

3. やさしい防音講座

—防音の基礎知識④—

6. 室内音場とは

日本音響エンジニアリング(株) 津金 孝光

7. 音響測定の方法

日本音響エンジニアリング(株) 福満 英章

前回まで、「1. 音とは？ 防音とは？」、「2. 吸音の仕組み・吸音材料」、「3. 遮音の仕組み・遮音材料」、「4. 防振の仕組み・吸音材料」、「5. 騒音・振動の防止設計」を解説しました。今回は、引き続き、「6. 室内音場とは、7. 音響測定の方法」について解説します。

6. 室内音場とは

この章では、コンサートホールや会議室など、空間の用途に応じて、室内音響を設計する必要性とその方法を解説します。

6.1 室内音場とは

室内音場とは、床・壁・天井などによって閉ざされた室内空間における、音の振る舞いです。特徴的な現象に、残響(Reverberation)と反響(Echo)が挙げられます。

残響とは、室内で音を出した時、その音を止めた後も響きがしばらく残る現象です。コンサートホールで音楽を潤い豊かに聞くためには不可欠なものです。

しかし残響が多くなると、一般的に音の明瞭性が悪くなります。そのため、講堂や会議室など人の会話を聞くことが主途となる室内では、過度な残響は使い勝手を悪くしてしまいます。

反響とは、短い音を出した時に、その音に遅れて、1つまたは連続した多数の反射音が分離して聞こえる現象です。馴染みのあるところでは、山びこも反響の一種です。室内で、特に反射面が平行している場合には、その間で反射が繰り返され、連続的なエコーが生じます。これをフラッターエコーといいます。天井に荘厳な竜の絵が描かれた日光東照宮の薬師堂では、絵の真下で手をたたくと起こるフラッターエコーを鳴き竜と称し、名所となっています。しかし一般的な室内で反響がおきると音響障害となるため、極力防ぐ必要があります。

6.2 吸音と室内音場

室内の残響の長さを評価するものの一つに、残響時間(Reverberation Time)があります。残響時間とは、音の響きの長さです(図1)。その定義は、室内音場として拡散音場(音のエネルギー密度がほぼ均一で、かつエネルギーの流れが等方的な音場)を仮定した時に、室内で音源から音を出し、音のエネルギー密度が定常状態になった後に音源を停止させ、エネルギー密度が $1/10^6$ (100万分の1, -60 dB)に減衰するまでの時間です。拡散音場の仮定に基づけば、残響時間は吸音材の配置、音源点・受音点の位置によらず、一定になりますが、実際の室空間においては音場の拡散の程度によって変化します。

残響時間を示す式はいくつかあります。ここでは、アメリカの物理学者ウォーレス・クレメント・セイビン(以下Sabine)の残響式を図2に示します。

このSabineの残響式には、2つのポイントがあります。1つ目は、室内空間の室容積が大きいと、必然的に残響時間は長くなります。2つ目に、平均吸音率と室内空間の総表面積との積である等価吸音面積(吸音力)が大きいと、残響時間は短くなります。つまり残響時間が短くなるためには、第1に室内空間の室容積が小さくなり、第2に吸音率の大きい材料を床・壁・天井などの表面に多く配置することが必要となります。

残響時間は、室内空間の過渡特性(入力の変化に対して、出力が追従する特性)を表す基本的な指標であると同時に、室内の響きや余韻の程度など、聴感的印象を表す指標としても広く使われます。最適な残響時

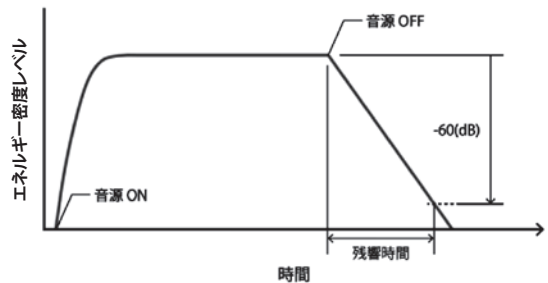


図1 残響時間の定義

$$\text{残響時間 } T = 0.161 \times \text{室容積} / \text{等価吸音面積}$$

(等価吸音面積 = 平均吸音率 × 室内総表面積)

図2 Sabineの残響式

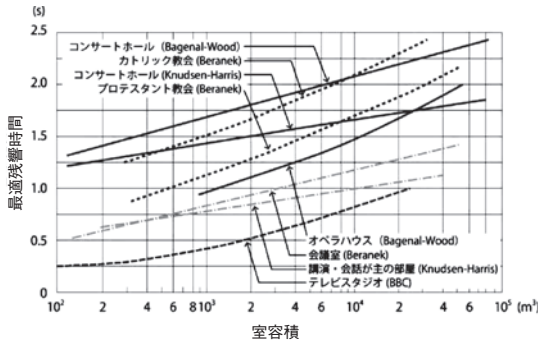


図3 室容積と推奨される最適残響時間(500 Hz)の関係図
日本建築学会編「建築設計資料集成環境」(丸善)より抜粋

間は、室の用途、規模によって異なります。複数の建築音響研究者により、コンサートホール、教会、会議室などの各用途別に、最適な残響時間が提案されています(図3)。

また残響時間には周波数特性があり、なるべく周波数特性が平坦(へいたん)になることが望ましいとされています。一般的な室では低音域でやや長め、高音域で短めとなる傾向となります。

残響時間を用いた室内音場の検討は、コンサートホールなど音響特性が重視される室内だけでなく、会議室、体育館、教室など、日常的に利用される空間においても実施の方がよいでしょう。室内の吸音処理を考慮することにより、室の目的に合わせた適切な室内音場の空間を構築することができます。

6.3 室内音場の問題が起きやすい3事例

建築設計時に、音響特性への配慮がおろそかになりやすい3つの空間(会議室、大空間、教室)と注意点を紹介します。

(1) 会議室の吸音対策

内装デザインに配慮した会議室は、床・壁・天井にガラス、塗装仕上げやフローリング、プリントタイルなど、音響的に反射性の高い材料や施工法によるケースが多くあります。完成後に使用してみたら、室内の音が響きすぎてしまい、話が聞き取りにくいという問題が顕在化することも少なくありません。会議室という室の目的から、適切な吸音処理は必須であり、話が聞き取りやすく、落ち着いた空間を担保する必要があります。特に、最近多く利用されて来ているweb会議システムを利用する場合には、システムを介して相手とコミュニケーションを取るために、通常の会議室以上に吸音に配慮した空間が必要です。

(2) 大空間の残響対策

体育館やスケートリンク、プールなどの大空間は、室容積が大きいため、必然的に残響時間が長くなります(参考: Sabineの残響式)。これらのスタジアムは競技用の床、リンクの水面、プールの水面など、音響的に大きな反射面になることが多いことも特徴です。また、競技に使用される放送・音楽だけでなく、観客席からの声援もあり、騒がしい空間となりやすく、それが競技に支障をきたす場合が見受けられます。さらに残響過多な大空間になると、非常時の放送が聞き取りにくく、避難に支障が出る可能性もあります。大空間においても、適切な吸音対策を施すことは極めて重要です。

(3) 教室の吸音対策

一昔前の一般的な学校は、壁や引き戸、扉で教室が独立・区画化され、廊下に面して並列に配置されていました。近年は、オープンプラン型をはじめとする多様な学校教室のデザインが提案され、また採用されています。各スペースを隔てる壁がないオープンプラン型は、従来のレイアウトより、音響的に良好な環境の確保が困難になる傾向があります。そのため日本建築学会は、環境基準として、学校施設の音環境保全基準・設計指針(AIJES-S001-2008)を2008年3月に発刊しました。適切な学校教育を行う場を構築するためには、教室の吸音対策は大事なポイントとなります。

本章では、室内音場の解説と、施設の目的ごとに留意すべきポイントをまとめました。

7. 音響測定の方法

本稿では、建築現場における音響測定の方法を説明します。騒音計、振動レベル計、測定用ノイズ発生装置などの計器の使用方法についても触れます。

7.1 建築音響分野の音響測定

音響測定に使用する測定機器、測定方法、評価方法に関する規格は、JIS(日本工業規格)、ISO(国際標準化機構が発行する規格)、IEC(国際電気標準会議が発行する規格)などによって厳密に整備されています。

その規格を守ることにより、音響特性を同一条件下で客観的に評価することが可能になっています。

建築現場での音響測定には3つの代表的な測定方法があります。騒音測定(JIS Z 8731 環境騒音の表示・測定方法)、遮音測定(JIS A 1417 建築物の空気音遮断性能の測定方法)、床衝撃音測定(JIS A 1418-1 建

建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法：標準軽量衝撃源による方法、-2 建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法：標準重量衝撃源による方法)の3つです。なお、遮音測定の評価方法については JIS A 1419-1 に、また、床衝撃音測定の評価方法は JIS A 1419-2 に規格化されています。各測定方法、評価方法の詳細は、第4章で解説します。音響測定で重要なポイントは3つあります。騒音や音源の特性に合わせて音の物理的な大きさを正しく測定すること、その周波数特性(音色の特徴)を知ること、測定規格に沿うことにより正確で再現性の良い音響測定データを取得することの3つです。

7.1.1 騒音計、振動レベル計

測定に使用する計器として、騒音計と振動レベル計を紹介します。騒音計は、マイクロホンにより音圧レベルを計測する測定器です(図1)。振動レベル計は、振動ピックアップにより振動レベル(振動加速度レベル)を計測する測定器です(図2)。近年はほぼデジタル化されており、いずれもセンサに入力される音や振動の電気信号の変化を、音圧レベルや振動加速度レベルの変化として表示・出力するものです。

(1) 騒音計の設定と使用方法

騒音計(JIS C 1509-1：仕様、C 1509-2：型式評価試験)を使用する場合、測定前に、測定目的に合わせた



図1 騒音計



図2 振動レベル計

3つの基本設定を行う必要があります。まずは周波数重み特性の設定です。dB(A)、dB(C)の聴感補正回路、dB(F)のフラット特性回路の選択を行います。次に、時間重み特性の設定を行います。音源の特性に合わせて、メータの動特性(Fast、Slow)を選択します。なお、人の聴感特性は、Fastに近いといわれています。最後にダイナミックレンジの設定です。ノイズに埋もれない、またオーバーロードしない最適なレンジに設定しましょう。ここで、周波数重み特性について、詳しく説明します(図3)。人が感じる聴感上の音の大きさ(ラウドネス)は、同じ音圧であっても音の周波数によって異なり、低音域に対して鈍感な感度特性をしています。さらに人の耳の特徴として、音の大きさによってその周波数特性が異なることが知られており、大きな音では低音域の感度がフラットに近くなります。純音の聴感的な大きさが一定となる音圧レベルを結んだ等感度曲線が等ラウドネス曲線ですが、dB(A)は1kHzで40 phonの大きさに聞こえる等感度曲線の逆特性に近似した聴感補正回路で、一般的な騒音測定の評価に使用されています。一方、dB(C)は90 phonの等感度曲線の逆特性に近似した低音域の感度が上昇した聴感補正回路で、大きな音の騒音評価の際に使用されます。dB(F)は周波数特性がフラットで、音の物理特性をそのまま周波数分析する時に使用します。

音響測定前には、音圧レベルを正しく計測するために、音響校正器を用い騒音計の指示値が正しい値を示すか確認する必要があります(JIS C 1515 音響校正器)。音は時間により変動するので、音源の種類や特徴によって、指示値の平均値、エネルギー平均値(Leq)、ピーク値の平均値、時間率騒音レベル(L₅、L₅₀など)等、適切な分析方法を採用します。(JIS Z 8731 環境騒音の表示・測定方法)。現在は、デジタル

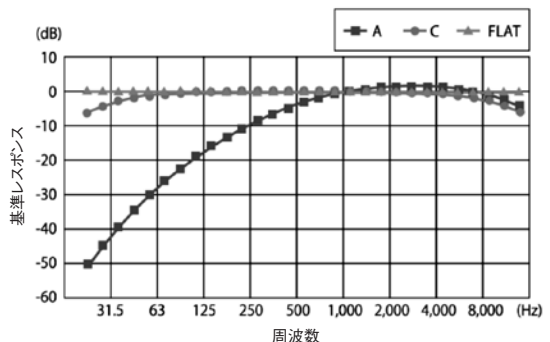


図3 周波数重み特性 dB(A)、dB(C)、dB(F)



図4 リアルタイムアナライザ機能付き積分型騒音計の表示画面イメージ

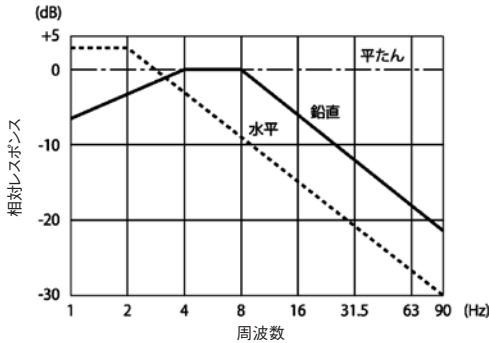


図5 振動レベルの感覚補正值

式の積分型騒音計が主流となっており、計測したサンプリングデータからエネルギー平均値や時間率騒音レベルを演算表示するので、分析結果を簡単に得ることができます。図4は、積分型騒音計の計測中表示画面の写真です。

(2) 振動レベル計の原理と使用方法

振動レベル計(JIS C 1510 振動レベル計)は、床面に振動ピックアップを設置して、その位置の振動レベル(VL: Vibration Level)を測定する計測器です。振動レベルとは、人が最も敏感なZ(鉛直)方向の振動加速度レベル(1~90 Hz)に対して、人の振動に対する感覚補正值を加えた振動の大きさのことで、図5は、振動レベルの感覚補正值のグラフです。この図から、鉛直方向の振動に対しては、人は4~8 Hz帯域の周波数で最も敏感で、それ以上の周波数では急減に低下する感度特性を持っていることがわかります。

振動レベルも、騒音と同様に時間変動するので、振動の種類や特徴に応じて、エネルギー平均値(Leq)、ピーク値の平均値、時間率レベル(L5、L50など)等、適切な分析方法を採用します(JIS Z 8735 振動レベル測定方法)。

7.1.2 周波数分析

騒音計のA補正回路を使用して測定すると、人が感じる騒音の大きさ(騒音レベル)を知ることができま

す。しかし、騒音レベルのみでは、高音域が大きい騒音なのか、低音域が大きい騒音なのかといった情報はわかりません。従って、音の特徴をより正確に知るためには、音響情報をいくつかの周波数帯域に分解して分析を行う必要があります。建築音響の分野では、定量的な評価を行う場合に対象とする周波数範囲は、通常63 Hz~8 kHzです。そのため、周波数分析の方法も、音響信号を63 Hz~8 kHzの8帯域(バンド)に分割するオクターブバンド分析、各々の帯域をさらに3帯域に分割する1/3オクターブバンド分析(50 Hz~10 kHz)などがあります(図6)。周波数分析は、音のエネルギーをいくつかの周波数帯域に分解して、各々の帯域の音圧レベルを分析することなので、分割した全ての帯域の音圧レベルを合成すれば、元の全体の音圧レベルになります。なお、オクターブバンド分析は、1/1オクターブバンド分析と表記する場合があります。

一方、モータやエンジンなどの回転機器の騒音など、純音成分や狭帯域の周波数分析、倍音成分の分析が必要な場合には、時間波形が数学的に正弦(sin)、余弦(cos)の周期関数による単振動波形に分解できるので、FFT分析(Fast Fourier Transform)により、詳細に特徴周波数を分析することが可能です。

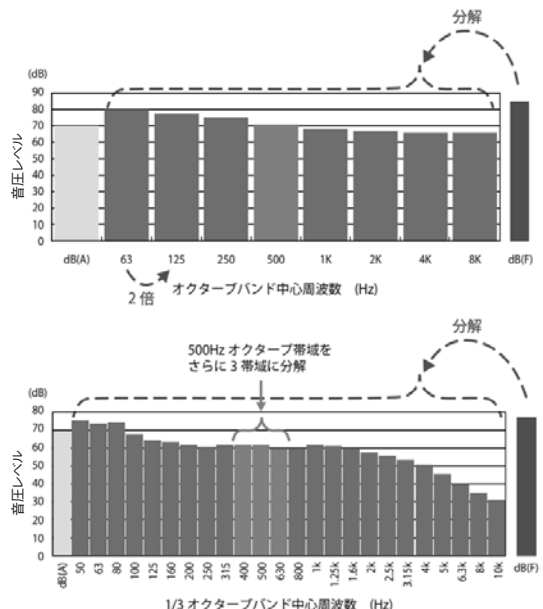


図6 オクターブバンド分析(上)と1/3オクターブバンド分析(下)の概念図

7.1.3 現場における実務的な音響測定

建築音響の現場での代表的な3つの音響測定である騒音測定、遮音測定、床衝撃音測定について、詳しく解説します。前述の通り、これらにはJISによる測定方法の規格があります。

(1) 騒音測定, JIS Z 8731 環境騒音の表示・測定方法

室内騒音の測定事例のグラフを、図7に示します。空調騒音のように騒音が安定している場合(定常騒音)は、5秒間程度のエネルギー平均値(Leq)で評価します(図7左)。音楽などの変動する騒音(図7右)では、前述のリアルタイムアナライザ機能付き積分型騒音計を使用します。音源特性により設定した時間の騒音データをサンプリングし、取り込んだ音圧レベルのLmax, L5, Leq, L95, Lmin, などの時間率騒音レベルの演算結果により評価します。平均的な騒音値を知りたい場合は、エネルギー平均値であるLeqを、また騒音対策用の音源データとして使用する場合は、一般的に時間率90%レンジの上端値であるL5の値を採用して検討します。

(2) 遮音測定 (空気音遮断性能), JIS A 1417 建築物の空気音遮断性能の測定方法

壁や扉などの測定対象面に、測定用の試験音(バンドノイズ)を音源スピーカにより均一に入射させて、音源側と受音側の音圧レベルの平均値の差を求め、測定対象の空気音を遮る能力として、D値などの等級曲線により評価します。JISによる規格では、測定周波数帯域は125 Hz～4 kHzです。測定方法には、室間音圧レベル差、特定場所間音圧レベル差の2つがありま

す。室間音圧レベル差では、対象とする2室間の遮音性能を測定します。音源室、受音室ともに3～5の観測点を定め、測定します(図8)。特定場所間音圧レベル差では、壁、扉、窓などの特定部位を対象として遮音性能を測定します。音源側、受音側ともに1m離れた位置で3～5点を測定します。

音源スピーカ
部屋全体に音が拡散し、対象部位に音が均一に入射するように室の隅に設置する。
(※室内の場合)

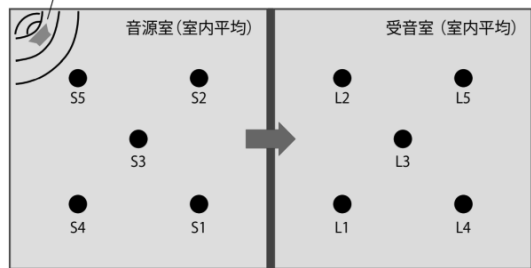


図8 室間音圧レベル差測定のイメージ図



図9 室間音圧レベル差測定の測定風景

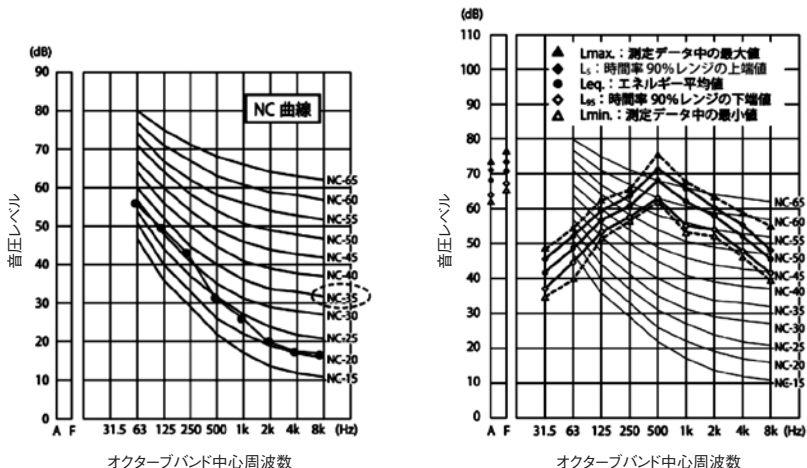


図7 定常騒音の測定事例・Leq(NC値)と、変動騒音の測定事例・時間率騒音レベル(NC値)

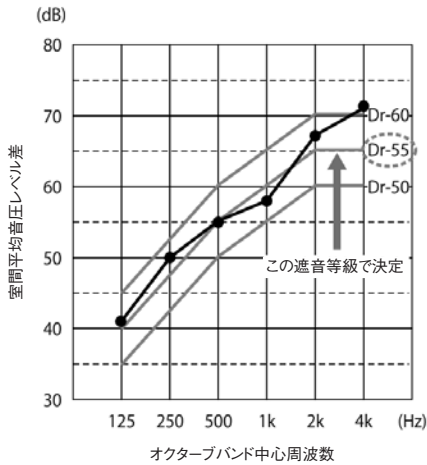


図10 室間音圧レベル差のグラフ(D値)

図9は、実際の音源室側と受音室側の測定風景です。音源室側では、測定のためにノイズジェネレータ、アンプ、音源スピーカなどの装置を用い、バンドノイズを発生させます。その状態で音源室、受音室ともに、各測定位置での音圧レベルを騒音計で計測します。

室間音圧レベル差の測定結果からD値を導き出すためには、D値の等級曲線に測定データをプロットして評価します。基本的には測定値が全ての周波数帯域において上回る、最大の等級曲線を遮音等級とします。ただし、遮音性能の等級曲線は5dBステップとなっていることから、等級曲線の値より最大2dBまで下回ることが許容されています。図10に示す測定結果の場合は、遮音等級Dr-55と評価します。

(3) 床衝撃音測定, JIS A 1418-1(軽量), -2(重量)

建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法

規定の衝撃源で床を加振した時に、下階の居室に発生する音圧レベルを測定し、L値の等級曲線により評価します。通常使用する衝撃源として、軽量・重量の2種類の衝撃源が規定されています。標準軽量衝撃源は、小物の落下音、ハイヒールなどの歩行音を想定した周波数帯域125 Hz～4 kHzの床衝撃源です。標準重量衝撃源は、子供の飛び跳ねや走り回りなどを想定した、周波数帯域63～500 Hzの床衝撃源です。

図11は、床衝撃音測定を行う場合のイメージ図です。加振装置には、標準軽量衝撃源としてタッピングマシン、標準重量衝撃源としてバングマシンを使用します(図12)。なお、実際の床衝撃音の測定結果からL値を導き出すためには、L値の等級曲線に測定データをプ

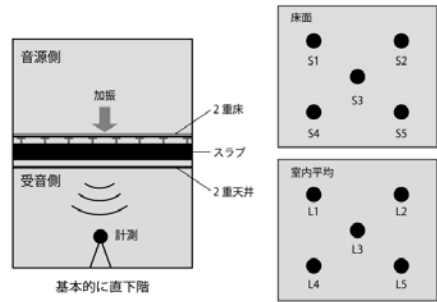


図11 床衝撃音測定のイメージ図

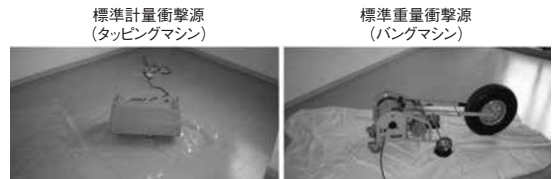


図12 床衝撃音測定に使用する標準衝撃源機器

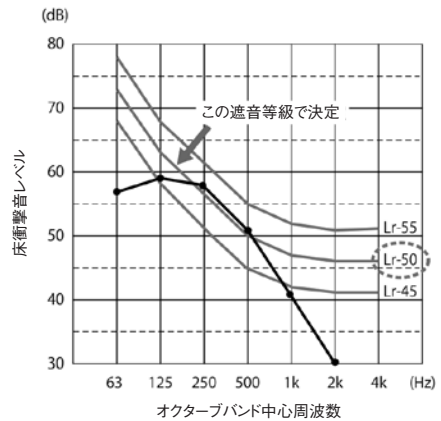


図13 床衝撃音レベルのグラフ(L値)

ロットして評価します。床衝撃音の場合は、基本的に測定値が全ての周波数帯域において下回る、最小の等級曲線を遮音等級とします。ただし、床衝撃音の等級曲線は5dBステップとなっていることから、等級曲線の値より最大2dBまで上回ることが許容されています。図13の測定結果の場合は、遮音等級Lr-50と評価されます。

本章では、建築現場における代表的な3つの音響測定の方法について解説しました。

以上で全7回にわたる防音の基礎知識シリーズは終了です。最後までお読みいただきありがとうございました。

◆音響技術のバックナンバーは、1冊から購入できます。また、No.187号までのバックナンバーはDVD(第4版)1枚に収録しております。

〈音響技術 バックナンバーリスト〉

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| No194 (vol.50 no.2 2021.6) | No.167 (vol.43 no.3 2014.9) |
| 〈特集〉 初心者のための音環境のアンケート調査・心理評価実験<超>入門 | 〈特集〉 遮音性能基準を考える ～集合住宅を中心として～ |
| No193 (vol.50 no.1 2021.3) | No.166 (vol.43 no.2 2014.6) |
| 〈特集〉 子どもと音環境 | 〈特集〉 伝統の継承、新たなる挑戦 -ホールの改修・改築 |
| No192 (vol.49 no.4 2020.12) | No.165 (vol.43 no.1 2014.3) |
| 〈特集〉 会議と音響 | 〈特集〉 避難所・応急仮設住宅の音響性能 |
| No191 (vol.49 no.3 2020.9) | No.164 (vol.42 no.4 2013.12) |
| 〈特集〉 超高層建築物の音と振動対策 | 〈特集〉 集合住宅を支える最新の遮音対策技術 |
| No190 (vol.49 no.2 2020.6) | No.163 (vol.42 no.3 2013.9) |
| 〈特集〉 音環境に係わる法律・基準・規格の動向 | 〈特集〉 鉄道騒音 測定・評価・予測・対策 最新技術への取り組み |
| No189 (vol.49 no.1 2020.3) | No.162 (vol.42 no.2 2013.6) |
| 〈特集〉 音響のディテール | 〈特集〉 吸音の上手な使いかた |
| No188 (vol.48 no.4 2019.12) | No.161 (vol.42 no.1 2013.3) |
| 〈特集〉 新しい遮音・吸音材料と活用技術 | 〈特集〉 実務で役立つ様々なデータ・資料 |
| No.187 (vol.48 no.3 2019.9) | No.160 (vol.41 no.4 2012.12) |
| 〈特集〉 固体音問題の発生と対策、評価 | 〈特集〉 建築工事騒音の現況と最近の対策技術 |
| No.186 (vol.48 no.2 2019.6) | No.159 (vol.41 no.3 2012.9) |
| 〈特集〉 オフィスの音と会話 | 〈特集〉 音響材料の使い方と技術資料集 |
| No.185 (vol.48 no.1 2019.3) | No.158 (vol.41 no.2 2012.6) |
| 〈特集〉 波動数値シミュレーションの使い方・使われ方 | 〈特集〉 木造建築物を対象とした音響技術の動向 |
| No.184 (vol.47 no.4 2018.12) | No.157 (vol.41 no.1 2012.3) |
| 〈特集〉 屋外の騒音源の伝搬特性と対策技術 | 〈特集〉 曲面空間と音響 |
| No.183 (vol.47 no.3 2018.9) | No.156 (vol.40 no.4 2011.12) |
| 〈特集〉 床衝撃音の測定法・評価法に関する現状と課題 | 〈特集〉 現場測定のここに注意 |
| No.182 (vol.47 no.2 2018.6) | No.155 (vol.40 no.3 2011.9) |
| 〈特集〉 最近の様々なホール事例 | 〈特集〉 建物の環境振動を取り巻く最近の話題 |
| No.181 (vol.47 no.1 2018.3) | No.154 (vol.40 no.2 2011.6) |
| 〈特集〉 知っておきたい遮音・吸音・防振の基礎知識 | 〈特集〉 航空機騒音 |
| No.180 (vol.46 no.4 2017.12) | No.153 (vol.40 no.1 2011.3) |
| 〈特集〉 建物の環境振動を巡る最近の話題 | 〈特集〉 音響工事のここに注意 |
| No.179 (vol.46 no.3 2017.9) | No.152 (vol.39 no.4 2010.12) |
| 〈特集〉 木造建築物の新動向と遮音対策 | 〈特集〉 スピーチプライバシー |
| No.178 (vol.46 no.2 2017.6) | No.151 (vol.39 no.3 2010.9) |
| 〈特集〉 いまさら聞けない建具のこと | 〈特集〉 床衝撃音の設計と対策 |
| No.177 (vol.46 no.1 2017.3) | No.150 (vol.39 no.2 2010.6) |
| 〈特集〉 共鳴・共振の基礎と応用 | 〈特集〉 音響設計の基礎 |
| No.176 (vol.45 no.4 2016.12) | No.149 (vol.39 no.1 2010.3) |
| 〈特集〉 教育・保育施設の音環境 | 〈特集〉 外部騒音の遮音 |
| No.175 (vol.45 no.3 2016.9) | No.148 (vol.38 no.4 2009.12) |
| 〈特集〉 住宅のリフォームと音環境性能 | 〈特集〉 最近の数値解析技術と可視化・可聴化 |
| No.174 (vol.45 no.2 2016.6) | No.147 (vol.38 no.3 2009.9) |
| 〈特集〉 床衝撃音対策の新しい技術 | 〈特集〉 建築音響のトラブルと訴訟の現状 |
| No.173 (vol.45 no.1 2016.3) | No.146 (vol.38 no.2 2009.6) |
| 〈特集〉 マイクロホンの使い方 | 〈特集〉 安心社会のデザイン |
| No.172 (vol.44 no.4 2015.12) | No.145 (vol.38 no.1 2009.3) |
| 〈特集〉 初心者のための音響評価指標入門 | 〈特集〉 生活系の固体音 |
| No.171 (vol.44 no.3 2015.9) | No.144 (vol.37 no.4 2008.12) |
| 〈特集〉 最近のオフィスに求められる音・振動環境 | 〈特集〉 集合住宅のフリープラン化と音環境 |
| No.170 (vol.44 no.2 2015.6) | No.143 (vol.37 no.3 2008.9) |
| 〈特集〉 特色ある測定法の話題 | 〈特集〉 最新規準・規格の解説 |
| No.169 (vol.44 no.1 2015.3) | No.142 (vol.37 no.2 2008.6) |
| 〈特集〉 残響の理論と実際 | 〈特集〉 次世代・省エネ建築と音環境 |
| No.168 (vol.43 no.4 2014.12) | No.141 (vol.37 no.1 2008.3) |
| 〈特集〉 工場の騒音・振動対策 | 〈特集〉 プライベート空間の音響設計 |

〈購入申込先〉 一般社団法人日本音響材料協会
 〒169-0073 東京都新宿区百人町3丁目21番16号 日本ガラス工業センタービル2階
 TEL 03-6384-1827 FAX 03-6384-1828