

## まえがき

本書のテーマは計測技術であり、計測対象はオーディオである。特に、オーディオ CD を上回る高品質デジタルオーディオ時代のオーディオ計測について検証しようというのが本書の狙いである。タイトルにも、本文中にも「超広帯域オーディオ」が登場する。ここで、この「超広帯域オーディオ」というのは、一般にオーディオ CD と呼ばれるコンパクトディスクデジタルオーディオ (CD-DA) よりも、ダイナミックレンジや周波数帯域が広いデジタルオーディオのことである。

オーディオ CD のフォーマットでは、理論上、ダイナミックレンジは 98 dB (4.1 節参照)、周波数帯域は 22 050 Hz (3.1 節参照) に制限されている。これに対し、例えば、1990 年代末に商品化されたスーパーオーディオ CD や DVD オーディオでは、可聴帯域内のダイナミックレンジは 120 dB 以上、周波数帯域は最大 90 000 Hz を超えている。しかし、これらのメディアは、広く普及するには至らず、DVD オーディオに関しては、日本の業界団体 DVD オーディオプロモーション協議会が 2007 年から事実上活動を停止しており、国内では新譜が発売される見込みもない。また、長年オーディオメディアの主役に君臨するオーディオ CD も、日本国内の売上げは 1998 年をピークに減少を続けている。欧米でも状況は同じである。

その一方、世界中のあらゆる都市で、路上でも、カフェテリアでも、バスや電車でも、ポータブルオーディオ機器を持ち、ヘッドホンやイヤホンをかけた人々たちを目にする。音楽が毎日大量に消費されていることは疑いようがない。ただ、人々がポータブルオーディオプレーヤーで聞く音楽の多くは、インターネット上で配信される圧縮オーディオ、つまり CD などのオーディオ信号を、データ量を小さくするために圧縮したものである。圧縮されたオーディオは、もと

の CD の品質に迫ることはあっても、超えることはない。

ここで CD の品質というのは、オーディオ CD のフォーマットが潜在的に持つ最高品質を意味する。実際に再生されてわれわれが聞く音は、プレーヤ、アンプ、スピーカといった機器の性能と再生環境によって劣化している。理想的な条件で、オーディオ CD に記録された信号が余すところなく完璧に再生された音を聞いた人はいないのである。

昨今の状況を見ると、CD の音を忠実に再生することよりも、データサイズを減らして、大量の楽曲をポータブルプレーヤに入れて持ち歩くことが好まれている。国によって事情は異なるが、韓国での売上げは、すでに音楽配信がオーディオ CD を上回っている。CD の品質でさえ、多くの人にとっては冗長なのである。では、なぜ本書で超広帯域オーディオを取り上げるのか、それには、二つの理由がある。第一に、インターネットの通信速度向上と記録メディアの大容量化により、デジタルオーディオは、もはやオーディオ CD の規格にこだわる必要はないということ。第二に、超広帯域オーディオの計測技術を論じることにより、音響計測技術の現状や課題が明確になるということである。

まず、確かにスーパーオーディオ CD や DVD オーディオが今後オーディオの主流になるとは考えにくい。しかし、2006 年頃からインターネット上の複数のサイトで、超広帯域オーディオデータの配信が行われている。また、ブルーレイディスク (BD) の規格には、サンプリング周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 で 6 チャンネル、しかもデータ損失なしという超広帯域のマルチチャンネルフォーマットが含まれている。サンプリング周波数 96 000 Hz なら 8 チャンネルも可能である。

サンプリング周波数と量子化ビット数は、デジタルオーディオの周波数帯域およびダイナミックレンジと密接に関係する変数で、値が大きいかほど高品質になる。オーディオ CD のサンプリング周波数は 44 100 Hz、量子化ビット数は 16、チャンネル数は右と左の 2 チャンネルである。BD の規格はすべてにおいて CD を圧倒するものである。

そもそもオーディオ信号のデータサイズは、高画質動画に比べると格段に小

さい。720×480画素,8ビット階調,毎秒30コマの動画を圧縮せずに通信するには,約83 Mbpsのビットレートが必要となる(bpsおよびビットレートについては1.3.2項参照)。これは,オーディオCDのビットレート(約1.4 Mbps)のおよそ60倍である。DVDプレーヤでは,標準モードで平均4.6 Mbpsなので,動画は非圧縮では扱えないが,オーディオ信号なら非圧縮でも通信できる。BDの最高転送速度は56 Mbpsなので,超広帯域オーディオをマルチチャンネルで処理できる。この56 Mbpsというビットレートは,近年,無線LANでも実現可能となってきている。

インターネットの通信技術や大容量記録メディアの進歩によって,超広帯域オーディオも圧縮することなく記録し,送受信することが可能なのである。クラウドコンピューティングを活用し,メディアを所有するのではなく,ネットワーク上で,必要なときに必要なコンテンツにアクセスする時代がすでに始まっている。そこでは,オーディオCDのようなメディアのフォーマットに縛られる必要はない。超広帯域オーディオが普及するのはこれからなのかもしれない。これが超広帯域オーディオに注目する第一の理由である。

超広帯域オーディオに注目する第二の,そして,より大きな理由は,超広帯域オーディオの計測技術を論じることにより,音響計測技術の現状や課題を明確に示すことができると考えるからである。本書のメインテーマは,あくまでも計測技術なのである。

CDプレーヤの特性を計測する手法は,JEITA(電子情報技術産業協会)によって定められている。しかし,この手法では,超広帯域オーディオが扱う広いダイナミックレンジと周波数帯域をカバーすることはできない。超広帯域オーディオでは,理論上のダイナミックレンジが120 dB以上,周波数帯域も90 000 Hzを超える。そのような信号を測定するには,これと同等以上の帯域とダイナミックレンジを持つ計測手法,装置が必要となる。

超広帯域オーディオが注目され始めた1990年代末から,一部の研究者により,非可聴帯域まで含めた品質管理の重要性和難しさが指摘されていた。しかし,この点を正面から議論し,考察する書籍はほとんど出版されていない。

そこで、本書の狙いは、高品位オーディオが置かれている現状、課題を整理し、新しい時代のオーディオ技術を切り開くための基礎知識を共有しようというものである。本書の構成は以下のとおりであるが、いずれの項目も、よりよいオーディオ製品が登場することへの期待を込めて論じられている。

本書は、アナログオーディオ技術の種類、変遷について簡単に紹介するところから始まる。第1章では、デジタルオーディオメディアの代表であるオーディオCDも取り上げ、そのフォーマット、容量と音質について短く述べる。

第2章では、デジタルオーディオの基礎知識として、サンプリングと量子化について説明する。デジタルオーディオを知るうえで非常に重要な量子化雑音やオーバーサンプリング、デルタシグマ ( $\Delta\Sigma$ ) 変調も登場する。0と1の2値しか持たない1ビットで、どうしてオーディオ信号を記録し、再現することができるのかについても解説している。

超広帯域オーディオは、ハイサンプリング、ハイビット、オーバーサンプリング、デルタシグマ変調といった要素によって実現されている。第3章では、このうち、ハイサンプリングに焦点が当てられる。まず、オーディオCDのフォーマットで、なぜ22 050 Hz以上の周波数成分の録音ができないのかが述べられる。続いて、ハイサンプリング技術によって、どのようなメリットがもたらされるのかが紹介される。この章では、ハイサンプリング化によって生じる問題点についても論じている。特に、超音波帯域まで含めた品質管理の重要性については、筆者らの過去の調査結果を含めて紹介した。

第4章では、ハイビット化による効果について述べている。ここでは、デジタルオーディオにおけるダイナミックレンジの求め方、1ビットオーディオにおける量子化雑音の特性が示されている。

良質なオーディオコンテンツを作るには、優れた演奏や録音技術だけでなく、信頼できるマイクロホンがなくてはならない。マイクロホンの校正は、あらゆる音響計測を支える基準である。第5章では、超低周波や超音波を録音するマイクロホンの特性がどのようにして計測されるのか、超広帯域の録音用マイクロホンはどのようなアイデアによって実現されるのかが紹介される。

われわれが聞く音は、聴取環境の影響を受けている。同様にスタジオやホールで録音される音楽にもその空間の特性が加わる。この空間の音響的な特性を調べるのが室内音響と呼ばれる分野である。第6章では、室内の音響特性をどのようにして測定するのか、代表的な手法について解説している。

録音・再生される信号は、雑音、ひずみによって劣化する。機器の性能を評価するには、オーディオシステム内で雑音、線形および非線形ひずみがどの程度生じているかを定量的に測定することが重要となる。第7章では、デジタルオーディオにおいて、信号を忠実に記録・再生するための心臓部ともいえるA-D/D-A変換器のおもな評価項目が述べられる。また、電気信号を音響波形に変換する役割を担うスピーカやヘッドホンの非線形ひずみ測定方法についても紹介する。

タイムジッタは、デジタルオーディオ特有の音質劣化要因として、特にオーディオマニアの間でしばしば言及されており、なかには迷信に近い言説も少なくない。その一方で、タイムジッタに関して科学的な観点で解説している書籍は少ない。そこで、本書では、一つの章(第8章)を割いて、タイムジッタについて詳しく解説している。

オーディオ機器を評価するうえで、人の聴覚特性を理解しておくことはきわめて重要である。聴覚特性に関する知識がなければ、人にとって不要な帯域の信号に貴重なダイナミックレンジを割くといった好ましくない状況を招くことになる。第9章では、人の可聴域に関する研究を紹介する。ここでも、あくまでも聴覚閾値や可聴域の限界を定量的に測定することに主眼が置かれている。

音は、人の耳に届くまでにさまざまな要因によって変化する。したがって音の主観評価実験を行うには、聴取環境を統制することが不可欠である。音の印象は、聞く人の心理的な側面によっても影響される。さらに実験者側の先入観や思い込みによっても実験結果が左右される。このことが音の主観評価を難しくしている。第10章では、この種の問題について述べるとともに、音響心理実験でも頻繁に用いられる有意差の検定について、正しく利用するための注意点が述べられている。

本書を通して、現代の音響計測技術がどこまで進んでいるのか、超広帯域の信号を録音し、計測するために、どのような研究が進められており、どのような課題が残されているのかについて理解していただけたら幸いである。また、一人でも多くの読者が、手頃で便利な圧縮オーディオとは別の高品位オーディオに関心を抱いてもらえることを願う。

本書を執筆するにあたっては、多くの方々の協力が不可欠であった。アキュフェーズ株式会社の高松重治、大貫昭則両氏には、第7章の測定データを提供いただくとともに、第1章の内容を校閲していただいた。産業技術総合研究所の堀内竜三、高橋弘宜両氏には、5.1節の内容を校閲し、図や写真も提供いただいた。上田麻理氏には、第10章について忌憚のない意見を聞かせていただいた。株式会社ATR-Promotionsの正木信夫氏には、すべての章にわたって有益な助言をいただいた。

さらに、産業技術総合研究所および旧電子技術総合研究所の諸先輩方、その他、研究を支援していただいたすべての方々に深く感謝の意を表す。

#### 執筆分担

1章 蘆原 郁	2章 桐生昭吾, 蘆原 郁
3章 蘆原 郁	4章 蘆原 郁, 桐生昭吾
5章 小野一穂, 蘆原 郁	6章 大久保洋幸, 蘆原 郁
7章 蘆原 郁	8章 西村 明, 蘆原 郁
9章 蘆原 郁	10章 蘆原 郁

2011年6月

編著者

# 目 次

## 1. 超広帯域オーディオまでの道のり

1.1 アナログ録音	1
1.1.1 機 械 式	1
1.1.2 光 学 式	8
1.1.3 磁 気 式	10
1.2 音質と容量	11
1.2.1 機械式レコード	12
1.2.2 光学式録音	14
1.2.3 磁気録音	15
1.3 CD-DAの音質	17
1.3.1 CD-DAのフォーマット	17
1.3.2 CD-DAの記録容量とビットレート	19
1.4 超広帯域オーディオ	21
1.4.1 ハイサンプリングと次世代オーディオ	21
1.4.2 オーディオの二極化	22
引用・参考文献	24

## 2. サンプリングと量子化

2.1 ナイキスト周波数とエリアシング	25
2.2 オーバーサンプリング	28

2.3 量子化雑音とディザ	29
2.4 PCM と $\Delta\Sigma$ 変調	32
引用・参考文献	37

### 3. ハイサンプリングのメリットとデメリット

3.1 サンプリング定理	38
3.2 ハイサンプリングのメリット	42
3.2.1 波形忠実度の向上	42
3.2.2 量子化雑音レベルの低減	43
3.3 ハイサンプリングのデメリット	44
3.3.1 非線形ひずみの増大	44
3.3.2 タイムジッタの影響	47
3.3.3 スーパーオーディオ CD の量子化雑音	50
3.3.4 パッケージメディアの品質管理	52
引用・参考文献	60

### 4. ハイビットとダイナミックレンジ

4.1 デジタルオーディオのダイナミックレンジ	62
4.1.1 デジタルオーディオにおけるダイナミックレンジの求め方	62
4.1.2 オーディオ信号のダイナミックレンジ	65
4.2 コンプレッションとヘッドルーム	65
4.3 ハイビット化によって期待されること	67
4.4 1 ビットオーディオの量子化雑音	69
引用・参考文献	72

## 5. 超広帯域のマイクロホン技術

5.1 超低周波から超音波までの音響計測	73
5.1.1 標準マイクロホン	73
5.1.2 超低周波領域の音響標準	77
5.1.3 超音波領域の音響標準	79
5.1.4 音響標準の重要性	83
5.2 超広帯域マイクロホンの開発	84
5.2.1 背景	84
5.2.2 音楽録音用マイクロホンの広帯域化	85
5.2.3 音楽録音用超広帯域マイクロホン	90
引用・参考文献	94

## 6. 室内音響と超広帯域オーディオ

6.1 スタジオ，ホールの残響時間	96
6.1.1 残響時間	96
6.1.2 残響時間の測定	98
6.1.3 ノイズ断続法とインパルス積分法	99
6.1.4 クロススペクトル法	101
6.1.5 TSP 法	103
6.2 室内音響の周波数限界	105
6.3 超広帯域オーディオと室内騒音	110
6.3.1 遮音の評価	110
6.3.2 騒音レベル	111
6.3.3 NC 値	112

6.4 再生環境 ..... 114  
 引用・参考文献 ..... 115

## 7. オーディオ信号の劣化およびその計測

7.1 雑音とひずみ ..... 118  
 7.2 オーディオ機器の測定 ..... 119  
     7.2.1 信号対雑音比 ..... 119  
     7.2.2 THD+N ..... 120  
     7.2.3 ダイナミックレンジ ..... 122  
     7.2.4 入出力直線性 ..... 122  
     7.2.5 周波数特性 ..... 123  
     7.2.6 群遅延時間 ..... 124  
 7.3 超広帯域オーディオ計測の問題 ..... 125  
 7.4 トランスデューサの線形性 ..... 126  
     7.4.1 線形ひずみと非線形ひずみ ..... 126  
     7.4.2 高調波ひずみ ..... 127  
     7.4.3 混変調ひずみ ..... 129  
     7.4.4 その他の非線形ひずみ ..... 130  
     7.4.5 帯域通過フィルタを用いた非線形ひずみの抽出 ..... 132  
     7.4.6 スピーカの時間ゆらぎ（ドップラひずみ） ..... 141  
 引用・参考文献 ..... 143

## 8. タイムジッタ

8.1 デジタルインタフェースジッタ ..... 145  
 8.2 サンプリングジッタ ..... 147  
 8.3 サンプリングジッタ計測法 ..... 149

8.3.1	周波数領域での測定	150
8.3.2	時間領域での測定	151
8.3.3	実 際 の 測 定	152
8.3.4	音楽信号を用いたジッタ測定	156
8.4	計測からわかるサンプリングジッタの諸様相	162
8.4.1	計 測 条 件	162
8.4.2	CD プ レ ー ヤ	166
8.4.3	DVD プ レ ー ヤ	171
8.4.4	パソコン用オーディオ機器	172
8.4.5	信号に依存するジッタ: J-test 信号	173
8.4.6	CD-R メディアによる影響	176
8.4.7	経 年 変 化	178
8.5	タイムジッタの許容量	179
8.5.1	理論上のタイムジッタ許容量	179
8.5.2	タイムジッタの検知域	183
8.6	ま と め	187
	引用・参考文献	188

## 9. 聴覚からみたオーディオ周波数帯域

9.1	可聴域と周波数帯域	190
9.2	純音の可聴域	190
9.2.1	低周波聴覚閾値測定	192
9.2.2	高周波聴覚閾値測定	201
9.3	複合音中の超高周波音	206
9.3.1	調波複合音における超高周波音の検知閾	206
9.3.2	調波複合音における可聴周波数上限	211
9.3.3	音楽信号での実験	216

9.4 ま と め ..... 223  
 引用・参考文献 ..... 224

10. 主観評価実験を行うには

10.1 出力信号をチェックする ..... 229  
 10.1.1 信号の劣化 ..... 229  
 10.1.2 レベル校正 ..... 229  
 10.1.3 信号レベル ..... 230  
 10.2 暗騒音，機材の動作確認など ..... 231  
 10.3 追試可能な実験計画を立てる ..... 231  
 10.4 ラボノート ..... 232  
 10.5 認知的バイアス ..... 234  
 10.5.1 ハロー効果，確証バイアス，プラシーボ効果 ..... 235  
 10.5.2 盲検法，二重盲検法，三重盲検法 ..... 235  
 10.5.3 実験者効果とヒツジ-ヤギ効果 ..... 236  
 10.6 有意差検定の注意点 ..... 238  
 10.6.1 例1： $t$ 検定の繰返し ..... 239  
 10.6.2 例2：尺度の混同 ..... 241  
 10.6.3 例3：手法，尺度の変更 ..... 243  
 10.6.4 例4：データの作為的な選別 ..... 244  
 10.6.5 例5：統計量の誤用 ..... 246  
 10.6.6 標本の抽出 ..... 247  
 10.6.7 有意水準について ..... 249  
 10.7 おわりに ..... 250  
 引用・参考文献 ..... 251

索 引 ..... 252

# 1

## 超広帯域オーディオまでの道のり

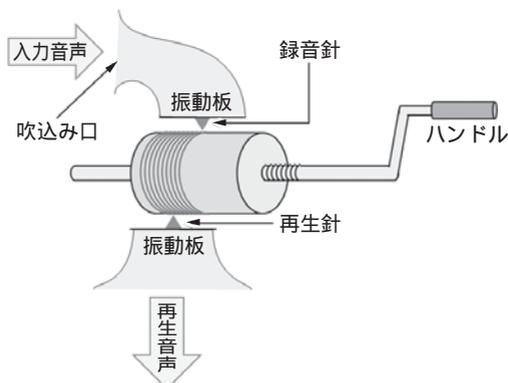
### 1.1 アナログ録音

オーディオ技術は、音をメディアに記録する技術とメディアに記録された音を再生する技術である。このオーディオ技術の歴史をさかのぼると、130年ほど前、アメリカの Thomas Edison により世界初の蓄音機が発明されたことにたどり着く。この装置はフォノグラフ (phonograph) と名付けられた<sup>1), 2)</sup>。言うまでもなく、フォノグラフはアナログオーディオ装置である。これ以降、初の民生デジタルオーディオ機器である CD プレーヤが発売されるまで、100年以上、アナログオーディオの時代が続くのである。

アナログ録音には、いくつかの方式がある。本節では、代表的な録音方式として、機械式録音、光学式録音、磁気式録音を取り上げ、それぞれの仕組みについて、簡単に説明する。

#### 1.1.1 機械式

(1) 円筒式と円盤式      フォノグラフは、図 1.1 に示すように、ハンドルの付いた鉄の軸に取り付けられた直径 8 cm の真ちゅうの円筒と、針の付いた振動板からなる。振動板につながる吹込み口に向かって話しながらハンドルを回すと、円筒が回転しながら軸上を移動し、針が円筒の表面のすず箔に溝を刻む。溝が刻まれた円筒を回転させると、今度は針が刻まれた凹凸をトレースし、これに伴って振動板が震え、声が再生されるのである。



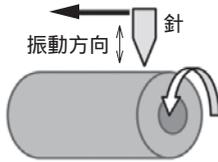
フォノグラフの模式図。軸に取り付けられたハンドルを回すと表面にすず箔が塗られた円筒形のシリンダが回転しながら軸に沿って移動する。

図 1.1 フォノグラフ

1877年12月6日、この装置を使った最初の録音再生実験が行われた。録音されたのは、Edison自身が歌う「メリーさんのヒツジ」だったとされている。歌が再生されたときのことを、後にEdisonは、「一生のうち、あんなに驚いたことはなかった」と語っている<sup>1)</sup>。なお、12月6日は、日本オーディオ協会により、「音の日」と定められている。

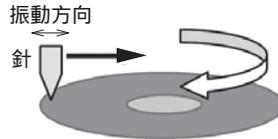
Edisonによるフォノグラフの発明から10年後、ドイツのEmil Berlinerにより、円盤式蓄音機が発明された。フォノグラフのレコードが円筒型であるのに対し、Berlinerは円盤型のレコードを考案した。これは、Edisonの特許から逃れるためでもあった。また、Edisonの録音方式は、音波を溝に対して垂直方向の凹凸として記録していたのに対し、Berlinerは、溝に対して水平方向の振動として記録する方式を考案している。円筒式、円盤式による録音方法の模式図を図1.2に示す。

音は、空気の圧力変化である。圧力は、静圧を中心として、プラス方向とマイナス方向に変動している。針を垂直方向に振動させる記録方式では、プラス側とマイナス側、つまり溝が深いときと浅いときとで、針がレコード表面から受ける力が大きく異なってしまう。これは音をひずませる原因となる。Berliner



( a ) 円筒式レコード

円筒式レコードと円盤式レコードの模式図。円筒式は、円筒表面上の溝に信号が凹凸の形状によって記録される。この凹凸を針でトレースし、針の振動を振動板に伝えることによって再生する。円盤式は、円盤表面に外周側から内周側に向けて渦巻状に溝が刻まれる。針は、外周から内周に向かって移動しながら溝に刻まれた凹凸の信号をトレースする。



( b ) 円盤式レコード

図 1.2 円筒式レコードと円盤式レコード

は、針を水平方向に振動させれば、プラス側、マイナス側の違いをなくすことができると考えたのである。ただし、水平方向の振動は、実際には、円盤の外周側と内周側への変動なので、厳密には差がある。

さらに彼は、円盤レコードの複製を作ることも考案している。録音された原盤の鋳型から、何枚もの複製を生産するというアイデアは、オーディオの歴史を大きく変えるものとなる。

改良の末、1887年に Berliner は、後のレコードプレーヤの原型ともいえる円盤式蓄音機を完成させ、グラモフォン (grammophone) と名付けた。円盤式レコードには、Berliner 自身の声で童謡「きらきら星」が吹き込まれた。

Edison も、すず箔のかわりにろうを塗ったろう管を使用することで円筒式レコードの音質を改善させ、原盤から取った金型に蝋を流し込むことで複製する方法も発明している。

当初、アメリカでは、フォノグラフが優勢であったが、ヨーロッパで市場を獲得したグラモフォンがしだいに人気を博し、20世紀に入るとアメリカでも円盤式レコードが主役の座を奪っていく。これには、装置の性能、すなわちハード面だけでなく、グラモフォンのほうが、レコードのコンテンツ、つまりソフト面において充実していたことが大きな要因であった<sup>1)</sup>。Berliner が音楽好きであったことも一因であろう。

Edison といえば円筒式と思われがちだが、20世紀になってからは、円盤式

レコードも開発している。再生針にダイヤモンドを使用したダイヤモンドディスクと呼ばれるものである。信号はあくまでも深さ方向の凹凸で記録する垂直方式であった。しかし、グラモフォンの優位は変わらず、Edison は、1929 年に蓄音機およびレコードの製造から撤退した。Edison が亡くなる 2 年前のことである。

(2) 電気音響技術とステレオ化 20 世紀初頭のレコードは、音から振動、および振動から音への変換効率の悪さから、ダイナミックレンジ(ダイナミックレンジについては 4.1 節参照)は狭く、周波数帯域も 250 Hz ~ 2500 Hz くらいであった。電話の音声よりも周波数帯域は狭かったことになる。このため、演奏者や歌手は、吹込み口の近くで演奏しなくてはならないが、それでも録音できる楽器は限られ、周波数の低いコントラバスなどは録音できなかった。また、録音時間もレコードあたり 2 分程度であった。

録音・再生時間を長くする要望は強かったが、レコードの回転数を下げると音質が劣化する。特に円盤式では、内周側の音質が悪くなる。音溝を細くするには、針先も細くする必要があるが、当時の技術では困難であった。

このような状況は、1925 年に真空管増幅器を用いた電気音響技術の導入によって一変する。音をマイクロホンで電気信号に変換し増幅する。さらに、レコード盤に信号を刻むカッタヘッドも電気駆動するのである。音を電気信号に変換することにより、信号を増幅できるようになり、信号対雑音比(SN 比)およびダイナミックレンジが大きく改善された。周波数帯域も従来より 2 オクターブ以上広くなった。

電気音響技術が導入されたことにより、録音できる楽器の種類が増え、オーケストラの演奏がつぎつぎにレコード化されるようになった。音を電気信号に変換することには、増幅以外にも、フィルタやイコライザが利用できるなどの利点があり、オーディオ史における画期的な出来事だったといえる。

音響-電気変換器であるマイクロホンも、電気-音響変換器であるスピーカも、じつは、1876 年に実用化されている。Alexander Graham Bell による電話器である。これは、鉄の振動板と電磁石を用いた音響-電気変換器にほかならない。

電話器の発明は、Edison のフォノグラフ発明の前の年である。しかし、電気音響技術がオーディオ技術に導入されるのには、およそ半世紀かかったのである。

1920 年代、レコードの材質にはシェラックが用いられており、回転数が厳密に規格化されていなかったため、毎分 70 回転や 80 回転などのレコードが存在していた。録音時間は、直径 12 インチ（約 30 cm）で片面 4 分～5 分であった<sup>2)</sup>。このレコードは、後に SP（standard play）レコードと呼ばれるものである。

1940 年代に、シェラックに比べて粒子が細かく滑らかなビニールが使われるようになり、より細い音溝に細密な記録が可能になった。1948 年、アメリカのレコード会社 CBS コロムビアから、直径は 12 インチだが、音溝が細くなったことに加えて、毎分  $33\frac{1}{3}$  回転とすることで、録音・再生時間を 30 分まで延ばしたレコードが発売され、LP（long play）レコードと呼ばれるようになる。

同じくアメリカのレコード会社である RCA ビクターでも直径が 17 cm、毎分 45 回転のレコードが開発されていた。このレコードは、EP（extended play）レコードと呼ばれ、レコードの材質や音溝の大きさは LP レコードとほとんど同じであった<sup>1)</sup>。EP レコードの再生時間は 5 分だが、オートチェンジャ（自動演奏装置）という装置により、異なるレコードを連続して再生できるものであった。中心には、オートチェンジャ用の大きな穴があるため、ドーナツ盤とも呼ばれた。

当初のレコードは、1 チャンネル、すなわちモノフォニックであったが、2 チャンネルのステレオフォニックを実用化する研究も進められた。ステレオ化の方式には、1 枚のレコードに 2 本の溝を刻み、2 本に枝分かれした再生針でトレースするバイノーラル方式、頂点が直角をなす V 字型の溝の両壁面に左右の信号を刻む 45-45 方式、左右の信号を垂直（vertical）方向、水平（lateral）方向の振動にして刻み込む VL 方式などがある。

1952 年に開発されたバイノーラル方式は、再生時間が短い、左右チャンネルの音質に差があるといった欠点があり、普及しなかった。後述するとおり、円盤式レコードには、内周ほど音質が悪くなる傾向がある。このため、バイノーラ

ル方式のステレオでは、外周側に信号を刻んだチャンネルのほうが高音質になってしまうのである。

また、1956年に開発されたVL方式は、広く普及していたモノフォニック盤との互換性で劣るという問題があったため、短期間で製造されなくなった。

1930年代から開発が進められた45-45方式は、セラック盤では、実現が難しかったため、ビニール製レコードが主流となる1950年代になって商品化された。この方式は、モノフォニック盤との互換性を確保しており、ステレオ方式の主流になった。

円盤式のレコードは、その後長年にわたりオーディオメディアの主流として君臨した。1980年代に、その座を一般にCDと呼ばれるCD-DA(コンパクトディスクデジタルオーディオ)に譲るが、その後もオーディオマニアやレコード愛好家によって愛聴されている。一方の円筒式レコードは、今では博物館など、限られた場所で保存されている。

(3) 円盤式の長所と短所 円盤式レコードが人気を得たのには、すでに述べたソフト面で勝っていたこと以外にもさまざまな理由が考えられる。

まず、円筒式レコードよりも量産性が優れていたことである。円盤式レコードは、原盤から取った鋳型を使うことにより、複製をいくらかでも容易に作れたため、レコードの大量生産を可能とし、オーディオメディアの大衆化につながった。実際には1枚の原盤から鍍金によって作られる凸型のオリジナル盤から、再度鍍金で凹型のマザー盤が数枚作られる。このマザー盤から、さらに数枚作られる凸型のスタンパーをプレス機にかけて大量のレコード盤が製造される<sup>1),3)</sup>。

薄くて平らな円盤式レコードは、保管場所を取らないという点でも円筒式に勝っていた。また、両面に記録できる点も円筒式にはない特徴である。最初の両面レコードは、1904年に発売されている。これにより、円盤式レコードの録音時間は2倍に伸びたのである。

しかし、円盤式には欠点もある。まず、レコードを一定の角速度で回転させると、外周と内周では、針に対する音溝の相対速度が大きく違ってくる。LPレコードの場合、最外周と最内周で2倍以上の差となる。このため、外周と内周

# 索引

## 【あ】

アジマス 15, 16  
アンチエリアシングフィルタ  
28, 29, 43, 59, 182, 200  
安定度 89, 90

## 【い】

イコライザ 4, 15, 66, 67  
インサイドフォース 7, 14  
インタフェースジッタ  
145-147, 171, 173  
インパルス応答  
101-104, 160  
インパルス積分法 96, 99,  
101, 104

## 【え】

エリアシング 27, 28  
エリアシングひずみ  
27, 59, 60

## 【お】

オーバーサンプリング  
29, 32, 33, 123  
オーバーサンプリング率 36  
折返しひずみ 27  
音圧感度 75-79  
音圧感度校正 79, 80  
音圧相互相反校正法 75  
音響中心 80  
音場感度 78, 79  
音場感度校正 79

## 【か】

解析信号 150-152, 154, 157,  
186  
回折効果 87, 88, 90, 91  
確証バイアス 234  
可聴域 13, 19, 22, 28, 59,  
77, 81, 189, 222, 223  
可聴周波数 28, 40, 42, 114,  
205, 210, 211  
可聴周波数上限 148, 210,  
211, 213-223  
可聴周波数帯域 40, 41, 67,  
77, 78, 189, 190, 201, 202,  
209, 215, 217, 222, 223  
カブラ校正法 75, 78, 79

## 【き】

機械式録音 1  
棄却検定 244  
偽薬 234, 235  
吸音率 97, 107, 110  
吸音力 97, 105  
共振周波数 86, 87, 90, 106  
強制選択法 186

## 【く】

空気吸収 97, 105, 107, 110  
グラモフォン 3, 4  
クロススペクトル法  
96, 101, 104  
群遅延時間 122, 124

## 【け】

計測用マイクロホン  
74, 77, 79, 85, 87, 91, 92,  
112, 195

## 【こ】

コインシデンス効果 111  
光学式録音 1, 14, 15  
高調波ひずみ 31, 119, 121,  
127, 129, 131, 132, 141,  
193, 196, 197, 201, 202  
固有振動 108-110, 114  
コンター効果 16, 17  
コンプレッション 66-69  
混変調ひずみ 52, 60, 127,  
129, 131, 132, 189, 207,  
209, 217  
混変調ひずみ率 124, 129

## 【さ】

最小可聴音圧 190  
最小可聴音場 190  
最小可聴値 64, 190  
最適残響時間 97  
サウンドトラック 8, 9, 14  
残響時間 96-99, 101, 102,  
104, 105, 107, 110  
三重盲検法 235  
サンプリング 18, 25-  
27, 29, 32, 34, 36, 38, 39,  
42, 55, 145, 147, 152, 158,  
159, 169, 175, 237, 246

サンプリングジッタ 145, 147-151, 171-173  
 サンプリング周期 25, 39, 159  
 サンプリング周波数 18, 20, 21, 25, 26, 28, 29, 34, 36-41, 43, 50, 52, 54-57, 70, 73, 84, 102, 104, 109, 126, 127, 148, 152, 153, 157, 159-161, 170, 179, 180, 183, 200, 201, 216, 228, 229  
 サンプリング定理 38, 40, 41  
**【し】**  
 磁気式録音 1, 10, 15, 16  
 実験者効果 236  
 ジッタ 145, 147-150, 152-154, 156-158, 161-164, 166, 168-170, 172-177, 185, 186  
 質量則 111  
 自由音場型計測用  
   マイクロホン 91, 92  
 自由音場感度 78, 79  
 自由音場相互校正法 79, 82, 83  
 周波数帯域 4, 11, 12, 17-19, 21, 22, 24, 38, 39, 41-44, 46, 50, 52, 57, 60, 70, 73, 74, 81, 83-88, 93, 110, 112, 114, 115, 118, 121, 126, 133, 143, 189, 200, 222, 228  
 周波数特性 17, 35, 46, 51, 73, 74, 77, 82, 83, 85, 87, 91-93, 103, 108, 109, 112, 115, 119, 122, 123, 132, 134, 183, 193  
 純音聴覚閾値 200, 203, 205, 211, 214-216, 218-222  
 信号対雑音比 4, 32, 78, 82, 83, 85, 89, 90, 104, 119, 122, 125, 137,

138, 140, 166  
**【す】**  
 スーパーオーディオ CD 22, 37, 41, 42, 50-52, 57, 58, 69, 70, 84, 125  
 スチフネス 86, 89, 90  
 スマイルノフ・グラブス  
   棄却検定 244  
**【せ】**  
 絶対校正 75  
 絶対校正法 79  
 線形ひずみ 67, 118, 119, 122-124, 126, 228  
 全高調波ひずみ 65, 120, 138, 141  
 全高調波ひずみ率計 120, 121  
**【そ】**  
 騒音レベル 56, 111-113, 229, 230  
 相反定理 75  
**【た】**  
 ダイナミックレンジ 4, 11, 12, 14-19, 21, 22, 24, 32, 50, 62-69, 73, 118, 120, 122, 125, 141, 230  
 タイムジッタ 47, 48, 56, 60, 145, 177-185, 189, 228  
 第1種の誤り 237, 239, 240  
 第2種の誤り 237  
**【ち】**  
 聴覚閾値 190, 191, 196, 200, 201, 214, 215, 220, 223  
 聴感補正 119, 120, 122, 125  
 超広帯域マイクロホン 85, 90-92, 115  
 調整法 181, 186  
 超低周波音 77, 190, 205

**【て】**

ディザ 30, 31, 34, 43, 50, 64, 65, 70  
 デジタルインタフェース  
   ジッタ 147  
 低調波ひずみ 127, 131, 132, 201, 202  
 データ転送レート 21  
 テレグラフオン 11

**【と】**

等価雑音レベル 85, 92  
 等価スチフネス 86, 87, 89  
 頭部伝達関数 198  
 等ラウドネス曲線 125  
 トーキー 8  
 ドブプラひずみ 127, 143

**【な】**

ナイキスト周波数 26-29, 38-40, 57, 124, 182, 183, 200

**【に】**

二区間二肢強制選択 203  
 二重盲検法 235, 237  
 2 接続頭辞 20  
 入出力直線性 123  
 認知的バイアス 233

**【の】**

ノイズシェーピング 32, 33, 35, 41, 50  
 ノイズ断続法 96, 99, 101

**【は】**

波高率 69  
 ハロー効果 234, 237  
 反証可能性 230, 231

**【ひ】**

比較校正 74, 75

非線形ひずみ	44,	ヘッドルーム	65-69	50, 62, 69-71, 73, 178
46, 56, 67, 118, 119, 122,		変形上下法	203, 207, 211	リミッタ
126, 127, 131, 132, 134,				66-69
137, 140, 153, 217, 228		【ほ】		量子化
ヒツジ-ヤギ効果	236	飽和磁化	15	12, 18, 25, 29, 30,
ビットレート	21			32-34, 37, 42, 50, 64, 71,
標準マイクロホン	74-79, 83	【ま】		126, 147, 153, 247
標本化	38, 148	マグネトフォン	11	量子化誤差
ヒルベルト変換	151			32
		【も】		量子化雑音
【ふ】		盲検法	233, 234, 237	29-36, 41, 43,
フォノグラフ	1-3, 5, 249			50-52, 57, 58, 60, 62-65,
ブラシーボ効果		【ゆ】		67-71, 120, 122, 125, 130,
	234, 236, 237	有意差検定	237, 246, 247	153, 178, 179, 230
分散分析	240, 243			両耳加算
		【り】		198
【へ】		離散コサイン変換	160	量子化ビット数
平均吸音率	97	リニア PCM	29, 30, 32, 41,	18, 20, 21,
				29-31, 41, 43, 50, 52, 63,
				64, 69, 70, 122, 127, 180,
				189, 201
				【れ】
				レーザピストンホン
				78

【A】		【D】		【E】
A 特性重み関数	111	DAT	19, 21, 22, 41, 179, 180	Edison, Thomas A. 1-5, 249
ABX 法	184, 216	DCC	19, 22	EP レコード
AES/EBU	145, 147	DCT	160, 161	5
aliasing	27	digital audio tape		equalizer
analysis of variance	240		19, 41, 179	66
		digital compact cassette	19	experimenter effect
【B】		digital versatile disc	41	236
Bell Alexander G.	4	direct stream digital	41, 50, 69	【F】
Berliner, E.	2, 3	Disney, W. E.	8, 9	falsifiability
blind experiment	234	dither	30	230
		Dr 値	111	【G】
【C】		DSD	41, 50, 69, 71	grammophone
CAV 方式	19	DVD	8, 41, 52, 54, 109,	3
CLV 方式	19		162, 179-181	【H】
confirmation bias	234	DVD オーディオ	22, 28, 41,	halo effect
constant angular velocity	19		42, 50, 52, 55, 57, 58, 69,	234
constant linear velocity	19		84, 164, 169, 179, 181	harmonic distortion
crest factor	69			31
cross-spectrum method	96			HATS
				139, 194, 195, 198
				HDMI
				146
				head and torso simulator
				194
				head-related transfer
				function
				198

high-definition multimedia  
interface 146  
HRTF 198

## 【I】

impulse response 101  
infrasound 190  
integrated impulse response  
method 96  
intermodulation distortion  
52  
interrupted noise method 96  
ITSP 103

## 【J】

J-test 信号 171-174

## 【L】

laboratory standard 74  
least significant bit 30  
LP レコード 5, 6, 13  
LS マイクロホン 74  
LSB 30, 43, 63, 171, 178  
Lumière 8

## 【M】

MAF 190-194, 197-199, 211  
MAP 190, 194, 195,  
197-199  
MD 19, 22  
Mendel, J. G. 244  
Millikan, Robert A. 244  
MiniDisc 19  
minimum audible field  
190  
minimum audible pressure  
190

## 【N】

National Television System  
Committee 18  
NC 曲線 56, 64, 112-114  
NC 値 56, 64, 112-114  
noise shaping 32  
NTSC 18  
Nyquist frequency 26

## 【O】

oversampling 29

## 【P】

phase-locked loop 147  
phonograph 1  
pink-TSP 104  
placebo 234  
PLL 147  
Poulsen, V. 11

## 【Q】

quantization 25  
quantization error 29

## 【R】

rejection test 244  
reverberation time 96

## 【S】

sampling 25  
sampling rate 25  
sampling theorem 38  
sheep-goat effect 236  
SI 接頭辞 20, 21  
signal to noise ratio 119  
Smirnov-Grubbs test 244

SN 比 4, 32, 119  
sound absorption 97  
SP レコード 5  
Student's *t*-test 238  
S/PDIF 145, 168, 172

## 【T】

*t* 検定 238-241, 243-245  
talkie 8  
telegraphone 11  
THD+N 120-122, 125,  
138-140  
threshold of hearing 190  
time jitter 47  
time-stretched pulse 74  
total harmonic distortion +  
noise 120  
transformed up-down  
method 203  
TSP 74, 103, 104, 228  
TSP 法 96, 104  
type I error 237  
type II error 237

## 【V】

VL 方式 5, 6

## 【W】

Wilcoxon の符号検定 242  
working standard 74  
WS マイクロホン 74, 82, 83

## 【数字・ギリシャ文字】

45-45 方式 5, 6  
 $\Delta\Sigma$  変調 32, 33, 36, 37, 50,  
69-71

— 編著者・著者略歴 —

蘆原 郁 (あしはら かおる)

- 1986年 筑波大学第二学群人間学類卒業  
1991年 筑波大学大学院心身障害学研究科  
博士課程修了(心身障害学専攻)  
学術博士  
1992年 工業技術院電子技術総合研究所勤務  
2001年 独立行政法人産業技術総合研究所勤務  
現在に至る

大久保 洋幸 (おおくぼ ひろゆき)

- 1992年 明治大学大学院工学研究科修士課程  
修了(電気工学専攻)  
1992年 日本放送協会に入局  
以来放送技術研究所にて、室内音響  
計測、音場シミュレーション、三次元  
音響再生技術の研究等に従事。現在、  
放送技術研究所テレビ方式研究部副  
部長

小野 一穂 (おの かずほ)

- 1991年 東京大学大学院工学系研究科修士課  
程修了(計数工学専攻)  
1991年 日本放送協会に入局  
以来放送技術研究所にて、スピーカー  
アレーを用いた立体音響再生技術、音  
響トランスデューサーの研究に従事。  
現在、放送技術研究所テレビ方式研  
究部主任研究員

桐生 昭吾 (きりゆう しょうご)

- 1983年 東京都立大学電気工学科卒業  
1988年 東京都立大学大学院工学研究科博士  
課程修了(電気工学専攻)  
工学博士  
1988年 工業技術院電子技術総合研究所勤務  
2001年 独立行政法人産業技術総合研究所勤務  
2005年 武蔵工業大学教授  
2009年 東京都市大学教授(校名変更)  
現在に至る

西村 明 (にしむら あきら)

- 1990年 九州芸術工科大学音響設計学科卒業  
1996年 九州芸術工科大学大学院芸術工学研  
究科博士後期課程単位取得満期退学  
(情報伝達専攻)  
1996年 東京情報大学助手  
2006年 東京情報大学助教授  
2007年 東京情報大学准教授  
現在に至る  
2011年 博士(芸術工学)九州大学

# 超広帯域オーディオの計測

Measurement of super wide range audio

© Ashihara Kaoru 2011

2011年8月5日 初版第1刷発行

検印省略

編著者 蘆原 郁  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社

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 978-4-339-00811-4 (新宅) (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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします