

「ささやきの回廊」と「キャノピー空間」の Bergeron 法波動音場解析

宮島 徹 霜田 英麿
(技術研究所) (技術研究所)

A Sound Field Analysis using Bergeron Method for Whispering Gallery and Canopy Space

by Tohru Miyajima and Hidemaro Shimoda

Abstract

The Full-wave analysis using Bergeron method is applied to real architectural space. In this paper, a Whispering Gallery and Canopy Model are analyzed. The whispering Gallery is the space that the sound propagates along a curved surface. The Canopy Model is a huge space, that is, the ceiling has a number of openings. In this former analysis, the typical phenomena of whispering in the gallery are observed. And in the latter analysis, the relation between the reverberation time and opening ratio is found quantitatively. And the complicated sound propagation in rooms is observed by the still picture composed of the analytical results.

概 要

Bergeron 法による波動音場解析を建築空間に適用し音場予測を行った。適用対象は、大きな凹局面に沿って音が伝搬していく「ささやきの回廊」と多数の吊り下げ反射板を有する大空間「キャノピー空間」である。前者は本解析によってささやきの回廊現象が明確に生じていることを明らかにした。後者では、空間の残響時間と吊り下げ反射板の数と面積によって規定されるみかけの開口率の関係を見出した。また、時間応答解析手法である Bergeron 法の特徴を生かして、音場全体の瞬時音圧応答を可視化することによって、音響現象の把握が可能であることを示した。

§ 1. はじめに

大空間施設やホールなどの音場予測手法は、今日においても音線法や虚像法による幾何音響解析¹⁾が主流である。しかし低周波数帯域の解析や回折現象など音の波動現象の解析は波動解析法が適していることは言うまでもない。

本稿では、差分法に属する波動解析手法である Bergeron 法²⁾による「ささやきの回廊」と「キャノピー空間」の音場解析結果と、解析結果の可視化の有効性について報告する。

「ささやきの回廊」は大きな凹曲面に沿って、音が繰り返し反射し遠くの壁際の位置でも明瞭に聞き取れる現象であり、ロンドンの St.Paul 寺院などが有名であるが、これ迄この現象の解析は参考文献³⁾にみられる程度である。今回の解析では低周波数帯域から 8kHz までの広い周波数帯域の解析を行って、ささやきの回廊現象の発生を確認することを目的としている。

「キャノピー空間」は、視覚的な天井面あるいは音響的な反射面を形づくるための多数の吊り下げ板に

よって構成される空間である。今回の解析では幾何解析では困難な低周波数帯域の残響特性を得ることを目的としている。

「ささやきの回廊」「キャノピー空間」とも、2次元解析を行っている。これは、2次元の解析では、基本的な室形状に起因する音響現象が顕著にあらわれると考えられ、その現象の把握のためには3次元モデルでの解析より適しているからである。

さらに Bergeron 法が、音場の時間応答を直接解析する手法であることを生かし、場の瞬時音圧応答を可視化することが音響現象の把握に有効であることを示す。

§ 2. Bergeron 法の概要

Bergeron 法は差分法に属する解析法であり、1次元分布定数線路を利用したモデル化手法である。この手法は有限長線路の正方格子(2次元)または立法格子(3次元)により波動場を表現することで、各節点毎の独立な節点方程式を逐次解析できることが

大きな特徴である。

一様な特性の有限長1次元線路で表現された場において、各線路上では厳密に平面波伝搬特性を満足する。これらの線路が交差する各節点においてキルヒホフの電流連続の法則を適用すると、節点に集まった波動エネルギーは枝別れした線路に均等に発散するという特性を示し、波動場本来のホイヘンスの原理を忠実に表現できる。図-1は1次元線路で構成される3次元等価回路の内部節点モデルを示している。ある時刻の中央節点(●印)における電圧Vは(1)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離散時間前からの寄与を平均したものと定義される。

この式は、各線路を流れる電流の正の方向が直行座標系の矢印の方向に定義されるとき、中央節点では V_{x1}, V_{y1}, V_{z1} で表される進行波と、 V_{x2}, V_{y2}, V_{z2} で表される後退波の影響を受けることを意味している。

この節点方程式は節点毎に独立であるので、同一

$$V = \frac{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2} + V_{z1} + V_{z2}}{6} \quad (1)$$

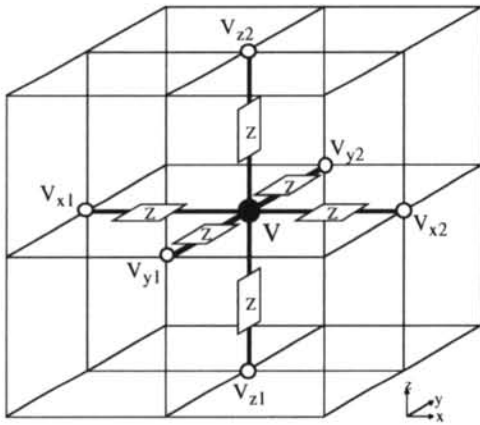


図-1 3次元節点モデル

音場		等価回路	
音圧	p	電圧	V
粒子速度	u	電流	I
特性インピーダンス	ρC	特性インピーダンス	Z

表-1 等価回路と音場の変数の対応 (1次元)

時間ステップ内では演算順序を自由に定義することが可能である。さらに単純な加減算のみにより定式化されることから、ベクトル演算化率が高くコンピュータの演算効率が高い。

1次元音場においては、1次元線路の電圧を音圧、電流を粒子速度、特性インピーダンスを媒質の特性インピーダンスに対応させることで、線路上の特性はそのまま音場の特性を表現することができる。等価回路と音場の変数の対応関係を表-1に示す。

§ 3. ささやきの回廊の音場解析

3.1 解析モデルと解析条件

図-2に解析モデルを示す。凹曲面は図中にrで示した曲率半径の異なる5つの円弧によって構成されている。このような真円形からずれた形状でささやきの回廊の現象が生じるかが今回の解析の目的である。

解析の最高周波数は8kHzまでとし、サンプリング定理⁴⁾を満足するように、空間差分 Δd は9.3mmとし

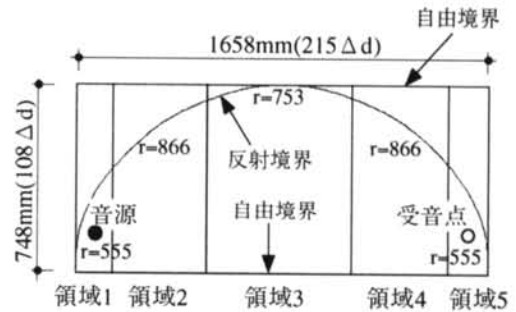


図-2 Bergeron 法解析モデル

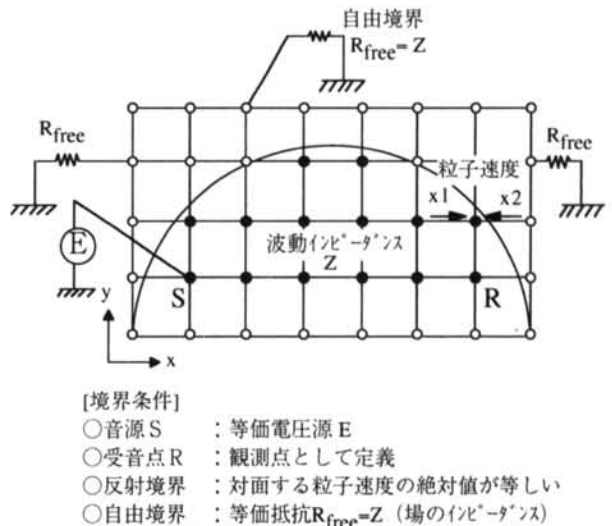
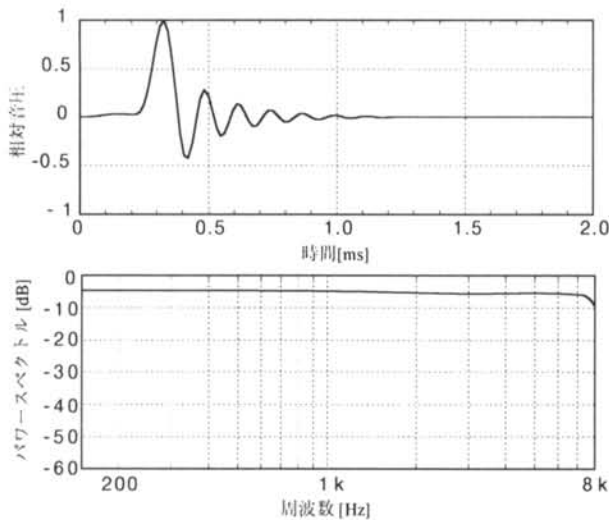
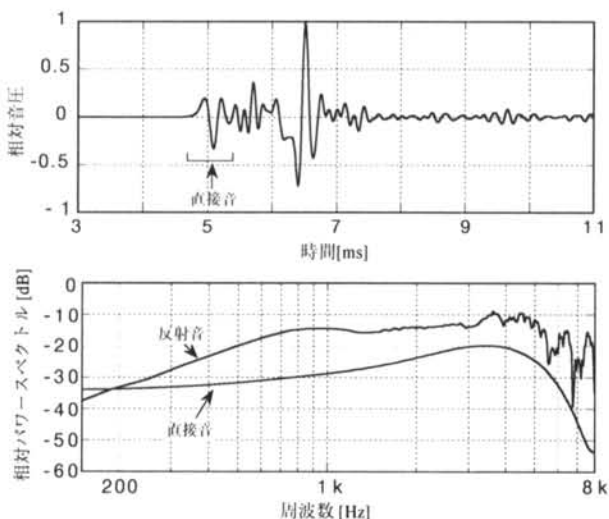


図-3 等価回路表示



(上段：時間応答、下段：周波数応答)

図-4 音源波形



(上段：時間応答、下段：周波数応答)

図-5 解析結果

た。その結果、解析空間全体は $215\Delta d \times 108\Delta d$ となる。実際の計算では各円弧の結合点により分割される領域1から領域5までの5つの矩形領域を逐次解析して、全体の応答を求めている。

音源と受音点は図-2に示すようにそれぞれ壁際の対称の位置に設定した。

図-3にBergeron法による等価回路を示す。図中に示した音源節点Sには等価電圧源Eが接続されている。また対称の節点に受音点Rを設定している。境界条件は、回廊の内面を吸音率0.01の反射境界とし、回廊の床面は吸音率0.99の吸音境界としている。

解析に用いた音源信号を図-4に示す。下段に示すように周波数特性は8kHzまで平坦である。

3.2 解析結果

図-5に解析結果を示す。上段の時間応答波形によると、直接音の到来後から約3msの間に多数の反射音が到来していることがわかる。特に直接音到来後約1.5ms付近に多数の反射音の重畳と考えられるレベルの高い応答が観測されている。

図-5下段には直接音と反射音それぞれの周波数特性を示した。この結果から、200Hz以上の周波数では、直接音に対して反射音が10~15dB高いレベルとなっており、反射音の集中により広い周波数帯域でレベルが上昇していることがわかった。

ここで、反射音によるレベル上昇の効果を(2)式によって評価した。

$E_r(t)$ は直接音のエネルギー、 $E_d(t)$ は反射音のエネルギー、 t_1 は直接音の到来時刻、 t_2 は直接音と反射音を分離する時刻である。この式は直接音を0dBとした時の反射音のレベル上昇値を表す。解析結果を

$$D_{dr} = 10 \cdot \log \frac{\int E_r(t)}{\int E_d(t)} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

(2)式に適用した結果、その値は10.01dBとなり、反射音によって直接音だけの場合と比較しおよそ10dBのレベル上昇があることが分かった。

3.3 解析結果の可視化

図-6に音場全体の瞬時音圧応答の時間変化を示す。図は音の発生後1msから6.5msまで、それぞれの時刻の瞬時音圧を表示している。これらの図から、音源の対称領域には約4.5ms後に直接音が到来し、5.5ms以降、反射音が集中して到来していることが確認できる。また、時間の経過に伴い反射音の集中した範囲が壁際を伝搬していくとともに、さらに、その範囲に反射音が加わっていき反射音群が成長していく現象が確認できた。

§4. キャンピ空間

4.1 解析モデル

キャンピ空間は図-7に示すように多数の吊り下げ反射板によって構成される空間である。今回の解析では、音の波動性が顕著である低周波数帯域に着目して、反射板より下の空間の残響時間と、反射板の大きさや枚数によって決まる開口率との関係を得ることを目的とした。

解析は幅180m、高さ45mの矩形空間を対象として

いる。音源を左右の中心線上に設定すると、反射音応答も左右対称となるため、実際の解析では図-8に示す幅90m高さ45mのモデルを用いた。天井、壁、床面の吸音率は0.3とし、反射板の吸音率は0.01に設定した。

図-9にBergeron法による等価回路を示す。解析の対象周波数は300Hzまでとし、サンプリング定理を満足するように、空間差分 Δd は0.25mとした。その結果、解析空間全体は $360\Delta d \times 180\Delta d$ となる。

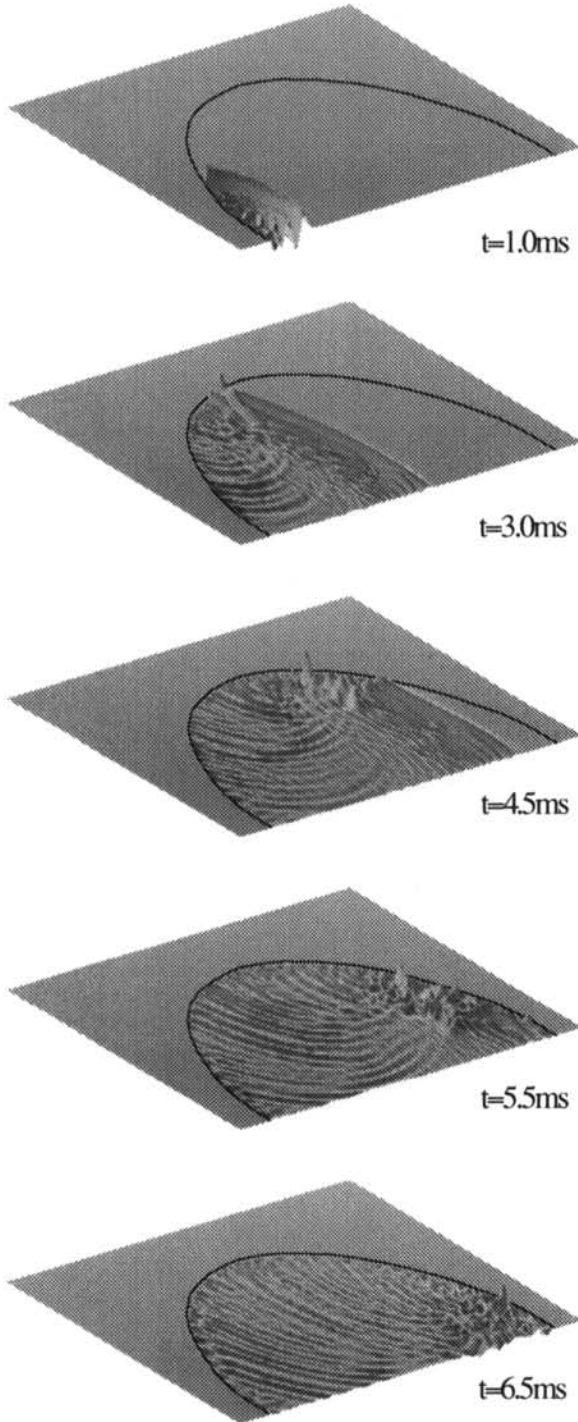


図-6 ささやきの回廊の瞬時音圧応答

図中に示した音源節点Sには等価電圧源Eが接続されている。A節点はキャノピーの表面を表わす。またB節点は対称境界上の節点を表わし、線路電流 x_1 は線路電流 x_2 と絶対値が等しく方向が逆という条件から定義される。

4.2 解析条件と解析結果の評価方法

今回は、(3)式に示す開口率R(%)をパラメータとして、音場の応答を解析した。

ここで l は反射板の長さ、 n は反射板の枚数を表す。

$$R(\%) = l \cdot n / 90 \times 100 \quad (3)$$



図-7 キャノピーモデルの例

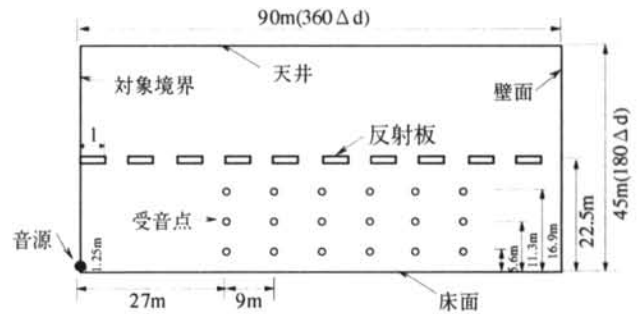


図-8 Bergeron法解析モデル概要

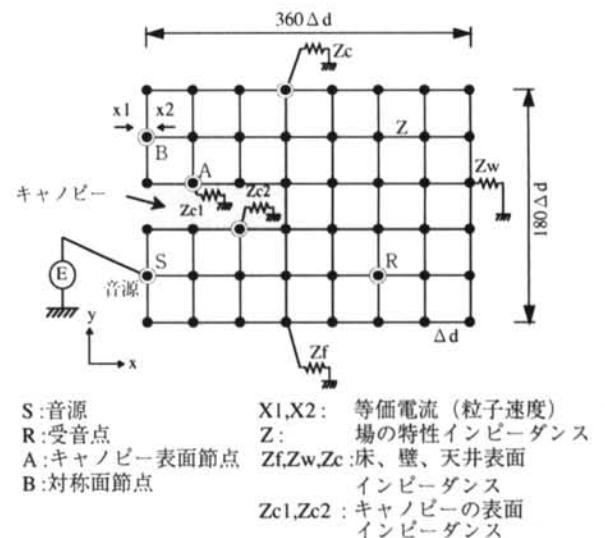


図-9 キャノピーモデルの等価回路表示

今回の解析では、反射板の数を10枚に固定し、各反射板の長さ l を変えることにより開口率を変化させた。反射板長さは最大9mであり、この長さを0.9m刻みで10段階に変化させ、開口率は0%,11.1%, 22.2%, ...,77.7%,88.8%,100%とした。

受音点は図-8に示すように、反射板より下の空間の中で、高さは5.6m、11.3m、16.9mの3段階でそれぞれ9m間隔に6点の計18点を設定した。音源信号

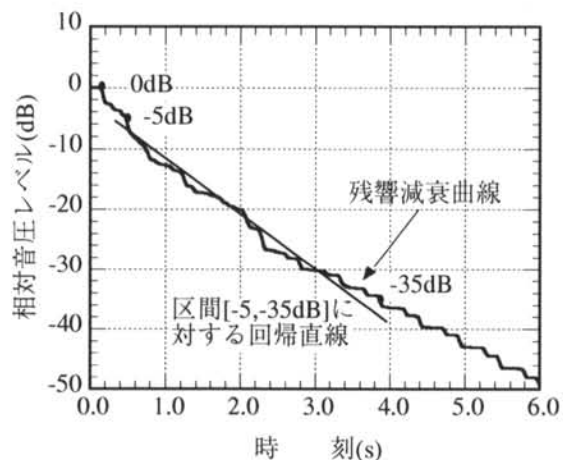


図-10 残響時間の計算方法

はサイン6波にハミング窓を掛けたトーンバースト波を用いた、解析によって得られた受音点での時間応答波形からschroederの方法によって残響減衰曲線を求め、図-10に示すように定常状態を0dBとして-5dBから-35dBの間の回帰直線の傾きから残響時間を計算した。⁶⁷⁾

4.3 解析結果

図-11に残響時間の計算結果を周波数帯域毎に示す。横軸はキャンピー面の開口率を表わし、縦軸はそれぞれの周波数帯域で開口率100%の残響時間で基準化した比率を表わしている。

これらの図から、いずれの周波数帯域においても、開口率が0%から増加するに従い、残響時間は一旦減少し、ある開口率を境にして増加に転ずることが分かった。

残響時間は拡散音場が仮定できる空間においては(4)式に示す関係がある。

$$T = \frac{0.161 V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (4)$$

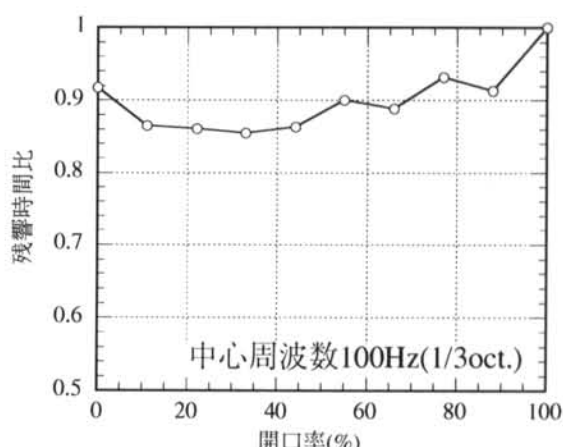
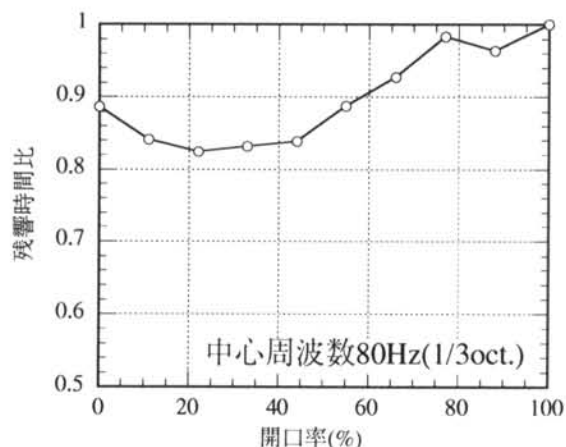
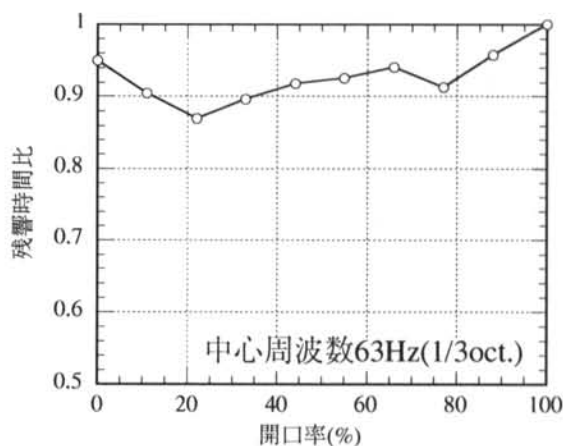
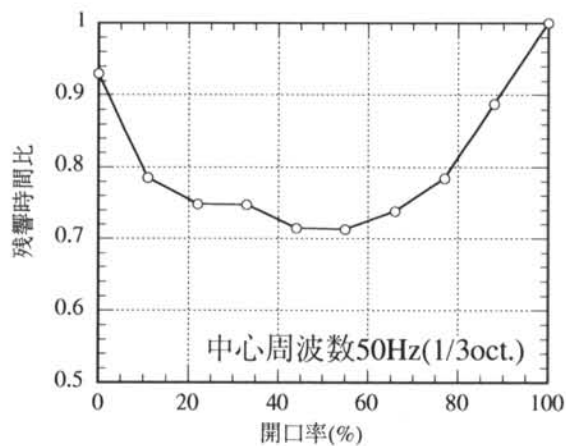
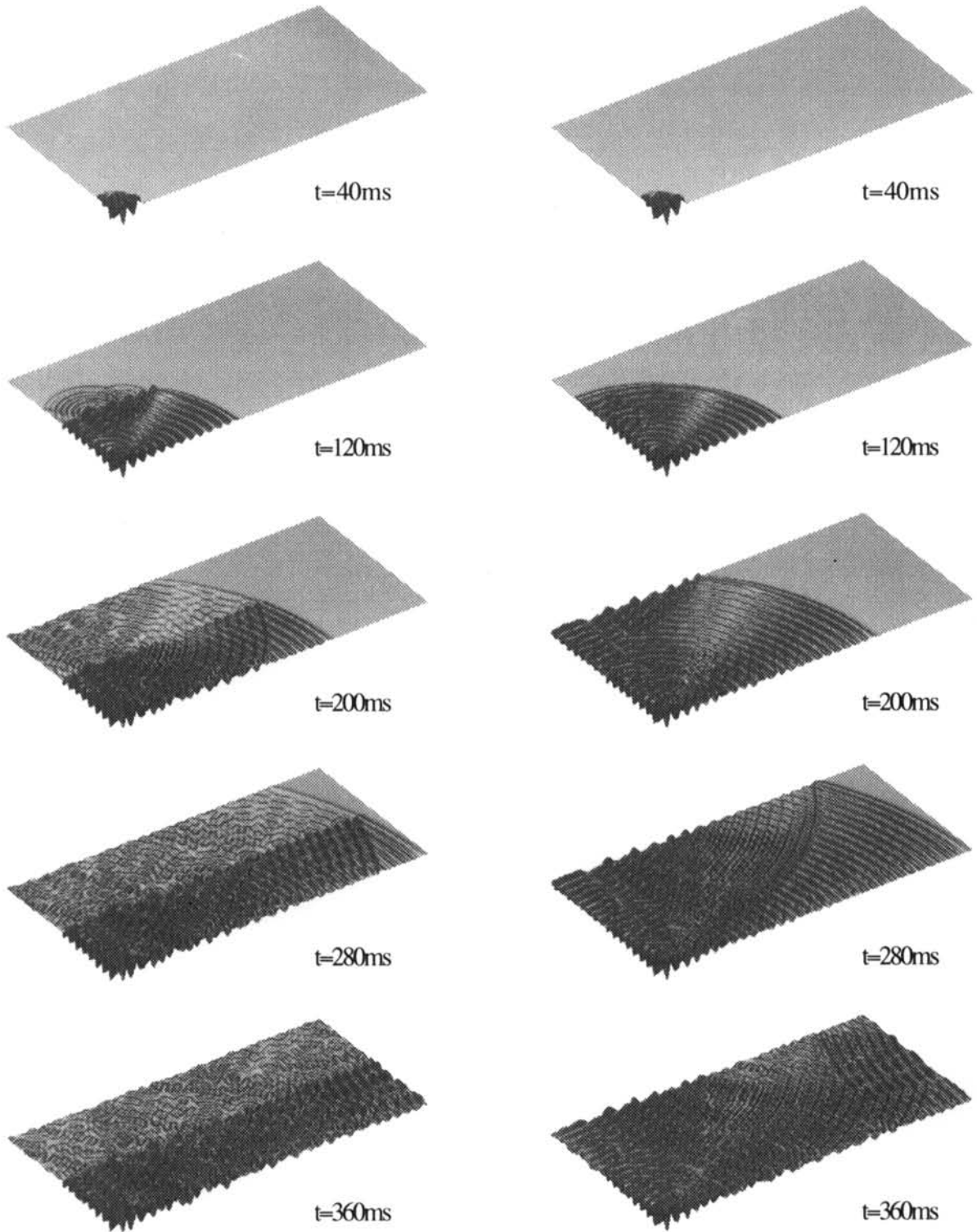


図-11 開口率と残響時間の関係

ここで T は残響時間(s)、 V は室容積(m^3)、 S は室内総表面積(m^2)、 $\bar{\alpha}$ は平均吸音率である。キャノピー空間では開口率の増減により V 、 S 、 α の実効的な値が変化し、残響時間が増減していると考えられる。

4.4 解析結果の可視化

図-12に音源を125Hzの正弦波とした時の瞬時音圧応答の時間変化を示す。左段は開口率11.1%の場合、右段は開口率88.8%の場合である。それぞれ音



左：開口率 11.1%、右：開口率 88.8%

図-12 キャノピーモデルの瞬時音圧応答（周波数 125Hz）

の発生後 $t=40\text{ms}$ から $t=360\text{ms}$ まで、 80ms 毎の瞬時音圧応答を示している。

開口率 11.1% の場合、反射板により明確な反射波が生じるとともに、開口部が2次的な音源となって球面波が生じている様子が見られる。 $t=200\text{ms}$ ですでに反射板の上部空間と下部空間のエネルギー密度の差は歴然となり、反射板によって2つの音響的に異なる空間が形成されることがわかる。

一方、開口率 88.8% では、キャノピーによる反射波が若干見られるものの、全体的には一体空間として音波が伝搬している様子が観測できる。

§ 5. おわりに

ささやきの回廊とキャノピー空間の Bergeron 法による解析について述べた。前者ではささやきの回廊の現象が明確に生じていること、回廊による効果により直接音だけの場合と比較して約 10dB のレベル上昇が生じることを示した。後者では反射板による開口率と残響時間の関係を明らかにした。また、音場全体の瞬時音圧応答を可視化することが、複雑な音響現象を把握する上で有効性の高い手法であることを示した。

今後、Bergeron 法をさらに実務へ適用していくとともに、よりプレゼンテーション効果の高い可視化手法の開発を行っていく。

<参考文献>

- 1) 例えば、前川純一：“建築・環境音響学”，共立出版，1990，p165
- 2) 霜田英磨他：“Bergeron 法による3次元室内音場の過渡応答解析”，日本音響学会誌 48 巻 7 号，1992
- 3) 佐藤泰男：“弾性波理論”，岩波書店，1978，Pp323-325
- 4) 例えば、大賀寿郎，山崎芳男，金田豊：“音響システムとデジタル処理”，電子情報通信学会，1995，p54
- 5) Von R. Thiele：“RICHTUNGSVERTEILUNG UND ZEITFOLGE DER SCHALLRUCKWURFE IN RAUMEN”，Acustica，Vol3，1953
- 6) M.R.Schroeder：“New Method of Mesuring Reverberation Time”，Journal of Acoustics Society of America，37，1965
- 7) ISO 3382-1997：“Acoustics -- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters”

