

# 立方残響箱内の音圧分布シミュレーション及び実験

藤 島 豊\*

## The sound pressure distribution simulation and the experiment in the cube reverberation box

Yutaka FUJISHIMA

### Abstract

This paper is comparing between the simulation and the experiment of the sound pressure distribution in the cube reverberation box.

Moreover, it is experimenting on the state of the change of the sound pressure distribution when putting acoustic absorption material in the reverberation box and placing the pillar of the rectangular parallelepiped, too, with the simulation.

It is using the time domain response analysis technique of the Spatial Network Method for the simulation.

It gets the result that can be satisfactory approximately in case of the comparison between the simulation and the experiment of the sound pressure distribution in the reverberation box.

### 1. ま え が き

音場空間の音圧分布特性を調べることは、建築音響分野はもとより電気音響分野においてもその重要性は増してきている。特に、音楽ホールなどの音響設計では音場予測にはシミュレーション技術は欠かせないものとしてその重要性を増してきている。音響施設の設計の多くは十分の一縮尺などの模型実験が適用されているが、相当な時間と費用を必要としており、コンピュータシミュレーションはこれ等の解決のための有力な手段となっている。しかし、これまでの解析の中心は幾何音響シミュレーションが中心で波動場の考慮は不十分であった。<sup>(1)</sup>また、数値解析手法としては、有限要素法や境界要素法も音響への適用が試みられている。時間応答解析手法としての空間回路網法の音場への適用として音場の定式化<sup>(2)</sup>とその応用例として振動板の放射インピーダンス計算<sup>(3)</sup>を

行いシミュレーションの結果と音響理論との整合性を明らかにしてきた。

本論文では音場空間のシミュレーションの有効性をより明確化するために立方体の残響箱を作成し、箱内の一平面における音圧分布を実験により調べ、同様のモデルを計算機により音圧分布シミュレーションを行いこれ等の結果を比較検討することを目的とした。

### 2. シミュレーション方法

空間回路網法及びBergeron法による音場の時間応答解析については主なものを挙げれば文献(1)～(8)に発表されている。ここでは図1に示すような立方体の残響箱をモデル化し、図中のG H I J面中央に配置した直径10cmのスピーカから発せられた音の音圧分布をA B C D面の半分C D E F面についてシミュレーションを試みた。

\* 電気電子工学科 助教授

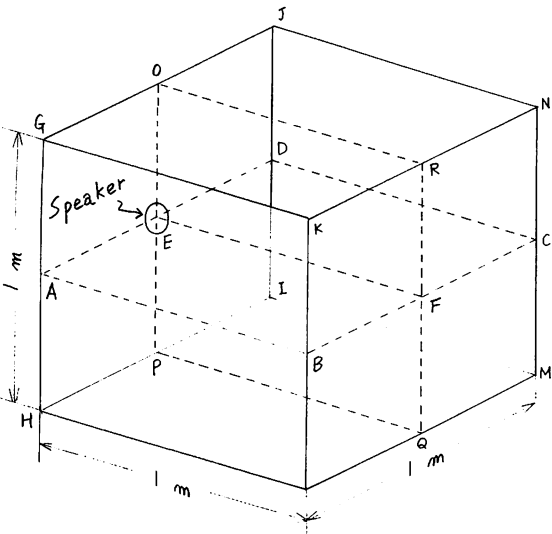


図1 残響箱モデル

実験値との整合性を高めるためにスピーカについては本シミュレーションの性格上、正方形で面積がほぼ同一になるように近似している。また、測定時間については音圧分布状態が定常状態とみなせる時間約0.5～1.0秒後に合わせてシミュレーション、実験を行っている。さらにスピーカの中心面OPQRに対して左右は対称であると仮定し図1のOPQRIJMNで囲まれたモデル全体の四分の一を解析対象範囲としている。

3. シミュレーション結果 (1)

条件

- 1) 各面は完全反射面と仮定  
(厚さ10mmアクリル板使用)
- 2) 各辺は1mでそれぞれ100分割している  
(解析対象範囲は100×50×50,  
 $\Delta d = 0.01m$ )
- 3) 音速は340m/sとする
- 4) 入力波はSin波とし、周波数は  
 $f = 588.9[Hz]$ と $f = 998.1[Hz]$
- 5) スピーカは平面矩形近似で一様の出力
- 6) 解析時間は0.5または1.0秒(実験と一致させる)

以上の条件を基本にして本節以下に示すような結果を得ている。図2は周波数 $f = 588.9[Hz]$ の音圧分布波形、図3は周波数 $f = 998.1[Hz]$ の音圧分布波形でどちらも箱内が空の完全密封状態のシミュレーション結果である。

4. 実験結果 (1)

表1に示す実験装置の規格で図1のCDEF面についてマイクロホンをスピーカ面、各壁面より若干離れた状態から2cmずつの正方格子上の各点における音圧を測定した結果が図4( $f = 588.9[Hz]$ )、図5( $f = 998.1[Hz]$ )である。

表1. 測定機器の規格表

|         |                                                                                                                                                                                          |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アンプ     | TORIO SOLID STATE STEREO AMPRIFIER MODEL TW-61                                                                                                                                           |
| 発振機     | NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO., LTD<br>LOW DISTORTION                                                                                                                                       |
| 直流電源    | KIKUSUIELECTR ELECTRONICS CORP., JAPAN                                                                                                                                                   |
| 周波数カウンタ | IWATU SC-7101                                                                                                                                                                            |
| バルボム    | KIKUSUIELECTR ELECTRONICS CORP., JAPAN MODEL 164D                                                                                                                                        |
| スピーカ    | FOSTEX株式会社<br>製造番号 FE107<br>口径 10[cm]<br>インピーダンス 8[Ω]<br>最低共振周波数 80[Hz]<br>再生周波数帯域 80[Hz] ⇔ 18[KHz]<br>出力レベル 90[dB]/W(1m)<br>入力 15[W]<br>実効半径 4.0[cm]<br>マグネット重量 101+59[g]<br>総重量 550[g] |
| マイクロホン  | SONY ECM-77S                                                                                                                                                                             |

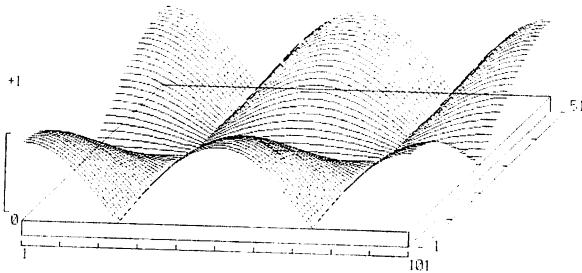


図2. 588.9[Hz]の音圧分布シミュレーション

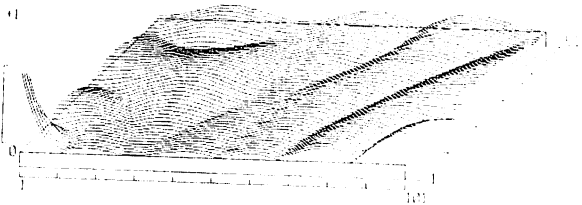


図3. 998.1[Hz]の音圧分布シミュレーション

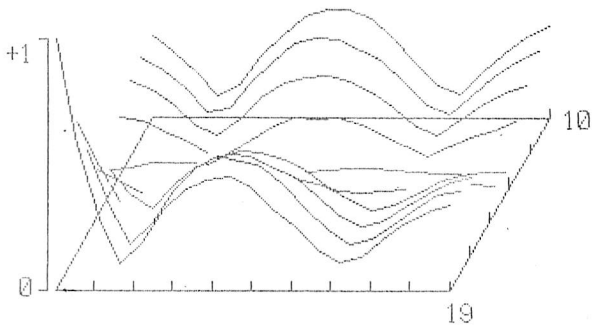


図 4. 588.9[Hz]の音圧分布実験結果

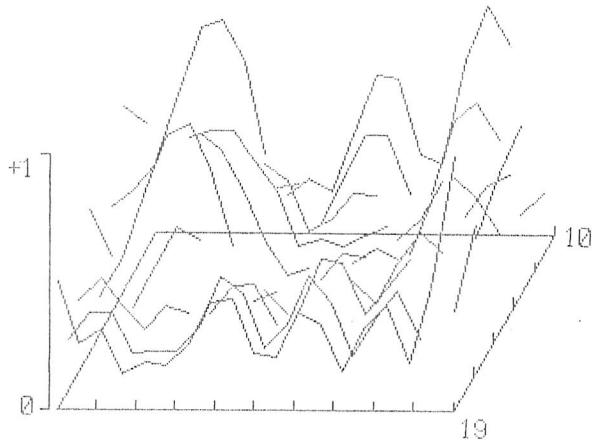


図 5. 998.1[Hz]の音圧分布実験結果

### 5. スピーカ以外の各面に一様の吸音材を貼り付けた場合

次に図 1 の残響箱モデルのスピーカ面以外の全ての面に発砲スチロール（厚さ25mm、全体の  $\alpha = 0.7$  相当）を吸音材として貼り付けた場合の音圧分布測定実験とシミュレーションを行った。このシミュレーションは吸音材料を吸音率（または反射係数）を考慮した条件としてプログラムに追加することで吸音効果が反映された結果となるか確かめることを目的としている。

### 6. シミュレーション結果 (2)

吸音材を考慮しない場合のシミュレーション結果は先に示した図 2 である。吸音材を考慮した音圧分布の変化の様子を図 6 示す。

### 7. 実験結果 (2)

吸音材を考慮した音圧分布の変化の様子を図 7 示す。吸音材の有無による音圧レベルの比較を電圧値で比較してみると最大レベルが吸音材無しの場合235[mV]、有りの場合68[mV]、最小レベ

ルは無しの場合49[mV]、有りの場合43[mV]という結果であり吸音効果が音圧低下という形で実験結果に現れていることが伺える。

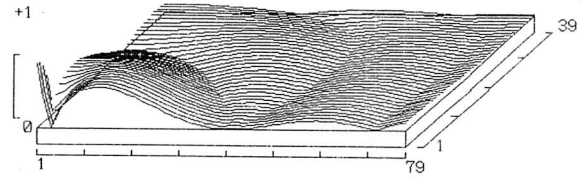


図 6. 588.9[Hz]の音圧分布シミュレーション

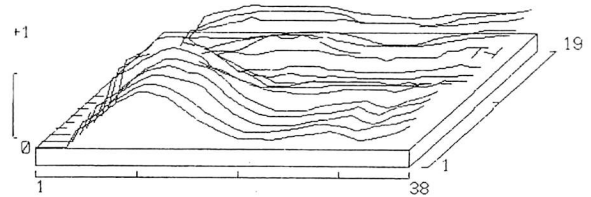


図 7. 588.9[Hz]の音圧分布実験結果

### 8. 直方柱を箱の中心部に置いた場合

続いて図 8 に示すように、図 1 の残響箱の中心に  $10 \times 10 \times 100[\text{cm}^3]$  の直方体（アクリル厚さ10[m]）を置いた場合に残響箱の内部の音圧分布がどのように変化するかをシミュレーションと実験結果とを比較する。

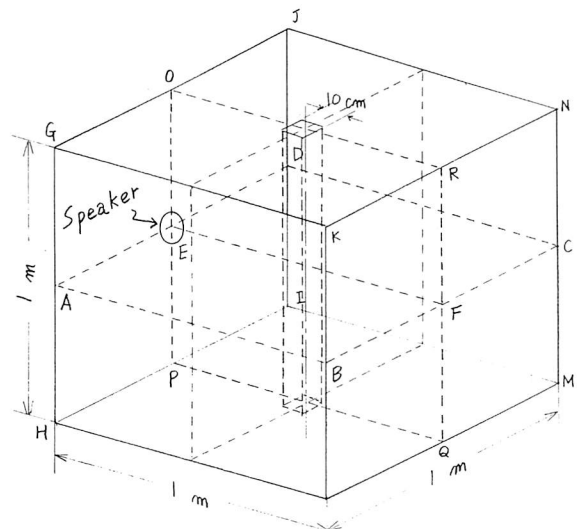


図 8. 直方柱があるモデル

### 9. シミュレーション結果 (3)

図9に周波数  $f = 558.9[\text{Hz}]$ 、図10に周波数  $f = 998.1[\text{Hz}]$  のシミュレーション結果を示す。どちらの結果も直方柱の影響が現れている様子がよくシミュレートされていることがわかる。

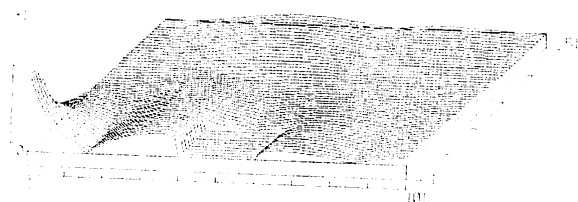


図9. 558.9[Hz]の音圧分布シミュレーション

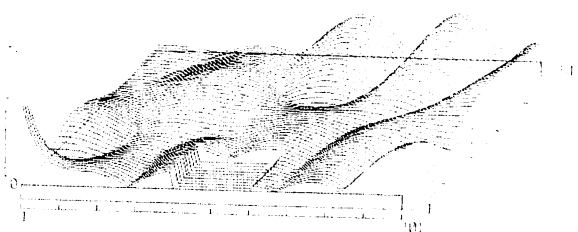


図10. 998.1[Hz]の音圧分布シミュレーション

### 10. 実験結果 (3)

実験結果の音圧分布図を周波数  $f = 558.9[\text{Hz}]$  については図11に、また周波数  $f = 998.1[\text{Hz}]$  については図12に示す。この結果についても直方柱の影響が現れている様子がはっきりとつかえる。

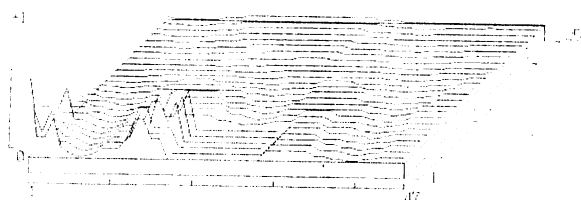


図11. 558.9[Hz]の音圧分布実験結果

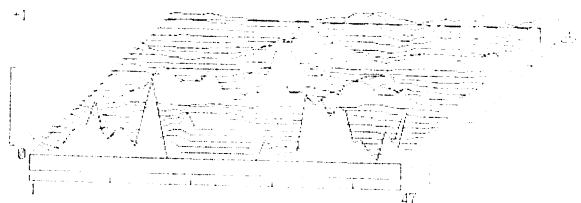


図12. 998.1[Hz]の音圧分布実験結果

### 11. 比較検討

実験結果およびシミュレーション結果のどちらも音圧をそれぞれ規格化して表示していることから、それぞれの結果図を視覚的に比較できる。

実験結果(1)については初期の実験であり、まだ実験方法が確立しておらず、マイクロホンをスピーカ面よりその対面の壁まで1 mの距離を5 cmずつ移動させて測定していることから、19点しか測定点が得られず、また図4、図5で明らかに図2、図3とは表示角度が違ふこと、さらに縦軸の高さの違いから特に998.1[Hz]では、音圧変化のシミュレーションとの相似性が一見特定できていないように見えるが、部分的に比較してみると必ずしも相似性が無いとは言い切れない。このことはこの実験方法の荒さに主な原因があったと考えられる。

次に結果(2)について考察してみると、結果(1)の実験の教訓をふまえて密閉性のより完全化をはかること、データ数を増やすためにマイクロホンの移動距離を2 cmとし、さらにマイクロホンの支柱も安定させて実験に臨んだ結果、測定の精度は格段に向上しているものの、スピーカ面および各壁面の近傍のデータは測定不可能で壁面周辺のデータ不足は否めない。しかし吸音材料を挿入した効果はシミュレーション、実験共によく現れており吸音材を考慮したシミュレーションが可能なことを示す結果を得られたことは本手法の可能性を大きく広げたものとして評価できるものである。

さらに将来的に、より現実に近いシミュレーションの第一歩として、空間に柱がある状態を想定して、比較的シミュレーションプログラムが作成しやすく、またこの大きさの残響箱での実験データも得やすい対称モデルとして箱内の中心位置に上下に隙間の無い柱を置いた場合のシミュ

レーション結果が図9、図10、その実験結果が図11、図12である。シミュレーション結果を見ると理想化したモデルにおける解析結果として、柱の影響がよくシミュレートされていることがわかるが、実験結果においては、これまた柱近傍のデータは本実験の性格上（マイクロホンはスタンドを設け、このスタンドは直径5cmの真鍮板に5mmの真鍮円柱を立て、底面より50cmの位置にマイクロホンを固定しているため）測定不可能なことから、支柱、残響箱の歪みなどからシミュレーションのような正確なデータは得られなかったものの、柱の影響による音圧の変化の様子はシミュレーションとほぼ一致していることが伺える。

## 12. あとがき

8の比較検討の結果から、残響箱内の音圧分布の把握は実験では非常に困難ではあるが、ある程度複雑な場合でもデータを得ることは可能であるが、これ等の実験結果から空間回路網法による定常状態での音圧分布の把握は、より現実的なモデルを構築することにより、計算機内に実験室モデルを想定し、あたかも計算機を実験室に見立てる数値実験が可能であることを示すことができた。

今後は、空間回路網法により、定常状態はもとより、この方法の特徴を生かして過渡状態における音の変化の様子もシミュレートでき、この方法が時間変化の様子を捉えられることからFFTを施すことにより、周波数応答解析にも有効である。よって音響問題全般に拡大できるものと思われ、定量的な解析を含めて対象を広げ発展させていけるものと思われる。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、掲載した実験データについては、本校平成5年度卒業（26期）生の石田 昌史君、平成6年度卒業（27期）生の亀田 享君、川村 利恵君、平成7年度卒業（28期）生の河合 太一君の卒業研究におけるデータの一部を採用させて頂いた。ここに深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 霜田 英麿・吉田 則信・深井 一郎：信学論（A），J 72-A, 1-11, 1989
- 2) 藤島 豊：苫小牧高専紀要、第26号、33-41、1991
- 3) 藤島 豊：苫小牧高専紀要、第29号、39-43、1994
- 4) 高木 彰・吉田 則信・深井 一郎：信学論（A）J 68-A, 688-695、1985
- 5) 藤島 豊・吉田 則信・深井 一郎：信学技法 US 87-54、1-8、1988
- 6) 霜田 英麿・吉田 則信・深井 一郎：日本音響学会、第45巻、4号、263-293 1989
- 7) 霜田 英麿・藤島 豊・吉田 則信・深井 一郎：日本シミュレーション学会、第9回計算電気・電子工学シンポジウム、179-184、1988
- 8) 藤島 豊・吉田 則信・深井 一郎：信学論（A）J 72-A, No. 5、852-854、1989

（平成12年10月24日受理）

