

コンピュータシミュレーションを用いたコンサートホールの音響特性に関する研究
 - その3 ワインヤード型コンサートホールについて -

日大生産工 塩川 博義
 日大生産工(院) 五十畑 武

1. 緒言

既報¹⁾²⁾では、コンピュータシミュレーションを用いて、ヨーロッパにおけるホール形態が異なる5つのコンサートホールの音響特性を比較検討し、その結果を報告した。今回は、ホール形態をワインヤード型コンサートホールに絞り、それらをコンピュータシミュレーション(ODEON Ver.5.02)を用いて各種音響パラメータを計算し、実測値と比較検討したのでその結果を報告する。

2. 音響パラメータおよび対象コンサートホール

2.1 音響パラメータ

本論文で用いる音響パラメータを Table1 に示す。

残響時間[RT]は、拡散音場において、音源を停止した後、定常状態の音圧レベルがある平均減衰率[dB/s]で、60[dB]減衰するのに要する時間であり、最適残響時間という形で設計指標として多く用いられる。

初期減衰時間[EDT]は、拡散音場において、音源を停止した後、定常状態の音圧レベルが平均減衰率[dB/s]で、10[dB]減衰するのに要する時間であり、主観的な残響感を反映した指標として多く用いられる。

相対音圧レベル[L]は、無指向性を持った音源からの測定点におけるインパルス応答の瞬時値と同じ音源を無響室において 10[m]隔てた位置の受信点におけるインパルス応答の瞬時値で除したものの対数値(G 値)を用いる。

明瞭度[C]は、直接音到来後 80[ms]までの反射音を対象とした初期反射音に起因する評価指標である。初期反射音は直接音を補強し明瞭度を増す効果を持つ。このC 値が大きいほど明瞭度が良いことを示す。

2.2 対象コンサートホール

シミュレーションを行うコンサートホールは、ヨーロッパのベルリン・フィルハーモニー、日本のサント

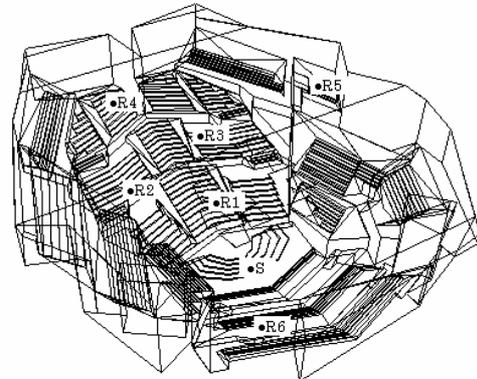


Fig.1 Computer simulation model of Berlin Philharmonie

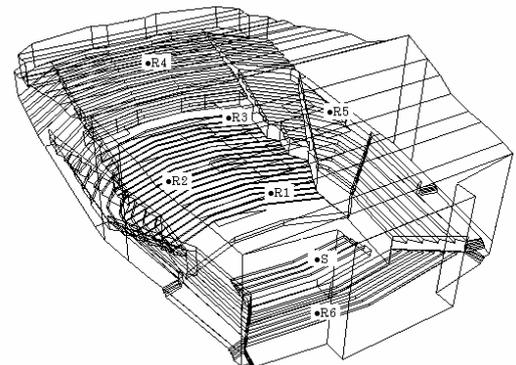


Fig.2 Computer simulation model of Suntory Hall ,Tokyo

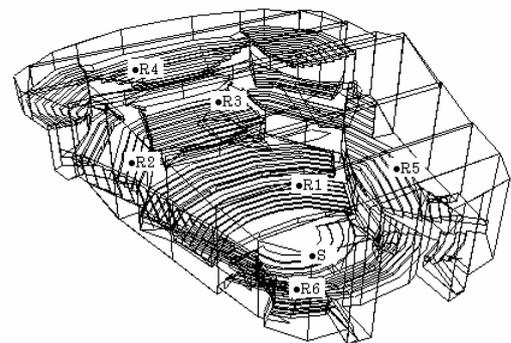


Fig.3 Computer simulation model of Kitara ,Sapporo

Table1 Room acoustical parameters

RT	Reverbration Time	残響時間
EDT	Early Decay Time	初期減衰時間
L	Level	相対音圧レベル
C	Clarity	明瞭度

Table2 Geometrical data for three rooms

	Belrin Philharmonie	Suntory Hall, Tokyo	Kitara, Sapporo
Actual Volume[m ³]	21,000	21,000	28,800
Estimate Volume[m ³]	25,453	20,723	28,526
Total surface Area[m ²]	9,957	6,114	8,645
Number of seats	2,215	2,006	2,008
Number of surfaces	1,202	528	779

リーホールおよび札幌コンサートホール Kitara の3つのワインヤード型コンサートホールである。実測値^{3) 4)}の有無によって、前者2つにおいては、残響時間[RT]、初期減衰時間[EDT]、相対音圧レベル[L]、明瞭度[C]、後者においては満席時および空席時の残響時間[RT]のみにおいて比較検討を行う。また、実測値はポイントごとの値ではなく、平均値のみであるので、シミュレーションによる計算値もポイントごとに求めて平均値を算出し、比較する。なお、本シミュレーションにおける各パラメータの算出方法は ISO 3382⁵⁾に準ずる。

3. 室計データ

作成した3つのホールのモデルを、Fig.1～Fig.3に示す。また、本シミュレーションに用いた3つのホールの室形データを Table 2 に示す。

図中のポイント S をステージ上の音源とし、R1～R6 を観客席上の受音点とする。受音点は、ステージから見て、R1 が1階席前右、R2 が1階席中央左、R3 が2階席右、R4 が後方3階席左、R5 が右方2階席中央、R6 がステージ裏2階席右に位置する。音源 S の高さは床上 1.0[m]、受音点の高さは床上 1.2[m]とする。

4. 結果および考察

各ホールの音響シミュレーションによる計算値と実測値との関係を Fig.4～Fig.7 にそれぞれ示す。

4.1 ベルリン・フィルハーモニー

残響時間[RT]の計算値は、全周波数帯域において実測値にほぼ等しい。全周波数帯域において 0.05[s]以内の誤差範囲に納まる。

初期減衰時間[EDT]の計算値は、全周波数帯域において実測値にほぼ等しい。一部を除けば、0.05[s]以内の誤差範囲に納まる。

相対音圧レベル[L]の計算値は、実測値と同じ傾向を示しているものの、全周波数帯域において、約 3.0～4.0[dB]前後下まわる。

明瞭度[C]の計算値は、125Hz 帯域を除き比較的、実測値に近い値を示す。125Hz、250Hz および 4000Hz

帯域においては約 1.0～2.0[dB]、500Hz～2000Hz 帯域においては 1.0[dB]以内の誤差範囲に納まる。

4.2 サントリーホール

残響時間[RT]の計算値は、全周波数帯域において実測値にほぼ等しい。全周波数帯域において 0.1[s]以内の誤差範囲に納まる。

初期減衰時間[EDT]の計算値は、実測値と同じ傾向を示しているものの、125Hz 帯域を除き実測値に対して約 0.3～0.6[s]下まわる。

相対音圧レベル[L]の計算値は、4000Hz 帯域を除き実測値にほぼ等しい。125Hz～2000Hz 帯域においてほぼ 1.2[dB]以内の誤差範囲に納まる。

明瞭度[C]の計算値は、全周波数帯域において実測値にほぼ等しい。全周波数帯域において 1.0[dB]以内の誤差範囲に納まる。

4.3 札幌コンサートホール

残響時間（満席時）[RT occupied]の計算値は、全周波数帯域において、実測値にほぼ等しい。全周波数帯域において 0.1[s]以内の誤差範囲に納まる。

残響時間（空席時）[RT unoccupied]の計算値は、全周波数帯域において、実測値にほぼ等しい。全周波数帯域において 0.05[s]以内の誤差範囲に納まる。

4.4 3つのホールの比較

全てのホールにおいて、残響時間および明瞭度は実測値にほぼ等しい。初期減衰時間においては、ベルリン・フィルハーモニーが実測値にほぼ等しいが、サントリーホールは大きく実測値を下まわる。相対音圧レベルにおいては、逆にベルリン・フィルハーモニーが大きく実測値を下まわり、サントリーホールは実測値にほぼ等しい。

4.5 相対誤差

ワインヤード型コンサートホールにおけるコンピュータシミュレーションの精度を検討するために、計算値と実測値との相対誤差を求める。相対誤差は、3つのコンサートホールにおける全音響パラメータの計算値を、それらの実測値と相対的に比較するために、

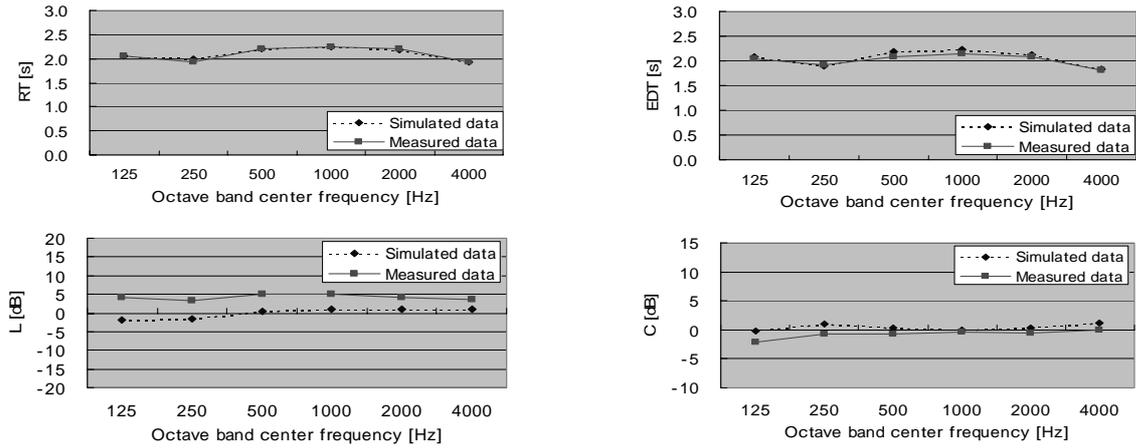


Fig.4 Acoustical Parameters of Berlin Philharmonie

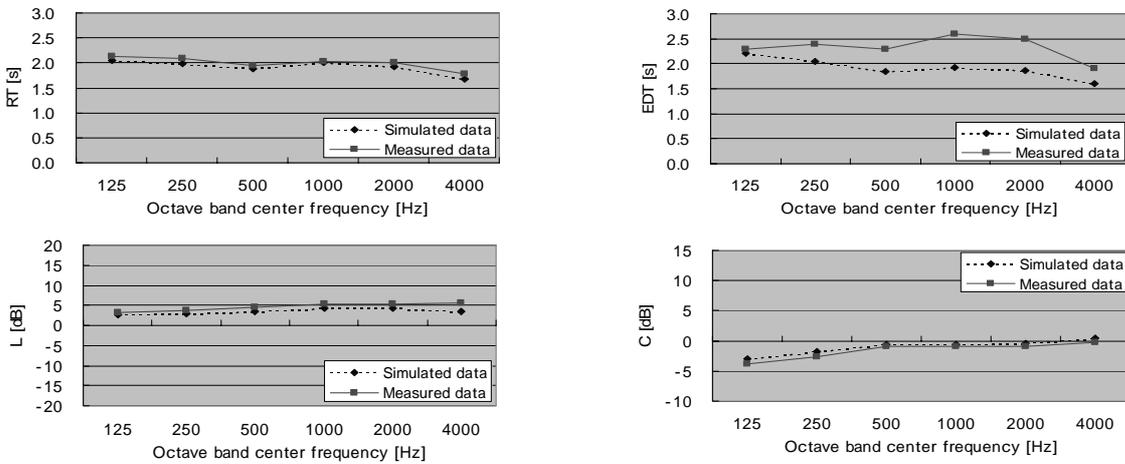


Fig.5 Acoustical Parameters of Suntory Hall, Tokyo

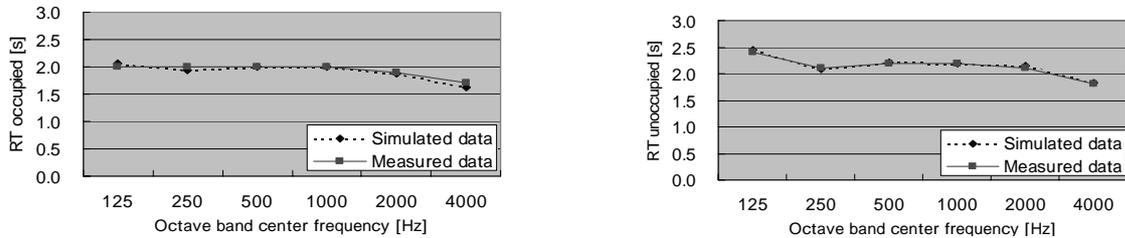


Fig.6 Acoustical Parameters of Kitara, Sapporo

各音響パラメータの許容域(Table3)を用いて、計算式(1)から求める。相対誤差は0に近いほど、実測値と計算値が近似していることを示す。

$$Error = \frac{\sum_{n=1}^{pos} \frac{|AP_{m(n)} - AP_{s(n)}|}{SL}}{N_{pos}} \quad (1)$$

Table3 Subjective limen of room acoustical parameters (SL)

Parameter	Subjective limen
RT [s]	5 [%]
EDT [s]	5 [%]
L [dB]	1 [dB]
C [dB]	1 [dB]

ここで、

- A P_{m(n)} = Measured value of the current acoustical parameter
- A P_{s(n)} = Simulated value of the current acoustical parameter
- S L = The subjective limen for the current acoustical parameter
- N_{pos} = Number of measuring positions

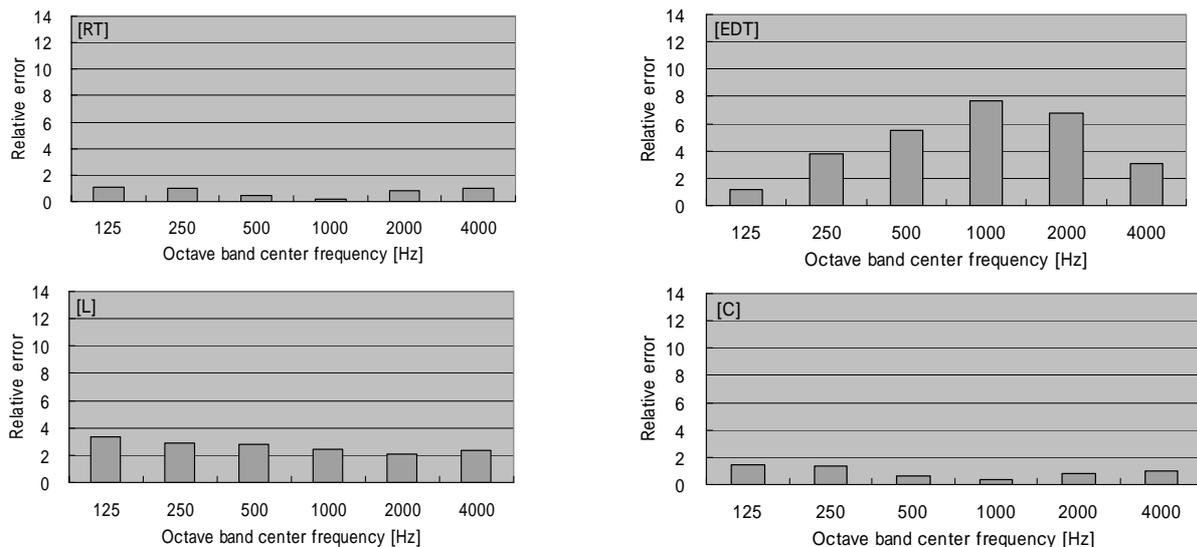


Fig.7 Relative errors for vineyard type concert halls

3つのコンサートホールから求めたワインヤード型コンサートホールにおける各音響パラメータの相対誤差を Fig.7 に示す。

残響時間[RT]の相対誤差は全周波数帯域において、ほぼ 1 以下を示し、シミュレーションの精度が高い。特に 500Hz および 1000Hz 帯域において 0.5 以下の小さい誤差を示す。

初期減衰時間[EDT]においては、125Hz 帯域を除き、3～8 前後の相対誤差を示す。サントリーホールの相対誤差が大きいため、全体のそれらも大きい。特に 500～2000Hz 帯域においては相対誤差が5を超える。

相対音圧レベル[L]においては、2～3 前後の誤差を示す。初期減衰時間[EDT]ほどではないが、ベルリン・フィルハーモニーの相対誤差が大きいため、全体の相対誤差も大きい。ベルリン・フィルハーモニーのシミュレーションモデルの体積が、実際の体積より約 4500[m³]大きいため、この体積の差を小さくしてモデルを作り直し計算すれば、相対音圧レベルの相対誤差が小さくなる可能性も考えられる。

明瞭度[C]においては、全周波数帯域において、1.5 以下の誤差を示し、シミュレーションの精度が高い。残響時間同様、500Hz および 1000Hz 帯域において 0.5 前後の小さい相対誤差を示す。

5. 結論

ワインヤード型コンサートホールにおいては、残響時間[RT]および明瞭度[C]は、高い精度でシミュレーションが可能であることを明らかにした。しかし初期減衰時間[EDT]および相対音圧レベル[L]においては、誤差が大きい結果が得られた。

今回は、残響時間は4種類のモデルを用いてシミュ

レーションの精度の検討を行ったが、他の音響パラメータは2種類とサンプル数が少なかったため、今後さらにアリーナ型コンサートホールまで枠を広げてサンプル数を増やし検討を行っていききたい。

「参考文献」

- 1) 塩川博義 板本守正 弓削正之, コンピュータシミュレーションを用いたコンサートホールの音響特性に関する研究, 日本大学生産工学部第 33 回学術講演会建築部会講演概要, (2000), pp317 - 320
- 2) 塩川博義 板本守正 弓削正之 二宮智美, コンピュータシミュレーションを用いたコンサートホールの音響特性に関する研究 - その 2 - Grosses Festspielhaus, Royal Festival Hall and Liederhalle, 日本大学生産工学部第 34 回学術講演会建築部会講演概要, (2001), pp223 - 226
- 3) Leo Beranek, Concert And Opera Halls, How They Sound, Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, (1996)
- 4) NAGATA ACOUSTICS Inc., Web page, <http://www.nagata.co.jp/index.html>
- 5) ISO 3382, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, (1997)
- 6) Jens.H.Rindel, Hiroyosi.Shiokawa, Claus.L.Christensen and A.C.Gade, Comparisons between Computer Simulations of Room Acoustical Parameters and those Measured in Concert Halls, PROCEEDINGS Joint Meeting of the Acoustical Society of America and European Acoustics Association, (1999)
- 7) M.Yuge, H.Shiokawa, J.H.Rindel, C.H.Christensen, A.C.Gade, M.Itamoto, Comparisons between Computer Simulations of Room Acoustical Parameters and those Measured in Concert Halls Part2: Goteborgs Konserthus and Barbican Concert Hall, 17th International Congress on Acoustics, (2001)