

音響シミュレーション技術の開発

TSounds シリーズとその展開

増田 潔^{*1}・田中 ひかり^{*1}・山口 晃治^{*1}

Keywords : sound simulation, noise propagation, floor impact sound, speech privacy, room acoustics

音響シミュレーション, 騒音伝搬, 床衝撃音, スピーチプライバシー, 室内音響

1. はじめに

建物ごとに仕様が異なる建設分野において、適正な音響性能を実現するためには、計画段階や設計段階で音響性能を精度よく予測することが重要である。

大成建設では、快適な音環境を実現するために、遮音や騒音対策を計画するためのシミュレーション技術、良い響きや音を聞き取りやすい空間を計画するためのシミュレーション技術について継続的に研究開発を行っており、これまでに4つの音響シミュレーションシステムを実用化している。

ここでは、TSounds (Taisei Sound Simulation system) シリーズと名付けたこれら4つの音響シミュレーションシステムの解析手法と適用事例を紹介する。

2. TSounds シリーズ

TSounds シリーズは表-1 に示す4つのシミュレーションシステムで構成されている。

表-1 TSounds シリーズ
Table 1 TSounds series

システム名称	内 容
TSounds-Ambience	総合騒音予測システム
TSounds-Floor	重量床衝撃音予測システム
TSounds-Privacy	スピーチプライバシー予測システム
TSounds-Concert	室内音響予測システム

TSounds-Ambience (総合騒音予測システム) は、遮音や騒音問題全般に適用可能で、建物内外の騒音伝搬を直接音、多重反射音、多重回折音、透過音などの音響現象を全て考慮して計算できる。

*1 技術センター 建築技術研究所 環境研究室

TSounds-Floor (重量床衝撃音予測システム) は、主に集合住宅で問題となる床衝撃音の中でも、特に予測が難しい重量床衝撃音予測向けに開発された。RC 造からS 造まで様々な構造に適用可能である。

TSounds-Privacy (スピーチプライバシー予測システム) は、病院の診察室と待合スペース間や、銀行の窓口付近、オフィスビルのオープンオフィスや会議室間における会話秘匿性 (スピーチプライバシー) を予測可能なシステムである。

TSounds-Concert (室内音響予測システム) は、コンサートホールや大会議場など、高い音響性能が要求される建築空間の音響設計を支援するために、残響時間や音圧分布等を予測するシステムである。

以上のように、建築空間の種類や用途に合わせて、4つのシミュレーションシステムを使い分け、様々な大型プロジェクトに対応している。

3. 各シミュレーション技術の概要

3.1 TSounds-Ambience (総合騒音予測)

都市・建築空間における騒音伝搬を予測するソフトウェアは古くから存在し、開発計画、建築物の設計に頻繁に使用されている。そのほとんどの解析手法はいわゆる幾何音響理論に基づくもので、経路探索を行い、経路毎に音の減衰を計算していく方法である。これらの代表的な方法では、騒音伝搬現象で重要となる反射現象および回折現象を別々に取り扱うものがほとんどで、計算条件によっては大きな計算誤差が発生する恐れがある¹⁾。

このような誤差の問題を解決するために、波動音響理論に基づく有限要素法や境界要素法、差分法などによる騒音伝搬シミュレーションも試みられているが、建物スケールと解析対象周波数から決定する要素スケ

ールのギャップから実用化されるまでには時間がかかりそうである。

そこで、幾何音響理論をベースとした解析法の中でも、境界要素法のような要素間の関係式から連立方程式を構築してエネルギー場を解析するエネルギー積分方程式法がある。この手法を応用した騒音伝搬シミュレーション手法（拡張エネルギー積分方程式法）を開発し、従来の手法の欠点を補うことを試みた²⁾。

さらに、この手法を用いたソルバーに、汎用 CAD を改良したプリ処理機能と、汎用可視化ソフトによるポスト処理機能を加えた TSounds-Ambience（総合騒音予測システム）を開発し実用化した。

3.1.1 予測手法

「拡張エネルギー積分方程式」法では、音場の境界面を幾つかの要素に分割し、それら要素間でのエネルギー収支に関する連立方程式を構築して各要素の入射インテンシティを先に求め、その結果から受音点での音圧を求める。要素間でのエネルギー収支を関連づける係数を計算する際に、反射・回折・音響透過などの波動現象をエネルギーレベルで近似的に考慮している。

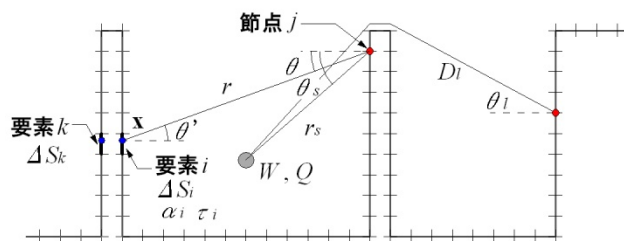


図-1 拡張エネルギー積分方程式
Fig.1 Extended energy integral equations

図-1 に示すような音場において、要素節点 j 上の入射インテンシティ I_j は次式で与えられる。

$$I_j = \sum_{i=1}^N \left[\iint_{\Delta S_i} I(\mathbf{x}_i) \frac{1 - \alpha_i \cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} dS_i \right] + \sum_{k=1}^N \left[\iint_{\Delta S_k} I(\mathbf{x}_k) \frac{\tau_i \cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} dS_k \right] + W \left(\frac{Q \cos \theta_s}{4\pi r_s^2} + \sum_{l=1}^{L_{diff}} Q D_l \cos \theta_l \right) \quad (1)$$

ここで、 W は音響パワー、 Q は指向係数、 N は全要素数、 ΔS_i は要素 i 、 ΔS_k は要素 i の裏側の同一形状の要素 k 、 $I(\mathbf{x})$ は要素内 \mathbf{x} 点における入射インテンシティ、 α_i 、 τ_i は要素の吸音率および透過率、 θ 、 θ' 、 θ_s 、 θ_l は節点を含む要素の法線方向ベクトルを基準とした入射角度、 r 、 r_s は \mathbf{x} 点および音源と節点 j との距離である。また、

D_l は l 番目の回折経路のエネルギー伝達率、 L_{diff} は回折経路数である。実際の数値計算では、式(1)の要素内の積分は内挿関数を使用して節点における入射インテンシティで近似する。式(1)の第 1 項は要素から節点への拡散反射、第 2 項は要素から節点への透過、第 3 項は音源から節点への直接音および回折音の計算である。

全ての節点に対して式(1)を適用して連立方程式を構築し、節点入射インテンシティを算出する。

3.1.2 適用例

超高層建物の解体作業における発生音の近隣への伝搬を低減するために、従来は解体階付近の全外周部に養生足場と養生材を設置していた（以下、従来工法）。しかし、従来工法では上部が解放されているため、解体騒音の低減量が小さい。そこで、大成建設では、屋根を設けて閉鎖空間化して解体作業を行うことで、近隣に伝搬する騒音を低減できる超高層建物閉鎖型解体工法「テコレップシステム」（以下、本工法）を開発し、実用化している。ここでは、本工法運用時の騒音低減効果の予測に TSounds-Ambience を適用した例を紹介する。

図-2 に示す測定点において解体作業中の騒音を測定し、TSounds-Ambience による予測結果と比較したものを図-3 に示す。

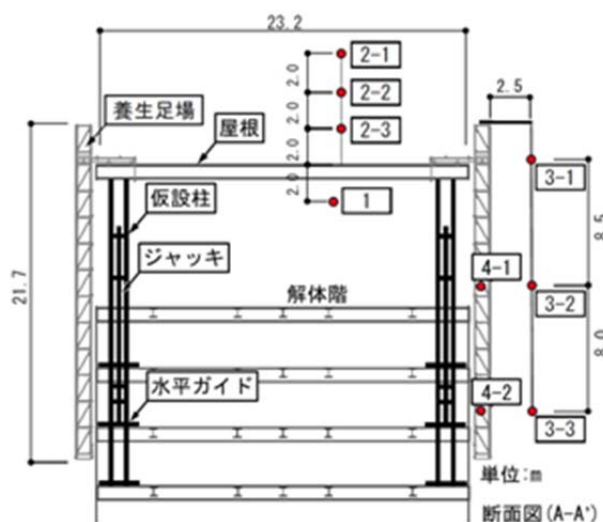
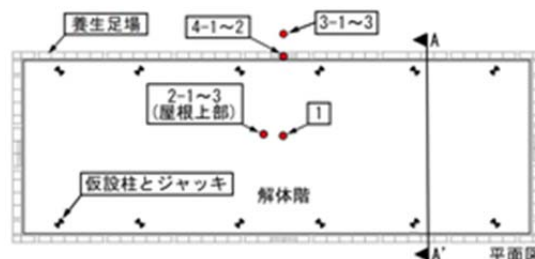


図-2 測定点位置

Fig.2 Position of the measurement points

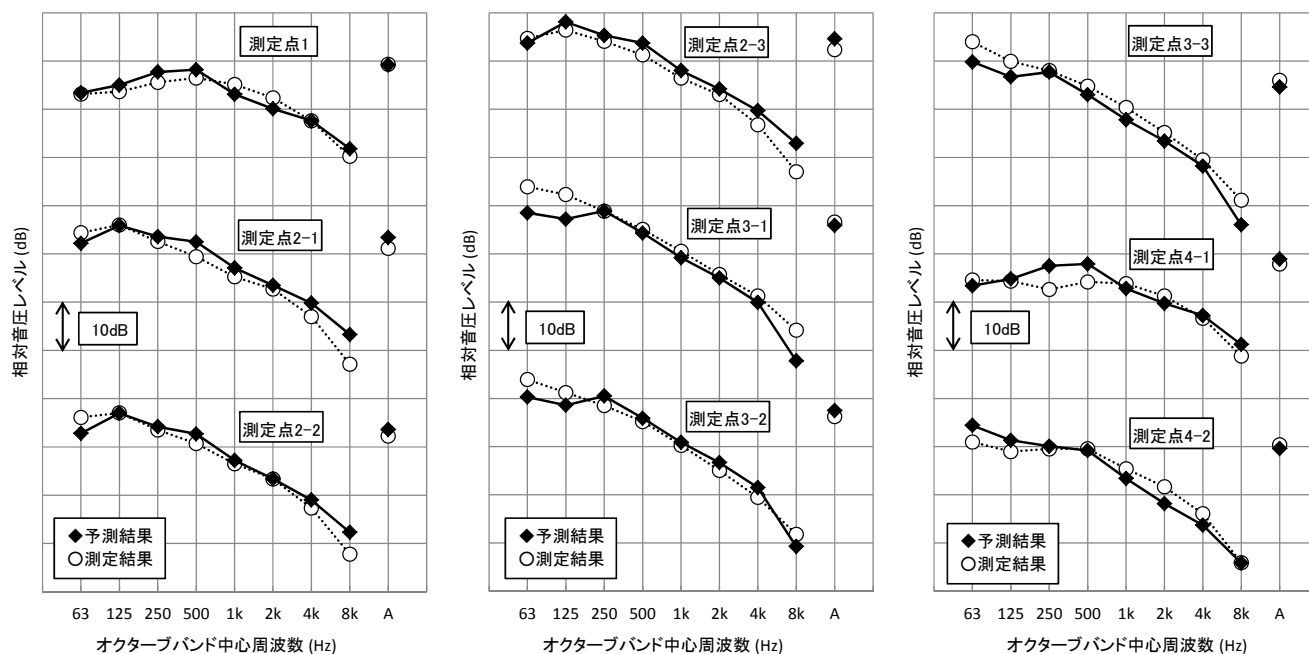


図-3 予測結果と測定結果の相対音圧レベル

Fig.3 Relative sound pressure level of measurement results and predicted results

予測時には、騒音源のパワーレベル、閉鎖空間を形成するパネルや屋根部分の透過損失値、内部で実際に測定した吸音率等を用いて計算した。図-3によれば、予測結果と測定結果の対応は良い。

上記結果を基に、外部に伝搬する騒音について従来工法と本工法の騒音伝搬シミュレーションを行った。音の拡がりを示した結果を図-4（従来工法）、及び図-5（本工法）に示す。

図には A 特性音圧レベルの等値面を示している。本工法は、従来工法と比較して、音の拡がりが小さくなり、外部への騒音伝搬が低減していることがわかる。

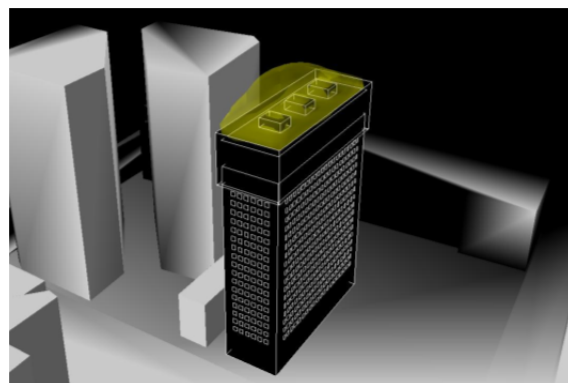


図-5 本工法の騒音伝搬予測結果

Fig.5 Noise propagation prediction of enclosed demolition method

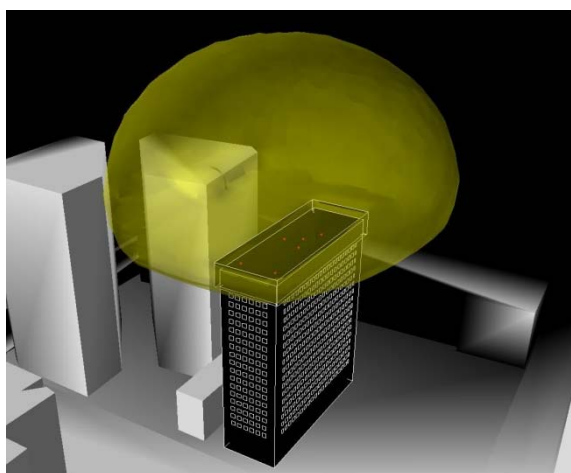


図-4 従来工法の騒音伝搬予測結果

Fig.4 Noise propagation prediction of conventional demolition method

以上のように TSounds-Ambience は、高い精度で騒音を予測できるだけでなく、可視化によって騒音伝搬の状況を直感的に把握できる。

3.2 TSounds-Floor（重量床衝撃音予測）

床衝撃音遮断性能は集合住宅に要求される音環境性能のひとつである。このうち、スプーンなどの軽く硬い物の落下による「軽量床衝撃音」の遮断性能はクッション材を含む床仕上げ材を用いるなど適切に仕上材を選定すれば向上することができる。これに対し、子供の飛び跳ねや、歩行を行うときに発生する「重量床衝撃音」の遮断性能は、主に建物の床スラブの厚さや梁の寸法・配置といった、構造条件により決定するため、床スラブ厚を増すなどの構造的な対策が必要であ

る。

重量床衝撃音遮断性能は測定法と評価法がそれぞれ JIS で定められており、これに基づいた目標値が多くの集合住宅で設定されている。近年の集合住宅では、構造耐力的に必要な厚さよりも重量床衝撃音遮断性能の目標値を満たすための厚さが上回るため、コンクリートの床スラブが非常に厚くなる傾向にある。床スラブ厚を必要最小限にするには、設計段階で重量床衝撃音遮断性能をいかに精度よく予測できるかが鍵となるが、性能の精度良い予測や対策を行うことは容易ではない。

従来の重量床衝撃音遮断性能の予測方法として、日本建築学会では、一般的な大きさの矩形の床スラブを持つ鉄筋コンクリート造建物を対象とした「インピーダンス法」を提案している³⁾。しかし、非常に大型のコンクリート床スラブを持つ建物や、矩形以外の不整形スラブを持つ建物、ほとんど梁を有さない建物など、近年増えてきた新しい構造条件の建物、また鉄筋コンクリート造以外の鉄骨造には適用できない。

以上のような問題を解決するために、有限要素法による振動解析の結果から重量床衝撃音を予測するソルバーと、解析結果を可視化できる機能からなる TSounds-Floor（重量床衝撃音予測システム）を開発した。

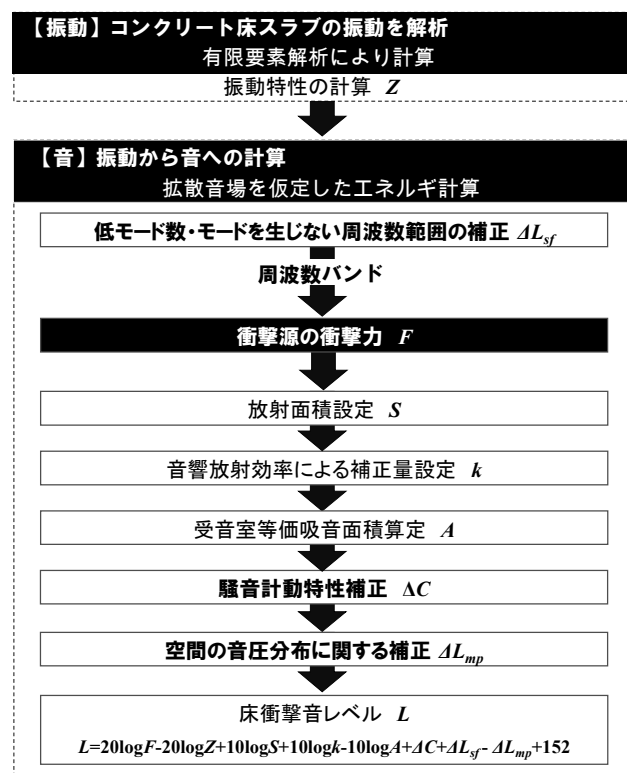


図-6 TSounds-Floor の計算フロー
Fig.6 Calculation flow chart of TSounds-Floor

3.2.1 予測手法

TSounds-Floor は、図-6 のフローで示すように、床スラブの振動を有限要素解析によって算出する予測手法を用いており、様々な床スラブの共振現象の影響が反映できる。また、特有の形状の建物であっても予測することが可能であるため、鉄筋コンクリート造で柱梁に支持された矩形スラブのみでなく、不整形スラブやほとんど梁を有さない壁式構造も適用対象となる。

床スラブ振動からの放射音は、完全拡散音場を仮定したエネルギー計算手法をベースに、独自に開発した空間の波動性を近似する補正手法を用いて計算している。

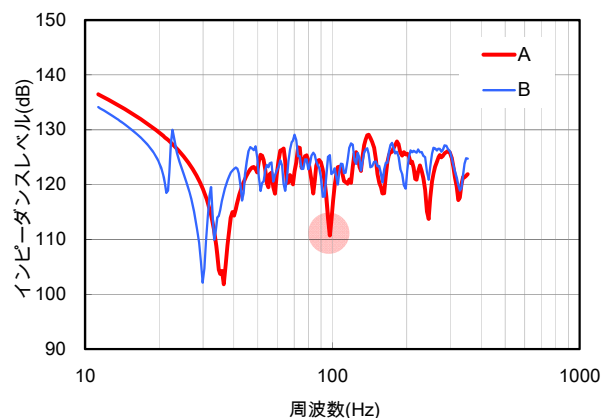
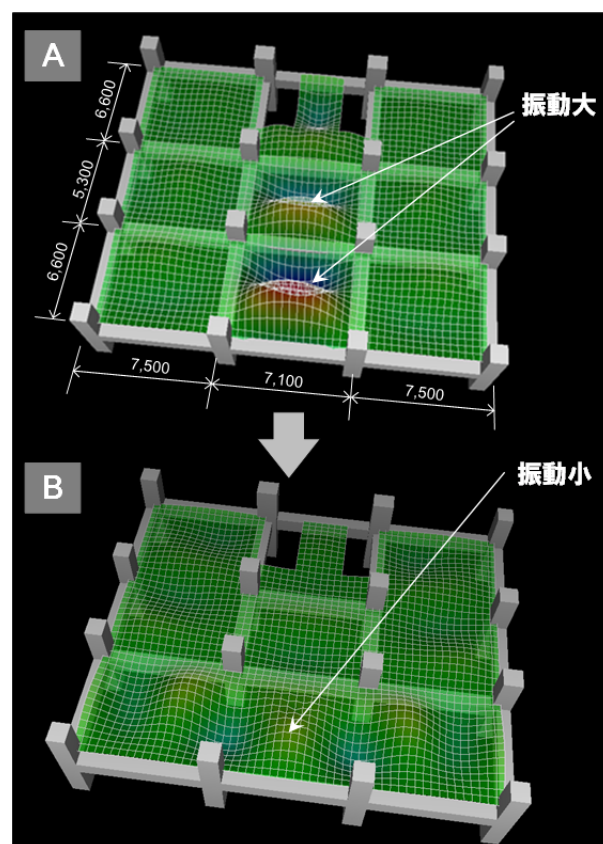


図-7 鉄筋コンクリート造建物の振動特性算出例
(上：振動分布算出例，下：インピーダンスレベル算出例)
Fig.7 Vibration calculation results of RC building

3.2.2 適用例

図-7は21階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅のある1フロアに対する予測例である。この建物は図中の「A」のように、柱と柱の間に梁が通った一般的な構造として設計されていた。しかし、TSounds-Floorにて重量床衝撃音を予測したところ、特定の周波数で振動しやすく、重量床衝撃音遮断性能が設計目標値を満たさないと予測された。この原因は梁に囲まれたスラブの寸法による共振周波数(97 Hz)においてインピーダンスレベルが鋭く落ち込むことにあることが数値解析の結果から分かった(図-7のグラフ中で薄い赤色で示した部分)。そこで、一部の梁を省略し、「B」のような構造としたところ、特定の周波数における落ち込みは無くなり、目標値を満足できると予測されたため、「B」をもとに設計・施工された。

図-8は鉄骨造建物の予測例である。鉄骨造建物は同じ床スラブ厚の鉄筋コンクリート造建物と比較して重量床衝撃音遮断性能が良い傾向がある。これは梁がねじれ振動しやすいために、加振された床スラブから周囲のスラブに振動が散逸し、加振された床スラブには振動のエネルギーが留まりにくいいためである⁴⁾。図-8に示したコンター図を比較すると、実測と予測が概ね一致していることがわかる。

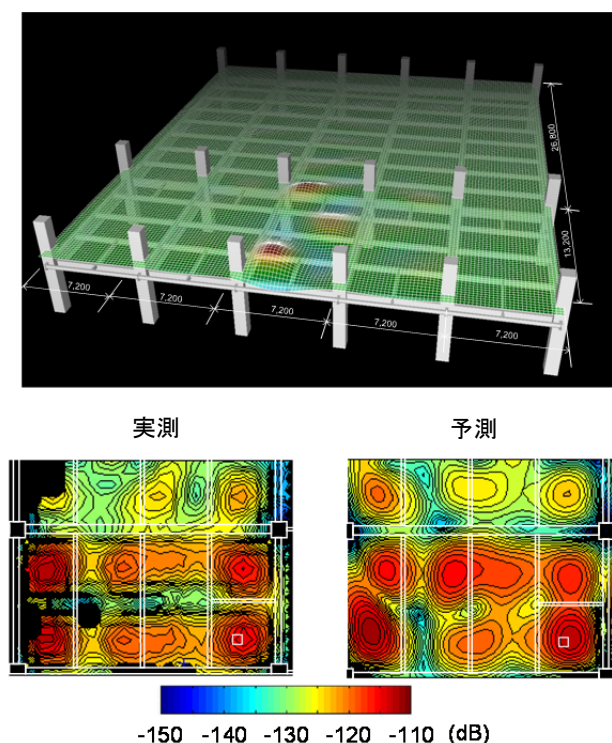


図-8 鉄骨造建物の振動特性算出例
(上：振動分布算出例，下：63 Hz 帯域(1/3 オクターブ)の振動分布(アクセラランス)の実測値と予測値の比較)

Fig.8 Vibration calculation results of steel construction building

3.3 TSounds-Privacy (スピーチプライバシー予測)

病院の多床室やオフィスの執務空間のようなオープンな空間では、会話の内容が第三者に聞き取られないように、スピーチプライバシーを考慮した音響設計が重要となってきている。そこで、設計段階においてスピーチプライバシーを評価することができる TSounds-Privacy (スピーチプライバシー予測システム)を開発した。

3.3.1 予測手法

TSounds-Privacy では、最大 8 つの参照点による高次差分スキームを用いた FDTD 法⁵⁾(Finite Difference Time Domain method)によって、インパルス応答を求め、スピーチプライバシーの評価基準の 1 つである音声伝達指標 STI (Speech Transmission Index) もしくは RASTI (Rapid Speech Transmission Index) を算出し、スピーチプライバシーを評価する。なお、STI, RASTI を算出する際に、暗騒音を考慮することができる。どちらの指標も 0~1 の値をとり、数値が小さいほどスピーチプライバシーがより保たれていることを意味する。

FDTD 法の境界条件には、音圧の入射波と反射波の比率(反射率)を規定する手法⁶⁾を用いる。音圧反射率には、実数のみを与える。また、音源は、Speech Transmission Meter (B&K 製, Type 3361) のスピーカをモデル化し、振動面に相当するグリッドに粒子速度の時間波形を与える方法⁷⁾を用いて指向性音源としている。

3.3.2 適用例

他者と長時間にわたって滞在することになるため、特にスピーチプライバシーの需要が大きいと考えられる病院の多床室において、暗騒音を変更した場合の予測例を紹介する。

図-9に示すように、ベッド間に高さ 1,800mm のローパーティションを設置した四床室を 3 次元にモデル化し、S を話し手、P を聞き手として、この位置関係における会話を想定して予測した。P での発生音の A 特性音圧レベルを 55dB とし、周波数特性は、日本語女声朗読⁸⁾を参考にした。暗騒音の A 特性音圧レベルは、40dB と 50dB の 2 条件とした。ここでは、スピーチプライバシー評価量として RASTI を予測した。

高さ 1,200mm における水平面の RASTI の分布を図-10に示す。これらの図では、赤色の範囲が聞き取りやすく、緑色、青色になるに連れて聞き取りにくくなることを示している。暗騒音が大きくなることによって、聞き手がいるベッド以外では、RASTI が小さくなり、聞き取りにくくなっていることが確認できる。

このように、TSounds-Privacy を用いることで、設計段階においてスピーチプライバシーの状況を把握することができる。また、暗騒音を変更した場合以外にも、パーティションの形状や材質、またはベッドの配置が変更した場合のスピーチプライバシーを評価することも可能である。

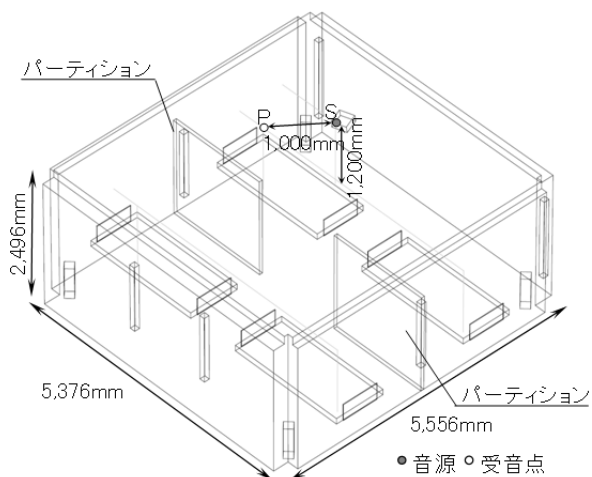


図-9 四床室の概要

Fig.9 Calculation model of 4-bed ward

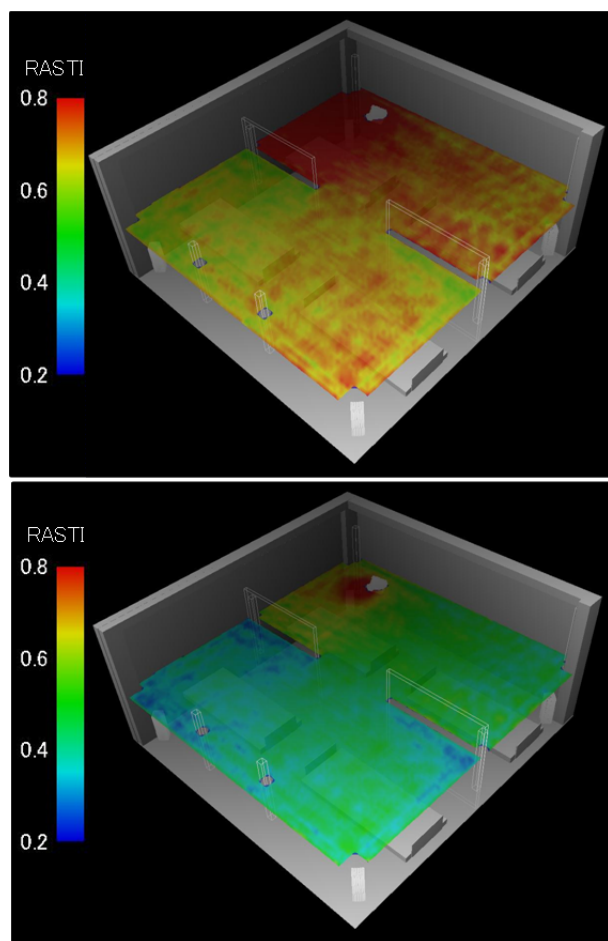


図-10 予測結果

(上：暗騒音 40dB, 下：暗騒音 50dB)

Fig.10 Calculation results

3.4 TSounds-Concert (室内音響予測)

コンサートホールや大会議場などの空間は、高い音響性能が要求されるため、設計段階におけるシミュレーションが非常に重要である。そこで、室形状や内装仕上げを反映して、残響時間や音圧分布などの音響設計指標を予測できる TSounds-Concert (室内音響予測システム) を開発した。

3.4.1 予測手法

予測手法は、音線法とモンテカルロ法を組み合わせた幾何音響計算である。具体的には、音線が反射する度に、音線の総長に応じてフレネル半径を計算し、音線の入射点から反射面の境界までの距離の平均値に対し、フレネル半径に対して一定量大きくなるまでは音線は鏡面反射を繰り返す、それ以降は拡散反射をするようにして高次反射まで計算する。

フレネル半径 r_f の計算は、音源から検討する反射面までの音線の総長を L 、予測対象としている音響空間の平均自由行路を p 、波長を λ とした時に、

$$r_f = \sqrt{\lambda \left(\frac{pL}{p+L} \right)} \quad (2)$$

で計算する。また、拡散反射は Lambert の余弦法則にしたがうものとし、計算時に乱数 R_1 , R_2 を発生させ、

$$\theta = \cos^{-1}(1-2R_1), \quad \phi = 2\pi R_2 \quad (3)$$

で反射角 θ , ϕ (回転角, 仰角) を計算する。

3.4.2 適用例

コンサートホールでは、ホールの残響音だけでなく、その反射音構造が重要となる。あるホールにおいて初期反射構造を TSounds-Concert にて可視化した結果を図-11 に示す。ステージ上で音が放射されてから 100ms までの反射音の波面の分布の様子が見てとれる。

次に空港管制実習シミュレータ用の 360 度スクリーンについて TSounds-Concert にて検討した例を紹介する。このシミュレータは中央の訓練用の制御装置の周囲に空港のシミュレーション映像を映し出す 360 度スクリーンが設置されている。このスクリーンを鉛直に施工してしまうと、スクリーンに沿って音が減衰せずに伝搬し続け、非常に残響が長くなっていくため (音の回廊現象)、訓練に支障をきたす。

そこで、TSounds-Concert にてスクリーンに様々な傾斜角度を持たせて残響時間予測を行い、シミュレータ居室の容積から求めた最適残響時間から、スクリーンの傾斜角度を 8 度とした。さらに、1/5 縮尺模型によって事前に音場の状況を確認した。

図-12 にスクリーンの傾斜角度を 0 度と 8 度とした時の TSounds-Concert によって計算された残響曲線、模型実験から得られた残響曲線、実際に 8 度傾斜で施工されたスクリーン内の残響曲線を合せて示す。なお、模型実験の結果は模型則にしたがって時間軸を 5 倍としている。予測した結果と模型実験結果、竣工測定結果は良い対応を示している。

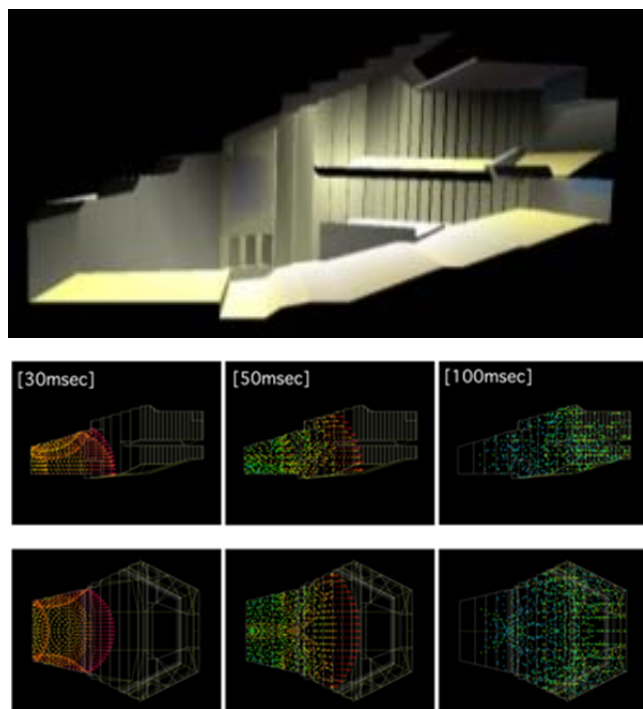


図-11 コンサートホールの反射音シミュレーション例
Fig.11 Reflection sound simulation of a concert hall

4. まとめ

本報では、大成建設で実用化している TSounds シリーズと名付けた 4 つの音響シミュレーションシステムの解析手法の概要と適用事例を紹介した。これらシミュレーションシステムの実プロジェクトへの適用件数は、初期バージョンのものも含めると、200 件を超える。

適用結果のフィードバックや新たなニーズから、これからも既存技術のブラッシュアップと、新たな音響シミュレーション技術の開発を行っていく予定である。

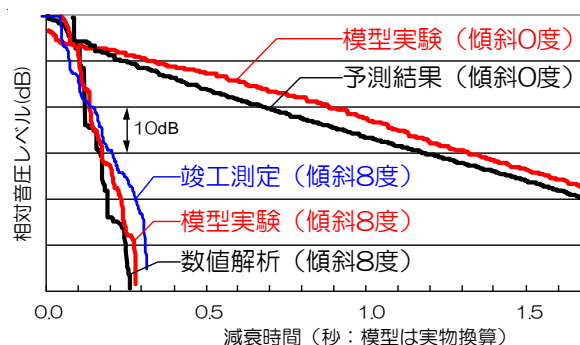
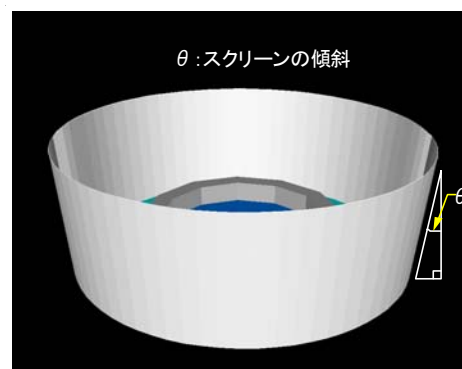


図-12 360 度スクリーンの傾斜と残響曲線
Fig.12 Reverberation curves of 360-degree screens

参考文献

- 1) K. Masuda : Sound environment simulation system for prediction of noise propagation in and around buildings, ASVA97 proceedings, 97, 585-590, (1997)
- 2) 増田 潔 : 拡張エネルギー積分方程式法による騒音伝搬予測, 日本騒音制御工学会平成 13 年研究発表会講演論文集, 273, 2001
- 3) 日本建築学会編 : 建物の床衝撃音防止設計, 技報堂出版, 2009
- 4) 田中ひかり, 増田 潔 : 鉄骨造建物の重量床衝撃音予測に関する FEM モデルについて, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1071-1072, 2011
- 5) S. Sakamoto : Phase-error analysis of high-order finite difference time domain scheme and its influence on calculation results of impulse response in closed sound field, AST, Vol28, pp.295-309, 2007.
- 6) 鹿野洋, 坂本慎一 : FDTD 法における反射境界面の扱い方, 日本音響学会講演論文集, 1253-1254, 2011.3.
- 7) 鹿野洋, Csaba Huszty, 横山栄, 坂本慎一 : FDTD 法における指向性音源の実現, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA-2010-13, 2010.4.
- 8) 日本建築学会編集 : 建築と環境のサウンドライブラリ SMILE2004, 技報堂出版, 2004.11.