

Bergeron 法による中規模ホールの低音域時間応答解析

霜田 英麿 中川 清

(技術研究所)

(技術研究所)

Analysis of Time Responses of Low-Frequency Sounds in Middle Halls using Bergeron Method

by Hidemaro Shimoda and Kiyoshi Nakagawa

Abstract

Full-wave analysis is useful to investigate acoustic performances of relatively small spaces as middle halls or TV-studios. However, 3-dimensional wave analysis of hall acoustics is still in developing stages, so that the satisfied study for the practical modeling has not necessarily been carried out. The Bergeron method has a unique characteristics of modeling by the transmission-lines network, which has recently been applied to analysis of electromagnetic fields, elastic wave fields and sound fields in rooms. In this paper, the time responses of low-frequency sounds in middle-halls has been investigated using this method by a simple room acoustic model with small number of surfaces.

概 要

中規模ホール、TV スタジオなどの比較的狭い室内の音響特性を設計段階において十分に検討するには波動解析が有効である。しかしながらこれらのホール音響に対する3次元波動解析はまだ研究開発段階にあると見てよく、実用的なモデル化の検討は必ずしも十分に行われてきたとは言えない。Bergeron 法は伝送線路網によるモデル化を特徴として、近年、電磁界解析、弾性波動解析および室内音場解析などに応用されてきた。本稿では、本手法を用いて、中規模ホールに対する低音域の時間応答を、反射面の少ない単純な室内音場モデルによって検討した結果について報告する。

§ 1. はじめに

中規模ホールやスタジオなど、比較的狭い空間に対する音響設計では、音の明瞭性を阻害する低音域の音響傷害を除去することが重要である。すなわち、いわゆる「モコモコした音」と表現されるような「こもり音」や、ある特定の低音が響いて耳障りなときに表現される「プーミーな音」などをいかに排除するかに重点がおかれる。

室内音響は広い周波数帯域を対象としているため、特性を端的に知る手がかりとして、あらゆる周波数を一様に含む信号（パルス）を室内に放射して、その過渡的な反射音特性（残響特性）が調査される。この残響特性は一般に「エコータイムパタン」あるいは「室内インパルス応答」と呼ばれる特性であるが、最終的には、一定の周波数帯域毎のインパルス応答を知ることにより、残響時間や明瞭性に関する様々な音場の特徴を明らかにすることができる。従って、音響シミュレーションにおいても、このインパルス応答を予測することが重要となっているが、従来より行われてきた

幾何音響解析では、本来高音域に適する性質を有するため、これら小室の低音域特性を精度よく予測することは困難とされている。

本稿では、差分法に属する波動場解析法である Bergeron 法を適用して、ある中規模ホールの低音域におけるインパルス応答解析を試みた結果について報告する。本手法による3次元音場定式化の詳細は文献に譲るが^{1)~2)}、ここでは Bergeron 法の時間領域における波動場解析法としての特徴を再確認し、3次元解析モデルの構築手順と、それによって得られたインパルス応答解析結果について概要を述べる。

§ 2. Bergeron 法の概要

Bergeron 法は1次元分布定数線路の波動伝搬特性を利用する音場解析手法である。いま図-1に示す、無損失・無ひずみの基本1次元線路において、単位長さあたりのインダクタンスを L 、キャパシタンスを C とするとき、線路の電圧・電流特性は次の1次元波動

方程式に従う。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x,t) = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} V(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I(x,t) = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} I(x,t) \quad (2)$$

この波動方程式の一般解として D'Alembert の解を用い、進行波を関数 f 、後退波を関数 g と定義すると、電圧波・電流波の一般解はそれぞれ次式で表すことができる。

$$V(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (3)$$

$$I(x,t) = \{f(x-ct) - g(x+ct)\} / Z \quad (4)$$

ここに x は位置変数、 t は時間変数である。また c は伝搬速度、 Z は線路の特性インピーダンスであり、それぞれ線路定数により以下の関係式で定義される。

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

(3)式および(4)式を変形すると次の(7)式および(8)式を得るが、これらはそれぞれ進行波および後退波と電圧・電流の関係を表している。

$$V(x,t) + ZI(x,t) = 2f(x-ct) \quad (7)$$

$$V(x,t) - ZI(x,t) = 2g(x+ct) \quad (8)$$

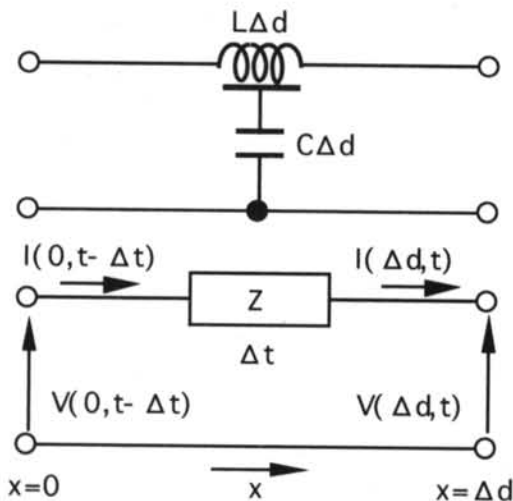


図-1 1次元基本線路

今、図-1は長さ Δd の無損失1次元線路であるから、波の進行方向を x の正方向とすると、進行波は線路入力端($x=0$)の特性がそのまま出力端($x=\Delta d$)に、また後退波は線路出力端($x=\Delta d$)の特性がそのまま入力端($x=0$)に出現することは自明である。すなわち、1次元線路の進行波および後退波の伝搬特性はその有限長線路の伝搬時間 Δt のみに依存し、以下に示す Bergeron 表示式を得る。

$$V(\Delta d,t) + ZI(\Delta d,t) = V(0,t-\Delta t) + ZI(0,t-\Delta t) \quad (9)$$

$$V(0,t) - ZI(0,t) = V(\Delta d,t-\Delta t) - ZI(\Delta d,t-\Delta t) \quad (10)$$

1次元線路の波動伝搬特性を示す特性線図を図-2に示す。この線図によって、(9)式の進行波の関係は位置 $x=0$ から位置 $x=\Delta d$ の右上がりの太線の伝搬経路で、また、(10)式の後退波の関係は位置 $x=\Delta d$ から位置 $x=0$ の右下がりの太線の伝搬経路で説明することができる。

これらの有限長線路によって、2次元波動場を正方向格子で、また3次元波動場を立方格子でそれぞれ表現すると、節点では電流連続条件（キルヒホッフ第1法則）が成立し、各節点毎に独立な方程式が導かれる。

図-3は2次元の正方格子網によるパルス発散過程の概念を示している。いま中央節点に一樣な方向に分散するパルス性の波源があるとして、離散線路の伝搬時間ごとに進行波の状態を観測すると、中央節点からそれに隣接する節点には同一時間で波動は伝搬する (Time step:1~Time step:2)。そして、それらの隣接節点においてまた同様にパルスは一樣に分散し、こ

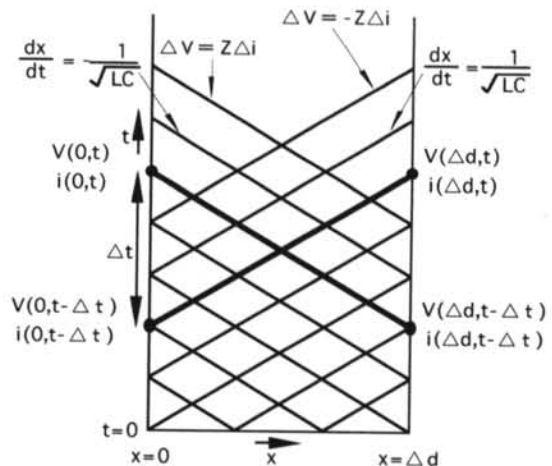


図-2 1次元線路の特性線図

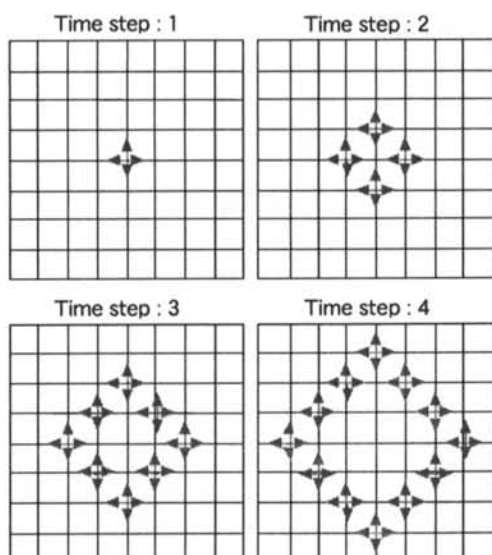


図-3 2次元回路網のパルス発散

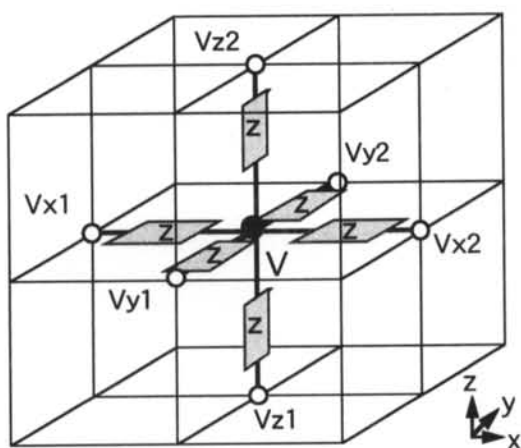


図-4 3次元内部節点モデル

れが繰り返されることによって結果的に無限遠方に波動は伝搬していく (Time step:3~Time step:4)。すなわち、この格子網は、パルスが同時刻に到達する各節点が次の新しい波源となり、それらを結ぶ包絡線によって波面が形成されるという、ホイヘンスの原理に基づく波動場を表現している。

図-4は立方格子で表わされる3次元波動場に対する等価回路の内部節点モデルを示す。すなわち、ある時刻の中央節点(●印)における電圧(V)は(11)式のように、中央節点を取りまく6つの節点(○印)における1離散時間(Δt)前の特性の平均値によって定義され、中央節点ではキルヒホッフの電流連続条件を満たす。

$$V(x, t) = \frac{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2} + V_{z1} + V_{z2}}{6} \quad (11)$$

等価回路		2次元音場	
電圧	V	音圧	P
電流	i	粒子速度	u
インダクタンス	L	媒質密度	ρ
キャパシタンス	C	音響容量	$1/3\kappa$
レジスタンス	R	音響抵抗	r
コンダクタンス	G	音響コンダクタンス	$g/3$
特性インピーダンス	Z	特性インピーダンス	$\sqrt{3\rho c}$

表-1 3次元音場と等価回路の変数対応



図-5 Eホール内観写真

ここに、 V_{x1}, V_{y1}, V_{z1} はそれぞれ(7)式の進行波特性を表し、 V_{x2}, V_{y2}, V_{z2} はそれぞれ(8)式の後退波特性を表す。

本稿における3次元室内音場モデルは、内部空間を図-4の節点モデルで表現し、境界条件となる音源、および反射面を集中定数回路による等価電源、等価抵抗でそれぞれ表現している。なお、3次元音場と等価回路の変数・定数の対応は表-1に示すとおりである。

§ 3. 中規模ホールの時間応答解析

3.1 解析モデルと解析条件

ホールは収容人員 210 名の多目的音楽ホール (以下 Eホールと呼ぶ) である。図-5の写真に示すように、基本形状は矩形で、舞台上方に反射板があり、両側の壁は対称な拡散壁となっている。また床は後方にゆるやかな段床を持ち、後壁および後部天井の一部は吸音性仕様である。

解析モデルを図-6に示す。このモデルは、中心周波数63Hz~500Hzまでの低中音域を対象とするため、側壁部の拡散形状は捨象して平面として扱い、全体で反射面数 11 面の単純形状としている。また、音源を舞台中央の前よりに設置し、この音源を含む中央鉛直面、または中央水平面において音圧のインパルス応答を観測した。解析条件を表-2に示す。

図-7はモデル中央の2次元鉛直面に対する等価回

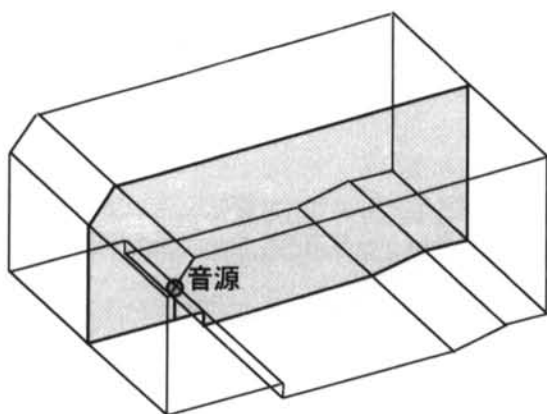


図-6 解析モデルと中央鉛直観測面

反射面数	座席	室容積	表面積	室温
11面	210席	1460m ³	840m ²	14度C

表-2 解析条件一覧表

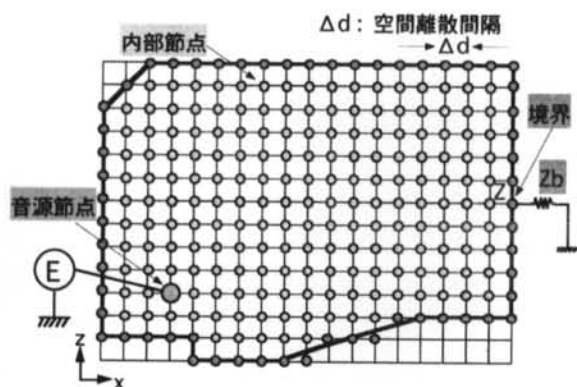


図-7 鉛直観測面の等価回路概念図

路概念図を示している。節点は、基本的には内部空間に対応する一様な伝搬系を表す内部節点と、壁面などの反射系を表す境界節点に2分されるが、音源の位置に相当する内部節点の1点は、音波を発生させる音源節点と定義している。この2次元鉛直面は、側壁を除いて同様な断面形状となっているため、図-8に示すように、この2次元等価回路を左右に展開して節点間を直交する線路で結合して内部伝搬系に対応する3次元空間モデルを構築している。従って、図-7に示す周囲の境界節点には、天井、反射板、前壁、舞台、床、後壁と一巡して、それぞれの部位毎の平均吸音率に対応する等価抵抗を結合している。また、両側の壁面に相当する平面はすべて境界節点を形成するが、各節点は壁の平均吸音率に対応する等価抵抗で終端している。各部位の平均吸音率（垂直入射吸音率：ここではほぼ

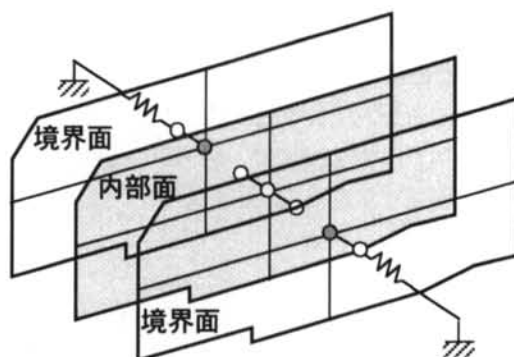


図-8 3次元モデル分解図

中心周波数 (Hz)	63	125	250	500
天井	0.10	0.10	0.15	0.15
舞台壁	0.10	0.10	0.10	0.05
側壁	0.10	0.10	0.10	0.05
後壁	0.15	0.15	0.20	0.20
床	0.05	0.05	0.15	0.25

表-3 各部位の平均吸音率

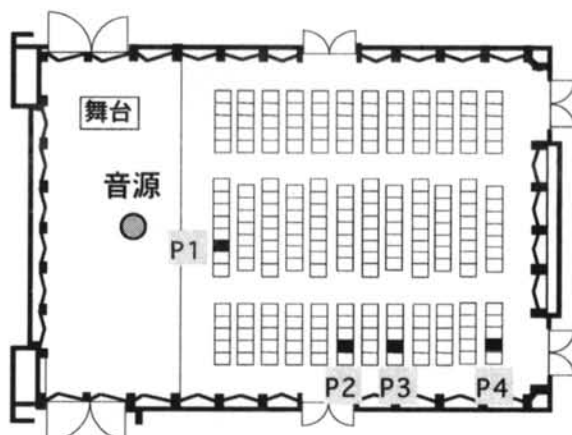


図-9 時間応答観測位置

ランダム入射吸音率に等しいものとする)を表-3に示す。

時間応答（インパルス応答）は、帯域毎のパルスを模擬するトーンバースト波（正弦波6波にハミングウィンドウを重ね合わせた波形）を用いて、初期の500msまでを観測した。なお、時間応答の観測位置は図-9に示すP1～P4の4点の座席位置である。

3.2 時間応答解析結果

トーンバースト波による音圧の時間応答解析結果を、計測値と比較して図-10 (63Hz)～図-13 (500Hz)にそれぞれ示す。ただし、図-13は測定値と、幾何音

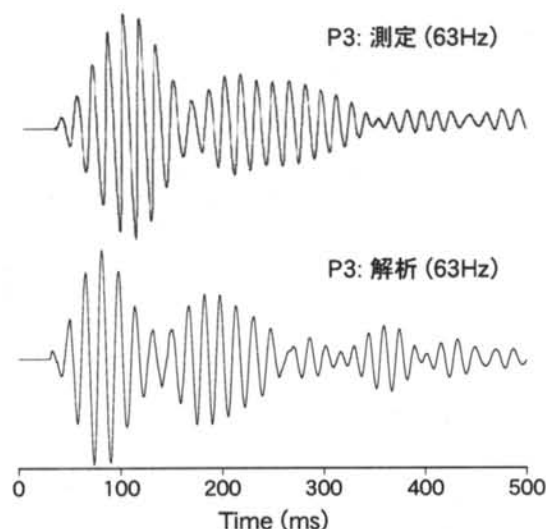


図-10 63Hz の時間応答解析結果と測定結果の比較 (P3)

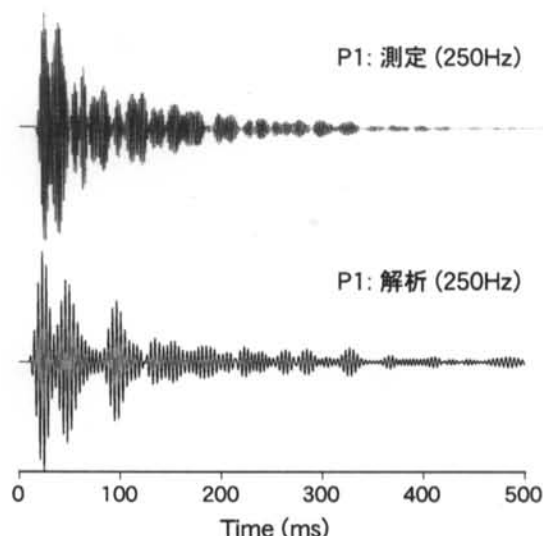


図-12 250Hz の時間応答解析結果と測定結果の比較 (P1)

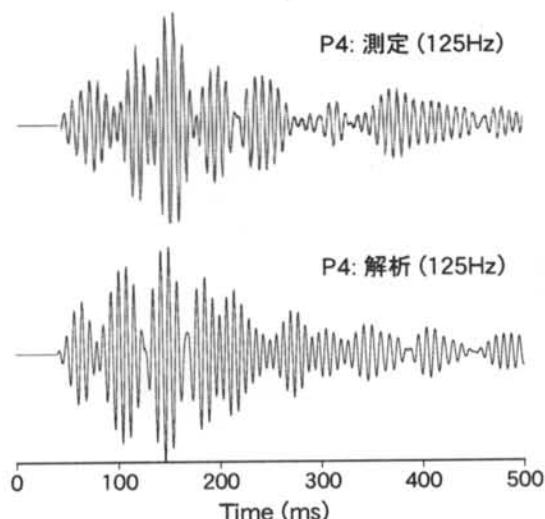


図-11 125Hz の時間応答解析結果と測定結果の比較 (P4)

響解析結果、波動音響解析結果をそれぞれ比較している。

(1) 63Hz 帯域の時間応答 (図-10)

観測点はホール後方の側壁寄りの P3 である。解析結果は 300ms 程度までの応答が比較的測定結果と類似しており、解析モデルの妥当性が示されている。また波長が長いため、応答には波動の影響が大きく現れており、解析結果、測定結果ともに、直接音と側壁による反射音が一部重なり合う様子が観測されている。

(2) 125Hz 帯域の時間応答 (図-11)

観測点は最も後方の側壁寄りの P4 である。解析結果は、ほぼ測定による応答に対応し、拡散壁形状などを含む厳密なモデルを構築しなくとも、観測位置に依存する時間応答が、比較的容易に予測できる可能性の

あることを示している。測定結果、解析結果ともに、直接音が到来した直後に、側壁と後壁による反射音の重ね合わせによって、直接音より音圧が上昇する様子が観測されている。

(3) 250Hz 帯域の時間応答 (図-12)

観測点はホール中央の最前列 P1 である。解析波形は、測定波形と同様に、初期 100ms までに大きな反射音が到来する応答の特徴を示している。一方、100ms 以降の応答は必ずしも両者の対応はとれていないが、定性的には類似の傾向を示しながら減衰していると考えられる。すなわち、観測点が前方に位置するため直接音の影響を強く受け、舞台の壁または反射板、側壁などの反射音が分離して繰り返し到来する様子が観測されている。この帯域の時間応答は、波長が短くなることによって、わずかな位相差が応答波形に大きな違いをもたらす可能性のあることを示しており、これ以上の帯域において予測精度を向上させるためには、室形はもとより、室温や、吸音率などの解析条件の的確な整合が求められるようになって考えられる。

3.3 幾何音響解析との比較

(1) 500Hz 帯域の時間応答 (図-13)

観測点はやや前方の側壁寄りの P2 である。ここでは、より波長が短くなることによって、解析結果にどのような変化をもたらすかを明らかにするために、波動音響解析結果と、幾何音響解析結果をそれぞれ測定値と比較して示す。ただし、幾何音響解析では左右の拡散壁形状も考慮した 195 面の反射面を持つモデルを用いている。また、測定結果は広帯域パルスによるインパルス応答から 500Hz 帯域を分離して求めた応答

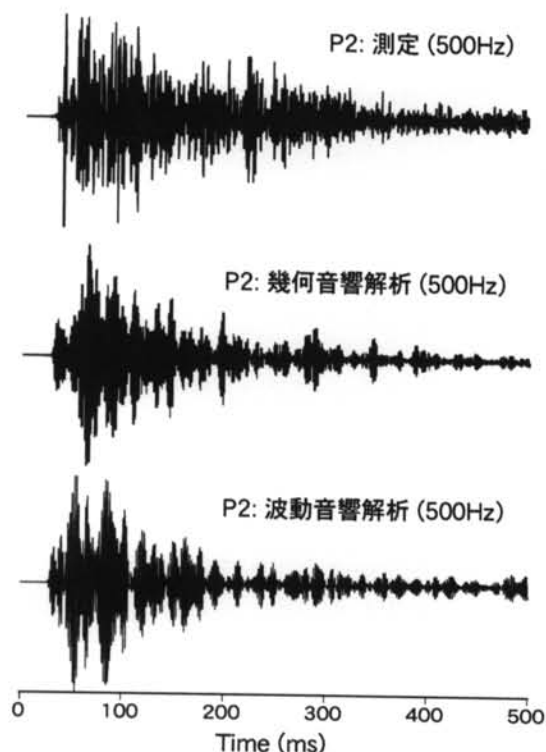


図-13 500Hz の時間応答解析結果と測定結果の比較 (P2)

波形であり、トーンバースト波による解析値との波形の厳密な比較はできない。

解析結果と測定結果を音響エネルギーに着目して比較すると、波動音響解析結果と、幾何音響解析結果はともに測定値と定性的な傾向は類似している。応答の特徴として、波長が短くなることによって音波のパルス性が強まり、あらゆる方向からの反射音が密に到来する様子が観測されている。

(2) C 値 (Clarity : 明瞭性) による評価 (図-14)

音響エネルギーによる測定値と解析値の応答の比較を、明瞭性に関わる物理量として知られる C 値によって検証する。C 値 (C80) はインパルス応答の 80ms までの初期音響エネルギーと 80ms 以降の音響エネルギーの比の対数で定義される室内音響物理指標であり、(12)式のように表される³⁾。

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} P^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} P^2(t) dt} \quad (12)$$

図-14 は、音響エネルギーによる予測値と実測値の対応を検証するために、125Hz~500Hz の各帯域

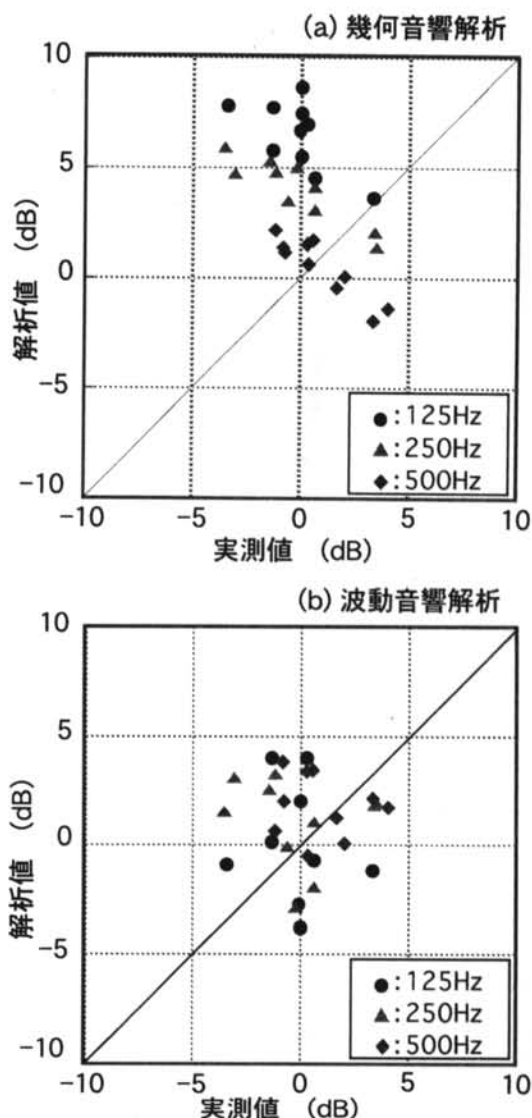


図-14 C 値の解析値と実測値の比較

について、幾何音響解析と波動音響解析による C 値の計算結果をそれぞれ散布図で示したものである。両者の対応がよいほどデータは 45 度の直線近傍に分布する傾向を示す。(a) で示す幾何音響解析結果は、低音域の 125Hz 帯域と、250Hz 帯域については、解析値が測定値を上回る偏った分布となるが、500Hz 帯域では、ほぼ直線の近傍に平均的に分布してよい対応を示す。

一方、(b) の波動音響解析結果は、125Hz 帯域~500Hz 帯域の分布に特に大きな偏りはなく、ほぼ直線の周りに一様に分布して、低音域~中音域における予測値が妥当な範囲にあることを示している。

3.4 可視化による場の応答観測

図-15 は、125Hz 帯域と 500Hz 帯域の中央鉛直面におけるトーンバースト波の瞬時音圧応答を示している。時間(ms) は音波が発生してから経過時間を表

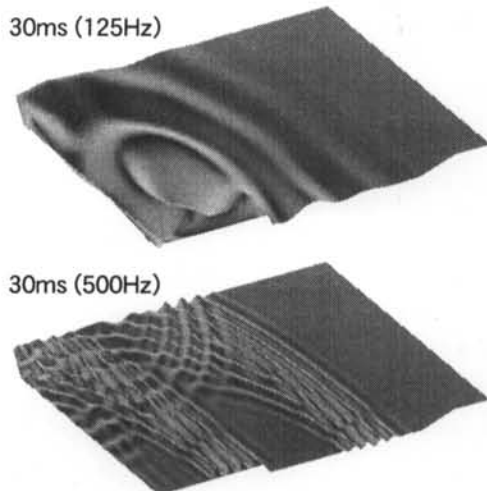


図-15 音源を含む鉛直面における瞬時音圧応答の比較 (125Hz vs. 500Hz/30ms)

している。音波伝搬をこのような波動で可視化することにより、過渡的な音波の振る舞いを詳細に観測することができる⁴⁾。

図-15の125Hzの30msにおける応答では、舞台も反射板もほとんど関係なく音波が進行する様子が観測される。一方、500Hzの30msにおける応答では、直接波の後を舞台後方から反射した波が追いかけて、舞台や舞台上方の反射板と天井からの反射音が大きな波面を形成しながらそれらに重ね合わさっていく様子が観測される。

同様に図-16は、250Hz帯域における音源を含む水平面内のトーンバースト波の瞬時音圧応答を、音波発生後20msから10ms毎に50msまで連続的に観測した結果を示している。観測面は、中央の鉛直面で2分されて左右対称となるため、ここでは上手側の1/2平面を表している。

応答は、音波発生後20msまでは同心円状の波面が確認されるが、30ms以上経過すると壁面からの反射波により干渉が起こり始め、以後、時間ステップを追うごとにその傾向は強まり、音波が徐々に拡散していく様子が観測される。時間ステップをより細かくして、これらの静止画をアニメーションにして観測すると、一連の音波伝搬性状をリアルに再現でき、より効果的であることは言うまでもない。

§ 4. おわりに

Bergeron法の波動解析の特徴を再確認するとともに、中規模音楽ホールの単純な11面モデルにより、

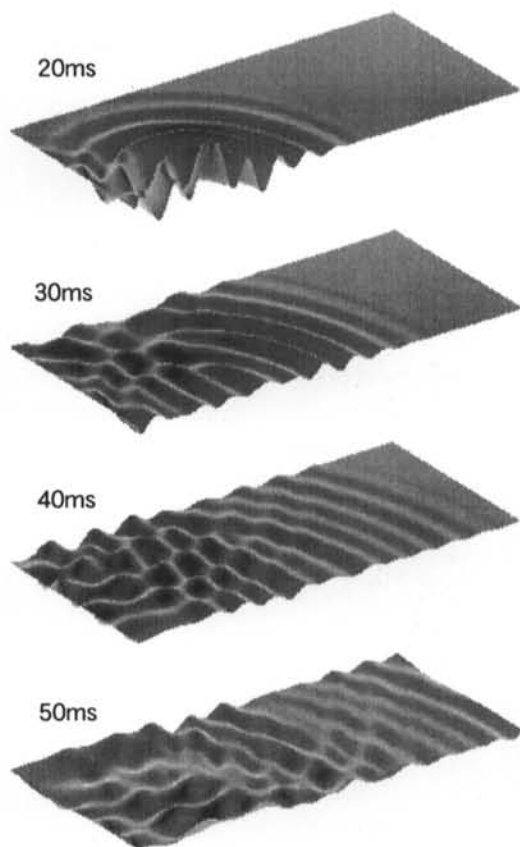


図-16 音源を含む水平面における瞬時音圧応答 (250Hz/20ms-50ms)

低音域の時間応答解析を試みた。その結果以下の知見を得た。

- (1) 200席程度の中規模ホールの低音域における波動解析モデルは、壁面を11面程度に捨象して構築しても、63Hz～125Hzの時間応答解析に有効である。
- (2) 250Hz以上の帯域においては、位相干渉も複雑になってくるため、応答波形の厳密な対応は困難となるが、500Hzの中音域までの応答解析結果から求められる音響エネルギー指標(C値)の実測値との対応はよく、これらの評価は実用的に行える。
- (3) Eホールのような中規模ホールの500Hz帯域においては、幾何音響解析結果と波動音響解析結果はともに同程度の予測精度が確保されている。
- (4) 波動の性質が顕著に現れる低音域において、場の応答解析結果を一定時刻毎に可視化して観察することは、室内における音波の伝搬性状を直感的に把握することに有効である。

なお、これらの結果も踏まえて、E ホールのような規模の音響施設については、500Hz 帯域までの低音域を波動音響解析で、また 500Hz 以上の中高音域を

幾何音響解析で予測する独自の「ハブリッド室内音響解析法」を現在提案している⁵⁾。

<参考文献>

- 1) 霜田英麿: “ベルジェロン法による室内音場解析”, 清水建設研究報告 第 48 号, pp.111-119, 1988.10
- 2) 霜田英麿: “Bergeron 法による音場解析手法について”, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA98-18, 1998.6
- 3) V.L.Jordan: “Acoustical Design of Concert Halls and Theatres”. Applied Science (1980) p.159
- 4) 宮島徹、霜田英麿、中川清: “可視化による音響伝搬性状の把握”, 信学技報 EA96-40, pp.15-22, 1996
- 5) K.Nakagawa and H. Shimoda: Hybrid analysis of sound fields in rooms using Bregeron method and the Image source method, Proc. ASVA 97, 627 632, 1997