

1/20縮尺音響模型実験について

上田泰孝^{*1}・吉田卓彌^{*1}・佐藤富士男^{*1}・野本利英^{*1}・小沢純子^{*2}

これまで1/10縮尺の音響模型実験が一般的であったが、昨今ハイレゾデバイスの発達によりより高周波数を扱うことが比較的容易となったため、今回多目的ホールを建設するにあたり1/20縮尺音響模型実験を実施した。1/20縮尺の音響模型実験用材料の選定、実験機器の基本性能、音響検討事例の紹介および実際と模型実験における音響指標の比較結果について紹介する。

キーワード： 1/20, 音響模型実験, 相似則, 音響シミュレーション

はじめに

日本青年館・日本スポーツ振興センタービルの中にある日本青年館ホールの音響検討に 1/20 縮尺の音響模型実験を用いた。対象建物概要を表-1に示す。

まず音響模型実験は、以下の相似則（式1）に従って実施¹⁾²⁾される。以下のように長さ l と周波数 f の関係が満たされる必要がある。つまり縮尺模型が小さくなればなるほど高い周波数で評価していく必要がある。

$$l / l_{\text{模型}} = f / f_{\text{模型}} \text{ ----- (式1)}$$

これまで 1/10 縮尺音響模型実験については多くの報告事例がある。今回は 1/20 縮尺で実験を行うため更に高い周波数での実験となる。1/20 縮尺音響模型に用いる材料、高周波数用の無指向性音源装置および音響模型実験結果と実物の比較による適用限界などについて知見を得ることを目的として実施した。

1. 音響模型実験の基本

1.1 検討フローと背景

図-1に音響模型実験のフローを示す。このフローに入る前に模型用音源装置や受音装置の整備が必要であった。昨今のハイレゾオーディオの普及により高サンプリングレートに対応したAD/DAおよびスピーカーなどのオーディオデバイスがあり、高周波数の処理が比較的容易に行える背景がある。今回は 1/20 縮尺模型用の内装材料の吸音特性の把握から実施した(①)。②の模型製作はCAD図から削りだしが可能なNC加工機を利用した。幾何音響シミュレーションにおいてもあまりに細かい段差(例えば扉枠のちりなど)は表現せず室形状の大まかな表現を再現するため、CAD図の修正と加工業者との打合せ・調整が必要であった。1/10 音響模型製作の場合大工さんとなるが、現在このような製作作業を依頼できる方が減り、NC加工機を用いた。

表-1 建物概要

所在地：	東京都新宿区霧ヶ丘町4-1
発注者：	一般財団法人日本青年館 独立行政法人日本スポーツ振興センター
設計監理：	久米設計
音響コンサル：	永田音響設計
施工：	安藤ハザマ
建物諸元：	劇場(1249席), ホテル(220室), 事務所, 飲食店, 物販店舗 地下2階, 地上16階 S造, 一部SRC造
劇場諸元：	1階 811席 2階 434席 車いす 4席, 合計 1249席
(仕上材)	床:カーペット 壁:下部タイル, 上部石膏ボード9.53層貼 天井:FGボードt83枚貼

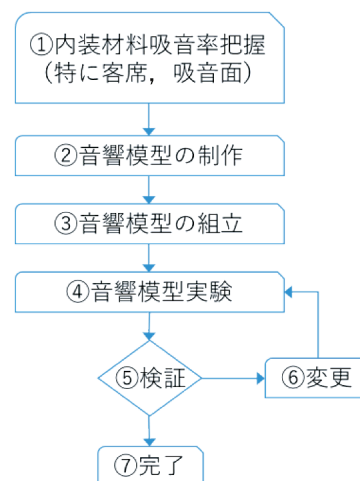


図-1 音響模型実験のフロー図

*1 建築研究第二部 *2 材料仕上技術部

また微妙なカーブの再現が容易であるのは大きなメリットでもあった。3Dプリンターの活用も考えたが製作コストや時間の観点および細部の表現は不要であることから、見送ることにした。

③の組み立ては、NC加工機で分割製作したものを実験室でパズルのように組み立てた後、周囲の補強、照明、電源、室素注入口、測定器用の開口など細部を作りながら実験が可能な状態にした。④実験では今回フラッター現象が客席後部で観測されたため、発生原因を模型と幾何音響シミュレーションで探り一部側壁の修正を行った。

1.2 模型実験用音源装置

1.2.1. 周波数特性

音響模型実験用の音源スピーカーについては、過去に放電パルススピーカー³⁾⁴⁾およびプラズマスピーカー⁵⁾、最近ではMEMSスピーカーが報告されている。今回、ハイレゾ用スピーカーを用い12面体スピーカーを製作することにした。模型実験用の無指向性音源装置についての基本特性について示す。

図-2に測定フローを示し、図-3に残響箱でホワイトノイズを出した時の受信位置での周波数特性を示す(イコライザー有無)。イコライザーにより10kHz以上の周波数が増幅され50kHz程度まで十分なSN比が確保されている。

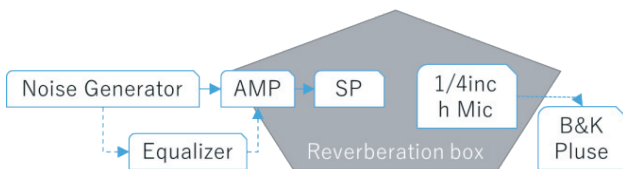


図-2 模型用SPの周波数特性測定フロー

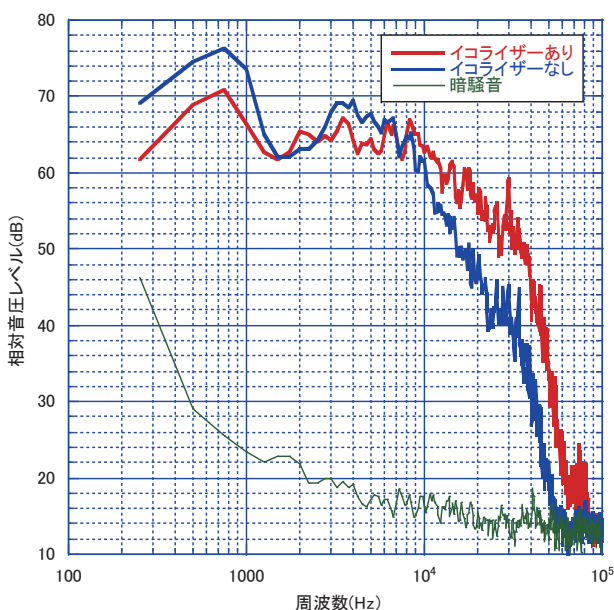


図-3 模型用音源の周波数特性

また低域は250HzでもSNがあり、スピーカーを低音と高音で交換することなく実験が可能となった。この後でも述べるが室素置換し模型内を乾燥空気で満たし実験をするため、機器の盛替えが減ると実験時間の短縮に繋がる。

1.2.2. 放射特性

次に音源スピーカーの放射特性を図-4に示す。実物換算した周波数で示しているため、実際計測した周波数は20倍である(2500, 10kおよび40kHz)。高い周波数である2000(40k)Hzになると凸凹が見られるが、ほぼ同心円状の放射特性となっており、無指向性音源として使えると考えた。

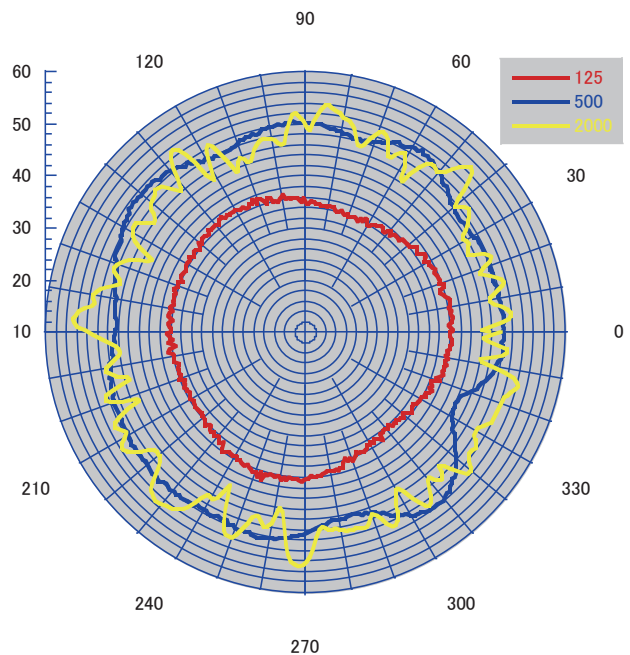


図-4 模型用音源の放射特性 (1/3 オクターブバンド)

1.3 音響模型実験用材料の選定

模型製作前に模型用の材料選定のため、残響箱(弊社残響室の1/5縮尺)にて各種材料および模型座席の吸音性能試験を実施した(図-5参照)。

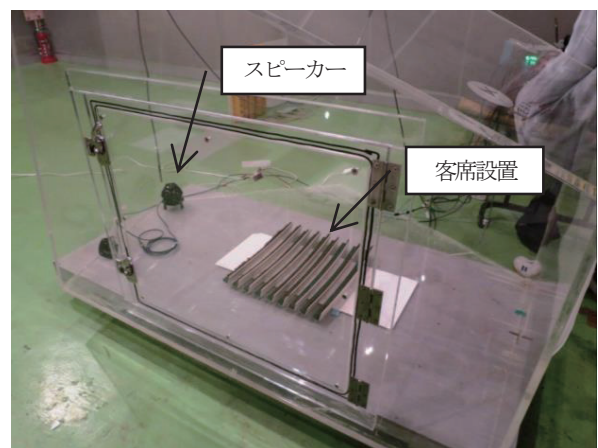


図-5 アクリル製残響箱での吸音試験の状況

1.3.1. 材料の吸音性能

吸音試験については相対的な比較であるため、残響箱の中は通常空気のままです素置換をせずに測定した。

いろいろな不織布およびクロスを試した結果、反射板後の舞台壁に貼り付けるグラスウール(32k, t50, 空気層なし)としてニードルパンチカーペット(t2)の2枚重ねを用いることにした(図-6参照)。

通路部のカーペット仕上げは、1枚貼とした。

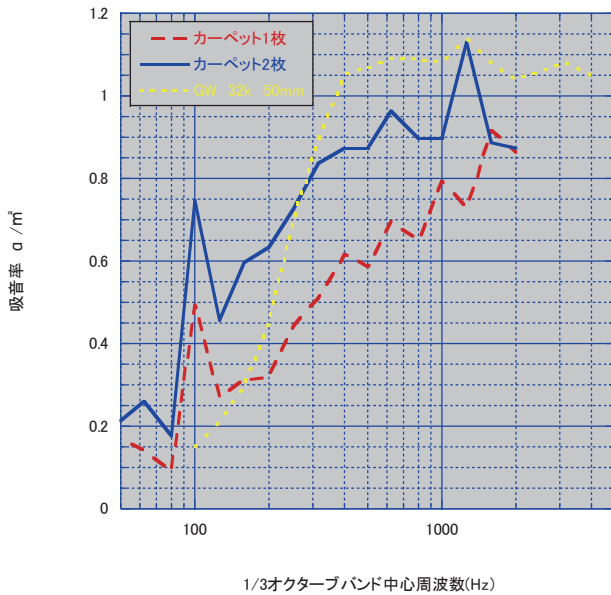


図-6 ニードルパンチカーペットの吸音率

1.3.2. 座席の吸音性能

模型用客席は、実物客席の背および座の傾きにできる限り添うよう制作した。図-7に模型用と実物(白線)の比較を示す。比較検討した結果、座にフェルト(t2)を2枚重ねとし、背はフェルト1枚とした(図-8参照)。図-9に客席吸音率の比較結果を示す。平土間設置の吸音率は実物の吸音率と同程度であった。人物着席も試行錯誤してみたが、これといった材料まで見つけられなかった。

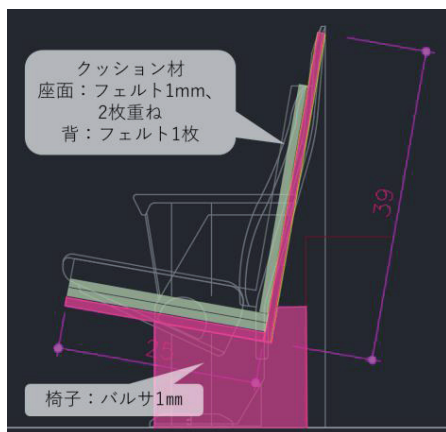


図-7 模型用座席の形状(寸法 1/20)および材料



図-8 模型客席の設置状況

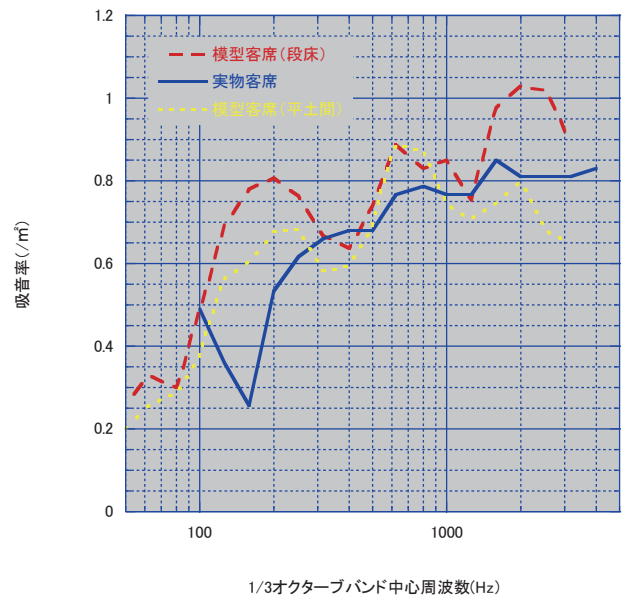


図-9 客席の吸音率比較

1.4 音響模型の組立

音響模型の組立について示す。模型内作業、室素置換、照明、電源および外部からのモニターなどを考慮した。図-10にNC加工機用CADデータを示す。

NC加工機で制作した部品を実験室内で組み立てた流れを次頁以降に示す。組立架台を事前に準備し、架台上で模型を組み立てた。ホールの組立に1日間、ホールを全体を覆うボックスおよびそのシールに2日間程度、室素置換取り付けに約2日間必要となった。

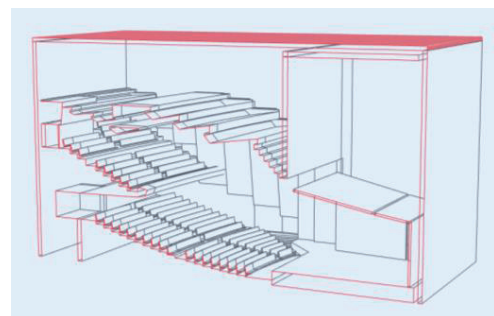
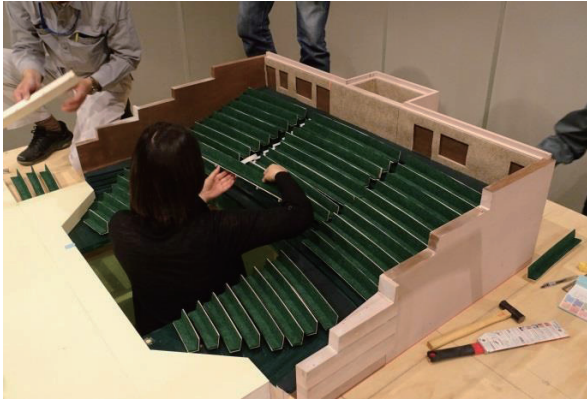


図-10 NC加工機用3Dデータ(ホール断面と外枠ボックス)



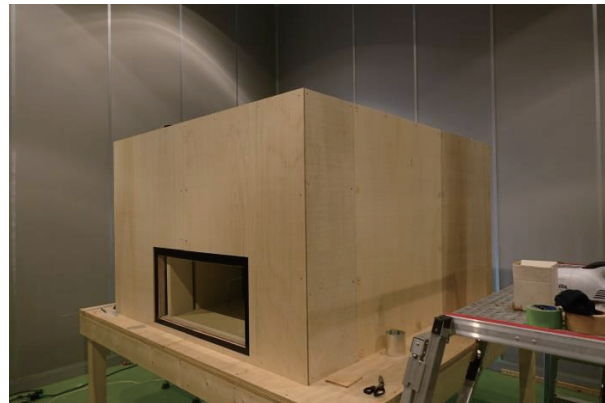
① ステージおよび1階席部分の組立，客席前の開口からホール内全てにほぼ手が届く



④ 天井材の設置



② 2階席の組立



⑤ ホール全体をボックスで覆い，室素置換時の漏れを防ぐ（一部外部から中身を見るためアクリル製，継ぎ目および窓廻りのシール処理）



③ ステージ廻りおよび側壁の組立



⑥ 実験の様子 目地をアルミテープで塞ぎ，室素置換時の気密性を確保，マイクの設置は，側壁と客席下面に設けた穴から所定の位置に到達するようにした。室素置換時の空気濃度と測定時に酸欠にならないよう酸素濃度計を室内にも設置した。

2. 音響模型実験結果

2.1 基本音響特性

2.1.1. 残響時間

図-11に測定位置図を示す。図-12にEDTとT30の残響時間測定結果を示す。T30については反射板なしの結果も示す。反射板ありのケースで1.65秒(500Hz), 反射板なしで1.4秒(500Hz)であった。

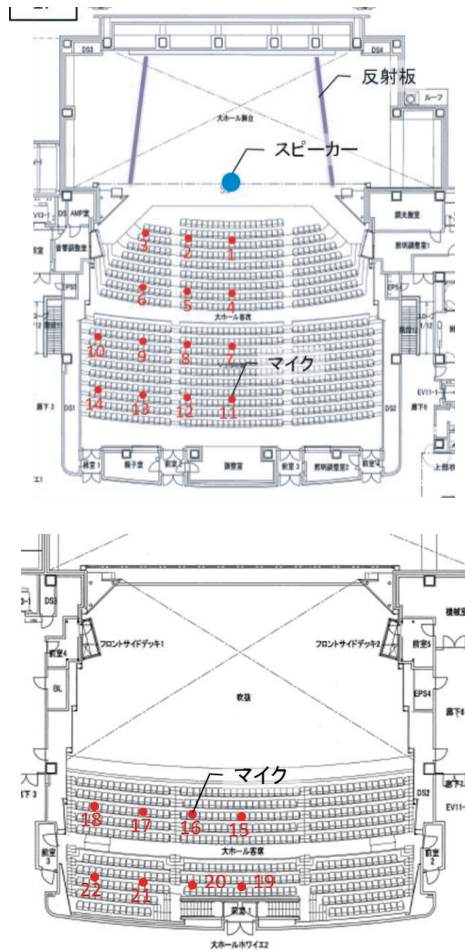


図-11 測定位置図 (上1階席, 下2階席)

表-2 残響時間測定結果 (T30 反射板ありのみ)

測定位置	オクターブバンド中心周波数				
	125	250	500	1000	2000
1	1.90	1.73	1.55	1.42	1.29
2	2.04	1.77	1.56	1.43	1.26
3	1.82	1.89	1.67	1.47	1.31
4	2.06	1.82	1.54	1.39	1.25
5	2.06	1.95	1.62	1.43	1.26
6	1.93	1.79	1.67	1.50	1.30
7	1.84	1.72	1.66	1.46	1.27
8	1.98	1.77	1.66	1.50	1.40
9	2.06	1.73	1.67	1.54	1.36
10	2.10	1.81	1.67	1.53	1.32

11	2.06	1.74	1.66	1.52	1.39
12	1.92	1.78	1.68	1.60	1.43
13	2.07	1.84	1.64	1.57	1.42
14	2.07	1.79	1.65	1.58	1.41
15	2.13	1.84	1.57	1.56	1.45
16	1.94	1.82	1.72	1.59	1.48
17	1.92	1.82	1.75	1.61	1.52
18	1.96	1.79	1.79	1.63	1.56
19	1.91	1.76	1.54	1.51	1.36
20	1.97	1.84	1.62	1.49	1.36
21	1.99	1.85	1.63	1.51	1.35
22	2.04	1.79	1.72	1.52	1.42
平均	1.99	1.80	1.65	1.52	1.37

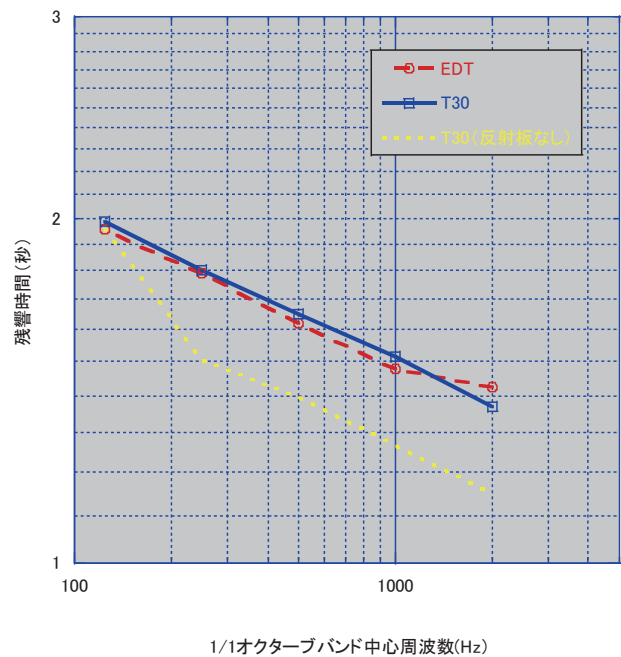
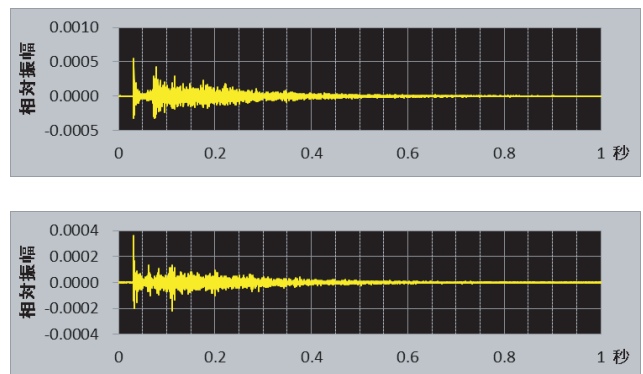


図-12 残響時間測定結果

2.1.2. エコータイムパターン

図-13にエコータイムパターン(2kHz)の測定結果を示す。2階席後方のP20で繰り返しの反射音(フラッターエコー)が観測された。



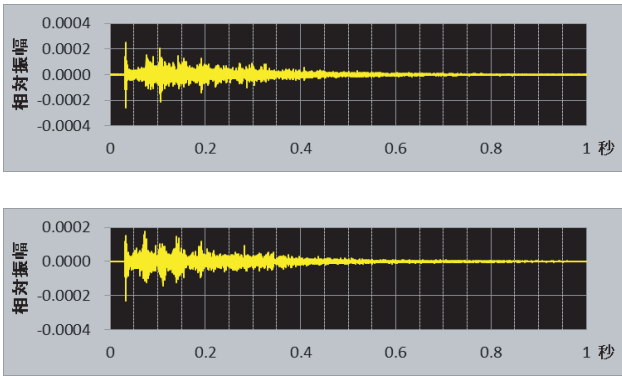


図-13 エコータイムパターン測定結果
(上から P5, 12, 16, 20)

2.2 追加検討項目

2階席のP20で観測されたフラッターエコー現象の原因特定とその対策について追加検討を行った。

2.2.1 室内音響シミュレーションによる検討

上下は拡散性の高い天井と客席床であり、前後はステージ反射板と客席段床で拡散性が高いことが解る。しかし側壁は並行面であるため、側壁間で繰り返し反射することが想像できる。図-14に室内音響シミュレーションを示す。ここでは各側壁のカバーエリアを表示している。音源がステージ前部(客席に近く)になればなるほど繰り返し反射する可能性が示唆された。側壁間の距離が26mであるため、80msもしくは40ms毎に反射することが考えられる。

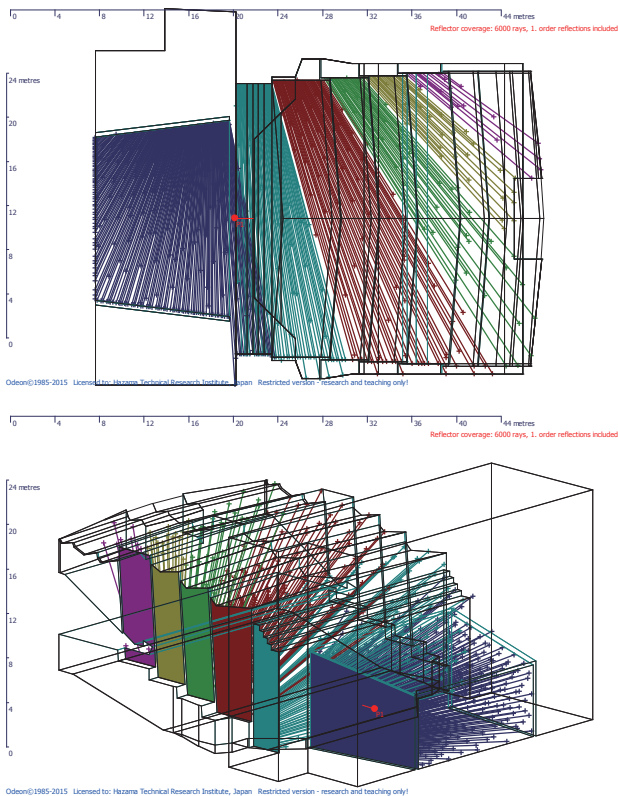


図-14 室内音響シミュレーション結果(平面と鳥瞰)

2.2.2 音響模型実験による検討

音響模型実験において側壁面に拡散板を取り付けエコータイムパターンの結果を比較した(図-15参照)。これより拡散を取り付けることにより、70ms, 115msおよび190msの反射は小さくなったが140msの反射は残った。音響シミュレーションでの仮定どおりに側壁の影響であることが判明した。このように拡散板をいろいろな個所に貼り付け比較検討し、音響コンサルタントおよび設計者と議論を重ね、デザイン性や通路幅の確保と側壁反射のそれぞれを網羅し図-16の上部の写真に示すような傾斜壁を設置することにした。エコータイムパターンも初期に比べ変わっている事が明確に確認できた(図-17)。



左：○部に拡散取り付け、右：拡散なし

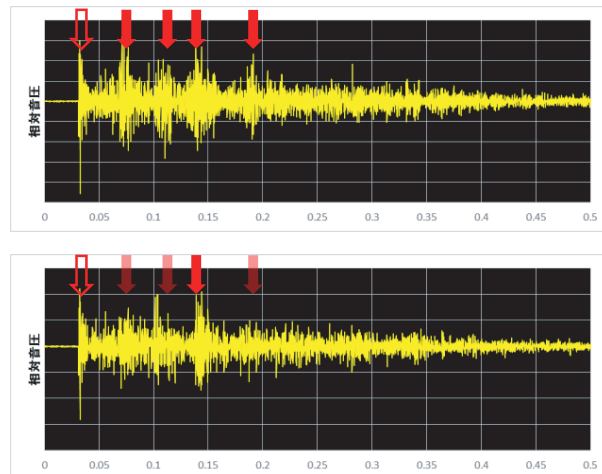


図-15 P20における拡散なしとありの2kHzエコータイムパターン結果(上：拡散なし、下：壁に拡散あり)

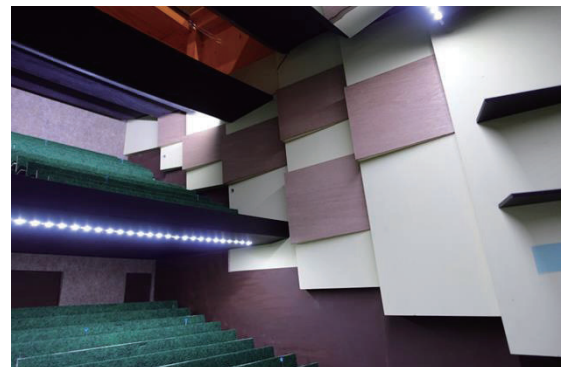


図-16 最終的に採用された側壁形状(木部)

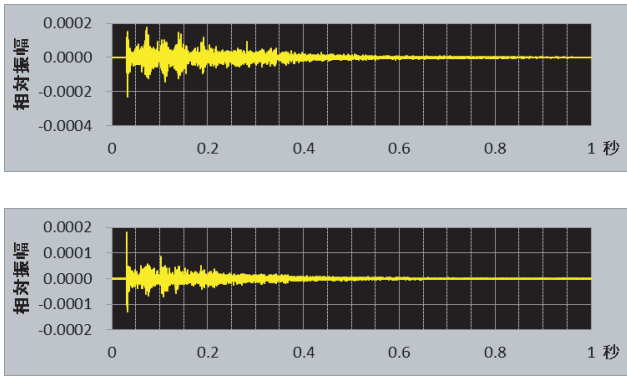


図-17 P20 における傾斜壁なしとありの 2kHz エコータイムパターン結果（上：傾斜壁なし，下：傾斜壁あり）

3. 竣工測定結果（模型実験との比較）

3.1 残響時間の測定結果

図-18 に空席時の残響時間周波数特性の比較を示す。2000Hz 程度まで比較的良い対応であった。しかし写真（図-19 参照）で示すように空席時の客席は上部に跳ね上がっており、座面は端が見え背については座で半分隠れている。座席吸音力は模型より少ないと思われるが、測定結果に差が見られないのは、床仕上げのカーペットの影響があると考ええる。

単位：秒

周波数 (Hz)	反射板 あり		反射板 なし	
	実物	模型	実物	模型
125	2.02	1.99	1.86	1.96
250	1.80	1.80	1.16	1.50
500	1.57	1.65	1.09	1.39
1000	1.44	1.55	1.05	1.27
2000	1.43	1.37	1.06	1.15
4000	1.30	—	0.91	—

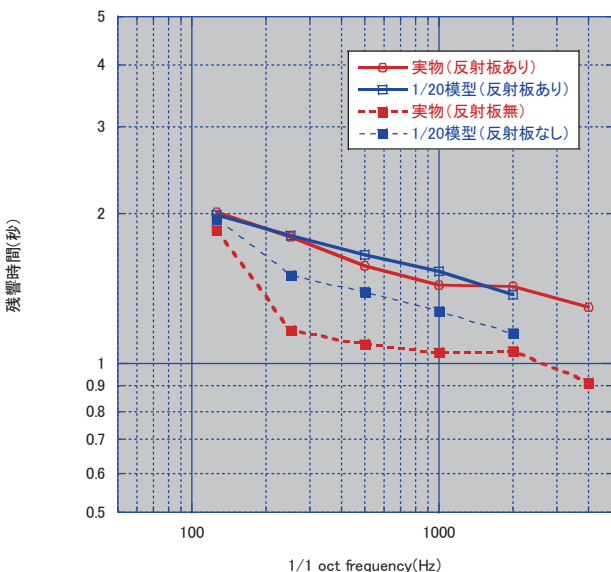


図-18 残響時間周波数特性の比較

反射板なしの場合は、実物と模型において残響時間の差が大きくなっていた。実際には5層に渡って袖幕およびホリゾン幕が配置され、ステージ上部にはぶどう棚にかけて天井反射板、側方反射板、緞帳およびバトンなど吊ものが多数配置され非常に複雑である（図-20 上参照）。模型ではステージ壁および天井の内装仕上げ材料であるグラスウールを想定したパンチカーペットを貼り付けただけであった。内装材料だけでなく複雑な吊物の形状や材質の影響で測定結果に差が生じていると考える。



図-19 竣工時の座席

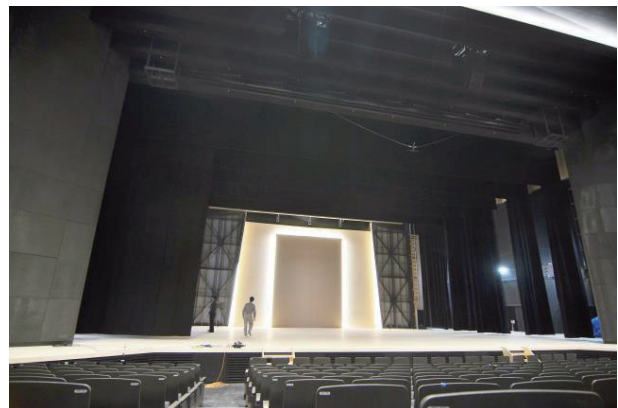


図-20 反射板なしの測定状況（上：実物，下：模型）

3.2 エコータイムパターン測定結果

図-21~22にP4(1階席)およびP22(2階席)における模型実験と実物のエコータイムパターン(500Hzおよび2000Hz)の比較を示す。図-23に完成後のホール内観を示す。模型実験で採用した傾斜壁が再現されている。

ここでは全ての測定点の結果を載せることはできないが、座席毎の反射特性の特徴は模型実験で捉えられていた。

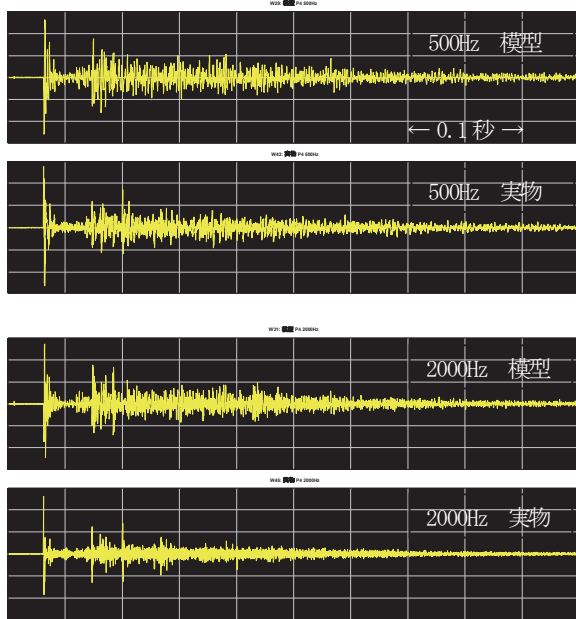


図-21 P4(1階席)のエコータイムパターンの比較

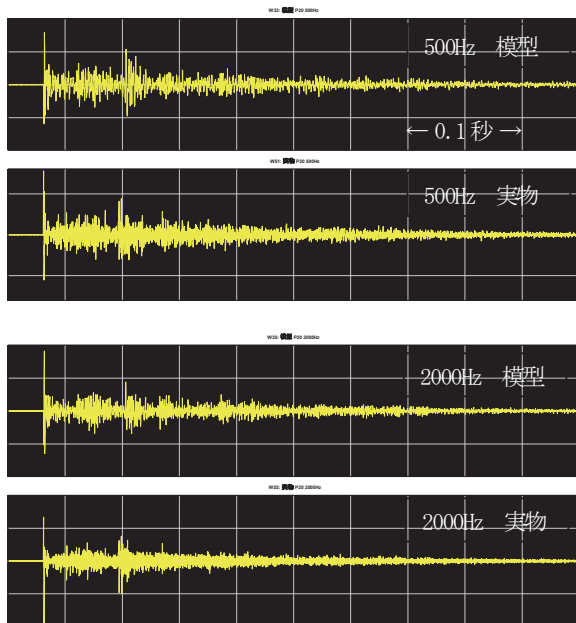


図-22 P20(2階席)のエコータイムパターンの比較



図-23 完成後のホール内観

4. まとめ

今回、残響時間とエコータイムパターンについて1/20音響模型実験と実際のホールを比較することができた。

反射板設置時の残響時間について比較的良い対応が見られた。反射板が無い状態の残響時間については、ステージ上の複雑な吊物類を模型内で再現しないと正確な数値は得られない。どの程度模擬すべきか引き続き本音響模型により今後検証する予定である。

エコータイムパターンの比較において視覚的ではあるが、模型実験は反射音構造を比較的よく捉えていた。今後C値などほかの音響指標でも比較する予定である。2階席において音響模型実験で観測されたフラッターエコーは確認できなかった。側壁形状変更の効果はあったものと考ええる。

その他今回の1/20縮尺音響模型実験について以下のメリットがあった。

①安価なハイレゾオーディオ用のスピーカーの組み合わせで音源スピーカーとして利用可能

低い周波数から高い周波数まで一つの音源スピーカーで実験が実施できた。エコータイムパターンを見ても充分仕様に耐えると考えている。

②模型製作には金型などを制作するNC旋盤を利用した。

CAD図から製作図に反映でき、曲線の加工も容易である。ただし基にしたBIMデータでは細かい凸凹が多数あるため、幾何音響シミュレーションの室形モデルを制作するときのようにシンプルな形状に修正した。どの程度簡素化すれば良いのかであるが、目標とする周波数が実スケールで2000Hzであれば、波長である約20cm以下についてはひとまず簡素化しても良いと考えれば床の蹴上程度は模擬するということになる。

③測定時間の短縮

1/20スケールであったため室素置換に有する時間が短

い。以前 1/10 スケールでの実験では約 3 時間程度室素置換に時間がかかったが、今回は酸素濃度 2%にするのに 20～30 分であった。また一度室素置換をすれば酸素濃度を維持していた。これはスケールが小さいため置換容量が少なく、シンプルなボックスカバー加工ができたことによる機密性によると考えている。

- ④室形の部分変更が容易である。1/20 縮尺であるため加工しやすい 3 mmベニヤ板で十分な反射が得られる。
- ⑤変更範囲が小さくて済むため、部分変更を行いながら実験が可能であった。

これまで音響模型実験は室形状が確定してから実施するものという認識であったが、この 1/20 スケールであれば部分変更が容易であるため、設計の初期段階から導入して音響検討が可能である。

参 考 文 献

- 1)江守他「模型実験の理論と応用」技報堂、2008
- 2)R. I. Emori and et all “Scale Model in Engineering: Fundamentals and Applications (Pergamon Press, Oxford, 1977.
- 3)村田他, 「室内音響特性測定に用いるインパルス音源について」, pp291-292, 日本音響学会講演論文集, 1976.
- 4)橘他, 「ハイブリット・シミュレーションによる室内音響の模型実験」, 43-46, 生産研究, 41 卷 2 号, 1989.
- 5)たとえば Magnat 製 MP-02 Plasma Tweeters など

Experimental Study of 1/20 Acoustic Scale Model for Concert Hall

Yasutaka UEDA, Takumi YOSHIDA, Fujio SATO, Toshihide NOMOTO and Junko OZAWA

Generally, 1/10 acoustical scale models are adopted in order to estimate the acoustic conditions of concert halls. We used a 1/20 scale model to investigate the acoustic conditions of a multipurpose concert hall. The development of high-resolution audio devices and CNC machine tools have contributed to the use of this method. Fundamental acoustic parameters were measured using the scale model. From the results of echo time patterns in the scale model, a flutter echo was observed on the second floor according to the side wall. So, the wall shape was changed.

The reverberation time with reflectors was predicted accurately using the scale model. But the reverberation time without reflectors did not match because the scale model did not reproduce the complex facilities around the stage such as stage curtains, batons, lighting equipment and reflectors.

Nonetheless, the 1/20 scale model is very compact and easy to handle in the experimental stage, so we confirmed its usefulness for investigating the acoustics of concert halls.