

## 音響サイエンスシリーズ編集委員会

### 編集委員長

九州大学

工学博士 岩宮眞一郎

### 編集委員

明治大学

博士(工学)

上野佳奈子

日本電信電話株式会社

博士(芸術工学) 岡本 学

九州大学

博士(芸術工学)

鏑木 時彦

金沢工業大学

博士(工学) 土田 義郎

九州大学

博士(芸術工学)

中島 祥好

東京工業大学

博士(工学) 中村健太郎

九州大学

Ph.D.

森 周司

金沢工業大学

博士(芸術工学) 山田 眞司

(五十音順)

(2010年4月現在)

## 刊行のことば

われわれは、音からさまざまな情報を読み取っている。言葉の意味を理解し、音楽の美しさを感じることもできる。音は環境の構成要素でもある。自然を感じる音や日常を彩る音もあれば、危険を知らせてくれる音も存在する。ときには、音や音楽を聴いて、情動や感情が想起することも経験する。騒音のように生活を脅かす音もある。人間が築いてきた文化を象徴する音も多数存在する。

音響学は、音楽再生の技術を生みかつ進化を続け、新しい音楽文化を生み出した。楽器の奏でる繊細な音色や、コンサートホールで聴く豊かな演奏音を支えているのも、音響学である。一方で、技術の発達をもたらした騒音問題に対処するのも、音響学の仕事である。

さらに、コミュニケーションのツールとして発展してきた電話や携帯電話の通信においても音響学の成果が生かされている。高齢化社会を迎え、聴力が衰えた老人のコミュニケーションの支援をしている補聴器も、音響学の最新の成果である。視覚障害者に、適切な音響情報を提供するさまざまな試みにも、音響学が貢献している。コンピュータやロボットがしゃべったり、言葉を理解したりできるのも、音響学のおかげである。

聞こえない音ではあるが、医療の分野や計測などに幅広く応用されている超音波を用いた数々の技術も、音響学に支えられている。魚群探査や潜水艦に用いられるソナーなど、水中の音を対象とする音響学もある。

現在の音響学は、音の物理的な側面だけではなく、生理・心理的側面、文化・社会的側面を包含し、極めて学際的な様相を呈している。音響学が関連する技術分野も多岐にわたる。従来 of 学問分野に準拠した枠組みでは、十分な理解が困難であろう。音響学は日々進化を続け、変貌をとげている。最先端の部

## ii 刊行のことば

分では、どうしても親しみやすい解説書が不足がちだ。さらに、基盤的な部分でも、従来の書籍で十分に語り尽くせなかった部分もある。

音響サイエンスシリーズは、現代の音響学の先端的、学際的、基盤的な学術的話題を、広く伝えるために企画された。今後は、年に数点の出版を継続していく予定である。音響学に関わる、数々の今日的トピックを、次々と取り上げていきたい。

本シリーズでは、音が織りなす多彩な姿を、音響学を専門とする研究者や技術者以外の方々にもわかりやすく、かつ多角的に解説していく。いずれの巻においても、当該分野を代表する研究者が執筆を担当する。テーマによっては、音響学の立場を中心に据えつつも、音響学を超えた分野のトピックにも切り込んだ解説を織り込む方針である。音響学を専門とする研究者、技術者、大学で音響を専攻する学生にとっても、格好の参考書になるはずである。

本シリーズを通して、音響学の多様な展開、音響技術の最先端の動向、音響学の身近な部分を知っていただき、音響学の面白さに触れていただければと思う。また、読者の皆様に、音響学のさまざまな分野、多角的な展開、多彩なアイデアを知っていただき、新鮮な感動をお届けできるものと確信している。

音響学の面白さをプロモーションするために、音響学関係の書物として、最高のシリーズとして展開し、皆様に愛される、音響サイエンスシリーズでありたい。

2010年3月

音響サイエンスシリーズ編集委員会  
編集委員長 岩宮眞一郎

# まえがき

“コンサートホールは最大の楽器である”といわれるように、いわゆるクラシック音楽は演奏会場の響きを伴ってはじめて成立する。すなわち、この種の音楽の演奏のためには、優れた作曲家、演奏家、楽器、あるいは歌手の存在が前提となることはもちろんであるが、その演奏の場であるコンサートホールが音楽の最後の仕上げをしているといっても過言ではない。このような演奏の器となるコンサートホールの響きはどのようにつくられるのであろうか。

コンサートホールを訪れたことのある人なら、壁につけられた凹凸、ステージの上に吊るされた板、傾いた壁、湾曲した面から構成される天井など、さまざまな形の仕掛けに目を向けたことがあるだろう。これらはすべて、コンサートホールの音響効果をねらって生み出された形である。

一方で、数ある著名なホールの響きは少しずつ異なるし、世の中に二つとして同じ形のホールはない。つまり、唯一無二の“最適な響き”というものがあるわけではなく、形に一つの正解があるわけでもないのである。響きの良し悪しを決める種々の要素のバランスを考え、形によって整えていくことでホールの音響効果が高められる。それを支える知識がコンサートホールの科学といえよう。

誰もが見て確認することができるコンサートホールの“形”とホールの命ともいえる“音”にはどのような関係があるのだろうか。コンサートホールの科学は、19世紀初頭、ボストン・シンフォニーホールの建設に際して行われた実験に端を発し、100年以上にわたって蓄積されてきた。その方法は、コンピュータを駆使した解析から心理学的な実験に至るまで幅広い分野にわたる。本書では、形と音との関係を読み解くうえでの科学的知見を中心に解説するとともに、その目標でもある建築設計の現在に迫る。

第1章では、コンサートホールの黎明期から古典形状ともいえるシューボックスホールの登場、その伝統にとらわれない新しい形への展開を追い、またわが国にも優れた音楽ホールが各地に建設されてきた流れを概観し、さまざまな形のコンサートホールが現存する歴史的背景を述べる。

第2章では、ホールの室形状や壁面の素材とホール内部に形成される音場（響き）との関係、聴衆や演奏者が抱くホールの印象の評価要因と響きの構成要素との関係、響きの特徴を定量的に把握するための計測・分析手法や聴感物理指標について解説する。

第3章では、建設前のホールの音響障害の回避や音響効果の検討に使われる予測手法－音響模型実験法とコンピュータシミュレーションについて解説するとともに、ホールの基本形状や壁面等の内部形状と音響現象との関係をビジュアルに紹介する。

第4章では、コンサートホールの設計のプロセスにおいて、室形状や壁の形などのホール内部を構成する要素が、響きとの関連においてどのような意図をもってデザインされていくかを解説する。

第5章では、コンサートホールにおける電気音響技術の利用について概観し、室内の形によって決定される音場の制約を電気音響技術によりいかに超越できるのか、音声明瞭度向上（拡声技術）と室内音響効果の増強（音場支援技術）という側面から解説する。

第6章では、以上で述べてきた室内音響現象の理論的背景として、コンサートホール内部における音のふるまいを物理的・数学的に記述する。

執筆にあたっては、コンサートホールに関する研究や建築空間の音響設計に興味のある方のみならず、音楽演奏や録音などの音楽制作に従事する方にも、有用な知識を提供することを目指した。すなわち、専門知識がない読者でも、コンサートホールの科学を支えている基礎事項を概観できる説明を心がけた。このような執筆方針によって物理現象の記述としての厳密性が失われたことへの対応として、第6章では物理学・数学を得意とする読者向けに、理論的解説を加えた。

冒頭でもふれたように、コンサートホールの科学は100年以上の歴史を持つ一方で、現在も世界各国の研究者によってさまざまな手段で科学的探究が続けられ、研究テーマの魅力的な宝庫であり続けている。あとがきでは、本書で書ききれなかった広がりや今後に残されている課題について、試考する。

2012年4月

上野佳奈子

#### 執筆分担

---

橘 秀樹	1章, コラム4
羽入 敏樹	2.1, 2.2, 2.4節
上野佳奈子	2.3節
坂本 慎一	3章, コラム2, 3
小口 恵司	4章
清水 寧	5章
日高 孝之	6章

---

※上記に記している以外のコラムは  
章の執筆者が執筆

# 目 次

## 第1章 ホールの歴史

1.1 欧米におけるコンサートホールの歴史 .....	1
1.2 日本におけるコンサートホールの歴史 .....	7
引用・参考文献 .....	11

## 第2章 ホール音場の性質と心理的評価

2.1 ホールの形状とホール内部に形成される音場との関係 .....	12
2.1.1 反射音と室内音場 .....	12
2.1.2 室容積と壁面素材 (吸音) .....	14
2.1.3 音楽ホールの室形状 .....	16
2.2 ホールの響きの印象評価要因 .....	19
2.2.1 室内音場の物理事象と聴覚事象 .....	19
2.2.2 受聴者による音場評価プロセスと音の要素感覚 .....	21
2.2.3 空間印象の要素感覚 .....	22
2.2.4 LEV の研究例 .....	24
2.2.5 音場の空間情報の解析例 .....	27
2.3 ホール・ステージにおける演奏者の評価 .....	29
2.3.1 演奏者にとってのコンサートホール .....	29
2.3.2 主観印象の評価要因 .....	30
2.3.3 室内音場の特性と主観印象 .....	32
2.4 各種聴感物理指標 .....	37
2.4.1 室内音響物理指標 .....	37
2.4.2 指標の周波数分析と弁別閾 .....	43
引用・参考文献 .....	44

## 第3章 室内音場の予測

3.1 縮尺模型実験法 .....	48
-------------------	----

3.1.1 音響模型実験の歴史 .....	48
3.1.2 音響模型実験の相似則 .....	51
3.1.3 模型実験による音の可聴化 .....	55
3.2 数値シミュレーション手法 .....	62
3.2.1 幾何音響学に基づく手法 .....	63
3.2.2 幾何音響学の利用例 .....	65
3.2.3 波動音響学に基づく手法 .....	67
3.3 形と音との関係 .....	72
3.4 波動音響シミュレーションの適用事例 .....	77
3.4.1 小ホールのインパルス応答の解析 .....	77
3.4.2 鳴き竜のシミュレーション：縮尺模型実験と波動数値解析 .....	78
引用・参考文献 .....	82

## 第4章 コンサートホールの設計の実際

4.1 ホール計画 .....	84
4.1.1 室内音響設計の役割 .....	84
4.1.2 ホール建設の動機付け .....	85
4.1.3 ホール規模の設定 .....	86
4.2 設計の流れ .....	87
4.3 設計各論 .....	89
4.3.1 基本形のデザイン .....	89
4.3.2 音響障害の防止 .....	95
4.3.3 ステージのデザイン .....	97
4.3.4 壁・天井（拡散）のデザイン .....	106
4.3.5 建築的な音響可変 .....	111
4.3.6 客席椅子のデザイン .....	113
4.3.7 バイブオルガン .....	115
引用・参考文献 .....	116

## 第5章 コンサートホールにおける電気音響技術

5.1 コンサートホールにおける電気音響の利用 .....	118
5.2 コンサートホールにおける拡声技術 .....	120
5.2.1 ハウリング：システムの安定性 .....	122
5.2.2 拡声音の明瞭性 .....	124
5.2.3 拡声音の音像定位 .....	128

5.3 音場支援を目的とした電気音響の利用 .....	130
5.3.1 システムの基本的構成と音響的課題 .....	131
5.3.2 実用化されているシステムの考え方 .....	142
5.3.3 実 施 例 .....	148
引用・参考文献 .....	156

## 第6章 ホール音場の理論的背景

6.1 は じ め に .....	158
6.2 波動音響学による取扱い .....	159
6.2.1 音場の形式論 (定式化) .....	159
6.2.2 残 響 時 間 .....	162
6.2.3 矩形室の音場 .....	163
6.2.4 シュレーダ周波数 .....	166
6.2.5 鏡 像 の 原 理 .....	168
6.3 幾何音響学による取扱い .....	170
6.3.1 幾何音響近似 .....	170
6.3.2 鏡 像 音 源 .....	172
6.3.3 室内の音の伝搬 .....	173
6.3.4 拡 散 反 射 面 .....	175
6.3.5 有限板からの反射 .....	177
6.4 統計的音響学による取扱い .....	178
6.4.1 残響時間の古典論 .....	178
6.4.2 定 常 音 場 .....	180
6.4.3 残響過程の性質と実現象への適用 .....	181
引用・参考文献 .....	184

あ と が き .....	187
---------------	-----

付 表 .....	189
-----------	-----

索 引 .....	191
-----------	-----

# 第1章

## ホールの歴史

18世紀以降、ヨーロッパ諸国でクラシック音楽が公開のコンサートの形で演奏されるようになり、そのための建物、すなわちコンサートホールが建設され始めた。わが国でも、第2次世界大戦後、全国各地にホール（会館）が建設されたが、そのほとんどは総合文化施設として広範な用途を前提とした多目的ホールであった。しかし、1980年頃から音楽専用ホール建設の機運が急速に高まり、ヨーロッパのホールに匹敵するコンサートホールが全国各地に建設されるようになった。本章では、これらのコンサートホールの歴史について、内外の代表的な例を挙げながら概説する。

なお、世界のコンサートホール、オペラ劇場に関しては文献1)、2)に詳細な資料がまとめられている。また、最近のコンサートホール設計の潮流については4章で詳しく述べられている。

### 1.1 欧米におけるコンサートホールの歴史

クラシック音楽の源流についてはヨーロッパの音楽史を細かく<sup>さかのぼ</sup>遡らなければならないが、ここでは演奏の場としてのホールについて、18世紀以降の歴史を見てみることにする<sup>3)</sup>。

イギリスでは、1700年前後から大都市における私邸や居酒屋などで有料のコンサートが開かれ、18世紀にはきわめて盛んになった。そのための建物としてコンサートホール（music room, concert room などとも呼ばれた）が多く建てられた。ただし、席数は数百人程度のものが多く、現在のホールに比べれば小規模であった。その代表的なものとしては1775年頃にロンドンに建設

† 肩付数字は各章末の引用・参考文献番号を表す。

## 2 1. ホールの歴史

されたハノーヴァ・スクエア・ルーム（約 800 席）が有名である（図 1.1）。このホールではイギリスで初めての有料公開コンサートが開かれ、ハイドン、モーツァルトなども演奏を行っている。ロンドン以外にもダブリン、オックスフォード、エディンバラなどにコンサートホールが建てられた。

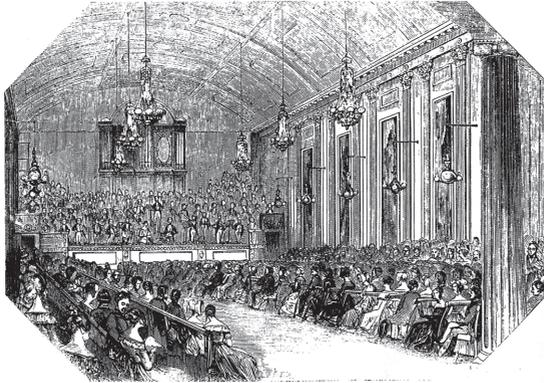


図 1.1 ハノーヴァ・スクエア・ルーム<sup>3)</sup>

一方、中世のヨーロッパ大陸では宮廷が音楽文化の中心で、王公や貴族の館の広間や舞踏場、音楽室などで私的なコンサートが開かれていた。このような背景から、公開コンサートの形式はイギリスよりやや遅れたが、18 世紀後半になって中産階級の台頭を背景として、市民を対象とした演奏会形式がドイツなどで生まれた。その代表的な例としては、1781 年にライプツィヒに設けられたゲヴァントハウス・コンサートホールが挙げられる（図 1.2）。

このホールは繊維織物商組合会館の図書室を改造して作られたもので、約 400 の座席を有し、市民階級を対象とした公開コンサートが開かれていた。このホールは 1894 年に取り壊され、新たにノイエス・ゲヴァントハウスが 1884 年に建設されたが、1944 年に戦災で焼失した。その後、さらに 1981 年に現在のノイエス・ゲヴァントハウスが建設された。

バロック時代（1600 年頃～1750 年頃）から古典派の時代（1750 年頃～1820 年頃）にかけては、演奏会場（ホール、教会など）がある程度特定され、その規模と音響条件に合わせて注文によって作曲されることが多かった（ハイドン

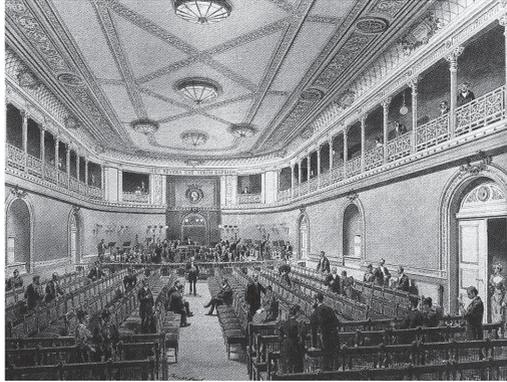


図 1.2 ゲヴァントハウス・コンサートホール<sup>3)</sup>

の交響曲がその一例)。またこの頃のコンサートホールは、その後のものに比べて規模も小さかった。その後、ロマン派の時代になると作品（楽譜）そのものが商品化するなど作曲の形態も変化し、作曲技法、演奏形式も大きく変化した。19世紀後半のベルリオーズ、リスト、ワグナーなどの作品では客席は1500席以上で残響も長い大型ホールを想定して作曲されるようになった。これに伴って、演奏規模も大きくなり、現在のシンフォニー・オーケストラの形が生まれた。シューベルト、メンデルスゾーン、シューマン、ドヴォルザーク、ブラームス、その後のマーラー、リヒャルト・シュトラウスに至る19世紀の作曲家による作品では、弦楽器群も増大し、木管楽器の種類が増え、打楽器類の役割も大きくなっている。このような音楽形式の変化（大型化）に伴って楽器の改良、パワーの増大が行われたことも見逃せない。

このような演奏会場として、ヨーロッパ各地にコンサートホールが建設されるようになった。そのうち代表的なものとしては、ウィーン改造計画の一環として1870年に建設されたウィーン・楽友協会大ホール（設計：T. R. von Hansen）が挙げられる（口絵1、図1.3(a)）。このホールの規模は室容積15000 m<sup>3</sup>、1680席で、基本形は直方体である。この室形状は靴を入れる箱のプロポーションに似ていることから、シューボックス（shoe-box）型と呼ばれている。

1888年にはアムステルダム・コンセルトヘボウ（設計：A. L. von Gent）が

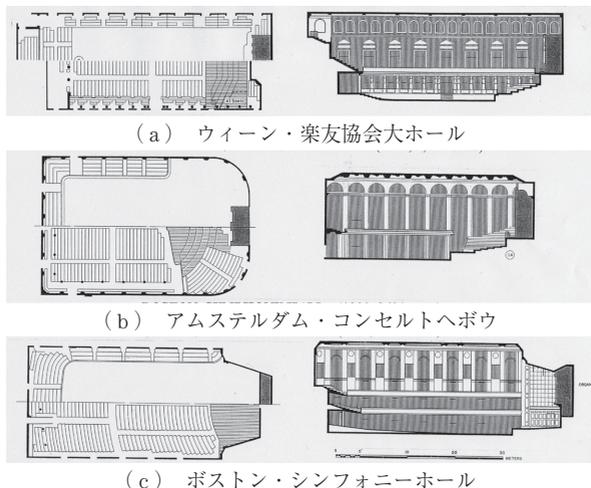


図1.3 代表的なシューボックスホール



図1.4 アムステルダム・コンサートヘボウ

建設された（図1.4、図1.3(b)）。このホールは、前述のウィーンのホールに比べてやや規模が大きく（室容積  $18\,700\text{ m}^3$ ）、ステージの奥は曲面で合唱席が設けられている。合唱を伴わない演奏会では、この合唱席も客席として使われ、20世紀のホールでしばしば採用されている客席がステージを取り囲むアリーナ形式のはしりともいえる。

北米では、1900年にボストン・シンフォニーホールが建設された（図1.5、

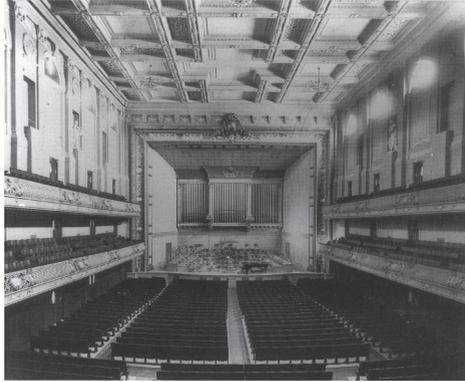


図 1.5 ポストン・シンフォニーホール<sup>4)</sup>

図 1.3(c))。このホールは前述のヨーロッパのホールの流れを汲むもので、形態としてはシューボックス型である。このホールの音響設計にあたって、セービン (W.C. Sabine (1868-1919)) が室内の残響現象を実験的に研究し、残響計算式 (セービンの残響式) を提案した (6.2.2 項参照)。この研究によって、セービンは室内音響学の始祖ともされている。

以上に述べた三つのホールは、コンサート以外に舞踏会や各種の集会などにも用いられ、いずれも平土間形式で座席も比較的簡素で移動可能になっている。

20 世紀に入ると、伝統的なシューボックス型にとらわれない新しい形式のホールが作られるようになった。その代表的なものとして、1963 年に建設されたベルリン・フィルハーモニーホール (設計: H. Scharoun) が挙げられる (口絵 2)。このホールは、ステージを取り囲んでブロックごとに分割された座席が段々畑状に配置されたアリーナ形式で、その形態がヨーロッパのぶどう畑に似ているということからヴィニヤード (vineyard) 型と呼ばれている。この形式のホールは、聴衆の視線・意識が中央のステージに集中して空間的な一体感が得られるなど建築的デザインとしては魅力的であるが、座席位置の違いによる音響的不均一性は免れない。また、どうしてもステージの上部が高くなるために反射音が不足しがちである。これらの音響的に不利な点を補うために、

## 6 1. ホールの歴史

吊り下げ反射板（**浮き雲**）が設けられることが多い。

その後、このようなアリーナ型のコンサートホールが世界各地に建設されるようになった。前述の1981年に建設されたライブツィヒのノイエス・ゲヴァントハウス（**図1.6**）もこのタイプに属する。また、この形式は1980年代以降に建てられた日本のコンサートホールの設計にも大きな影響を与えている。

前述のシューボックス型やヴィニヤード型以外にも、種々の基本形を持つホールがある。そのうち扇形を基本とするホールとしては、ミュンヘン・フィルハーモニー（1985年、**図1.7**）が挙げられる。楕円形もしばしば採用される



**図1.6** ライプツィヒ・ノイエス・ゲヴァントハウス



**図1.7** ミュンヘン・フィルハーモニー

# 索引

<hr/>					
<b>あ</b>					
アイリングの残響式	179	音響拡散体	76	鏡像法	168
アメリカ配置	98	音響可変	111	共鳴器型	52
アリーナ型ホール	93	音響帰還	119	共鳴器型吸音構造	61
アリーナ形式	4	音響集中	97	共鳴システム	163
安全拡声利得	123	音響障害	95	共鳴周波数	163
<hr/>		音響設計	87	鏡面反射	175
<b>い</b>		音響反射板	100	虚音源分布	67
椅子の等価吸音面積	114	音響模型実験	48	虚像法	64
板振動型吸音機構	52, 61	音場支援技術	119	<hr/>	
1席当りの容積	87	音場の拡散性	181	<b>く</b>	
イメージシフト	95	音線法	63, 172	空間印象	22
インコヒーレント	170, 172	音像定位	120	空気の音響吸収	54
インパルス応答	33, 161	<hr/>		空気の特性インピーダンス	72
<hr/>		<b>か</b>			
<b>う</b>		開ループゲイン	122	クライストチャーチ・	
ウィーン・楽友協会大ホール	76	拡散音	20	タウンホール	7
ウィーン楽友協会	3	拡散形状	106, 110	グリーン関数	160
ヴィニヤード	92	拡散反射	175, 182	<hr/>	
ヴィニヤード (veneyard) 型	5	拡散壁	76	<b>け</b>	
ヴィニヤード・ステップ	92	拡声技術	118, 119	計算負荷	69
ヴィニヤードホール	94	拡声ゲイン	122	継時マスクング	19
浮き雲	6, 76	仮想音源分布	27	ゲヴァントハウス・コンサー	
浮き雲タイプ	101	可聴化	55	トホール	2
<hr/>		楽器配置	98	減衰定数	162
<b>え</b>		神奈川県立音楽堂	8	<hr/>	
エコー	20	カラレーション	122, 133	<b>こ</b>	
エンクロージャ	102	乾燥空気	54	後期側方反射音レベル LG	24, 40, 41
エンペローブ関数	174	<hr/>		後向性マスクング	20
<hr/>		<b>き</b>		後天的フィードバック	30
<b>お</b>		幾何音響学	159	行路長	181
大型キャノピータイプ	101	幾何音響理論	62	固有周波数	165
オーケストラホール	86	基本形	89	コンサルトヘボウ	3
音に包まれた感じ	20, 107	客席椅子	113	<hr/>	
音響インピーダンス	160	客席勾配	90, 114	<b>さ</b>	
		客席数	86		
		境界条件	52, 71, 160	ザ・シンフォニーホール	8, 50
		境界要素法	67	サイドスピーカ	128
		鏡像音源	172		

サイドバルコニー	91
残響音	12
残響可変装置	111
残響減衰曲線	37
残響減衰波形	162
残響時間	14, 37, 162
残響チャンパ	111
3大シューボックスホール	89
サントリーホール	10
散乱波	174
<hr/> <b>し</b> <hr/>	
シート・ディップ・	
エフェクト	90, 104
時間重心 $T_g$	39
時間領域有限差分 (FDTD)	
法	73
指向係数	125, 180
室内インパルス応答	161
室内楽ホール	86
時不変性	34
時変制御	136
シミュレーション精度	77
シューボックス	90
シューボックス (shoe-box)	
型	3
シューボックスホール	94
シュレダ拡散壁	106
シュレダ周波数	167
初期音対後期音エネルギー比	39
初期減衰時間	38
初期側方エネルギー率	40
初期側方反射音	17
初期対後期指標 $C_{te}$	39
初期反射音	12, 91
<hr/> <b>す</b> <hr/>	
ステージ床	102, 105
ステージ高さ	102
ステージ面積	86
ステージライザー	102
ストレングス	38
スパークパルス音源	58

---

**せ**

---

セービン	5
セービンの残響式	179
線形性	33
先行音効果	19

---

**そ**

---

奏楽堂	7
相似則	51
速度ポテンシャル	159
側方反射音	18

---

**た**

---

第一波面の法則	19, 128
多孔質型吸音機構	52
多孔質吸音材料	60
たたみ込み積分	35
ダミーヘッド	59
ダミーヘッドマイクロホン	41

---

**ち**

---

丁度可知差異	43
直接音	12

---

**て**

---

定常音場	180
テラス	92
デルタ ( $\delta$ ) 関数	33
伝達関数	160

---

**と**

---

ドイツ配置	98
東京文化会館	8
頭部音響伝達関数	21

---

**な**

---

鳴き竜	79, 96
-----	--------

---

**に**

---

日光東照宮	79
日生劇場	49

---

**の**

---

ノイエス・ゲヴァントハウス	2
---------------	---

---

**は**

---

ハース効果	128
パイプオルガン	115
ハイブリッドシミュレー	
ション	56
ハウリング	119, 122, 134
波動音響学	159
波動音響理論	62
波動方程式	62
ハノーヴァ・スクエア・	
ルーム	2
反射音	12
反射音線	90
反射音到来方向	24

---

**ひ**

---

比音響アドミタンス	71, 160
比音響インピーダンス	71
ひのき舞台	105
日比谷公会堂	7
広がり感	23

---

**ふ**

---

フラッタエコー	78, 96
フランチャイズホール	85
フレネル帯	177
プロセニアムスピーカ	128
フロントスピーカ	128

---

**へ**

---

閉ループゲイン	123
ヘルムホルツ方程式	160
ベルリン・フィルハーモニー	
ホール	5, 49
弁別閾	43

---

**ほ**

---

ホールの横幅	16
--------	----

ポストン・シンフォニー ホール 4, 66 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>み</b></p> <hr/> みかけの音源の幅 19, 107 ミュンヘン・フィルハーモ ニー 6 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>む</b></p> <hr/> むくり 79 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>も</b></p> <hr/> モード 170	モード理論 160 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>ゆ</b></p> <hr/> 有限差分法 67 有限要素法 67 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>ら</b></p> <hr/> ランベルト則 176 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>り</b></p> <hr/> 離散化幅 69 リップルタンク法 49 リブ型吸音構造 53	両耳間相関度 19, 41 臨界距離 126, 180 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>る</b></p> <hr/> 累積エネルギー分布 74 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>れ</b></p> <hr/> レーリーの指標 175, 176 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>ろ</b></p> <hr/> ロングパスエコー 95
---	---	---



<p style="text-align: center;"><b>A</b></p> <hr/> ACS (acoustic control system) 147 AFC (active field control) 143 AR (assisted resonance) 130, 142 ASW 19 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>C</b></p> <hr/> $C_{80}$ 17, 39 clarity 39 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>D</b></p> <hr/> $D_{50}$ 16, 39 definition 39 DI 125 directivity index 125 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>E</b></p> <hr/> EMR (electronic microphone rotator) 136 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>F</b></p> <hr/> Fluc-FIR フィルタ 137	<p style="text-align: center;"><b>I</b></p> <hr/> IACC 20 In-line system 133 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>J</b></p> <hr/> JND 43 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>L</b></p> <hr/> LEV 20 Lf 19 LF 40 LFC 40 LG 41 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>M</b></p> <hr/> modulation transfer function 127 MTF 127 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>N</b></p> <hr/> $N_2$ 置換法 54 non-in-line system 133 non-regenerative system 133 Nyquist の安定性基準 123	<p style="text-align: center;"><b>P</b></p> <hr/> Preference 22 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>Q</b></p> <hr/> Q 125 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>R</b></p> <hr/> RASTI 127 RAV 93 regenerative system 133 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>S</b></p> <hr/> speech transmission index 126 ST (Support) 42 $ST_{Early}$ 42 STI 126 $ST_{Late}$ 42 <hr/> <p style="text-align: center;"><b>V</b></p> <hr/> VRAS (variable room acoustics system) 145
---	--	---

## あ　と　が　き

本書ではコンサートホールの音響にまつわる科学的知見と関連技術を紹介してきた。その内容は100余年の蓄積を経て多岐にわたるとはいえ、それぞれの時代に可能であった研究手法を適用し、検証・実現可能な課題に限定されていることは否めない。芸術と科学の融合の場ともいえるコンサートホールは、断片的な現象の理解では全体を捉えにくい複雑な研究対象であり、将来的な発展の余地も多く残されている。

ホールの形と音との関係を考えるとき、これまでの知見の蓄積によって、音響障害となる事象の科学的理解やそれを排除するための技術的手法はほぼ整備されてきたといえよう。しかしながら、建築設計における余条件とのバランスをとりながら、音の良さを追求するプロセスは、いまだ経験的知識に頼るところも多い。これは、4章で述べられているように、実際のホールの設計では一つの壁の形を変えれば複数の音響パラメータが変化するのに対して、実験的に音響パラメータの影響を調べる研究では、一つか二つのパラメータのみを可変としてその影響を検証した知見が大部分であることが多分に関係している。総合的な聴感印象がパラメータ単体の影響の足し合わせで決まるとは限らず、複数のパラメータの複合影響が存在する例は2章でも紹介されている。今後の研究の蓄積が期待される領域といえよう。

演奏に与えるホールの影響も含めて最終的に聴衆に届く音楽を評価することも、これまでのホール研究の枠組の外側にある。すなわち、これまでのホール研究は一定の演奏音に対してホールが付与する音響効果を論じるもので、ホールの音響に応じて演奏家が演奏を調整するというプロセスが反映されていない。このようなホールと演奏との相互作用的な関係を想定したとき、ホールの良し悪しには新たな展開が現れる。

さらに、実際のホールに求められる条件としては、客席に座ってじっと音楽に耳を傾けるとき、その音楽に付加される響きが最良のものであればよいだけではない。エントランスからホールの内部に至る動線が醸す効果、一つの空間に集まった大勢の聴衆との一体感により増幅される感動、演奏家の動きや表情を捉える視覚情報と相まった複合影響など、音響とは別の要因によって、音の聞こえやそこから受ける印象が増強し、音楽体験が特別なものとなる場合もある。例えば、音の聞こえに対する見えの影響は複数の感覚モダリティが関係するもので、より総合的にホールと人を結ぶ科学として今後の進展が望まれる。

コンピュータや信号処理技術の進化も今後の研究や新たなホールのあり方に広がりを与えている。5章で紹介したように、これらの技術がホールの電気音響設備に導入されることで、建築的な限界を超えた音響効果の生成も実現されてきている。3章で紹介したコンピュータシミュレーションも近年急速に発展している分野であり、開発研究と同時に応用事例も増えてきてはいるが、現状ではホール内の音響現象を予測するにはコンピュータの性能不足の他、解決すべき課題が残されている。

さらには、音楽シーンの多様化、ホールの特徴づけや形態において設置者や建築家が志向する独自性は、ホールの音響に対しても新たな要求性能を提起し続けている。コンサートホール研究には以上述べたようなさまざまな展開が期待されており、本書が今後この分野の発展に携わろうという読者の一助になれば幸いである。

最後に、多忙中執筆いただいた著者の皆様と、このあとがきを書くにあたりご示唆をいただいた日本大学本杉省三氏、永田音響設計豊田泰久氏に謝意を表します。

—— 編著者・著者略歴 ——

**上野佳奈子** (うえの かなこ)

1996年 東京大学工学部建築学科卒業  
1998年 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程修了  
1999年 東京大学助手 (2007年～助教)  
2003年 博士 (工学) (東京大学)  
2008年 明治大学専任講師  
2010年 明治大学准教授  
現在に至る

**羽入 敏樹** (はにゅう としき)

1988年 日本大学大学院工学部建築学科卒業  
1990年 日本大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程修了  
1990年 松下通信工業株式会社  
1994年 日本大学大学院理工学研究科建築学専攻博士課程修了  
博士 (工学)  
1997年 日本大学助手  
2000年 日本大学専任講師  
2007年 日本大学准教授  
現在に至る

**小口 恵司** (おぐち けいじ)

1978年 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業  
1980年 九州芸術工科大学大学院修士課程情報伝達専攻修了  
1980年 株式会社永田穂建築音響設計事務所 (現株式会社永田音響設計)  
2003年 九州芸術工科大学大学院博士後期課程情報伝達専攻修了  
博士 (芸術工学)  
2010年 上野学園大学非常勤講師  
現在, 株式会社永田音響設計取締役  
プロジェクトチーフ

**日高 孝之** (ひだか たかゆき)

1977年 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業  
1979年 大阪大学大学院工学研究科修士課程応用物理学修了  
1979年 株式会社竹中工務店  
1985年 工学博士 (京都大学)  
1995年 イタリア国立科学研究所客員教授  
1996年 技術士 (応用理学部門)  
1998年 九州芸術工科大学客員教授  
現在, 株式会社竹中工務店技術研究所リサーチフェロー, 九州大学大学院非常勤講師

**橘 秀樹** (たちばな ひでき)

1967年 東京大学工学部建築学科卒業  
1972年 東京大学工学系大学院博士課程修了 (建築学専門課程)  
1972年 東京大学助手  
1973年 工学博士 (東京大学)  
1975年 東京大学講師  
1977年 東京大学助教授  
1991年 東京大学教授  
2004年 東京大学名誉教授  
2004年 千葉工業大学教授  
現在に至る

**坂本 慎一** (さかもと しんいち)

1991年 東京大学工学部建築学科卒業  
1996年 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程修了  
博士 (工学)  
1996年 東京大学助手  
1999年 東京大学講師  
2002年 東京大学助教授  
2007年 東京大学准教授  
現在に至る

**清水 寧** (しみず やすし)

1975年 東京工業大学工学部建築学科卒業  
1977年 東京工業大学大学院総合理工学研究科社会開発工学専攻修了  
1977年 ヤマハ株式会社入社  
2000年 ヤマハ株式会社休職  
2000年 レンセラー工科大学建築学部研究准教授 (Troy, NY, USA)  
2003年 ヤマハ株式会社復職  
2008年 東京工業大学大学院総合理工学研究科連携教授 (併任)  
現在に至る

# コンサートホールの科学

—— 形と音のハーモニー ——

Science of concert hall

—— Harmony of shape and sound ——

© 一般社団法人 日本音響学会 2012

2012年6月28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  
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 978-4-339-01326-9 (吉原) (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