

日本音響学会 編  
音響テクノロジーシリーズ 19

# 頭部伝達関数の基礎と 3次元音響システムへの応用

博士（工学） 飯田 一博 著

コロナ社

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長

東京大学  
博士（工学） 坂本 慎一

編集委員

産業技術総合研究所 工学博士	蘆原 郁	千葉工業大学 博士（工学）	飯田 一博
東北学院大学 博士（情報科学）	岩谷 幸雄	九州大学 博士（工学）	尾本 章
山梨大学 博士（工学）	垣尾 省司	甲南大学 博士（情報科学）	北村 達也
滋賀県立大学 博士（工学）	坂本 眞一	株式会社 ATR-Promotions 工学博士	正木 信夫
龍谷大学 博士（工学）	三浦 雅展		

（五十音順）

（2016年11月現在）

# 発刊にあたって

「音響テクノロジーシリーズ」の第1巻「音のコミュニケーション工学－マルチメディア時代の音声・音響技術－」が刊行されてから20年が経過した。本シリーズは、日本音響学会が刊行する書籍のシリーズとして、「音響工学講座」に続く2番目のシリーズである。またその後、日本音響学会では、新たに「音響入門シリーズ」、「音響サイエンスシリーズ」の編集が開始され、音の世界への入門から応用まで、科学から技術まで、広くウイングを広げつつある。

「音響工学講座」が、大学や専門学校で音響工学を学び、あるいは現場で音響学を応用した仕事に従事する研究者・技術者を対象として、学術分野別に筋の通った教科書として統一的に編集されたシリーズであるのに対して、「音響テクノロジーシリーズ」は、その時々々の音響工学に関係する最先端の分野をとりあげ、その技術を深く理解すべく編集されたシリーズである。東倉洋一初代編集委員長は、これを「従来の研究分野別の構成とは異なり、複数の分野に横断的に係わるメソッド的なシリーズ」と述べている。「音響工学講座」のように分野別のシリーズを縦糸、本シリーズのように分野は違えども共通に適用できる技法や手法をまとめたシリーズを横糸、と喩えられることもある。丈夫な縦糸と横糸が偏りなく、しっかりと組み合わせられることによって、直面する課題の解決に耐えうる盤石の知識基盤が構築できる。

「音響テクノロジーシリーズ」は、シリーズ名に「テクノロジー」をうたっている。テクノロジーとは、実用的な目的のために、知識を応用することやその方法、理論、体系を意味する。本シリーズが扱う音響学は、かかわる分野が非常に幅広い。音波の発生と伝搬は物理現象であり、音波の知覚と認識は、心理学や生理学の領域にある。音楽音響の分野に至っては、楽器の発音機構の理

## ii 発刊にあたって

解には非常に高度な物理的知識が必要であると同時に、芸術の分野にまで踏み込むこともある。そのため、音響学は現代の科学技術の各所に役立てられ、応用されている。本シリーズではこれまで、音のトランスデューサやデジタル処理技術、心理学的測定法のように、音響工学や音響心理学の根幹をなすテーマから、音を用いたイメージング技術やアクティブコントロールのような音の工学的応用を深く掘り下げたテーマ、さらには非線形音響のように最新のトピックを取り扱ってきた。今後は、知識や技術のボーダーレス化に伴い、音響技術の国際化も重要な視点となるだろう。また、広く考えれば、音響学が担うべき役割は、単なる科学技術の領域にとどまらず、人間や社会のシステムにおける位置づけが重要となってくる。そのようなことも鑑み、今後も実学と直結した音響学の魅力を本シリーズで伝えていきたい。最後に、本シリーズの発刊にあたり、企画と執筆に多大なご努力をいただいた編集委員、著者の方々、ならびに出版に際して種々のご尽力をいただいたコロナ社の諸氏に深く感謝する。

2017年2月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長 坂本 慎一

# ま え が き

頭部伝達関数は、ヒトが音の空間特性（特に方向感や拡がり感）を知覚するにあたって中心的な役割を果たす物理量である。頭部伝達関数を応用することにより、時間と空間を超えて3次元的に音を再現したり、任意の仮想音空間を創造したりすることが可能となる。実際にそのようなシステムが開発されつつある。

それにも関わらず、頭部伝達関数の全貌を修得するのに適した書籍はいまのところ見当たらない。筆者自身を省みても、これまで「空間音響学」において頭部伝達関数の概要を述べ、「音響工学基礎論」において3次元音響に関わるデジタル信号処理の一端を紹介したが、これらの記述は断片的であるといわざるをえない。

このような背景のもと、本書では頭部伝達関数の基礎から応用までを視野に入れ、古典から最先端に至る知見を以下のような構成で記述した。

まず序章では、頭部伝達関数の定義や座標系など、本書を読み進めるにあたって必要となる基礎的な項目を述べ、さらに現時点での研究の到達点をまとめた。この章を読むだけでも頭部伝達関数を巡る研究や技術開発の概要を理解できるよう記述した。

2章と3章では、それぞれ水平面内および正中面内の音源による頭部伝達関数と方向知覚について、基礎から最新の研究成果まで詳しく述べた。4章と5章では、頭部伝達関数の個人差、その克服方法（頭部伝達関数の個人化方法）、任意の3次元方向への音像制御方法について、最新の知見を中心に述べた。これらは本書の中核となる章であり、頭部伝達関数の本質を明解に記述するよう心掛けた。

6章から8章では、これまであまりまとまった議論がなされなかった、頭部伝達関数と方向決定帯域、音像距離、音声了解度との関連について述べた。

9章から11章では、頭部伝達関数の測定方法、分析・信号処理方法、さらにデータベースについて、それぞれ説明した。読者が自ら測定、分析を進められるように、できるだけ具体的に記述した。

12章と13章では、3次元音響システムへの応用として、基本原理を詳しく説明したあと、開発が進められているいくつかの3次元聴覚ディスプレイを紹介した。

さらに、8つの節からなる付録を設け、本文では触れられなかった周辺の知見を記した。必要に応じて参照してもらえれば幸いである。

あとがきでは本書のまとめと今後の展望を記した。

各章末に「引用・参考文献」を設けて、引用した論文と書籍を列挙したので、さらに詳しく学習したい読者にはぜひ原典をひもといていただきたい。

本書の刊行にあたっては、多くの方にご協力いただいた。特に、神戸大学の森本政之名誉教授、東京大学の坂本慎一准教授、東北学院大学の岩谷幸雄教授、千葉工業大学の竹本浩典教授、菟木禎史教授には原稿に対して有意義なご意見をいただいた。また、飯田研究室の石井要次君と田中直子さんには、データ整理や文献整理でご協力いただいた。ここに記して深く感謝申し上げます。

本書が、頭部伝達関数や3次元音響システムに関心のある学生諸君の学習に、さらに技術者、研究者の実務に役立つものとなり、この分野の研究開発が一層進むことが筆者の真の希望である。執筆には細心の注意を払ったが、もとより浅学非才の身、お気づきの点があれば、ご指導、ご叱正いただければ幸いです。

2017年 早春 津田沼にて

飯田 一博

# 目 次

## 1. 序 章

1.1 頭部伝達関数とは	2
1.2 頭部伝達関数と頭部インパルス応答	3
1.3 音 源 と 音 像	4
1.4 座 標 系	5
1.5 頭部伝達関数の研究略史——現在の到達点と課題——	7
1.5.1 頭部伝達関数の概念	7
1.5.2 頭部伝達関数の物理的特徴	8
1.5.3 頭部伝達関数の再現による音像方向の再現	8
1.5.4 左右方向の知覚の手掛かり	9
1.5.5 前後上下方向の知覚の手掛かり	9
1.5.6 方向知覚の生理的機構	10
1.5.7 頭部伝達関数のモデル化	10
1.5.8 頭部伝達関数の標準化	11
1.5.9 頭部伝達関数の個人化	11
1.5.10 頭部伝達関数の測定	12
1.5.11 頭部伝達関数の数値計算	12
1.5.12 方向決定帯域とスペクトラルキュー	13
引用・参考文献	14

## 2. 水平面の頭部伝達関数と方向知覚

2.1 水平面の頭部伝達関数	18
2.2 水平面の方向知覚	19
2.2.1 本人の頭部伝達関数による方向知覚	19
2.2.2 他人の頭部伝達関数による方向知覚	21
2.3 左右方向の知覚の手掛かり	23
2.3.1 両耳間時間差	23
2.3.2 両耳間レベル差	25
2.4 コーン状の混同	26
2.5 複数音源による合成音像	27
引用・参考文献	28

## 3. 正中面の頭部伝達関数と方向知覚

3.1 正中面の頭部伝達関数	29
3.2 正中面の方向知覚	30
3.2.1 本人の頭部伝達関数による方向知覚	30
3.2.2 他人の頭部伝達関数による方向知覚	32
3.2.3 正中面の音像再生における3つの問題	34
3.3 前後上下方向の知覚の手掛かり	35
3.3.1 スペクトラルキュー概観	35
3.3.2 スペクトラルキュー詳細	37
3.4 正中面定位における両耳スペクトルの役割	43
3.5 スペクトラルキューの成因	46
3.5.1 耳介の寄与	46
3.5.2 ピークの成因	50
3.5.3 ノッチの成因	53
3.6 頭部伝達関数の学習	56

3.7 音源信号の知識	56
3.8 ノッチ検出の生理的機構	58
3.9 頭 部 運 動	58
引用・参考文献	60

## 4. 頭部伝達関数の個人性

4.1 頭部伝達関数の個人差	63
4.1.1 振幅スペクトルの個人差	63
4.1.2 スペクトラルキューの個人差	65
4.1.3 両耳間時間差の個人差	67
4.1.4 両耳間レベル差の個人差	68
4.2 耳介形状および頭部形状の個人差	71
4.2.1 耳介形状の個人差	71
4.2.2 頭部形状の個人差	73
4.3 頭部伝達関数の標準化	74
4.3.1 ダミーヘッドの頭部伝達関数による方向知覚	74
4.3.2 ロバストな頭部伝達関数による方向知覚	78
4.4 頭部伝達関数の個人化	82
4.4.1 振幅スペクトルの個人化	83
4.4.2 両耳間時間差の個人化	95
4.4.3 両耳間レベル差の個人化	98
4.4.4 今後期待される展開	100
引用・参考文献	100

## 5. 任意の3次元方向の頭部伝達関数と音像制御

5.1 頭部伝達関数の空間的な補間	104
5.2 矢状面間でのノッチとピークの類似性	105

5.3 正中面頭部伝達関数と両耳間差による3次元音像制御	108
5.3.1 実測正中面頭部伝達関数と両耳間差による3次元音像制御	108
5.3.2 正中面パラメトリックHRTFと両耳間時間差による3次元音像制御	111
5.3.3 正中面best-matching HRTFと両耳間時間差による3次元音像制御	113
5.4 矢状面間の合成音像	116
引用・参考文献	118

## 6. 方向決定帯域とスペクトラルキュー

6.1 方向決定帯域とは	120
6.2 方向決定帯域の個人差	121
6.3 方向決定帯域の帯域幅	122
6.4 方向決定帯域とスペクトラルキューの関係	123
引用・参考文献	124

## 7. 距離知覚と頭部伝達関数

7.1 音源距離と音像距離	125
7.2 音像距離に影響を及ぼす物理量	126
7.2.1 音圧レベル	126
7.2.2 反射音の遅れ時間	128
7.2.3 入射方向	129
引用・参考文献	138

## 8. 音声了解度と頭部伝達関数

8.1 両耳マスキングレベル差	139
8.2 入射方向が単語了解度に及ぼす影響	140
引用・参考文献	143

## 9. 頭部伝達関数の測定方法

9.1 測定システムの構成	144
9.2 測定用信号	145
9.3 スピーカ	148
9.4 マイクロホン	148
9.5 被験者	149
9.6 頭部伝達関数の算出方法	150
9.7 短時間測定法	151
引用・参考文献	152

## 10. 頭部伝達関数の信号処理

10.1 両耳間時間差とレベル差の算出方法	153
10.2 スペクトラルキューの抽出方法	154
10.3 頭部インパルス応答と音源信号の畳込み方法	157
10.3.1 時間領域での処理	157
10.3.2 周波数領域での処理	161
引用・参考文献	165

## 11. 頭部伝達関数データベースの比較

11.1 おもな頭部伝達関数データベース	166
11.2 スペクトラルキューの比較	167
11.3 耳介形状の比較	170
引用・参考文献	173

## 12. 3次元音響再生の原理

12.1 ヘッドホンによる耳入力信号の再現	174
12.1.1 基本原理	174
12.1.2 音像制御精度	180
12.1.3 動的手掛かりの導入	183
12.2 2つのスピーカによる耳入力信号の再現	184
12.2.1 基本原理	184
12.2.2 音像制御精度	186
引用・参考文献	190

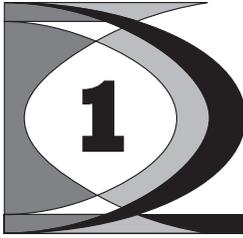
## 13. 3次元聴覚ディスプレイ

13.1 システム構成	191
13.2 コンサートホールの音場シミュレーションへの応用	194
13.3 防災放送の音場シミュレーションへの応用	197
13.4 音源方向探査システムへの応用	200
引用・参考文献	202

## 付 録

A.1 実音源による方向知覚	203
A.2 音波の伝達経路	206
A.3 第1波面の法則	209
A.4 室内音響の予測方法	211
A.5 フーリエ変換	214
A.6 時間窓	218
A.7 耳栓型マイクロホンの作成方法	224

A.8 96 kHz サンプリングによる頭部伝達関数	230
引用・参考文献	232
あ と が き	233
索 引	235



# 序

# 章

ヒトはたった2つの耳で3次元空間の音の方向と距離を知覚している。幾何学的には、 $n$ 次元空間における物体の位置を同定するには $n+1$ 個の観測点が必要である。位置（方向と距離）ではなく方向だけに議論を絞ったとしても、2つの観測点（両耳）で3次元空間の方向を同定することはできない。一体われわれは、何を手掛かりにして音の方向を知覚しているのだろうか。この素朴な問いが頭部伝達関数の研究の出発点である。

音の方向を同定する簡単な方法として、例えば首を左右に振るなど、頭の向きを変えることが思い浮かぶ。音が正面から聴こえてくるように頭の向きを変えれば、その方向が音源方向である。しかし、ヒトは頭を動かすことなく音の方向を知覚できる。むしろ、音の方向を同定するために自発的に頭を動かすことはまれである<sup>1),†</sup>。獲物のたてる音によってその方向を同定して捕獲するメンフクロウでさえ、頭を動かすことを手掛かりとはしていない<sup>2)</sup>。

ヒトが音の方向を知覚するうえで中心的な役割を果たしているのは**頭部伝達関数**（head-related transfer function, **HRTF**）である。普段われわれが聴いている音は否応なく頭部伝達関数の影響を受けている。日常生活において頭部伝達関数の影響を受けないのは（音波を外耳道入口に直接放射する）ヘッドホンやイヤホンによる受聴と（受話器を耳介に当てる）電話での通話ぐらいである。したがって、ヒトの方向知覚メカニズムを解き明かすうえで、頭部伝達関数の研究は必要不可欠といえる。

---

<sup>†</sup> 肩付番号は各章末の引用・参考文献を示す。

また、頭部伝達関数を応用した3次元音響システムにより、ある音場を時間と空間を超えて再現したり、任意の音場を生成したりすることが可能になる。つまり、高精度な音の**仮想現実** (virtual reality, **VR**) や**拡張現実** (augmented reality, **AR**) の実現が期待できる。

このように、聴覚の空間知覚の研究においても、3次元音響システムの開発においても、頭部伝達関数は重要な役割を担っている。それでは、頭部伝達関数の基礎から応用を巡る議論を始めよう。

## 1.1 頭部伝達関数とは

まず、頭部伝達関数を定義する。音波は鼓膜に届く直前に頭や耳介、あるいは胴体の影響を受ける。このような、頭部周辺による入射音波の物理特性の変化を周波数領域で表現したものを**頭部伝達関数**という。音源が受聴者の正面方向にある場合の頭部伝達関数の振幅特性を図1.1に示す。ここで、縦軸の0 dBは頭や耳介がない場合の音圧振幅である。±10 dBを超える特徴的な山(ピーク)や谷(ノッチ)がいくつか存在する。このように、入射音波の強さは周波数によっては10倍を超えたり1/10より小さくなったりする。人は、このようなピークとノッチの影響を受けた音を普段聴いているのである。

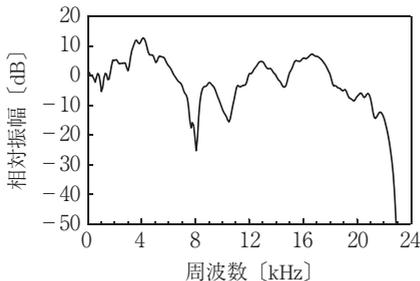


図1.1 正面方向の頭部伝達関数の振幅特性の一例

頭部伝達関数  $H_{l,r}$  は式 (1.1) で定義される。

$$H_{l,r}(s, \alpha, \beta, r, \omega) = \frac{G_{l,r}(s, \alpha, \beta, r, \omega)}{F(\alpha, \beta, r, \omega)} \quad (1.1)$$

ここで、 $G_{l,r}$  は自由音場における音源から受聴者の左右の外耳道入口もしくは鼓膜までの伝達関数<sup>†</sup>、 $F$  は自由音場における受聴者がいない状態での音源から受聴者の頭部中心に相当する位置までの伝達関数である。添え字  $l, r$  は耳の左右、 $s$  は受聴者、 $\alpha$  は音源の側方角、 $\beta$  は上昇角、 $r$  は距離、 $\omega$  は角周波数をそれぞれ表す。ただし、距離  $r$  は 1 m を超えると頭部伝達関数には影響しない<sup>5)</sup>。つまり、頭部伝達関数は、自由音場を基準として、受聴者の頭や耳介などの存在によって生じる音圧の変化を周波数の関数として表したものである。したがって、頭部伝達関数の相対振幅が正であることは、頭や耳介の存在によって自由音場と比較して音圧振幅が増大し、逆に負であることは減少することを意味する。なお、頭部伝達関数の位相特性については、両耳間の相対的な位相差さえ保たれていれば方向知覚において重要ではないことが示されているため<sup>6)</sup>、本書では扱わない。

頭部伝達関数は音波の入射方向により異なる。それは頭部や耳介の形状が前後左右上下のいずれについても非対称であるからである。この入射方向依存性を手掛かりとして、ヒトは音の方向を知覚している。その詳細については3章で詳しく述べる。また、入射方向が同じでも、受聴者の頭部や耳介の形状によって頭部伝達関数は異なる。3次元音響再生の実用化にとって、この個人依存性が大きな壁となって立ちはだかるのであるが、その詳細と解決への取組みについては4章で詳しく述べる。

## 1.2 頭部伝達関数と頭部インパルス応答

先に述べたように、頭部伝達関数は頭部による音波の物理特性の変化を周波数領域で表したものであるが、時間領域で表現したほうが便利な場合もある。

<sup>†</sup> 頭部伝達関数の定義において、観測点を外耳道入口ではなく鼓膜位置とする考え方もある<sup>3)</sup>。しかし、頭部伝達関数を測定する際にマイクロホンが鼓膜の直前に設置することは技術的に困難であり、また、外耳道内の伝達関数は入射方向に依存しないので<sup>4)</sup>、閉塞した外耳道入口で定義されることが多い。

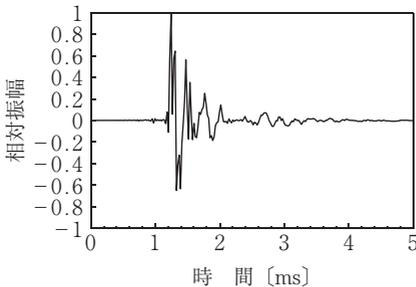
なお、時間領域で表現したものを**頭部インパルス応答** (head-related impulse response, **HRIR**) という。頭部伝達関数と頭部インパルス応答はフーリエ変換対の関係にある。

式 (1.1) で頭部伝達関数を定義したが、実際には式 (1.2) のように、頭部インパルス応答を測定し、それをフーリエ変換によって求めることが多い。

$$H_{l,r}(s, \alpha, \beta, r, \omega) = \frac{\mathcal{F}[g_{l,r}(s, \alpha, \beta, r, t)]}{\mathcal{F}[f(\alpha, \beta, r, t)]} \quad (1.2)$$

ここで、 $g_{l,r}$  は自由音場における音源から受聴者の左右の外耳道入口もしくは鼓膜までのインパルス応答、 $f$  は自由音場における受聴者がいない状態での音源から受聴者の頭部中心に相当する位置までのインパルス応答、 $\mathcal{F}$  はフーリエ変換である。

音源が受聴者の正面方向にある場合の頭部インパルス応答を **図 1.2** に示す。入射方向にもよるが、応答はおおよそ 2～3 ms 以内で収束する。



**図 1.2** 正面方向の頭部インパルス応答の一例

### 1.3 音源と音像

つぎに音像の概念を説明する。**音源** (sound source) から発せられた音波が鼓膜に到達すると、ヒトにはさまざまな感覚が生まれる。音波によりヒトが知覚したものの総体を**音像** (sound image) あるいは**聴覚事象** (auditory event) という。音源は物理的な存在であるが、音像は知覚現象により生じる心理的な存在である。音像には、時間的性質 (残響感, リズム感, 持続感など), 空間

的性質（方向感，距離感，広がり感など），質的性質（大きさ，高さ，音色など）があるが，音像の空間的な位置，すなわち音像の方向と距離を知覚することを**音像定位**（sound image localization）という。

日常生活では音源の位置に音像を定位することが多いが，つねに音源位置に音像を定位するとは限らない。例えば狭帯域信号に対しては，音源が前方にあるのに後方に定位したり，逆に後方の音源を前方に定位したりすることがある。また，音源方向に関わらず特定の方向にしか知覚しない場合もある。音像の距離についても実際の音源距離とは異なることがある。これらの現象については3，6，7章で詳しく述べる。

一方，仮想現実や拡張現実のように，意図的に音源とは異なる位置に音像を定位させる場合もある。例えば，ヘッドホンを用いた3次元音響再生システムでは，物理的な音源位置は左右の耳の近傍であるが，音像を3次元空間の任意の位置に生じさせることを目的としている。

## 1.4 座 標 系

座標系についても説明しておこう。読者には，**図 1.3** に示す**方位角**（azimuth） $\phi$  と**仰角**（elevation） $\theta$  を用いる**球座標系**（spherical-coordinate system）が馴染み深いと思われる（地球儀の経度が方位角，緯度が仰角に対応する）。

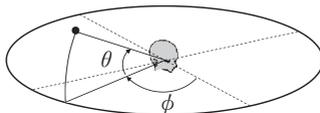


図 1.3 球座標系

しかし，方位角と仰角は聴覚の方向知覚メカニズムとは良く対応しない。聴覚の方向知覚メカニズムは，左右方向の知覚と前後上下方向の知覚で異なり（2，3章参照），これらと対応の良い座標系を用いるのが妥当である。そこで，本書では**図 1.4** に示す**耳軸座標系**（interaural-polar-axis coordinate system）をおもに用いる。

# あ と が き

頭部伝達関数の基礎と3次元音響システムへの応用について、筆者の力の限りをつくして執筆した。

改めて振り返ると、頭部伝達関数の研究が本格的に始まった1960年代からこの50年の間に、世界のさまざまな国の研究者が多くの研究成果を上げた。特に、頭部伝達関数の基礎についての知見はかなり蓄積されたといってよい。

しかしながら、その応用面では大きなブレイクスルーは見当たらない。現時点で、コンシューマ向けに実用化された本当の意味での3次元音響システムは、世界のどこにも存在しないといってよいだろう。その理由は、頭部伝達関数の個人差問題を克服できていないからである。

Sottek and Genuit は1999年3月のDAGA meeting (Berlin) で以下のようなBlauertのシナリオを紹介している<sup>†</sup>。

Blauert showed a scenario on personalization of HRTF, “A person who enters a multimedia shop is scanned by a camera and some instants later his/her individual HRTF set is ready to be sold for the use in advanced 3D applications”.

その後、18年が経過しようとしているが、このシナリオはいまだ実現されていない。現時点では、残念ながら「特定の受聴者にしか実感できない3次元音響システム」の域を出ていない。

一方で、頭部伝達関数の個人化方法の研究は活発に進められている（本書で取り上げた研究のほかにも世界中で多くのチャレンジがある）。いずれ、ス

---

<sup>†</sup> R. Sottek and K. Genuit : Physical modeling of individual head-related transfer functions, DAGA, Berlin (1999.3)

マートホンのカメラで撮影した頭部や耳介の画像から受聴者に適した頭部伝達関数が生成され、ネット経由で受聴者に届けられる日が訪れるだろう。これなら眼鏡を作るよりもずっと簡単である。

折しも2016年はVR元年といわれ、3次元音響システムへの期待は高まっている。VRはエンターテインメントのみならず、専門性の高い教育・訓練、ヒトの知覚や認識の研究、ロボットや機器の高精度な制御、建築や都市の設計、臨場感の高いコミュニケーション、新しい芸術表現など、幅広い分野で社会や生活を向上発展させるポテンシャルを持っている。このような社会的要請を追い風にして「誰にでも実感できる3次元音響システム」は10年以内に実現できるのではないかと筆者は予想している。

それでは、今後の研究の進展を楽しみにしていったん筆をおくことにする。

# 索引

<b>【い】</b>	
一致モデル	24
因果律	175
<b>【え】</b>	
エコー	209
エコー検知限	209
エコーディスターバンス	210
エンクロージャ	148
<b>【お】</b>	
横断面	6
オーバラップ加算法	163, 194
音響中心	148
音源	4
音源距離	125
音源信号のスペクトル	56
音源方向探査システム	200
音場のコンピュータシミュレーション	211
音声了解度	140, 197
音線法	212
音像	4
——の上昇	34
音像距離	125
音像定位	5
<b>【か】</b>	
外耳道入口	3, 207
外耳道インパルス応答	208
外耳道音響インピーダンス	176

拡張現実	2
仮想現実	2
眼窩点	6
<b>【き】</b>	
擬似頭	11, 74
逆S字カーブ	30, 204
逆swept-sine信号	145
キャビネット	148
球座標系	5
境界要素法	213
仰角	5
共鳴モード	50
虚音源	211
虚像法	211
距離知覚の手掛かり	126
<b>【く】</b>	
空間インパルス応答	195, 206
空間的性質	4
空間的な補間	104
<b>【け】</b>	
原音場	174, 184
原点	6
<b>【こ】</b>	
後期反射音	206
合成音像	27, 116, 209
高速フーリエ変換	215
鼓膜	3
コーン状の混同	26

<b>【さ】</b>	
再生音場	184
サイドローブ	218
三角窩	48
残響音	206
<b>【し】</b>	
耳介	46
耳介形状	71, 86, 170
——の類似度	83
耳介モデル	52
時間的性質	4
時間窓	150, 218
時間領域有限差分法	213
耳甲介腔	48
耳軸	6
耳軸座標系	5
耳珠	6
矢状面	6, 106, 116
システム遅延の検知限	192
実音源	203
質的性質	5
室の固有振動	52
舟状窩	48
縮尺模型	213
受聴音圧レベル	126
上オリーブ外側核	10, 26
上オリーブ内側核	10, 24
上昇角	6
上昇角知覚に関する弁別閾	66
初期反射音	206
振幅スペクトルの個人差	63

<b>【す】</b>		<b>【と】</b>	ブローブマイクロホン 8, 19, 148
水平面	6	等距離画像	137
水平面定位の弁別閾	110	動的手掛かり	183
スプライン補間	104	頭内定位	35
スペクトラルキュー		頭部インパルス応答	4, 207
9, 13, 35, 43, 86, 110, 124,		頭部運動	9, 58
154, 167		頭部形状の個人差	73
——の個人差	65	頭部伝達関数データベース	
——の再学習	56		91, 166
スペクトルの統合	44	頭部伝達関数の位相特性	3
スペクトルの微細構造	37	頭部伝達関数の個人化	
			11, 82
<b>【せ】</b>		頭部伝達関数の個人差	233
正中面	6	——の物理評価指標	92
節線	55	頭部伝達関数の類似性	106
絶対不応期	25	トランスオーラルシステム	
先行音効果	209		20, 31, 184
前後誤判定	34, 204	<b>【の】</b>	
<b>【そ】</b>		ノッチ	2, 18, 29, 53
相反則	12, 151	ノッチ検知閾	43
側方角	6	<b>【は】</b>	
<b>【た】</b>		背側蝸牛神経核	10, 58
第1波面の法則	209	ハース効果	210
代表的な受聴者の		パーセントスプリット	210
頭部伝達関数	78	パーチカルモード	50
卓越周波数帯域	13, 121	パニング	28
畳込み積分	156	パラメトリック HRTF	
ダミーヘッド	11, 74		9, 10, 37, 111
単語理解度	141, 197	<b>【ひ】</b>	
単耳スペクトル	44	ピーク	2, 18, 29, 50
<b>【ち】</b>		標準頭部伝達関数	11, 74
聴覚事象	4	<b>【ふ】</b>	
<b>【て】</b>		フィルタマトリクス	185
定位モデル	108	複素スペクトル	162
デジタルオーディオ		ブラックマン-ハリス窓	
インタフェース	191		154, 220
手掛かりの統合	44	フランクフルト水平面	6
		フーリエ変換	4, 214
		<b>【へ】</b>	
		ヘッドトラッカ	183, 191
		変動係数	72
		<b>【ほ】</b>	
		方位角	5
		方向決定帯域	13, 120
		方向情報フィルタ	13, 124
		方向知覚の弁別閾	205
		防災放送システム	197
		放射インピーダンス	176
		ポジショントラッカ	191
		<b>【ま】</b>	
		マスキング閾値	139
		<b>【み】</b>	
		耳型	224
		耳栓型マイクロホン	
			144, 148, 178, 191, 224
		耳入力信号	174
		<b>【め】</b>	
		メインローブ	218
		<b>【ゆ】</b>	
		有限要素法	213
		<b>【ら】</b>	
		ラウドネス	126
		<b>【り】</b>	
		離散フーリエ変換	214
		両耳音圧	134
		両耳間位相差	139
		両耳間距離	24, 95
		両耳間差キュー	110
		両耳間時間差	
			9, 23, 153, 207
		——の個人化	95

—の個人差	67	両耳空間インパルス応答	両耳明瞭度レベル差	139
—の弁別閾	67	195, 208	<b>【れ】</b>	
両耳間時間差モデル	23	両耳信号の時間差算出機能	連続測定法	12, 151
両耳間相互相関閾数	153	24	<b>【ろ】</b>	
両耳間レベル差	9, 23, 25, 153, 207	両耳信号のレベル差	ロバストな頭部伝達関数	78
—の個人化	98	算出機能	ロングパスエコー	197
—の個人差	68	両耳スペクトル		
—の弁別閾	69	両耳入力信号の包絡線		
		両耳マスキングレベル差		

<b>【A】</b>		<b>【H】</b>		N1 周波数	41, 65, 86
AR	2	head-related transfer		N2	9, 43, 111, 156
aural axis	6	function	1	N2 周波数	41, 65, 86,
<b>【B】</b>		horizontal plane	6	NFD	93
BEM	12, 213	HRIR	4, 207	$N_m S_m$	139
best-matching HRTF	11, 87, 113	HRTF	1	<b>【O】</b>	
BILD	139	<b>【I】</b>		overlap-add method	163
Blackman-Harris window	220	ILD	23	<b>【P】</b>	
BMLD	139	image method	211	P1	51, 156, 208
boosted band	13, 121	individualization	82	P1 周波数	42, 66
BRIR	195, 208	inside-of-head localization	35	P2	51, 156
BSPL	134, 193	ITD	23	P2 周波数	42
<b>【C】</b>		<b>【K】</b>		P3	52
cone of confusion	26	KEMAR	11	PCA	10, 11, 85
<b>【D】</b>		<b>【L】</b>		PDR	178
DCN	10, 58	lateral angle	6	personalization	82
directional band	13, 120	lateralization	35	pHRTF	37
DTF	84	look-up table	56	<b>【Q】</b>	
dumny head	11	<b>【M】</b>		quadrant error	85
<b>【F】</b>		M 系列信号	12, 145	<b>【R】</b>	
FDTD 法	12, 90, 213	masked threshold	139	random subjects	78
FEC ヘッドホン	178, 199	median plane	6	ray tracing method	212
FEM	213	<b>【N】</b>		RIR	195, 206
FFT	161, 215	$N_0 S_\pi$	139	rising angle	6
front-back error	34	N1	9, 43, 54, 111, 156	RSD	72

<b>【s】</b>		sound source	4	<b>【v】</b>	
		spectral cue	35	vertical mode	50
sagittal plane	6	summing localization	27	VR	2, 233
scale factor	85	swept-sine 信号	12, 145	<b>【数字】</b>	
scale model	213	<b>【T】</b>			
Scilab	146, 158, 215, 221	transaural system	20	1 次聴覚野	24
SD	92	transverse plane	6	3 次元聴覚ディスプレイ	191
sound image	4	typical subject	78, 182	96 kHz サンプリング	230
sound image localization	5				

— 著者略歴 —

飯田 一博 (いいた かずひろ)

1984年 神戸大学工学部環境計画学科卒業

1986年 神戸大学大学院工学研究科博士前期課程修了(環境科学専攻)

1986年 松下電器産業株式会社(現パナソニック株式会社)勤務

1993年 神戸大学大学院工学研究科博士後期課程修了(環境科学専攻)  
博士(工学)

2007年 千葉工業大学教授

現在に至る

## 頭部伝達関数の基礎と3次元音響システムへの応用

Fundamentals of head-related transfer function and its application to 3-D sound system

©一般社団法人 日本音響学会 2017

2017年4月13日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人 日本音響学会  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社  
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01133-3 C3355 Printed in Japan

(新宅)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。