請はあまり強くないことを示唆する。

4.5 イヤホン特性が音像定位に与える影響

バイノーラル信号の再生にはイヤホンを用いるが、音響的な観点から、正確なバイノーラル音響信号を再生するための諸条件が吟味されている。なお、イヤホンは電気音響変換器を総称する用語で、ヘッドホンにはイヤホンの中でヘッドバンドを用いるものを指す⁽⁸⁹⁾、⁽⁹⁰⁾。

外耳道閉塞状態で収録されたバイノーラル信号を再生する場合には、外耳道入口から外を見た音響インピーダンスがイヤホン装着時と非装着時とで等しくなるFECイヤホンが有利であることが分かっている⁽²⁷⁾。このFECイヤホンとしてはK-1000 (AKG) やSR-Lambda pro. (STAX) などの小形のス

図24 3種類のイヤホンで行った正中面の音像定位実験結果の一例 ダミーヘッド受聴の頭部運動条件で行った。

ピーカを耳元に置く構造を持つ開放型のヘッドホンがあり、音像定位実験に好んで利用されてきている。また、耳介開放型の音場提示デバイス^{(91), (92)}も作成されている。しかし、このような開放型イヤホンは構造的に音響的クロストークが大きく、K-1000では最大で-25 dBものクロストークがある⁽⁸²⁾。そのため、音響的にはバイノーラルではなくトランスオーラル受聴状態となる。

また、イヤホンの周波数特性は平坦ではなく、各イヤホンや実耳への装着の仕方によっても大きく変化するため、イヤホンの周波数特性を補正する必要があることも分かっている。そして、被験者ごとにイヤホンを実耳に装着したときの周波数特性をプローブマイクロホンで測定し、その周波数特性を逆フィルタで補償することによって再生される立体音像空間のひずみが少なくなることも報告されている^{(28)~(31), (93), (94)}。

ところが、様々なイヤホンでバイノーラル信号を再生してみると、必ずしも上述したような音響条件を完璧に満たさなくても、三次元音像が再生できることが分かる。図24は、ダミーヘッド受聴の頭部運動条件で行った正中面の音像定位実験結果を、密閉型ヘッドホン(HDA200)、開放型ヘッドホン(K-1000)、挿入型イヤホン(Etymotic Research, ER4S)で比較した結果である。同図に示されるように、必ずしもFEC特性を持つK-1000の定位精度が高いわけでもなく、挿入型イヤホンでもそこそこ正中面定位がなされていることが分かる。また、図25は、聴覚ディスプレイ受聴でHDA200の実耳応答特性を補正した場合の、水平面と正中面の音像定位実験である。同図と図23を比較すると、イヤホンの実耳特性補正は、頭部運動と同様に水平面の定位正解率をわずかに向上させるが頭外定位率の改善効果は頭部運動より小さいこと、正中面では定位正解率と頭外定位率のいずれにおいても、イヤホンの実耳特性補正の効果は頭部運動よりはるかに小さいことが分かる。挿入型イヤホンとイントラコンカ型イヤホンでも同様の結果である^{(95), (96)}。

このように、受聴者の頭部運動に追従したHRTFを畳みこんだ動的バイノーラル信号を用いる場合は、これまでに指摘されているような再生系に対する音響的要請はあまり強くないことが分かる。

図25 HDA200の実耳応答特性を補正した場合の、聴覚ディスプレイ受聴による水平面と正中面の音像定位実験の一例

4. 6 HRTFの左右逆転が音像定位に及ぼす影響

実験プログラムのミスにより、自分のHRTFを左右逆にした合成バイノーラル信号を用いて聴覚ディスプレイ受聴で水平面音像定位実験を行ったことがある。耳介や耳甲介腔や頭部の形状が左右対称であれば、左右のHRTFを入れ替えても問題にならないが、上述したように、実際の頭部形状は左右非対称である。図26に結果の一例を示すが、音像定位結果は左右のHRTFを逆にした場合でもほとんど変わらない。頭外定位正解率は数%の差があるが、有意差はない。この結果は、自分のHRTFの左右差は、水平面音像定位にほとんど寄与しないことを示唆している。

図26 正常なHRTFと左右のHRTFを逆にして合成バイノーラル信号による水平面音像定位実験結果の一例

4.7 イヤホンドライバの逆相接続が音像定位に及ぼす影響

ヘッドホンジャックへのリード線のハンダづけミスにより、ヘッドホン（HDA200）の左耳ドライバを逆相にした状態で、聴覚ディスプレイ受聴で水平面音像定位実験を行ったことがある⁽⁹⁷⁾。正常なHDA200ではすべての音像は十分な距離感を持って正しい位置に頭外定位するが、左側を逆相にしたHDA200での結果は図27に示すように頭部運動条件でも惨憺たるものであった。被験者の内観も、音像は頭外に出るものの、HDA200とは思えないほど頭部の近傍に定位しその位置はあいまい、というものであった。逆相ということは位相が π だけずれることであるから、バイノーラル信号のHRTF振幅スペクトルとILDは保たれているが、ITDは周波数ごとに異なってしまう。その結果、再生された音像の聴こえ方が正常なHDA200を用いた場合とは大きく異なったと考えられる。

図27 正常なHDA200と左側ドライバを逆相接続したHDA200を用いたときの、聴覚ディスプレイ受聴による水平面音像定位実験結果の一例

図28 50歳代の被験者の聴感度特性の一例

4.8 受聴者の聴感度特性が音像定位に及ぼす影響

多くの音像定位実験では聴力検査の結果が正常な学生や成人が被験者を務めていると思われる。労働安全衛生法による健康診断における聴力検査は1 kHzと4 kHzだけで行われ、30 dB以上の聴力損失を異常値としている。より詳細に聴感度特性を測てみると、高齢者だけでなく20～30歳代の若者でも高域における聴力損失が著しく大きい者や左右の最小可聴閾値が大きく異なる者が見つかる⁽⁹⁸⁾。このような受聴者の聴感度特性は、どのような影響を音像定位に及ぼすのだろうか。

図28は50歳代の筆者の聴感度特性で、4～12 kHzでは最小可聴閾値が高く16 kHz以上の音は全く聴こえていない。さすがに遮断周波数16 kHzのHPFを通した白色雑音で実頭受聴による音像定位実験を行うとその結果はランダムに近くなったが、通常の白色雑音では健聴者と同様にきちんと音像定位ができ被験者が務まる。また、左右の聴感度特性が大きく異なる被験者も水平面定位が偏ることはない。これは、ある周波数の最小可聴閾値が20 dB高いとしても、いわゆるリクルートメント現象により聴覚系内で音圧とラウドネスのマッピングがとられるためとも考えられる。すなわち、通常の70から80 dB SPLといった音圧の刺激音に対しては、その周波数成分のラウドネスは必ずしも20 dB低下しないためであろう。あるいは、局所的なHRTFスペクトルの山と谷が保持されていればいいのかもかもしれない。いずれにせよ、詳細は不明である。

高齢者が増加しつつあるということは高域の聴感度が低い人々が増加しつつあることと等価であり、このような聴感度特性とバイノーラル信号などによる立体音像の聴こえとの関係や音像定位実験の被験者選択など検討は今後の課題である。

5. おわりに

HRTFの計測とバイノーラル信号による立体音像再生にかかわる諸問題について、様々な実験データに基づいて論考した。そして、いくつかの今後の課題を示すとともに、次の三点を指摘した。(1)現在のHRTF計測データは必ずしも満足のいく精度のものではなく、様々な配慮を払った音響計測が必

要である。(2) HRTFの振幅スペクトル距離値であるSDではHRTFの差や立体音像の聴こえ方の差を必ずしもうまく評価できず、より有効な物差しが必要である。(3) 受聴者の頭部運動に追従する動的バイノーラル信号を用いる場合、HRTFやバイノーラル信号の再生系に対する音響的厳密性を緩和できる。なぜ緩和できるのかという構成的な理由は不明であり、今後の研究課題である。本稿では全く触れなかったが、壁などからの初期反射や後部残響成分も立体音場の聴こえ方に影響する^{(99)~(102)}。いずれにせよ、このようなHRTFを操る技術を更に発展させることによって、三次元音像を自由自在にレンダリングするソフトウェア“Otoshop”がリリースされ、超臨場感のある音を手軽に楽しめる日も来るであろう。

なお、音像定位における聴覚刺激と視覚刺激との相互作用、および、音像定位にかかわる聴覚神経生理学については割愛したが、いずれも立体音像の聴こえ方をより深く理解するには不可欠な項目であり、興味のある方は文献(44)、(45)、(103)を参考にされたい。また、バイノーラル方式以外のトランスオーラル方式^{(104)~(106)}や波面合成方式^{(107)~(109)}による立体音場再生も有望な技術であり、アプリケーションに応じた使い分けが必要である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(18300042)および、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究による。長時間にわたるHRTF計測および種々の音像定位実験は、東京工業大学大学院総合理工学研究科の相良洋行氏と遠藤渉氏、および、富山県立大学の青山裕樹氏、清水奨太氏、森川大輔氏と松永悟行氏の協力を得た。また、HRTFの物差しの比較は山端直樹氏、ステレオマイクロホンの実験は島倉希氏の協力を得た。彼らをはじめとする平原研究室の学生諸子に感謝する。また、東北大学電気通信研究所における幾度ものHRTFの計測を御支援頂いた鈴木陽一教授、岩谷幸雄准教授、矢入聡助教と鈴木・岩谷研究室の学生諸子にも感謝する。

文 献

- (1) J. Blauert, Spatial Hearing - The Psychophysics of Human Sound Localization -, Revised Edition, pp.81-84, The MIT Press, Cambridge, 1997.
- (2) 渡邊貫治, 岩谷幸雄, 行場次郎, 鈴木陽一, “仮想音環境のための頭部伝達関数コーパス,” FIT2005, no.LK-010, pp.237-240, Sept. 2005.
- (3) 東北大学HRTFデータベース,
<http://www.ais.riec.tohoku.ac.jp/lab/db-hrtf/index-j.html>
- (4) 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向及び仰角方向に関する頭部伝達関数の補間,” 音響誌, vol.57, no.11, pp.685-692, 2001.
- (5) T. Nakado, T. Nishino, and K. Takeda, “Head-related transfer function measurement in sagittal and frontal coordinates,” Acoust. Sci. Technol., vol.29, no.5, pp.335-337, 2008.
- (6) 名古屋大学HRTFデータベース,
<http://www.sp.m.is.nagoya-u.ac.jp/HRTF/index-j.html>
- (7) 長岡技術科学大学HRTFデータベース,
<http://audio.nagaokaut.ac.jp/hrtf/>
- (8) W. Gardner and K. Martin, “HRTF measurements of a KEMAR,” J. Acoust. Soc. Am., vol.97, no.6, pp.3907-3908, 1995.
- (9) MIT Media Lab., HRTF of a KEMAR Dummy-Head,
<http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- (10) IRCAM, LISTEN HRTF DATABASE,
<http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/>
- (11) V. Algazi, R. Duda, D. Thompson, and C. Avendano, “The CIPIC HRTF database,” Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, pp.99-102, 2001.
- (12) UC-Davis, The CIPIC HRTF Database,
http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL_html/CIL_HRTF_database.htm
- (13) B. Katz, “Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. I. Rigid model calculation,” J. Acoust. Soc. Am., vol.110, no.5, pp.2440-2448, 2001.
- (14) 角張 勲, 阿部一任, 寺井賢一, “高精度頭部3次元モデルを用いたHRTF解析手法の検討,” 音響論集, pp.513-514, Sept. 2003.
- (15) M. Otani and S. Ise, “Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method,” J. Acoust. Soc. Am., vol.119, no.5, pp.2589-2598, 2006.
- (16) P. Mokhtari, H. Takemoto, R. Nishimura, and H. Kato, “Comparison of simulated and measured HRTFs: FDTD simulation using MRI head data,” AES convention paper 7240, 123rd Convention, NY, USA, Oct. 2007.
- (17) E. Wenzel, “Localization in virtual acoustic displays,” Presence, vol.1, no.1, pp.80-107, 1992.
- (18) H. Møller, “Fundamentals of binaural technology,” Appl. Acoust., vol.36, no.3-4, pp.171-218, 1992.
- (19) 三好正人, “音場を創る,” 音響誌, vol.52, no.6, pp.466-469, 1996.
- (20) 福留公利, “バイノーラル制御技術の原理・歴史と現状,” 音響誌, vol.61, no.7, pp.374-379, 2005.
- (21) 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定,” 信学論(A), vol.J84-A, no.3, pp.260-268, March 2001.
- (22) 西野隆典, 田島英和, 米田成吾, 武田一哉, 板倉文忠, “クラスタリング手法に基づく汎用頭部伝達関数の作成と評価,” 信学技報, EA2001-12, pp.1-8, May 2001.
- (23) 西塔宏二, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “定位感に基づいて勝ち抜き選択されたHRTFによる音像定位,” FIT2005, no.K-012, pp.381-383, Sept. 2005.
- (24) 飯田一博, 中村一啓, “正中面の頭部伝達関数の非個人化に関する一考察,” 音響論集, pp.297-298, Sept. 2000.
- (25) 松井健太郎, 安藤彰男, “ICAを用いた個人性頭部伝達関数の推定に関する検討,” 音響論集, pp.605-606, Sept. 2008.
- (26) T. Nishino, N. Inoue, K. Takeda, and F. Itakura, “Estimation of HRTFs on the horizontal plane using physical features,” Appl. Acoust., vol.68, no.8, pp.897-908, 2007.
- (27) H. Møller, D. Hammershøi, C. Jensen, and M. Sørensen, “Transfer characteristics of headphones measured on human ears,” J. Audio. Eng. Soc., vol.43, no.4, pp.203-217, 1995.
- (28) 小澤賢司, 金澤永治, 鈴木陽一, “ヘッドホンを用いたバイノーラル再生における個人性補正の効果,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, no.3, pp.949-956, 2000.
- (29) 渋谷亮輔, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “ヘッドホンにおける個人性を加味したFEC特性の検証,” 信学技報, EA2003-60, pp.21-26, Aug. 2003.
- (30) 岩谷幸雄, “バイノーラル収録・再生における課題—ヘッドホンの自由空間等価特性の影響—,” 音響誌, vol.61, no.7, pp.386-391, 2005.
- (31) 飯田一博, 松田潤一, 村瀬敦信, 森本政之, “ヘッドホン3D音響再生における外耳道伝達関数補正の効果と非個人化,” 音響論集, pp.561-562, Sept. 2002.
- (32) H. Wallach, “On sound localization,” J. Acoust. Soc. Am., vol.10, pp.270-274, 1939.
- (33) H. Wallach, “The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization,” J. Exp. Psychol., vol.27, no.4, pp.339-368, 1940.
- (34) R. Thurlow and S. Runge, “Effect of induced head movement in localization of direction of sound,” J. Acoust. Soc. Am., vol.42, no.4, pp.480-488, 1967.
- (35) R. Thurlow and S. Runge, “Head movements during sound localization,” J. Acoust. Soc. Am., vol.42, no.2, pp.489-493, 1967.
- (36) 川浦淳一, 鈴木陽一, 浅野 太, 曾根敏夫, “頭部伝達関数の模

- 擬によるヘッドホン再生音像の定位,” 音響誌, vol.45, no.10, pp.756-766, 1989.
- (37) S. Perrett and W. Noble, “The effect of head rotations on vertical plane sound localization,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.102, no.4, pp.2325-2332, 1997.
- (38) S. Perrett and W. Noble, “The contribution of head motion cues to localization of low-pass noise,” *Perception & Psychophysics*, vol.59, no.7, pp.1018-1026, 1997.
- (39) F. Wightman and D. Kistler, “Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.105, no.5, pp.2841-2853, 1999.
- (40) 稲永潔文, 山田祐司, 小泉博司, “頭部運動による動的頭部伝達関数を模擬したヘッドホンシステム,” 信学技報, EA-94-94, pp.1-8, March 1995.
- (41) 植松 尚, 柏野牧夫, 平原達也, “頭外音像定位における自発的な頭部回転の影響,” 音響論集, pp.501-502, Oct. 2001.
- (42) M. Kato, H. Uematsu, M. Kashino, and T. Hirahara, “The effect of head motion on the accuracy of sound localization,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.24, no.5, pp.315-317, 2003.
- (43) A. Kudo, H. Higuchi, H. Hokari, and S. Shimada, “Improved method for accurate sound localization,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.27, no.3, pp.134-146, 2006.
- (44) T. Yin, “Neural mechanisms of encoding binaural localization cues in the auditory brainstem,” in *Integrateve Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, D. Oertel, R. Fay and A. Popper, eds., pp.99-159, Springer-Verlag, New York, 2002.
- (45) J. Middlebrooks, L. Xu, S. Furukawa, and B. Mickey, “Location signaling by cortical neurons,” in *Integrateve Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, D. Oertel, R. Fay, and A. Popper, eds., pp.319-357, Springer-Verlag, New York, 2002.
- (46) 菅乃武男, “聴覚野の機能的構成,” 生体の科学, vol.31, no.6, pp.466-473, 1980.
- (47) 小西正一, “フクロウの音源定位の脳機能,” 科学, vol.60, no.1, pp.18-28, 1990.
- (48) A. Honda, H. Shibata, J. Gyoba, K. Saitou, Y. Iwaya, and Y. Suzuki, “Transfer effects on sound localization performances from playing a virtual three-dimensional auditory game,” *Appl. Acoust.*, vol.68, no.8, pp.885-896, 2007.
- (49) P. Hofman, J. G. van Riswick, and A. van Opstal, “Relearning sound localization with new ears,” *Nat. Neurosci.*, vol.1, no.5, pp.417-421, 1998.
- (50) J. Gold and E. Knudsen, “A site of auditory experience - dependent plasticity in the neural representation of auditory space in the Barn owl's inferior colliculus,” *The Journal of Neuroscience*, vol.20, no.9, pp.3469-3486, 2000.
- (51) 上野佳奈子, 土屋はるひ, 伊勢史郎, 大谷 真, “音の定位と探索における学習に関する研究,” 音響学聴覚研資, vol.36, no.7, H-2006-115, pp.645-650, 2006.
- (52) 本多明生, 柴田 寛, 行場次朗, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 大内 誠, “三次元聴覚ディスプレイ研究の新展開 -聴覚VRゲームによる転移効果-,” 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol.12, no.4, pp.487-496, 2007.
- (53) T. Nakado, T. Nishino, and K. Takeda, “Head-related transfer function measurement in sagittal and frontal coordinates,” *Acoust. Sci. & Technol.*, vol.29, no.5, pp.335-337, 2008.
- (54) M. Morimoto, K. Iida, and M. Itoh, “Upper hemisphere sound localization using head-related transfer functions in the median plane and interaural differences,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.24, no.5, pp.267-275, 2003.
- (55) K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki, and M. Morimoto, “Median plane localization using parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues,” *Appl. Acoust.*, vol.68, no.8, pp.835-850, 2007.
- (56) 平原達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹, “頭部伝達関数論考,” 音響学聴覚研資, vol.38, H-2008-4, pp.19-24, 2008.
- (57) 福満英章, 榎本国次, 平原達也, “マイナスdBの無響室,” 音響技術, vol.31, no.4, pp.54-60, 2002.
- (58) Y. Suzuki, F. Asano, H. Kim, and T. Sone, “An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.97, no.2, pp.1119-1123, 1995.
- (59) 矢入 聡, “頭部運動感応型聴覚ディスプレイのシステム遅延に関する研究,” 東北大学学位審査博士論文, pp.11-39, 2006.
- (60) 相良洋行, 戸嶋巖樹, 平原達也, “HRTF 測定時の頭部の動き,” 音響論集, pp.571-572, Sept. 2005.
- (61) 感覚・知覚実験法, 内川恵二, 岡嶋克典(編), p.90, 朝倉書店, 東京, 2008.
- (62) 平原達也, 戸嶋巖樹, 川野 洋, 青木茂明, “頭部運動に追従するダミーヘッドシステム-テレヘッドII-,” 人工知能学会第18回AIチャレンジ研究会資料, pp.51-58, 2003.
- (63) H. Møller, M. Sørensen, D. Hammershøi, and C. Jensen, “Head-related transfer functions of human subjects,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol.43, no.5, pp.300-321, 1995.
- (64) K. Riederer, “Effect of head movements on measured head-related transfer functions,” *Proc. of the 18th International Congress on Acoustics*, pp.795-798, Kyoto, 2004.
- (65) D. Zotkin, R. Duraiswami, E. Grassi, and N. Gumerov, “Fast head-related transfer function measurement via reciprocity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.120, no.4, pp.2202-2215, 2006.
- (66) B. Katz and D. Begault, “Round robin comparison of HRTF measurement systems : Preliminary results,” *Proc. of the 19th International Congress on Acoustics*, pp.2-7, Madrid, 2007.
- (67) B. Moore and B. Glasberg, “Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.74, no.3, pp.750-753, 1983.
- (68) 平原達也, “音声工学と聴覚科学—機械の方略と人間の方略—,” 音響誌, vol.53, no.9, pp.714-719, 1997.
- (69) 飯田一博, 伊藤元邦, 森本政之, “方向知覚メカニズムに基づいたHRTFの物理評価指標,” 音響論集, pp.505-508, Sept. 2008.
- (70) 遠藤 渉, 柏野牧夫, 平原達也, “頭部運動に追従するステレオマイクロフォンによる音像定位,” 音響論集, pp.303-304, Sept. 2006.
- (71) J. Blauert, *Spatial Hearing - The Psychophysics of Human Sound Localization* -, Revised Edition, p.71, The MIT Press, Cambridge, 1997.
- (72) 平原達也, “不完全なダミーヘッドによる音像定位,” 音響論集, pp.463-464, Sept. 2005.
- (73) 戸嶋巖樹, 青木茂明, 平原達也, “頭部運動を再現する改良型ダミーヘッドシステム-テレヘッドII-,” 音響誌, vol.62, no.3, pp.244-254, 2006.
- (74) S. Aoki, I. Toshima, and T. Hirahara, “Head-related functions of dummy heads replicated using user's lifecast,” *Proc. 18th International Congress on Acoustics*, vol.I, pp.799-802, Kyoto, 2004.
- (75) 稲永潔文, G. Rasmussen, 利光平大, “IEC60959 準拠HATSの頭部形状に関する検討と考察—左右対称ダミーヘッドの耳介モデルの検討—,” 音響論集, pp.603-604, Sept. 2008.
- (76) 稲永潔文, G. Rasmussen, 利光平大, “IEC60959 準拠HATSの頭部形状に関する検討と考察—左右対称ダミーヘッドの可能性の検討—,” 音響論集, pp.761-762, Sept. 2008.
- (77) I. Toshima, H. Uematsu, and T. Hirahara, “A steerable dummy head that tracks three- dimensional head movement: TeleHead,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.24, no.5, pp.327-329, 2003.
- (78) 戸嶋巖樹, 植松 尚, 青木茂明, 平原達也, “頭部運動を再現するダミーヘッド:テレヘッド,” 音響誌, vol.61, no.4, pp.197-207, 2005.
- (79) 大谷 真, 平原達也, “Windows 上で動作する動的聴覚ディスプレイ,” 音響論集, no.3-Q-31, pp.711-712, March 2007.
- (80) 大谷 真, 平原達也, 伊勢史郎, “汎空間型動的聴覚ディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.4, pp.453-460, 2007.
- (81) T. Hirahara, “Physical characteristics of headphones used in psychophysical experiments,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol.25, no.4, pp.276-285, 2004.
- (82) 青山裕樹, 大谷 真, 平原達也, “聴覚実験用イヤホンの諸特性,” 信学技報, SP2007-28, pp.25-30, July 2007.
- (83) 平原達也, “ヘッドホンの陥穽,” 音響誌, vol.55, no.5, pp.370-376, 1999.
- (84) E. Wenzel, “Effect of increasing system latency on localization of virtual sounds with short and long duration,” *Proc. of the International Conference on Auditory Display (ICAD)* , pp.

- 185-190, 2001.
- (85) 矢入 聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “頭部運動と聴覚ディスプレイのシステム遅延の関係に関する一考察,” 信学技報, EA2005-38, pp.23-28, Aug. 2005.
 - (86) I. Toshima, S. Aoki, and T. Hirahara, “Sound localization using an acoustical telepresence robot: teleHead II,” Presence, vol.17, no.4, pp.365-375, 2008.
 - (87) 平原達也, 相良洋行, 遠藤 渉, “縮小ダミーヘッドによる音像定位,” 音響論集, pp.433-434, March 2006.
 - (88) M. Otani and T. Hirahara, “Auditory artifacts due to switching head-related transfer functions of a dynamic virtual auditory display,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E91-A, no.6, pp.1320-1328, June 2008.
 - (89) 大平郁夫, “オーディオ機器の規格と測定法 (3) —ヘッドホン—,” 音響誌, vol.45, no.7, pp.556-564, 1989.
 - (90) 日本電子機械工業会 (EIAJ) 規格 RC-8140, “ヘッドホン及びイヤホン,” 1998.
 - (91) 渋谷亮輔, 石田泰久, 岩谷幸雄, 坂田真人, 鈴木陽一, “耳介開放型聴覚ディスプレイに関する検討,” 音響学聴覚研資, H-2004-100, pp.573-576, 2004.
 - (92) 渋谷亮輔, 石田泰久, 岩谷幸雄, 坂田真人, 鈴木陽一, “小型平面スピーカを用いた複合現実感聴覚ディスプレイの開発,” FIT2004, no.LK-015, pp.285-286, 2004.
 - (93) 島田正治, “ヘッドホンの頭外音像定位技術,” 音響誌, vol.61, no.7, pp.392-397, 2005.
 - (94) 吉田正亮, 工藤彰洋, 穂刈治英, 島田正治, “頭外音像定位における外耳道伝達関数補償の影響,” 信学論 (A), vol.J92-A, no.1, pp.1-11, Jan. 2009.
 - (95) 青山裕樹, 大谷 真, 平原達也, “イヤホン呈示刺激による音像定位,” 音響論集, pp.515-516, Sept. 2007.
 - (96) 平原達也, 青山裕樹, 大谷 真, “動的バイノーラル信号の音像定位におけるイヤホンの実耳応答補正の効果,” 音響論集, pp.511-512, Sept. 2008.
 - (97) 平原達也, “はじめての聴覚実験 - デジタルな世界に棲む人々に伝えたい, 音を鳴らし, 測り, 聴き比べるときのお約束 -, ” 音響誌, vol.65, no.2, pp.81-86, 2009.
 - (98) 森川大輔, 平原達也, 大谷 真, “被験者の聴感度特性と5.1ch方式による再生音の臨場感の関係,” 信学技報, EA2008-80, pp.91-96, Oct. 2008.
 - (99) N. Durlach, A. Rigopulos, X. Pang, W. Woods, A. Kulkarni, H. Colburn, and E. Wenzel, “On the externalization of auditory images,” Presence, vol.1, no.2, pp.251-257, 1992.
 - (100) D.R.Begault, “Perceptual effects of synthetic reverberation on three-dimensional audio systems,” J. Audio Eng. Soc., vol.40, no.11, pp.895-904, 1992.
 - (101) B. Rakerd and W. Hartmann, “Localization of sound in rooms. III. Onset and duration effects,” J. Acoust. Soc., Am. vol.80, no.6, pp.1695-1706, 1986.
 - (102) D. Mershon, W. Ballenger, A. Little, P. McMurtry, and J. Buchanan, “Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance,” Perception, vol.18, no.3, pp. 403-416, 1989.
 - (103) 小宮山 撰, “視覚と聴覚による音像知覚,” 音響誌, vol.52, no.1, pp.46-50, 1996.
 - (104) 浜田晴夫, “基準的取音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成,” 音響誌, vol.39, no.5, pp.337-349, 1983.
 - (105) M.Miyoshi, “Inverse filtering of room acoustics,” IEEE Trans. ASSP, vol.36, no.2, pp.145-152, 1988.
 - (106) 猿渡 洋, 立蔵洋介, 鹿野清宏, “M出力N入力の一般的な制御問題とその解法,” 音響誌, vol.61, no.7, pp.380-385, 2005.
 - (107) 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 音響誌, Vol.53, no.9, pp.706-713, 1997.
 - (108) 及川靖広, 馬場貞如, 山崎芳男, “人間の聴覚を考慮した波面合成法による音場制御と音場再現,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, no.3, pp. 919 - 926, 2000.
 - (109) 木村敏幸, 筧 一彦, “波面合成法による立体音場再生におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による波面の合成精度への影響,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.2, pp.191-198, 2007.

(平成21年1月7日受付 平成21年2月12日最終受付)

平原達也 (正員)

昭53北大・工・電子卒, 昭58同大学院博士課程了, 同年日本電信電話公社(現NTT)入社。以来, 横須賀通研, ATR 視聴覚機構研, NTT基礎研, ATR-I, NTT-CS研, ATR 人間情報科学研で音声工学と聴覚科学の研究および研究マネジメントに従事。現在, 富山県立大・工・教授, 東北大・通研・客員教授, 工博, 日本音響学会, 米国音響学会, 日本VR学会各会員, 日本音響学会栗屋潔学術奨励賞受賞, 著書「聴覚・触覚・前庭感覚」など。

大谷 真 (正員)

平11京大・工・建築卒, 平13同大学院修士課程了, 平18同博士課程了, 平18富山県立大・工・博士研究生, 平20より東北大・通研・GCOEフェローとして音場解析・聴覚ディスプレイなどの研究に従事, 工博, 日本音響学会, 米国音響学会, 日本VR学会, など各会員。

戸嶋巖樹

平14東大大学院工学系研究科機械情報修士課程了, 同年NTT入社, 以来現在まで, NTT-CS研にて音響テレプレゼンスロボットなどの研究に従事。平20東工大大学院機械物理工学専攻博士課程了, 工博, 第16回人工知能学会全国大会優秀賞, 第22回日本ロボット学会研究奨励賞受賞, 日本ロボット学会, 日本音響学会, 日本機械学会, IEEE (Robotics and Automation Society) など各会員。