

## 設計者向け室内音響予測・評価ツールの開発

清家 裕喜子 (技術研究所)    三浦 大作 (設計本部)    北嶋 哉也 (技術研究所)    加藤 菫 (技術研究所)    石塚 崇 (技術研究所)    宮島 徹 (技術研究所)

### Development of Room Acoustic Prediction and Evaluation Tools for Designers

Yukiko Seike, Daisaku Miura, Kanaya Kitajima, Ayame Kato, Takashi Ishizuka and Toru Miyajima

ホールや会議室など音の響きや明瞭性が重要視される建物の音響設計は、早期に検討を開始することによって、高品質な音響性能を実現するためのコストを抑えることができる。そこで音響の専門的な知識を有さない意匠設計者自らが、プロジェクトの初期段階で音響検討を行える仕組みの構築を目的とし、室形状の作成から予測計算、評価までの全工程が3DCAD ツールの操作で完結する室内音響予測・評価ツールを開発した。本稿ではツールの概要と、複雑なリブ形状の天井を有する学校講義室の響きや、吹き抜けを有するオフィスの音響伝搬の予測に適用した例を紹介する。

For the halls and conferences where design of acoustical performance is essential, we develop room acoustic prediction and evaluation tools for designers who do not have specialized knowledge of acoustics to start acoustical examinations at early stage of a project. In a 3DCAD software and its extensions, designers can operate all processes including building a room model, carrying out prediction calculation of sound propagation in the room and evaluating calculated results. This paper introduces the outline of these tools and exhibits examples of acoustic propagation prediction applied to a lecture room with a complicated ceiling ribs and an office with a stairwell which are difficult to examine by conventional reverberation formula.

#### 1. はじめに

2018年に経済産業省より発表された「DX推進ガイドライン」<sup>1)</sup>による後押しもあり、建設分野においてBIMやCIM等に代表されるデジタル化技術の浸透が進んでいる。当社においては中期デジタル戦略2020において、「Shimz デジタルゼネコン」を策定<sup>2)</sup>し、「ものづくりをデジタルで」「ものづくりを支えるデジタル」「デジタルな空間・サービスの提供」の3つの柱の推進・実現に向けて様々な取り組みを行っている。

建築音響の分野においても、意匠設計者が設計業務で使用している3DCADツールと従来の音響予測計算ソフトの連携<sup>3)</sup>により、音響予測計算のデジタル化が進んでいる。

ホールや講義室などの音の響きや明瞭性が重要な建物の設計においては、より良い音環境を実現するため、音響の専門家による検討を行う必要がある。適切な音の響きを得るには、室容積や室形状、

壁や天井・床の吸音性や拡散性をプロジェクトの初期段階から考慮することが望ましいが、実際には後期段階で検討を始めることも少なくない。その場合には必要な音響性能を確保または向上させるための設計変更が困難または変更に伴うコストが大きくなるといった問題が生じる。一方で、音響検討を行うには音響の専門家へ相談する必要があり、時間・検討コストの負荷が大きく、初期段階から必要な検討を行うにはハードルが高いのが現状である。

そこで筆者らは、プロジェクトの初期段階において、音響の専門的な知識を有さない意匠設計者自らが室内音響の検討を容易に行うことができる仕組みを構築することを目的とし、3DCADツールによる室内音響予測・評価ツールの開発に取り組んだ。本稿では、開発したツールの概要と、精度検証結果および適用事例を紹介する。

## 2. ツールの概要

### 2.1 ツールのねらい

従来の音響予測計算ソフトウェアを用いた音響検討の流れを図-1(a)に示す。意匠設計者が建築用の CAD ソフトで作成した室形状データを音響専門家が音響予測計算ソフトウェアに入力、計算条件を設定し、計算・可視化等を行う。得られた結果に対して音響専門家が評価や判定を行い、設計変更を行う場合には意匠設計者が CAD ソフトで室形状データを修正し、前述の流れを繰り返す。このように意匠設計者と音響専門家が何度も打合せ等を重ねながら音響設計を行うため、時間やコストが大きくかかる。

そこで筆者らは、図-1(b)に示すように意匠設計者自らが音響検討を実施できるようにするため、音響検討に関わる全工程の操作を1つのソフトウェアとしてまとめ、計算結果の評価まで自動で行うことのできるツールを開発した。本ツールにより、プロジェクトの初期段階において意匠設計者が室内音響の検討を行うことが可能となり、音響検討に係わる時間・コスト削減につながる。更に初期段階で検討を開始するため設計の自由度が高く、音響品質向上のための設計が容易になる。本ツールによる音響検討で得られる結果は、必要条件としての大まかな方針を決定するものであり、より詳細な検討を行う際には従来同様に音響専門家への相談を行う。その場合、音響専門家による詳細検討も同じツールを用いて行うことができるため、スムーズに検討を進めることができる。

### 2.2 全体構成

本ツールの構成は図-2に示すように、【室形状入力】【操作】【計算・評価】の3つの部分で構成される。

【室形状入力】は3次元モデリングツール Rhinoceros<sup>4)</sup>で行う。以下、本報では室形状データのことをモデル、室形状のデータを3DCADで作成することをモデル化と呼ぶ。

【操作】は Rhinoceros のプラグインツールである Grasshopper<sup>5)</sup>で行う。Grasshopperは Rhinoceros のモデリング支援やビジュアルプログラミングを行うツールで、アルゴリズムに基づいたデザインやシミュレーションが可能となる。Rhinoceros で作成したモデルの読み込み、音響予測計算に必要な部材種類や計算条件等の設定、次章で述べる Python プログラムの実行、結果の可視化などは Grasshopper 上のグ

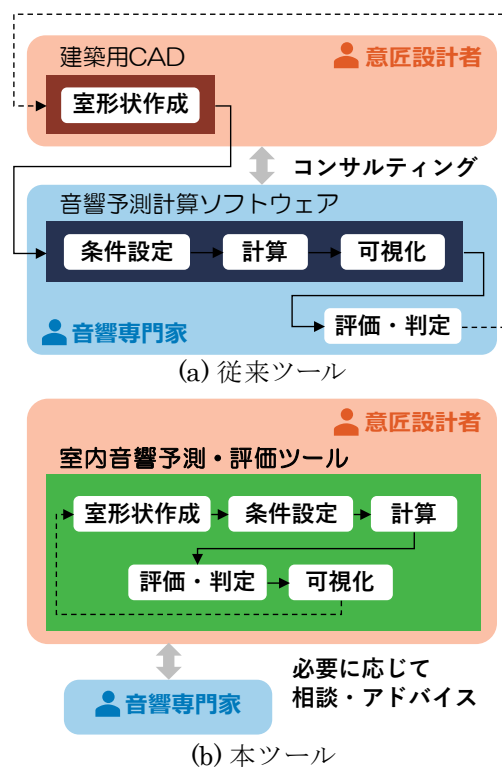


図-1 音響検討のフロー

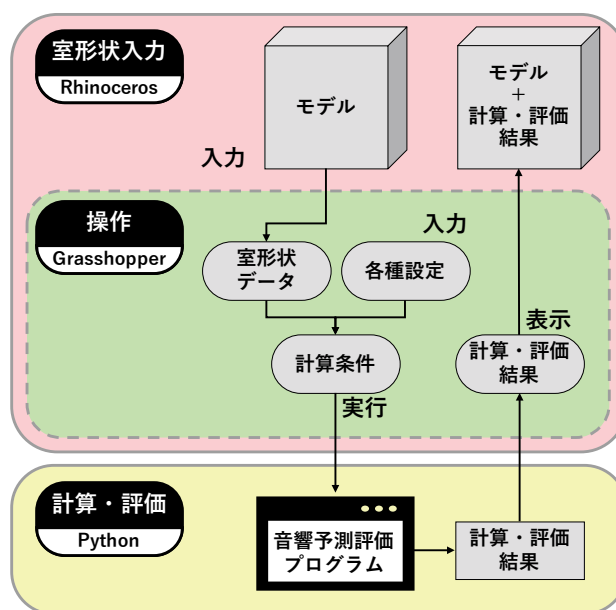


図-2 室内音響予測・評価ツールの構成

ラフィカルなインターフェースから操作して行う。

【計算・評価】はプログラミング言語 Python で作成した音響予測計算と音響評価指標値の算出および評価を行うプログラム(以下、音響予測評価プログラム)にて実行する。Python プログラムは Grasshopper から実行処理を行うため、ユーザーは Python を直接操作する必要はない。

計算・評価の結果は Grasshopper 上や、Rhinoceros で入力したモデル上に可視化させる。

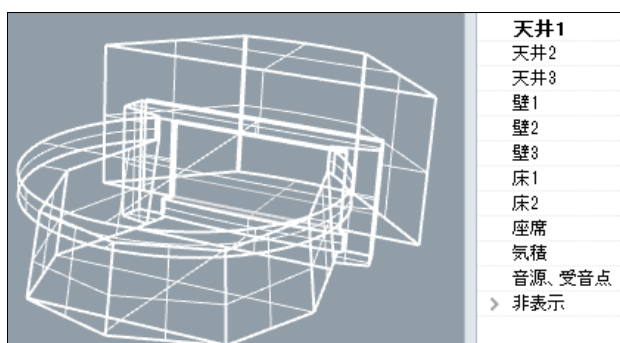


図-3 モデルの例

### 2.3 Rhinoceros によるモデル作成

作成したモデルの例を図-3に示す。意匠設計作業において Rhinoceros で室形状データを作成している場合には、それを基に本ツール用のモデルを作成する。室内の壁・床・天井などの室内空間に面する部材をモデル化し、仕上げの種類ごとにレイヤーを分ける。ホールや講堂など座席が配置されている場合には、その範囲を設定する。

音響予測計算では音が発生する位置(以下、音源点)と音を聞く位置(以下、受音点)を設定する必要がある。ホールであれば、舞台上に音源点を、客席に受音点を配置する。受音点は、図-4(a)に青線で示すように客席の範囲を設定し等間隔に自動整列配置するか、図-4(b)に示すように任意の位置に手で配置する。

### 2.4 計算条件の設定

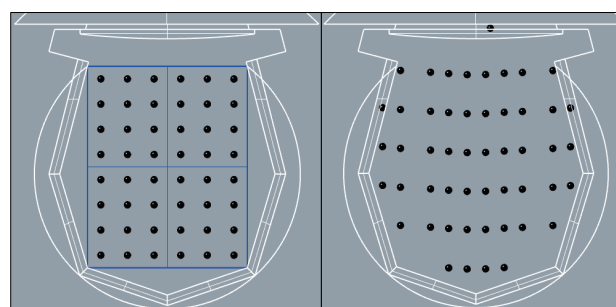
図-5に示す Grasshopper のインターフェースで以下の各種条件を設定する。

#### (1) 部材の設定

Rhinoceros で作成したモデルを読み込み、仕上げ材の種類を設定する。仕上げ材の種類はモデルで設定したレイヤーごとに数十種類のリストから選択すると、材質に応じた吸音率および散乱係数<sup>6)</sup>が設定される。具体的な仕上げ材が決まっていなくても、反射面か吸音面かなどの大まかな設定が可能である。吸音率および散乱係数はデータベースから読み込まれ、計算条件として書き出される。仕上げ材の組み合わせを変えて最大3パターンまでパラメトリックスタディが可能である。

#### (2) 解析条件

表-1に示す14種類のリストの中から室用途を選択する。座席がある部屋の場合は実座席数を入力する。Rhinoceros で作成したホール反射板等のモデルに対して回転の条件や変化の範囲等のルールを設定することで、パラメトリックスタディも可能である。計算精度は低・中・高の3段階から



(a)自動整列配置 (b)手動配置

図-4 受音点の配置例

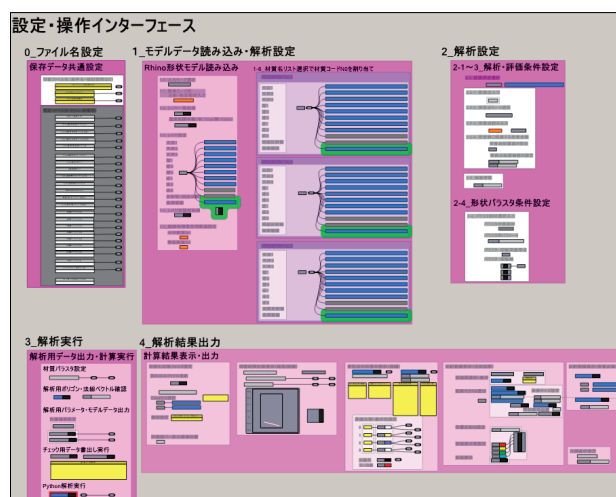


図-5 Grasshopper 操作画面

選択する。

### 2.5 音響予測計算と結果の評価

Grasshopper のインターフェースを操作し、Python で作成した音響予測評価プログラムを実行する。音響予測評価プログラムの詳細は次章で述べる。

### 2.6 予測・評価結果の可視化

音響予測評価プログラムで算出した解析結果を読み込み、Grasshopper および Rhinoceros モデル上に結果を可視化する。

#### (1) 残響時間のグラフ

残響時間は「簡易計算」「詳細計算」の2種類の結果を Grasshopper 上に表示する。「簡易計算」は Grasshopper 上において式(1)に示す Eyring-Knudsen の残響式により算出するため、音響予測評価プログラムで計算を行わずにモデルの形状と仕上げ材の設定だけで確認できる。

$$T = \frac{KV}{-S \log_e(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad (1)$$

ただし、 $T$ : 残響時間[s]、 $K$ : 定数[s/m]、 $V$ : 室容積[m<sup>3</sup>]、 $S$ : 室表面積[m<sup>2</sup>]、 $\bar{\alpha}$ : 平均吸音率、 $m$ : 空気

表-1 設定可能な室用途と評価対象の音響物理指標

室用途	音響物理指標				
	平均吸音率	音楽明瞭度	音声明瞭度	エコー妨害度	音圧レベル分布
コンサートホール・多目的ホール・学校講堂 (アコースティック：音楽演奏用途)	○	○	-	○	○
多目的ホール・ライブハウス (電気音響：音楽演奏用途)	○	-	-	○	-
多目的ホール・講堂・集会場 (電気音響：講演・式典用途)	○	-	-	○	-
オペラハウス	○	○	-	○	○
教会 (カトリック)	○	-	-	○	○
教会 (プロテスタント)	○	-	-	○	○
会議室 (中～大)・教室	○	-	○	○	-
オフィス	○	-	-	-	-
体育館・スポーツ施設	○	-	-	○	-
アリーナ系 (1万人規模以上, 電気音響：音楽演奏用途)	○	-	-	○	-
アリーナ系 (1万人規模以上, 電気音響：アナウンス中心)	○	-	-	○	-
アトリウム (非常放送伝達)	○	-	-	○	-
テレビスタジオ	○	-	-	-	-
ラジオスタジオ・アナウンスブース)	○	-	-	-	-

※ ○：評価対象，-：評価対象外

吸収による減衰率[m<sup>-1</sup>]とする。

「詳細計算」は音響予測評価プログラムで算出された全受音点の残響時間の平均値を表示する。

### (2) 音響物理指標値および評価結果

図-6(a)に受音点ごとの音響物理指標値をRhincerosのモデル上に可視化した例を、(b)に全受音点の平均値または分布範囲をグラフに表示した例を示す。受音点の球の色は評価結果を示しており、後述するルールによって評価された結果(○・△・×)によって色分けして表示される。

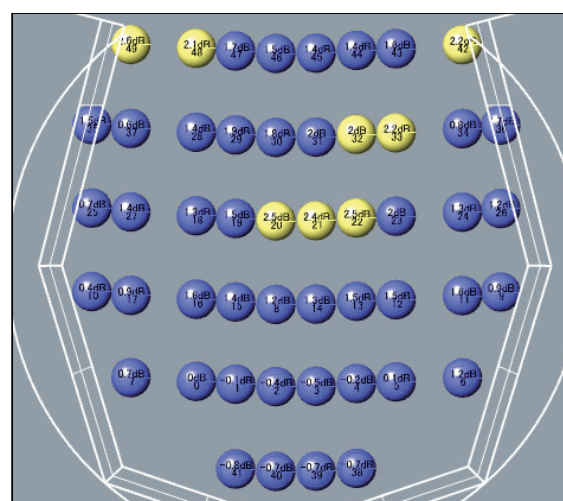
### (3) 反射音線

図-7に示すように、音の伝搬を表す音線は「音線放射」と「受音音線」の2種類の結果をRhincerosのモデル上に表示する。「音線放射」は計算した音源点から音が全方向に伝搬する経路をGrasshopper上で表示し、色は反射回数を表す。「受音音線」は音響予測評価プログラムで計算した音源点からある受音点へ伝搬する経路を表示し、色は受音点に入射したときの音線のエネルギー量を表す。

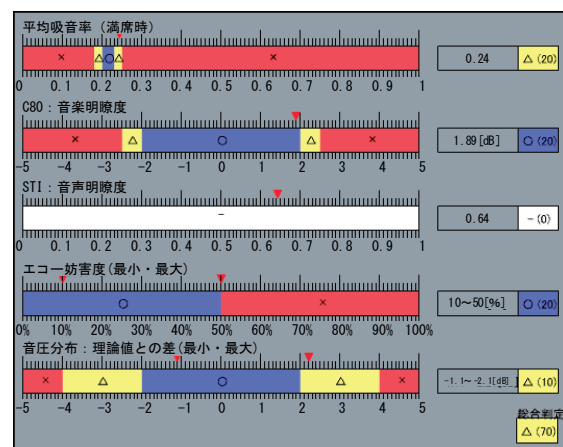
## 3. 音響物理指標の評価

### 3.1 評価概要

一般的に室内音響設計では、建築音響の専門家が音響予測計算で得られる反射音応答、残響時間や平均吸音率、音の反射経路などの各種音響指標



(a)音圧レベルの受音点分布



(b)評価結果のグラフ表示

図-6 音響物理指標の可視化の例

に基づいて設計案の評価を行う。評価には、様々な文献や過去の経験などに基づいた専門的な知識が必要であるため、例えば意匠設計者が音響予測計算まで実施できたとしても、その結果を正しく評価することは困難である。そこで本ツールでは、室用途ごとに評価すべき音響物理指標の種類とその目標とする範囲を設定した。建築音響の専門家が文献や経験に基づいて評価している部分を体系化および自動化することによって、専門的な知識を有さない意匠設計者が音響予測計算の結果を評価できる。

### 3.2 音響物理指標の評価尺度の設定

評価する音響物理指標は、表-1 に示す平均吸音率、音楽明瞭度、音声明瞭度、エコー妨害度、音圧レベル分布の 5 種類を選定した。選定した指標はすべて一般的に使われている音響物理指標であり、音響予測計算で得られる反射音応答から算出できる。反射音応答は図-8 に示すような受音点で観測される音のエネルギーの時系列信号のことで、音源から受音点に直接音が到達した後、初期反射音、後期反射音が続いて到達する。各指標値の定義及び算出方法は付録に記す。

平均吸音率・音楽明瞭度・音声明瞭度の 3 指標は全受音点の平均値を、エコー妨害度・音圧レベル分布の 2 指標は全受音点における値の分布範囲をそれぞれ評価する。評価の方法は、良い(O)・要検討(△)・悪い(X)の 3 段階評価と、点数による評価の 2 つの方法がある。例として、コンサートホールと会議室の平均吸音率の 3 段階評価の判定基準を表-2 に示す。

#### (1) 平均吸音率 $\bar{\alpha}$

室全体の吸音の程度を表す量で、0 から 1 の値をとる。数値が大きいほど吸音の程度が大きい。

建築設計資料集成 1<sup>7)</sup> に示されている平均吸音率の目安(表-3)を参考に、室用途ごとの推奨範囲を設定した。また表-3 に記載のない室用途の推奨範囲は、当社の実測例や文献<sup>8),9)</sup>等に掲載された実測例を参考に設定した。

#### (2) 音楽明瞭度 C80

音楽に対する明瞭性を表す量で、直接音と反射音のエネルギー比で表される。単位は[dB]で、数値が大きいほど明瞭性が高い。

音楽明瞭度が重要となる室用途は、主に生音による演奏が行われるコンサートホールである。文献<sup>10)</sup>等からコンサートホールにおける一般的な音楽明瞭度の音響物理指標 C80 の推奨範囲を調査し、

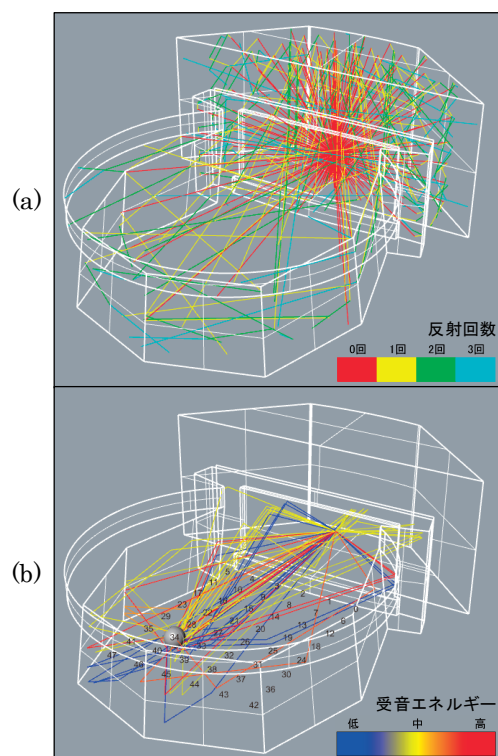


図-7 反射音線の例  
(a)音線放射、(b)受音音線

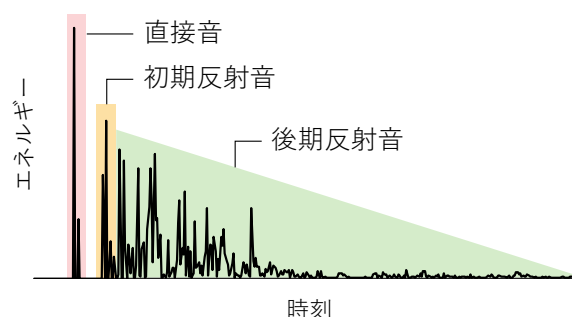


図-8 反射音応答の例

表-2 平均吸音率の判定範囲の例

	○	△	×
コンサートホール	0.2以上 0.23未満	0.18以上0.2未満, 0.23以上0.25未満	0.18未満, 0.25以上
会議室	0.25以上 0.3未満	0.23以上0.25未満, 0.3以上0.32未満	0.23未満, 0.32以上

-2~+2dB に設定した。

#### (3) 音声明瞭度 STI

STI : Speech Transmission Index とよばれる音声に対する明瞭性を表す量を用いて評価する。0 から 1 の値を取り、数値が大きいほど明瞭性が高い。

会議室のような会話を行う空間では音声明瞭度

が重要となり、STIは一般的に0.6以上であることが望ましいとされる<sup>11)</sup>。

#### (4) エコー妨害度 %ディスタージャンス

直接音が聞こえた後に明瞭な反射音が分離して聞こえることをエコーといい、音楽や音声の明瞭度が低下する原因となる。これを評価する指標として Bolt&Doak が提唱しているエコーの「%ディスタージャンス」<sup>12)</sup>を用いる。0~90%で表され、数値が大きいほど妨害度が高い。

本ツールではホールや会議室など、音源位置や受音位置が明確で大きな音が発生する室用途に対して、%ディスタージャンスの評価尺度を設定した。具体的な値は、音楽演奏用途かまたは講演等の音声伝達が重要かによって 50%または 30%とした。

#### (5) 音圧レベル分布

ホール等の室内音響が重要な部屋では、音が十分に拡散し、座席によって音が異常に大きいまたは小さいなどの偏りが無いことが望ましい。本ツールでは、十分に拡散した部屋の音圧レベル分布を理論式で算出し、音響予測計算で算出した値と比較する。

当社の実測例から実測と理論値の差を算出した結果を図-9に示す。音源と受音点の距離が近い場合には大きく乖離するが、拡散性が高い形状や仕上げの建物では概ね-2dB~+2dBの範囲に収まる事が確認された。従って理論値とシミュレーションの値の差の推奨範囲は-2dB~+2dBとした。

### 3.3 総合評価

前節で判定した各音響物理指標の評価に基づいて、総合評価を行う。総合評価は各音響物理指標の評価と同様の、良い(O)・要検討(Δ)・悪い(X)の3段階の評価、及び点数によって行う。

総合判定は、表-4に示すように、各音響物理指標に対する評価に応じて決まる。点数は評価対象の項目の合計が100点となるように点数が分配される。特に重要な項目は分配点数が高くなる。表-5にコンサートホールの評価例を示す。例1では”良い(O)”と”要検討(Δ)”の項目があるため、総合判定も”要検討(Δ)”となる。例2では”良い(O)”と”要検討(Δ)”の項目もあるが、”悪い(X)”の項目が1つあるため総合判定は”悪い(X)”となる。

意匠設計者が総合判定および総合点数に対してとるべき行動は以下に述べる通りである。

**総合判定O**：室形状や仕上げ材の設定が室用途に対して適しており、音響的な障害は発生しない。室形状や仕上げ材の変更は不要。

表-3 室の用途と平均吸音率の目安  
(建築設計資料集 17)

	室の使用目的	平均吸音率
ホール	コンサートホール	0.20~0.23
	オペラハウス	0.25
	劇場	0.30
	講堂	0.30
	多目的ホール	0.25~0.38
スタジオ	ラジオ用音楽スタジオ	0.25
	ラジオ用一般スタジオ	0.25~0.35
	ラジオ用アナウンススタジオ	0.35
	テレビスタジオ	0.40
	録音スタジオ	0.35
その他	音楽鑑賞用リスニングルーム	0.25
	居間兼用リスニングルーム	0.30
	学校教室	0.25~0.30
	会議室	0.25~0.30
	事務室	0.30
	宴会場・集会場	0.35
	体育館	0.30

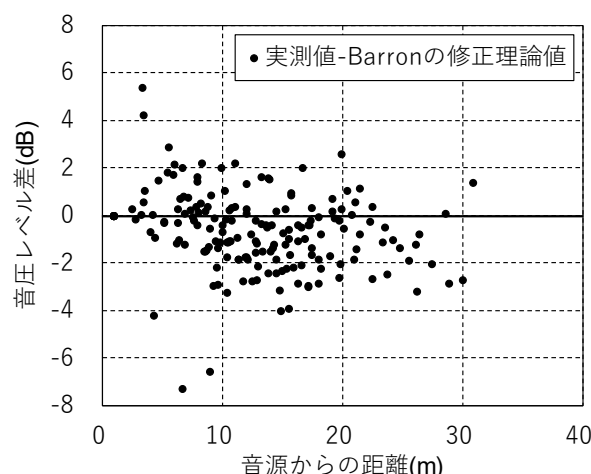


図-9 Barronの修正理論値と実測値の音圧レベルの差

表-4 総合判定の条件

総合判定	各音響物理指標の評価
O	全指標がOの場合
Δ	1指標でもΔがある場合
X	1指標でもXがある場合

**総合判定Δ**：推奨値からやや外れた項目があり、音響的な障害が発生する可能性がある。Δとなっている音響物理指標を確認し、改善できるように室形状や仕上げ材を変更する。改善が難しい場合は専門家へ相談する。

**総合判定X**：推奨値から大きく外れた項目があり、

音響的な障害が発生する可能性が高い。×となっている音響物理指標を確認し、改善できるように室形状や仕上げ材を変更する。改善が難しい場合は専門家へ相談する。

**総合点数**：各音響物理指標の点数の合計点で、0点～100点で表される。参考値として表示され、点数に対する基準はない。

## 4. 音響予測評価プログラム (Python)

### 4.1 プログラムの概要

Python で作成した音響予測評価プログラムは、音響予測計算を行う幾何音響シミュレーション(音線法)を実行するプログラムと、音線法で算出した反射音応答から各種音響物理指標を算出し評価するプログラムから構成される。音線法に関するプログラムの大部分はGPU(Graphics Processing Unit)で高速処理を行っている。計算時間は数秒～数十分程度で、モデルの複雑さや受音点の数、設定する計算精度によって変化する。

### 4.2 音線法

幾何音響シミュレーションとは、音をエネルギーを持った粒子と捉え、その伝搬過程を幾何的に再現した手法である。音の波動性を再現する波動音響シミュレーションと異なり、比較的計算負荷が低く、汎用の室内音響シミュレーションソフトウェア等では一般的な手法である。本ツールでは幾何音響シミュレーション手法のうち音線法(図-10)を採用している。

音線法は、音源点から放射された音の粒子の軌跡を音線として表し、壁や天井・床などの面での反射を追跡する。音線はエネルギーを持っており、反射面での吸音・拡散と空気吸収によってエネルギーが減少していくことで音の減衰を模擬する。反射は図-10に示すように、入射角と等しく反射する鏡面反射成分と、その他の方向に反射する散乱反射成分がある。音線法では1本の伝搬経路のみ追跡するため、仕上げ材種類ごとに設定した散乱係数を基に反射ごとにランダムに鏡面反射か散乱反射かを判定し、散乱反射の場合には反射角度を乱数で決定することで、散乱反射を模擬する<sup>6)</sup>。最終的に音線が受音点に設定した球状の領域(受音球)を通過した時刻、その音線のエネルギーを時系列のヒストグラムとして反射音応答を描く。この反射音応答を実際の測定で得られる帯域インパルス応答のエネルギー表示として解釈する。

表-5 コンサートホールの評価例

	平均 吸音率	音楽 明瞭度	音声 明瞭度	エコー 妨害度	音圧分布 レベル	総合 評価
重要度	高い	普通	-	普通	普通	-
点数の 割当て	40	20		20	20	(100)



例	判定	△	○	-	○	△	△
1	点数	20	20	-	20	10	70
例	判定	△	○	-	○	×	×
2	点数	20	20	-	20	0	60

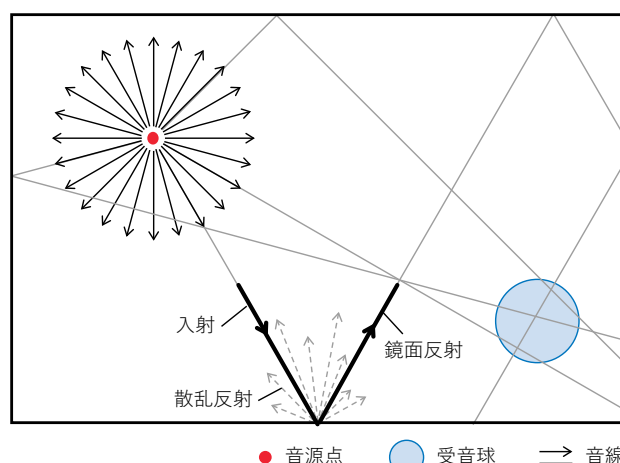


図-10 音線法のイメージ

### 4.3 音響物理指標値の算出および評価

前節で得られた反射音応答より、3.2節で述べた各種音響物理指標値を算出して評価基準と比較し、各種音響物理指標値および総合的に判定し点数を与える。

### 4.4 プログラムの精度検証

幾何音響シミュレーションプログラムの精度検証を目的として、実測と音響予測計算それぞれで得られた反射音応答より残響時間を算出して比較する。音響予測計算で算出する残響時間 $T_s$ と実測の残響時間 $T_r$ との差 $T_d = T_s - T_r$ を測定点ごとに評価する。

#### 《検証例 A：小ホール(映画館)》

図-3にモデル形状例として示した座席数約200席の小ホールで検証を行った。客席天井・舞台壁面・床面・座席が吸音性、客席壁面が反射性の空間で、客席壁面は上部が内側に入るように傾いており、映画館として使われている。空席時の残響時間実測値約0.6sに対して、算出した $T_d$ を図-11の平面モデルに示す。 $T_d$ の範囲は-0.01～0.11sであり、実測値とよく一致している。

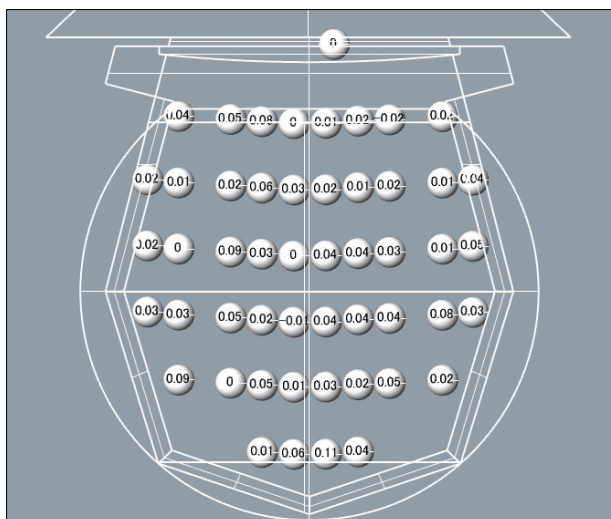


図-11 小ホール精度検証結果

### 《検証例 B：大ホール》

図-12 に示す座席数約 1200 席の大ホールで検証を行った。2 階バルコニー席があり、客席側壁・後壁・床面・座席が吸音性、その他は反射性で、空席時の残響時間実測値約 1.7s のホールである。算出した  $T_d$  を図-12 のモデルに示す。シミュレーションでは音源から離れた点の結果の一部で反射音が十分に減衰せず  $T_s$  と  $T_r$  が乖離したが、音源から近い多くの点で  $\pm 0.2s$  以内となった。

検証例 A、B の結果より、概ね実用的な予測精度が得られることが確認できた。一部乖離した点については今後プログラムの修正で対応予定である。

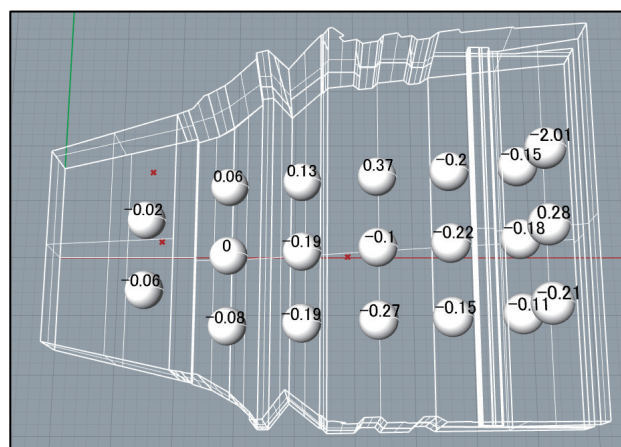
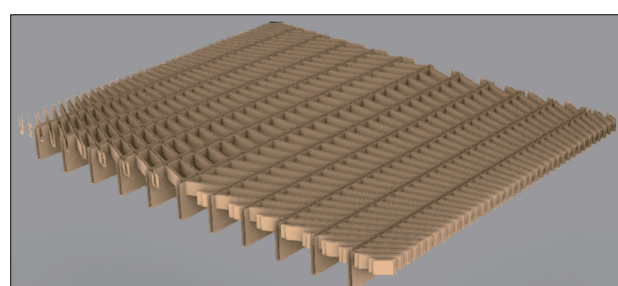
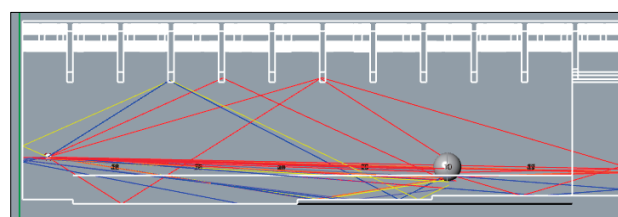


図-12 大ホール精度検証結果



(a) 天井リブ形状モデル



(b) 音線図(断面)

図-13 学校講義室

## 5. 適用事例

### 5.1 学校講義室

天井に複雑なリブ構造がデザインされた、学校講義室の検討を行った。矩形形状で、壁・天井はリブ構造を含め全て CLT 現し、床面がタイルカーペット、座席は木製で約 300 席である。CLT 現しは吸音が期待できないため残響過多となる懸念があった。図-13(a)に天井リブ形状モデルを示す。

表-6 に示すように、CLT 現しの条件 A に対して、天井・後壁・側壁の仕上げを B~D の 3 条件に変更し、それぞれ式(1)の簡易計算と音響予測計算により残響時間を算出した。その結果、簡易計算では吸音面が増えるほど残響時間が短くなったが、音響予測計算では側壁と後壁を吸音面とした D のみで残響時間が短くなるという結果が得られた。図-13(b)に示すように、本モデルのような矩形形状では向かい合う反射性の壁面で反射音が残る。

表-6 学校講義室の残響時間計算結果

条件	簡易計算	シミュレーション
A 天井・後壁・側壁 : CLT 現し	5.70	3.74
B 後壁・側壁: CLT 現し 天井: 有孔板	1.28	3.89
C 側壁: CLT 現し 天井・後壁: 有孔板	1.03	3.48
D 天井: CLT 現し 後壁: 有孔板 側壁: カーテン	0.92	1.16

室形状を反映しない統計理論によって残響時間が算出される簡易計算ではこの反射を考慮できないが、音響予測計算で用いている音線法ではこの反射を再現できるため、条件 A~C では残響時間が短くならないということが確認できた。



## 5.2 オフィス棟

各フロアの中央が円形の吹抜けでつながっている5階建てのオフィス棟の音圧レベル分布の検討を行った。検討に使用したモデルを図-14(a)に示す。円形吹抜の位置が各階で少しずつ重なるデザインとなっており、ある階の話声が円形吹抜の中で多重反射して他階の執務空間に伝搬し、音響的な問題が発生することが懸念された。

多重反射の有無を本ツールの音線図により確認した結果、円形吹抜けの中での音の多重反射は確認されなかった。図-14(b)に、話声を想定して音源近傍1m点の音圧レベルを60dBと仮定したときの音圧レベル分布の例を示す。建物全体として、局所的に音圧レベルが高くなっている点がないことが確認できる。なお本手法では回折音は考慮されていないが、本適用例のようなオフィスの音響検討への需要が見込まれるため、回折音を考慮した計算手法の整備を今後進める予定である。

## 6. まとめ

プロジェクトの初期段階において、音響の専門的な知識を有さない意匠設計者自らが室内音響の検討を容易にできる仕組みを構築することを目的とし、3DCADツールによる意匠設計者向けの室内音響予測・評価ツールを開発した。音響予測評価プログラムの精度検証を実施し、概ね実用的な予測精度であることを確認した。また講義室およびオフィスに本ツールを適用し、残響時間や音圧レベル分布等の検討を行った例を紹介した。

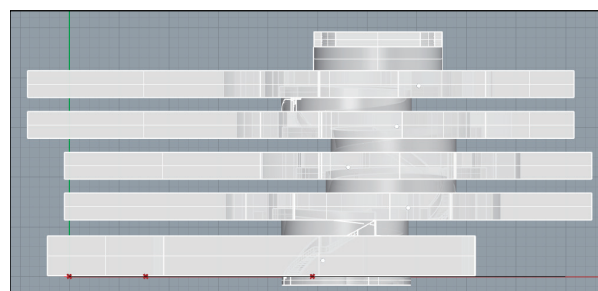
本ツールを意匠設計者へ展開することにより、プロジェクトの初期段階において意匠設計者自らが室内音響の検討を行うことが可能となる。初期段階から音響検討を行うため、後期では困難な室形状や仕上げ材の変更も容易にでき、その結果音響設計に係わる時間・コストの削減、音響品質の向上が期待される。本ツールはホールや大会議室を対象として開発を行ったが、新たな用途として近年増加傾向にあるオープンプランオフィスの音響検討への活用が期待される。

今後は回折音を考慮した計算手法の整備、評価方法の妥当性検証、計算結果の可聴化の実装などを進めていく。

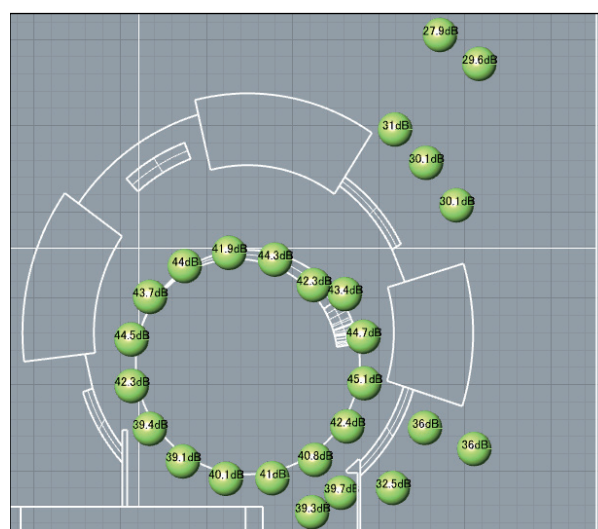
## 付録 音響物理指標の定義および算出方法

### (1) 平均吸音率 $\bar{\alpha}$

図-8に示す反射音応答から残響減衰曲線を求



(a) モデル全体(立面)



(b) 音圧レベル分布(平面)

図-14 オフィス棟

め<sup>13)</sup>、-5dBから-35dBの30dBレンジの傾きから60dB減衰する時間すなわち残響時間を算出する。平均吸音率 $\bar{\alpha}$ は残響時間 $T$ [s]と室容積 $V$ [m<sup>3</sup>]および室表面積 $S$ [m<sup>2</sup>]より以下の式で求める。

$$\bar{\alpha} = \frac{0.16V}{ST} \quad (2)$$

上式より、残響時間が長いと平均吸音率は小さくなる。平均吸音率を大きくするためには、吸音性能の低い仕上げ材を吸音性能の高いものに変更する、吸音性能の高い仕上げ材の面積を増やすなどの変更を行う。

### (2) 音楽明瞭度 C80

直接音到来から80msまでと、80ms以降に到来するエネルギーの比から(3)式で求められる。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3)$$

ただし、 $p^2(t)$ は反射音応答で得られる音のエネルギーの瞬時値を用いる。

C80の値を調整するには直接音と残響音のバランスを変える必要がある。たとえば直接音が大きくなるように反射板の角度を調整すると、C80の

値は大きくなる。

### (3) 音声明瞭度 STI

音源で発生した音が受音点に到達するまでの間に反射音や暗騒音が影響して変化する程度を変調度(MTF: Modulation Transfer Function)といい、MTFよりSTIを算出する<sup>14)</sup>。

STIの値を大きくするには、反射音や暗騒音の影響を小さくする。音響予測計算では暗騒音は考慮されないため、反射音やエコーといった響きの影響を小さくするために室形状や仕上げ材の変更を行う。

### (4) エコー妨害度

反射音の直接音からの遅れ時間と相対的な強さとの関係で、聴衆者のうち何%がエコーに対する妨害感を感じているかを示す。図-15に文献(12)で示されている%ディスタース曲線と、反射音応答の例を示す。反射音応答が全時間で下回る最も低い曲線が評価値となり、図-15の例では50%となる。用途に対するエコー妨害度の推奨値についての既往研究はなく、音響専門家がインパルス応答の形や聴感からエコーを評価する。

エコーは向かい合う平行な壁面の間や、壁面などの吸音仕上げが適切に行われていない大空間などで発生する。例えば反射性の高い仕上げ材で構成された矩形の部屋では、部屋の前後・左右・上下の3方向でエコーが発生する。エコーの解消には、エコーが発生している壁の一方もしくは両方を吸音性の仕上げに変更する、リブを入れて拡散性を高める、壁の角度を変えて不平行とするなどの方法がある。

### (5) 音圧レベル分布

完全拡散音場を仮定した音圧レベル分布の理論式(4)を基に残響音の距離減衰を考慮したBarronの修正理論式(5)<sup>15)</sup>で算出した音圧レベル分布を参照値とし、その値と音響予測計算の結果との差を評価する。

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (4)$$

$$L_r = L_w + 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{T_c}{13.82V} \exp \left( -\frac{13.82r}{Tc} \right) \right] \quad (5)$$

例えば周囲と比較して極端に音圧レベルが大きくなる位置がある場合には、天井や壁の形状に

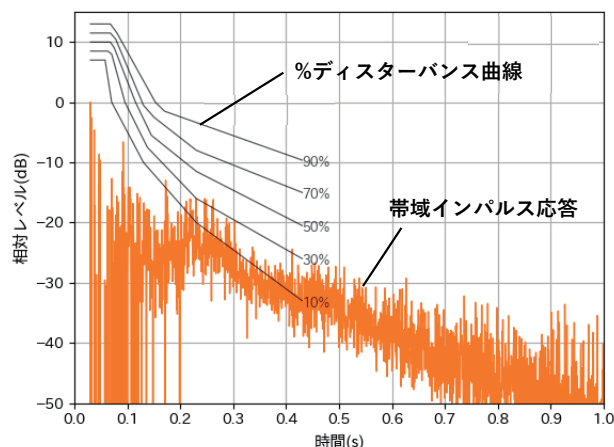


図-15 エコーの%ディスタース<sup>12)</sup>  
および反射音応答の例

よって焦点ができ、一か所に音が集中していることが考えられる。従って、音が出来の限り拡散するように室形状や壁の形状を変更する。

#### <参考文献>

- 1) 経済産業省：“デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX推進ガイドライン)”, Ver.1.0, 2018年12月, <https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>, (参照 2021-10-4)
- 2) 清水建設株式会社：“中期デジタル戦略にもとづきデジタル化コンセプトを策定～デジタルゼネコンを目指して～”, 2021年7月, <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021023.html>, (参照 2021-10-4)
- 3) 青木亜美, 八里直輝：“設計業務における音響設計への昨今の要望と取り組み”, 建築音響研究会資料, 2021年7月
- 4) 株式会社アプリクラフト：“Rhinosceros”, <https://www.rhino3d.co.jp/>, (参照 2021-10-6)
- 5) 株式会社アプリクラフト：“Grasshopper”, <https://www.applicraft.com/products/rhinosceros/grasshopper/>, (参照 2021-10-22)
- 6) 佐久間哲哉：“小特集一室内音響における最近の話題—壁面の拡散性の解析及び評価法”, 日本音響学会誌, Vol.61 pp39-44, 2005
- 7) 日本建築学会編：“建築設計資料集成(1)”, 1978.
- 8) 社団法人日本音響材料協会：“音響技術 vol.20 no.2 通巻NO.74”, 1991.6
- 9) 社団法人日本音響材料協会：“音響技術 vol.37 no.3 通巻NO.143”, 2008.9
- 10) Vilhelm Lassen Jordan：“Acoustical Design of Concert Halls and Theatres”, Applied Science Publishers LTD, 1980
- 11) 中島立美, 前田節雄：“室内での音声の「聴き取り易さ」とSTI”, 建築音響研究会資料, 1984年

- 12) R.H.Bolt, and P.E.Doak : “A Tentative Criterion for Short Term Transient Response of Auditoriums”, The Journal of the Acoustical Society of America, 1950
- 13) M.R.Schroder : “New Method of Measuring Reverberation Time”, The Journal of the Acoustical Society of America, 1965
- 14) 日本建築学会編 : “都市・建築空間における音声伝送性能評価基準・同解説”, 2011年11月
- 15) Mike Barron, “Energy relations in concert auditoriums I”, The Journal of the Acoustical Society of America, 1988