

# ま え が き

Helmholtz の科学的研究 (1863) を契機にして誕生した聴覚理論は, Békésy の基底膜振動の進行波理論 (1928~1960) で検証され, その後の Rhode (1971), Sellick et al. (1982), Robles et al. (1986) らの基底膜振動の詳細な観察を促した。近年の Brownell et al. (1985), Hudspeth (1985), Zheng et al. (2000) らの研究に代表される蝸牛の能動的活動 (Cochlear Amplification) の機序の解明により, ヒトの驚くべき聴覚能力, 例えばわずか 0.2 % の差の異なる二つの周波数の弁別能力, 120 dB の広帯域のダイナミックレンジなどを説明できる原始情報がようやく 21 世紀に入り一通り出そろったようである。

一方, 音の高さ (ピッチ) や大きさ (ラウドネス) 等の音響心理学的事象は, もっぱら蝸牛の解剖学的構造や生理学的機能をもとに議論され, Fletcher (1953), Zwicker (1957) の臨界帯域, Patterson の聴覚フィルターモデル (1974) の提案に至っている。これらの説やモデルは, 聴覚を理論的に説明しようとするものとして, 聴覚モデルと総称される。

聴覚モデルは国内外で聴覚現象の研究全般をリードしてきたが, 日本では聴覚モデルを包括的に取り扱った書籍や出版物はきわめて少ない。長い歴史をもつ聴覚モデルや最新の計測技術で観測された各種実験結果の全容を研究者が知る機会は限られている。Schouten の主張 (1970) のように, 聴覚を理解するために必要な三大学問分野 (生理学, 心理学, 数理学) 間のたがいに密接な補完関係に鑑み, 本書では, これまでの代表的な聴覚モデルと最新の聴覚モデルに言及した。さらには音響心理学や音響生理学の関連研究, 蝸牛の能動的活動の基盤となる有毛細胞の分子生化学的機構, 蝸牛以降の聴覚系に特有の生理現象とそのモデルを取り上げ, 聴覚モデルに基づくラウドネス計算法や聴覚モデルの動作のシミュレータといった工学的手法も紹介した。

各章の執筆は、上記の内容に精通していると編者が判断した研究者に担当していただいた。しかし、これだけの広範囲でかつ横断的研究分野に及ぶ聴覚研究をもらすことなく紹介することは、少数の編著者だけではとうてい及ぶことではない。また編著者の興味や関心で題材を取り上げたので内容に偏りがあるが、若い研究者が聴覚とその機構の理論的側面に興味を持つきっかけになれば幸いである。

最後に、本書を出版する機会を与えてくださった日本音響学会とコロナ社、そして多忙ななか執筆を快諾していただいた著者の方々に深く感謝する。

2011年6月

森 周司, 香田 徹

#### 執筆分担

---

1章, 2章	香田 徹
3章	日比野浩・任 書晃・倉智嘉久
4章	入野俊夫
5章	鶴木祐史・鈴木陽一
6章	牧 勝弘
7章	津崎 実・入野俊夫

---

# 目 次

## 第 1 章 音の高さのモデル

1.1 古典的聴覚説 .....	1
1.2 Békésy の基底膜振動の進行波モデル .....	3
1.3 微細構造説 .....	4
1.4 Wever の斉射説と Licklider の二元説 .....	9
1.5 微細構造説に対する反論 .....	10
1.6 3種の現代聴覚モデルとその後の改良モデル .....	12
引用・参考文献 .....	16

## 第 2 章 蝸牛の物理的機構とそのモデル

2.1 聴覚末梢系の生理 .....	19
2.2 ヘルムホルツの共鳴説と Békésy の進行波説 .....	22
2.3 聴覚1次ニューロンの興奮現象 .....	23
2.4 聴覚末梢系のモデル .....	30
2.4.1 Gabor の聴覚分解能理論と Flanagan の伝達関数モデル .....	30
2.4.2 基底膜振動の流体力学的モデル .....	31
2.4.3 蝸牛の無反射伝送線路モデル .....	36
2.4.4 単一伝達物質の貯蔵庫を有する聴神経発火モデル .....	41
2.4.5 複数個の伝達物質の貯蔵庫を有する聴神経発火モデル .....	42
2.4.6 聴神経発火の PST ヒストグラムにみられる適応現象 .....	44
2.5 Békésy 以降の基底膜振動特性 .....	45
2.5.1 蝸牛管の巨視的 2 層モデルと Lighthill の進行波解 .....	47

2.5.2 外有毛細胞による蝸牛増幅	48
2.5.3 コルチ器蓋膜の共振特性と第2フィルタ	49
2.5.4 耳音響放射とそのモデル	51
引用・参考文献	53

### 第3章 内耳有毛細胞機能の分子生物学的基盤とそのモデル

3.1 機械 - 電気変換器としての有毛細胞	58
3.1.1 有毛細胞の構造	58
3.1.2 有毛細胞における音シグナル伝達機構	62
3.1.3 MET チャネル	62
3.1.4 tip link と gating spring の分子構成	66
3.1.5 感覚毛間の結合の分子構成	68
3.1.6 MET チャネルの順応	69
3.1.7 感覚毛伸張の分子機序	73
3.2 有毛細胞における音シグナルの増幅機構	74
3.2.1 音シグナルの増幅機構の生理的意義	74
3.2.2 外有毛細胞による電位依存性運動	77
3.2.3 感覚毛の能動運動	78
3.3 有毛細胞に立脚した周波数分析機構	85
3.3.1 哺乳類の蝸牛における周波数分析	85
3.3.2 下等脊椎動物の蝸牛での周波数分析	87
3.4 有毛細胞モデル	90
3.4.1 古典的有毛細胞モデル	91
3.4.2 内外有毛細胞機能を含めた基底膜振動モデル	91
引用・参考文献	93

### 第4章 聴覚フィルタの心理物理実験とモデル

4.1 聴覚フィルタの基礎概念	102
4.1.1 振幅周波数特性	102

4.1.2	音圧依存性と入出力特性	104
4.1.3	そのほかの非線形特性	105
4.2	聴覚フィルタ特性の心理物理的推定	106
4.2.1	マスキング現象と心理物理実験	106
4.2.2	臨界帯域の測定	107
4.2.3	マスキングのパワースペクトルモデル	107
4.2.4	ノッチ雑音マスキング法によるフィルタ形状の推定	108
4.2.5	位相周波数特性の測定	110
4.2.6	フィルタ形状の音圧依存性の測定	110
4.2.7	圧縮特性とその測定	110
4.2.8	2音抑圧特性の測定	113
4.3	聴覚フィルタの定式化	114
4.3.1	ガンマトーンフィルタ	114
4.3.2	レベル依存性と非対称性の導入	115
4.3.3	ガンマチャープフィルタ	116
4.3.4	ガンマチャープフィルタの周波数特性	117
4.3.5	圧縮型ガンマチャープ	118
4.3.6	動的圧縮型ガンマチャープフィルタバンク	121
4.3.7	パラメータ数の意味での妥当性	121
4.3.8	最適性	122
4.4	ま と め	123
	引用・参考文献	124

## 第5章 音の大きさのモデル

5.1	音の強さとラウドネス	129
5.1.1	ラウドネスとその定義	129
5.1.2	音の強さの変化の知覚	132
5.2	ラウドネスレベル	134
5.2.1	最小可聴値	134
5.2.2	ラウドネスレベル	135

5.3	ラウドネス密度とパーシャルラウドネス	138
5.3.1	音の帯域幅とラウドネスの関係	138
5.3.2	パーシャルラウドネス	142
5.3.3	最小可聴値付近におけるラウドネス成長曲線	144
5.3.4	ラウドネスの時間的特性	147
5.4	定常広帯域音のラウドネスの計算	149
5.4.1	Stevens の計算法	150
5.4.2	Zwicker の計算法	151
5.4.3	Moore and Glasberg の計算法	155
5.5	ラウドネス計算法に関する残された課題と最近の動向	160
5.5.1	全般的な注意点	161
5.5.2	モノラルとバイノーラルラウドネス	161
5.5.3	パーシャルラウドネスモデルの精緻化	162
5.5.4	非定常音のラウドネス計算	163
	引用・参考文献	165

## 第6章 聴覚中枢神経系の生理現象とそのモデル

6.1	脳幹における聴覚情報の伝搬経路	168
6.2	蝸牛神経核の応答特性とそのモデル	169
6.2.1	腹側核の時間応答パターンとそのモデル	170
6.2.2	背側核の周波数応答パターンとそのモデル	175
6.3	上オリーブ複合体の機能と両耳聴のモデル	181
6.4	下丘の複雑な時間応答パターンとそのモデル	185
	引用・参考文献	191

## 第7章 シミュレータによる内部表現と特徴量

7.1	モデルとシミュレータのもつ意味	195
-----	-----------------	-----

7.2 Langner の発振・遅延による周期性検出モデル	196
7.2.1 PAN	197
7.2.2 発振回路と遅延回路	198
7.2.3 チョッパー間の最小シナプス遅延	199
7.3 Meddis のチョッパー型細胞による変調周期検出モデル	200
7.3.1 Meddis グループのモデルの変遷	201
7.3.2 チョッパー型細胞の変調伝達特性と周期性検出	201
7.3.3 全体のモデルの構成	202
7.3.4 モデルの妥当性	204
7.3.5 公開パッケージ	205
7.4 Patterson の聴覚イメージモデル	205
7.4.1 音色のモデル——時間的な非対称性の直観的表現——	206
7.4.2 ストロープ時間積分と遅延	207
7.4.3 ストロープとインパルス応答——寸法の正規化モデルへ——	210
7.4.4 公開パッケージ	211
7.5 Shamma の聴覚皮質応答野モデル	212
7.5.1 側抑制ネットワーク	212
7.5.2 皮質における受容野	212
7.5.3 多層解像度分解	214
7.5.4 公開パッケージ	216
7.6 AIM を使ってみよう	216
7.6.1 シミュレータの起動	216
7.6.2 外耳・中耳の影響 (PCP)	217
7.6.3 基底膜振動	218
7.6.4 神経活動パターン	220
7.6.5 ストロピングと安定化聴覚像	221
7.6.6 メリンイメージ	224
7.7 ま と め	225
引用・参考文献	226

# 第1章

## 音の高さのモデル

聴覚に関するヘルムホルツ (Helmholtz) の科学研究を契機にして誕生した聴覚理論は、もっぱら音の高さ (ピッチ) の知覚を考察の対象としている。本書では、解剖学的・生理学的知見に基づいて、高さの知覚やそのほかの聴覚心理学的現象を、数式あるいはそのほかの手段で説明 (表現あるいは模擬) しようとする研究を聴覚モデルと総称する<sup>1)†1</sup>。本章では、聴覚理論の成り立ちを概観しよう<sup>†2</sup>。

### 1.1 古典的聴覚説

音の高さが何によって決まるかという時間説と周波数説 (または場所説) との対立は、19世紀半ばのゼーベック (Seebeck) とオーム (Ohm) との論争に端を発する。ゼーベック<sup>13),14)</sup> は、サイレンでつくった空気の衝撃波 (インパルス波) では、その発生間隔に応じた高さが聞こえることを実験的に示して時間説を主張した。

一方、オームは「 $f$  Hz の高さを聞くとき、刺激音のなかに正弦波成分  $\sin 2\pi ft$  が必ず存在する」 (これはオームの純音の定義であり、オームの法則と呼ばれる) と主張するとともに、フーリエ理論 (1822年) により、ゼーベックの刺激音中に正弦波成分が存在することを数値的に明らかにして周波数説を

<sup>†1</sup> 肩付数字は各章末の引用・参考文献番号を表す。

<sup>†2</sup> 古典的聴覚説についての詳細な報告としては、Green<sup>2)</sup> の成書が、また、日本語による優れた報告として竹内<sup>3)</sup> や亀田<sup>4)</sup> などあげられる。音の高さに関する有名な総合報告として、Small<sup>5)</sup> や de Boer<sup>6)</sup>、Plomp<sup>7)</sup> らの成書がある。また、日本語のものとして、大串<sup>8)</sup>、吉田・亀田<sup>9)</sup>、江端<sup>10),11)</sup>、香田<sup>1)</sup> のほか、最近の入手可能な優れた成書 Moore<sup>12)</sup> などがある。これらの詳細な参考文献は充実している。



主張した。

これに対し、ゼーベックはサイレンを工夫して正弦波成分をほとんど含まない刺激音に対してもそれを含む場合と高さは同じであることを観察し、オームに反論した。しかし、オームは聴覚的錯覚と説明して実質的にはオームの敗北となった。

その後、ヘルムホルツ<sup>15)</sup>は、オームの法則を拡張して、「複合音は基本周波数成分とその高調波成分とに分解され、その基本周波数に応じた高さを有する」と主張し、これを**オームの音響法則**と命名した。また、ヘルムホルツはその周波数分析は内耳蝸牛で行われると考え、当時の生理学的知見（2.1節参照）を援用して、蝸牛内の基底膜を共鳴器群とする**共鳴説**を主張した。この説は**周波数説**（または、共鳴器の固有周波数が基底膜上の位置で異なるので**場所説**とも呼ばれる）に属する。

さらに彼は、基本周波数成分を取り除いても音の高さは変わらない実験事実に対し、聴覚系の非直線性による**ひずみ波成分**（**差音**）の発生の考え、**耳性ひずみ説**（**差音説**）で説明し、音の高さに関する種々の現象を場所説で説明しようとした。なお、彼は有名な**ヘルムホルツの位相律**：「楽音については耳は位相を感じない」を発表したが、その適用範囲として雑音などの非周期音や非楽音を除外して楽音に限定していたことはおおいに注目すべきである。

**耳性内ひずみ説と結合音** 複数個の純音を同時に入力すると、ほかの音が聞こえることは18世紀の頃から知られていた。これらの音はしばしば**結合音**（combination tones）と呼ばれる<sup>†</sup>。この音の存在は、その周波数を含む狭帯域雑音による**マスキング**（第4、5章で詳述）や、その周波数近傍の純音との**うなり**（**ビート**（beat）, 2周波成分音の包絡線の時間変化の割合、すなわち、2純音の差音）などの知覚で確認できる。結合音は、蝸牛の基底膜振動（または有毛細胞の毛の振動）に含まれると考えられている。もちろん結合音の存在は聴覚末梢系が非線形であることを意味する。

<sup>†</sup> 18世紀のバイオリニストの名を冠して**タルティーニ二音**（Tartini tone）とも呼ぶ<sup>7)</sup>。

ヘルムホルツは<sup>15)</sup>、「耳は一種の周波数分析器である」とする知覚モデルを提案するとともに、結合音は過剰入力に対する中耳での非線形ひずみで説明できるとした（**耳性内ひずみ説**と呼ばれる）。この説は広く支持されていたが、その後、非線形特性やその発生場所が議論の対象になった。

## 1.2 Békésy の基底膜振動の進行波モデル

ヘルムホルツ以後、新しい聴覚説が種々提案されたが、1928年頃からの Békésy の一連の研究が完成するまで<sup>16)</sup>、ヘルムホルツの共鳴説の優位は保たれたままであった。Békésy は蝸牛の基底膜、ライスネル膜、蓋膜、コルチ器などの種々の物理的特性を実測して、基底膜が周波数分析に大きな役割を果たしていることを明らかにした。さらに、基底膜の物理的特性に合わせてつくった物理モデルで予想されるいくつかの振動姿態のなかで、**進行波** (travelling wave) が種々の動物の内耳での観察結果と最も近いことを明らかにした。

彼は基底膜上のいくつかの点における振動とアブミ骨振動との比（振幅特性および位相特性）を、駆動周波数とその位置を2変数として実測した（図 2.4, 図 2.5 参照）。その結果は共鳴説と同様、場所説を示唆したものの、基底膜上に進行波が生じていることを裏付けた。Békésy の実験結果は 2.2 節で、Békésy 以降の実験結果は 2.5 節で紹介する。

物理学・工学の研究者たちにとって最も興味ある聴覚研究の一つは、基底膜振動を表現（あるいは説明）することである。これは Zwislocki<sup>17)</sup>、Peterson and Bogert<sup>18)</sup>、Fletcher<sup>19)</sup> の研究に始まる。1960年代以後、現在に至るまでの多数の数式的モデルに関しては、2.4, 2.5 節を参照されたい。なお、Schouten は<sup>20)</sup>、聴覚を理解するための三大分野（生理学、心理学、数理学）間の密接な補完関係の重要性を主張している（第2章のコラム「聴覚モデル論小史」参照）。

### 1.3 微細構造説

Fletcher は<sup>21)</sup>、基本周波数成分がほとんどない複合音の高さに関するゼーベックの実験を再び取り上げた。彼は、700, 800, 900, 1000 Hz からなる複合音の高さが、**存在しない基本周波数成分音** (missing fundamental) の 100 Hz に対応するという実験結果をヘルムホルツの差音説で説明した。この説明は当時、動物の蝸牛電位で結合音が観測されたこともあり、容易に受け入れられた。なお、Fletcher<sup>22)</sup> が**マスキング**や音の大きさなどの聴覚現象を説明するために導入した**臨界帯域幅** (critical bandwidth) (第 4, 5 章参照) の概念は、現在も聴覚の基本的特性として広く受け入れられているとともに、最初に聴覚を数学的に取り扱った点で工学者からも高く評価されている (Fletcher<sup>23)</sup>)。

「存在しない基本周波数成分音」の差音説への反論は、まず、Schouten<sup>24)</sup> の実験から始まった。彼は、周期  $1/(200\text{ s})$  のパルス音 (図 1.1 (a)) の高さ と 200 Hz の基本周波数成分を除去したパルス音 (図 1.1 (b)) の高さは変わらないことを示した。基本周波数成分の除去は、パルス音に、振幅と位相を適当に調整した 200 Hz の純音を重畳することによって打ち消し、さらにその重畳されたパルス音と 206 Hz の純音との間のビート知覚の有無で除去を確認した<sup>†</sup>。

彼は、図 1.1 のパルス音のようにたくさんの部分音からなる複合音の知覚に関して、「低次の部分音は個別的に知覚され、それらは別々に聞くときの高さと同じ高さを有する。これに対し、高次の部分音は個別的に知覚できず、一つの成分音として一体的に知覚される。“residue” と名付けたその主観的成分音

<sup>†</sup> ビートの知覚が消失するように、第 3 番目の音として結合音と同一の周波数の純音 (打ち消し音 (cancellation tone) と呼ばれる) のレベルや位相を調節して重畳し、消失できたときのレベルや位相をそれぞれ結合音のレベルや位相とみなす。この打ち消し法 (cancellation method) は、音響心理実験での基本的手法の一つである。非線形現象の解明のために、非線形現象を援用しつつ線形的手段を用いていることは興味深い。

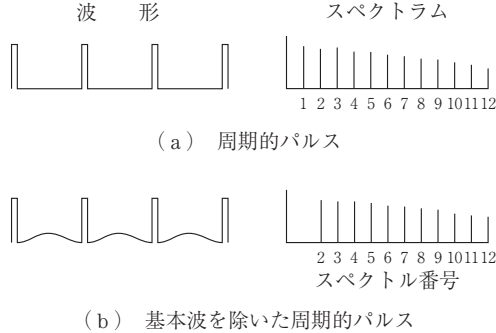


図 1.1 ゼーベックが用いたパルス音<sup>6)</sup>

は混じり合った鋭い音質を有し、その高さは一体化された波形の周期（すなわち、除去された基本周波数成分の周期）で決まる」と説明した。その高さは **residue pitch** と呼ばれる。なお、ほとんどエネルギーを含まない周波数に対応した高さには、**low pitch**, **periodicity pitch**, **time-separation pitch**, **repetition pitch** などの呼称もあるが (de Boer<sup>6)</sup> ; Plomp<sup>7), 25)</sup>), 統一のため、ここでは low pitch を用いる。上記の彼の説明は、実験結果の説明にとどまらず、**periodicity theory** と呼ばれる一つの理論となっている。

さらに、Schouten は以下の**振幅変調** (amplitude-modulation, AM) の手法を用いて実験を行い、periodicity theory を強固なものとした。周波数  $f$  の正弦波を周波数  $g$  の正弦波で振幅変調することにより、 $f-g$ ,  $f$ ,  $f+g$  の周波数成分を有する複合音 (**振幅変調音** と呼ばれる) が合成される。はじめに、 $f=1000$ ,  $g=200$  としたときの複合音 (200 Hz にはエネルギーはないが、200 Hz を基本周波数とする高調波関係にある複合音) の高さ (low pitch) は 200 Hz の基本周波数成分を含む複合音の高さと等しいことを確認した。つぎに、 $g$  を一定にしたまま  $f$  を 1050 Hz に変化させて、最初の複合音の三つの部分音を 50 Hz ずつシフトさせた 850, 1050, 1250 Hz からなる (聴覚的には) 高調波関係にない複合音をつくった。その結果、low pitch は少々弱く感じられたが、low pitch はほぼ繰返し周期  $1/(210\text{ s})$  のパルス音のそれと一致し、差音説の予測値 200 Hz に対応しないことが明らかになった。なお、調べるべき複合音

(試験音と呼ぶ)の low pitch を高調波関係にある複合音(マッチング音と呼ぶ)の基本周波数で測ることは、ピッチマッチングと呼ばれる。また、高調波関係にある複合音の low pitch とその部分音を一律にシフトさせてつくった高調波関係にない複合音のそれとの差はピッチシフトと呼ばれる。

差音説に対するほかの反証としてマスキング実験がある。Licklider<sup>26)</sup>は、(耳性ひずみにより生成されたと考えられる)基本周波数成分を狭帯域雑音でマスクして、low pitch 知覚における基本周波数成分の重要性を調べた。Small and Campbell<sup>27)</sup>や Patterson<sup>28)</sup>も同様な実験を行い、基本周波数成分は low pitch 知覚に重要な役割を果たしていないことを明らかにした。

de Boer<sup>29)</sup>は、Schouten と同様に、高調波関係にない5周波成分音(および7周波成分音)と高調波関係にあるそれとのピッチマッチングを行って、そのピッチシフトを系統的に調べるとともに、low pitch が同時に複数個存在することを明らかにした(de Boer<sup>6)</sup>)。さらに de Boer は、その実験結果について2種類の説明を行った。その一つは、高調波関係にない複合音の時間波形の山と山との時間(pseudo-period と名付けた)に基礎を置く **pseudo-period theory** であり、ほかの一つは、その複合音に周波数上で最も近い高調波関係にあるほかの複合音の基本周波数(pseudo-fundamental と名付けた)に基礎を置く **pseudo-fundamental theory** である。

彼は二つの説が数学的には等価であることを示した。上記の Schouten, de Boer や Licklider の実験結果は、長い間信じられていた場所説に疑問を投げかけ、low pitch の知覚では基本周波数が重要でないことを明らかにしたが、以下のことに注意すべきである。すなわち、low pitch は、純音のピッチのように明瞭なものでなく、そのピッチマッチングは難しいことである。Ritsma<sup>30)</sup>は、AM 音の搬送周波数  $f$ 、変調周波数  $g$ 、変調度  $m$  を変化させて、low pitch の知覚可能な範囲を求め、図 1.2 の結果を得た。Plomp<sup>25)</sup>や Ritsma<sup>31)</sup>は、low pitch の知覚にどの範囲の高調波が最も重要であるかを調べた(low pitch の知覚に最も支配的な高調波の周波数帯域は **dominant region** と呼ばれる)結果、基本周波数成分は高調波成分より重要でないことを明らかにした。

# 索 引

<hr/> <b>あ</b> <hr/>		外耳道	19	共鳴説	2
足場蛋白質	67	蓋 膜	21, 23	均等興奮雑音	139
圧縮型ガンマチャープ	119	外毛細胞	23	<hr/> <b>け</b> <hr/>	
圧縮特性	104	外リンパ液	19, 59	結合音	2, 28, 29
アプミ骨	19	下 丘	168	原 音	29
安定化聴覚像	207, 221	下丘中心核	185	<hr/> <b>こ</b> <hr/>	
<hr/> <b>い</b> <hr/>		蝸 牛	19	高域通過型非対称関数	119
閾値特性	45	——の音増幅機構	74	合成周期	24
位相固定	133	——の能動的活動	22	興 奮	23, 24
位相固定性	172	蝸牛管	19	興奮パターン	112, 222
位相同期の性質	25	蝸牛神経核	168	鼓室階	19
<hr/> <b>う</b> <hr/>		蝸牛窓	19	古典的聴覚説	22
ウェバーの法則のニアミス	132	蝸牛増幅	22, 48	古典的伝送路モデル	34
打ち消し音	4	蝸牛増幅器	105	鼓 膜	19
打ち消し法	4	蝸牛頂	21	コルチ器	21
うなり	2	蝸牛マイクロフォニックス	23	<hr/> <b>さ</b> <hr/>	
<hr/> <b>お</b> <hr/>		確率モデル	41	最小可聴音圧	134
応答野	24	確率論的モデル	41	最小可聴音場	134
オーディオグラム	135	重ね合せ	52	最小可聴値	134
遅い順応	71	感覚毛	59	最適周波数	24
遅い波	47	——の束	48, 59	差 音	2, 29
音振幅の増幅	75	——の能動運動	77, 79	差音説	2
音の大きさ	129	感覚レベル	135	サステインド型	185
——のレベル	134	ガンマチャープ	116	<hr/> <b>し</b> <hr/>	
音の高さ	15	ガンマトーン	114	耳音響放射現象	35
オームの音響法則	2	ガンマトーンフィルタ	114	時間応答パターン	169
オームの純音	1	ガンマトーンフィルタバンク	206, 218	時間間隔ヒストグラム	12, 25
オームの法則	1	<hr/> <b>き</b> <hr/>		時間周波数受容野	215
オンセット型	170, 185, 198	機械 - 電気変換チャネル	62	時間説	1
音調性	15	擬似周波数変調音	8	時間マスキング曲線	112
<hr/> <b>か</b> <hr/>		擬似線形の反射理論	52	試験音	6
外 耳	19	基底膜	21, 197, 212	自己相関	200
		基底膜フィルタ	218	耳性内ひずみ説	3
		キスタ骨	19		
		共起検出	201		

耳性ひずみ説	2	側抑制	27, 212
自動利得調節	30	存在しない基本周波数成分	4
自動利得特性	42		
シナプス結合	23	<b>た</b>	
シナプス後電位	171	第1次聴覚野	212
自発振動	79	第1次ピッチシフト	7
自発性放電	24	ダイナミックレンジ	22
尺度構成法	130	第2次ピッチシフト	8
周期	22, 25	第2フィルタ	35, 46
周期ヒストグラム	12	多層柱状構造	212
周期ピッチ	10	脱分極	62
周波数	22	タルティーニ音	2
周波数応答パターン	169	単音放射	51
周波数説	1, 2		
周波数部位地図	85	<b>ち</b>	
周波数分析	76	中央階	19
周波数分析器	22	中耳	19
受動的ガンマチャープ	119	聴覚域値	134
受動モデル	38	聴覚フィルタ	31, 101, 102
順応	69	聴覚フィルタの帯域幅当りの	
順応モーター	71	ラウドネス	141
上オリーブ外側核	182	聴覚フィルタバンク	102
上オリーブ内側核	182	聴覚モデル	1
上オリーブ複合体	168	聴覚理論	1, 22
神経核	168	聴神経発火の古典的モデル	43
神経伝達物質	23	聴力曲線	135
神経伝達物質の量子的放出	42	聴力レベル	135
	42	貯蔵庫	42
進行波	3, 22	チョッパ型	170, 185
振幅変調	5	チョッパ型細胞	198
振幅変調音	5		
<b>す</b>		<b>つ</b>	
ストロープ時間積分	206, 207	ツチ骨	19
スペクトル密度	139		
<b>せ</b>		<b>て</b>	
正規化	30	適応現象	41, 42
斉射説	9	電位依存性運動	77
絶対域値	134	電気刺激誘発耳音響放射	52
前庭階	19	伝送線路	34
前庭窓	19	伝達関数	39
		伝達物質の生成・放出規則	42
<b>そ</b>		伝達物質の放出	41
層状核	183	伝達物質の放出部位	42

<b>と</b>	
等価矩形帯域幅	103
等感曲線	136
同期現象	9
動的圧縮型ガンマチャープ	
フィルタバンク	121, 206, 218
等ラウドネス曲線	136
等ラウドネスレベル曲線	136
特性インピーダンス	36
特徴周波数	24, 87, 175, 197
<b>な</b>	
内耳	19
内毛細胞	23
内リンパ液	21, 59
<b>に</b>	
2音抑圧	113
2音抑圧現象	27
二元説	10
入射波・反射波の理論	40
入力インピーダンス	37
入力レベル周波数特性	45
ニュートンの運動方程式	32
<b>の</b>	
脳幹	168
能動過程	74
能動モデル	39
ノッチ雑音マスキング法	106, 108
<b>は</b>	
背側蝸牛神経核	169, 198
波形保存性	42
パーシャルマスキング	143
パーシャルラウドネス	143
場所説	1, 2
場所ピッチ	10
バースト音	26
バースト雑音	26
発火の整流特性	25

発火パターン	12				
波動方程式	33				
速い圧縮特性	121				
速い順応	71				
速い波	47				
反射係数	37				
<b>ひ</b>					
ピエゾ圧電素子の共振特性	50				
微細構造説	8				
ヒストグラム	24, 25, 26				
ひずみ音耳音響放射	51				
ひずみ波成分	2				
非線形圧縮	76				
非線形能動スティフネス特性	51				
非線形の入出力関係	27				
ピッチシフト	6				
ピッチマッチング	6				
ビート	2				
ビルドアップ型	199				
頻度説	9				
<b>ふ</b>					
フィルタ形状	103				
不応期	171				
腹側蝸牛神経核	169, 198				
不動毛	48				
負の剛性	81				
部分音	5				
プライマリーライク型	170				
フーリエ解析器	22				
分布定数線路	34				
		<b>へ</b>		<b>も</b>	
		ヘルムホルツの位相律	2	網状板	48
		変調周波数	197		
		<b>ほ</b>		<b>ゆ</b>	
		ポアソン過程	42	誘発耳音響放射	51
		放電	23	有毛細胞	21
		飽和現象	26		
		ポーザー型	185, 199	<b>よ</b>	
		<b>ま</b>		抑圧	27
		膜電位の共振	87	抑圧野	28
		マグニチュード産出法	131	抑制	27
		マグニチュード推定法	131	IV型応答	175
		マスキング	2, 4, 6, 106		
		——の上方への広がり	154	<b>ら</b>	
		——のパワースペクトル		ライスネル膜	21
		モデル	107	ラウドネス	129
		マッチング音	6	——の成長則	130
		<b>み</b>		ラウドネス積分	142
		ミオシン	48	ラウドネス密度	142
		ミッシングファンダメンタル	196, 222	ラウドネスレベル	134
		<b>む</b>		ラプラスの断熱変化の式	32
		無反射条件	37	<b>り</b>	
		無反射伝送線路モデル	39	離調聴取	109
		<b>め</b>		リブル音	214
		メリン変換	210	両耳間音圧差	182
				両耳間時間差	182
				臨界帯域	101, 106, 107
				臨界帯域幅	4
				<b>れ</b>	
				連続の方程式	32

<b>A</b>		<b>C</b>		<b>E</b>	
AGC	42	CF	175	EEOAE	52
Allen-Fahey の測定法	51	CM	23	ELC	136
<b>B</b>		<b>D</b>		EPSP	42
BMM	218	dominant region	6	ERB <sub>N</sub> 番号	103
		DPOAE	51	<b>G</b>	
				gating spring モデル	66



<hr/> <b>H</b> <hr/>		
Hopf Cochlea 51	MET 48	<hr/> <b>R</b> <hr/>
	MET チャンネル 62	repetition pitch 5
	MSO 182	residue pitch 5
<hr/> <b>I</b> <hr/>	<hr/> <b>O</b> <hr/>	<hr/> <b>S</b> <hr/>
ILD 182	optimum processor model 12	SAI 207, 221
inhibition 27		sOAE 76
ITD 182	<hr/> <b>P</b> <hr/>	SP 24
<hr/> <b>J</b> <hr/>	pattern transformation model 12	STE 51
Jeffress のモデル 182	periodicity pitch 5	Stevens のべき乗則 130
<hr/> <b>K</b> <hr/>	periodicity theory 5	STI 206
Kemp echo 35, 48	phase-lock 現象 9	STRF 215
<hr/> <b>L</b> <hr/>	pseudo-fundamental theory 6	suppression 27
lateral inhibition 27	pseudo-period theory 6	<hr/> <b>T</b> <hr/>
low pitch 5	PST 26	TEOAE 51
LSO 182	PST ヒストグラム 170	time-separation pitch 5
<hr/> <b>M</b> <hr/>	<hr/> <b>Q</b> <hr/>	tip link 59
MAF 134	QFM 音 8	twitch 73
MAP 134		<hr/> <b>V</b> <hr/>
		virtual pitch theory 13

**森 周司 (もり しゅうじ)**

1983年 京都大学文学部哲学科卒業  
1986年 京都大学大学院博士課程前期修了(心理学専攻)  
1991年 プリティッシュコロンビア大学(カナダ)心理学部  
Ph.D. 課程修了  
Ph.D. in Psychology (プリティッシュコロンビア大学)  
1991年 長崎大学講師  
1993年 長崎大学助教授  
1995年 富山県立大学助教授  
2001年 東京都立大学助教授  
2006年 九州大学教授  
現在に至る

**日比野 浩 (ひびの ひろし)**

1994年 大阪大学医学部医学科卒業  
1994年 大阪大学医学部耳鼻咽喉科医員  
1999年 大阪大学大学院医学系研究科博士課程修了  
(耳鼻咽喉科学専攻)  
博士(医学)  
1999年 大阪大学助手  
1999年 ロックフェラー大学(米国) 研究員  
2007年 大阪大学准教授  
2010年 新潟大学教授  
現在に至る

**倉智 嘉久 (くらち よしひさ)**

1978年 東京大学医学部卒業  
1978年 東京大学医学部附属病院研修医  
1980年 生物科学総合研究機構助手  
1981年 岡崎国立共同研究機構助手  
1982年 マックスプランク生物物理化学研究所(西ドイツ)  
研究員  
1985年 東京大学医学部第二内科医員  
1985年 東京大学医学部附属病院助手  
1985年 医学博士(東京大学)  
1990年 メイヨークリニック(米国) コンサルタントおよび  
助教授  
1992年 メイヨークリニック(米国) 准教授  
1993年 大阪大学教授  
現在に至る

**鶴木 祐史 (うのき まさし)**

1994年 職業能力開発大学校情報工学科卒業  
1996年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
博士前期課程修了(情報処理学専攻)  
1998年 日本学術振興会特別研究員  
1999年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
博士後期課程修了(情報処理学専攻)  
博士(情報科学)  
1999年 ATR 人間情報通信研究所客員研究員  
2000年 ケンブリッジ大学(英国) 客員研究員  
2001年 北陸先端科学技術大学院大学助手  
2005年 北陸先端科学技術大学院大学助教授  
2007年 北陸先端科学技術大学院大学准教授  
現在に至る

**香田 徹 (こうだ とおる)**

1969年 九州大学工学部通信工学科卒業  
1971年 九州大学大学院工学研究科修士課程修了  
(通信工学専攻)  
1974年 九州大学大学院工学研究科博士課程修了  
(通信工学専攻)  
工学博士  
九州大学助手  
1981年 九州大学助教授  
1991年 九州大学教授  
九州大学名誉教授  
九州大学特任教授  
最先端数理モデル連携研究センター  
(合原プロジェクト) 特任教授  
現在に至る

**任 書晃 (にん ふみあき)**

2000年 京都府立医科大学医学学科卒業  
京都府立医科大学付属病院耳鼻咽喉科研修医  
2002年 松下記念病院耳鼻咽喉科医員  
2005年 京都府立医科大学耳鼻咽喉科・頭頸部外科  
専攻医  
2009年 京都府立医科大学大学院医学研究科博士課程  
修了(統合医科学専攻)  
博士(医学)  
2010年 ロックフェラー大学(米国) 研究員  
現在に至る

**入野 俊夫 (いりの としお)**

1982年 東京工業大学電気電子工学科卒業  
1984年 東京工業大学大学院理工学研究科  
博士前期課程修了(電気電子工学専攻)  
1987年 東京工業大学大学院理工学研究科  
博士後期課程修了(電気電子工学専攻)  
工学博士  
1987年 日本電信電話株式会社勤務  
2002年 和歌山大学教授  
現在に至る

**鈴木 陽一 (すずき よういち)**

1976年 東北大学工学部電気工学科卒業  
1978年 東北大学大学院工学研究科博士課程前期修了  
(電気及通信工学専攻)  
1981年 東北大学大学院工学研究科博士課程後期修了  
(電気及通信工学専攻)  
工学博士  
1981年 東北大学助手  
1987年 東北大学助教授  
1991年 ミュンヘン工科大学(ドイツ) 客員研究員  
1999年 東北大学教授  
現在に至る

**牧 勝弘** (まさ かつひろ)

1995年 法政大学工学部電気工学科卒業  
1997年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
博士前期課程修了 (情報処理学専攻)  
2000年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期  
課程修了 (知能システム科学専攻)  
博士 (理学)  
2000年 同志社大学博士研究員  
2002年 日本電信電話株式会社勤務  
2010年 情報通信研究機構勤務  
現在に至る

**津崎 実** (つざき みのる)

1980年 東京大学文学部第IV類 (行動学) 卒業  
1982年 東京大学大学院人文科学研究科修士課程修了  
(心理学専攻)  
1982年 新潟大学助手  
1985年 東京大学助手  
1988年 株式会社国際電気通信基礎技術研究所研究員  
2004年 京都市立芸術大学助教授  
2007年 京都市立芸術大学准教授  
2011年 京都市立芸術大学教授  
現在に至る

**聴覚モデル**

Models in Hearing

© (社)日本音響学会 2011

2011年8月30日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 社団法人 日本音響学会  
東京都千代田区外神田 2-18-20  
ナカウラ第5ビル2階  
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

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 978-4-339-01323-8 (安達) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします