

## 時間周波数解析に基づくオーケストラ演奏中の音環境の視覚化

得能 さやか 守田 了  
山口大学 工学部

あらまし

CG で作成されたオーケストラ演奏中のホール内における音環境を音線法に基づきシミュレートする。時間周波数解析に基づき観測されたホール内の各位置における主となる周波数を光スペクトルに基づき色づけすることによって直感的にわかりやすく視覚化する。奏者の配置を考慮した演奏中の音環境を視覚化できることは、演奏者がホールと曲にあった編成や楽器配置を考えるときに有効である。またホール作成前に各編成、各楽曲に基づく音環境をシミュレートする場合に有効である。本稿では、山口大学学生会館の多目的ホールを用いて、弦楽4重奏であるパッヘルベル作曲のカノン演奏中の音環境の変化を紹介する。キーワード: 音線法, 視覚化, 弦楽四重奏, 時間周波数解析

## Visualization of sound environment on orchestra performance based on time frequency analysis

Sayaka TOKUNOU Satoru MORITA  
Faculty of Engineering Yamaguchi University

abstract

We simulate the sound environment based on the beam tracing in the virtual hall generated using computer graphics. We visualize the sound environment on orchestra performance by coloring the major frequency observed in each positions of the virtual hall. In the case of defining the orchestra formation or instrument positions, it is available that it can be visualized sound environment considered player's positions. In this report, we visualize the simulated sound environment while "Kanon" composed by Pachelbel is played by the string quartet in the virtual multipurpose hole at Yamaguchi university.

keyword: beam tracing, visualization, string quartet, time frequency analysis

# 1 はじめに

世界には大小たくさんのホールがあり、いろいろな演奏会が行われている。少しでも良い音環境のホールをつくるために、建築の分野では古くから研究が行われている。設計の段階で模型実験や数値シミュレーションが繰り返され、形状が検討される。また、既存のホールにおいて実際に音を測定することで評価を行い、次回の設計の手がかりとする。現在では、コンピュータ・シミュレーションも多く取り入れられている。仮想環境における音の伝搬を視覚化する試みが行われている[1]。ここでは音楽の音程を視覚化することを目的としていない。音環境を視覚化することによって、最適なホール形状を探し出すシミュレーションシステム[2]がある。このシステムでは、音環境を評価するさまざまなアイコンを視覚的に表現し、このアイコンを操作することによって目的とするホール形状を探し出していく。建築家がデザインを検討することを目的に音環境を視覚化し、ホールを使う奏者の立場での視覚化は目的としていない。

本研究では、演奏中の音環境を視覚化することによって建築関係者だけでなく演奏者も対象とした視覚化を行なう。視覚化の方法として、ホール内における音の分布の様子を周波数の色分けによって表現する。ステージ上の奏者の楽器位置に合わせて音源を配置し、パート毎の演奏を各音源として用いる。演奏にしたがって音環境が変化する様子を見ることができ、奏者の配置を変えることによって変化する音環境も見ることができる。音環境の視覚化を行なうにあたって、以下の条件をあげることができる。

1. ホール内のすべての位置の音を視覚化できること。
2. 音楽に合わせて音の変化を視覚化できること。
3. 既存のホールにおいて、シミュレーション可能なこと。
4. 仮想のホールにおいて、シミュレーション可能なこと。
5. ホール構造、表面材料の変更が可能なこと。
6. 実際の奏者の位置に合わせて音源を配置すること。
7. 奏者の配置や曲を変えて、シミュレーション可能なこと。
8. 視覚化された結果から、特定の目的にあったホール形状を見つけ出すこと。

ここでは、1. から7. までの条件を満足させるシミュレーションを行い、演奏中のホールの音環境を視覚化する。先に紹介したシミュレーションシステムでは、2.6.7. 以外の条件を満たしている。1. は、本研究の視覚化とは異なりホール形状や材料の変化による評価シンボルの変化を主に視覚化している。しかし、建築分野の音響シミュレーションのなかでは奏者の配置は考慮されておらず、奏者の配置を考慮した演奏中の音環境を視覚化できることは、演奏者がホールと曲にあった編成や楽器配置を考えることができる。

2節では、音線法を用いてホール各位置における演奏を合成する手順を述べ、3節では2節の方法によって合成された演奏を解析し、主な周波数を色付けする方法を述べる。4節では、実際のホールを対象として演奏中の音環境の視覚化を行い、その結果を紹介する。

## 2 音線法

ホールにおける音環境を調べるために、ホール内の各位置における演奏を合成する。音源から音の受信点までの反射伝搬経路を、音線法によって求める。音線法とは、音源点から等位立体角間隔で多数の音線を出して反射伝搬経路を追跡計算する方法である[3]。本研究では、ホール内の各位置における演奏を合成するために、受信点から音線を出し、音源までの伝搬経路を求める。図1に音線法による音の受信点と音源への反射音線図を示す。音線は時間とともに伝搬経路が延びると、音線の相互間隔が広がり音源に当たる確率は低くなる。そのため、その強さは一定の領域の中に到達する音線の数で求め

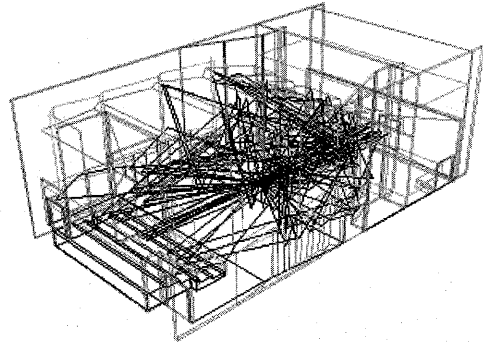


図1: 音線図

なければならない。本研究では音源を一定の半径を持った球とし、その領域に到達する音線を考える。図2(a)に示すように、球の半径  $r(m)$  は音線を出す立体角  $\theta(^{\circ})$  に対し、基準とする距離  $D(m)$  を用いて次のように決められる。

$$r = D \tan \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

図2(b)に示されるように、ある音線が音源に到達したとき、

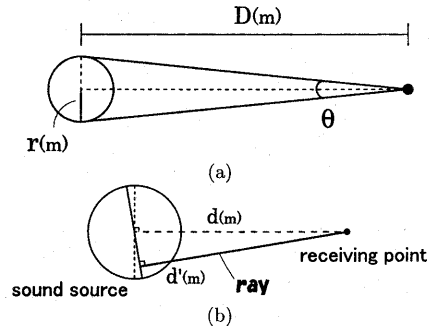


図2:

正確な受信点から音源までの距離は  $d(m)$  である。しかし、 $d$  が十分に大きいとき  $d \approx d'$  と考えることができる。受信点から音源に到達した各音線は、その伝搬距離  $d'(m)$  によって強さに重み付けがされる。重み  $w$  は、音源の半径を求めるために基準とした距離  $D(m)$  と、伝搬距離  $d'(m)$  から

$$w = \frac{d'^2}{D^2} \quad (2)$$

として求められる。

各音線の伝搬経路から、音の到達にかかる時間と距離による減衰が計算され、反射によって壁面への吸音率が求められる。音速を  $343.5(m/s)$  とすると、音の到着にかかる時間は  $\frac{d}{343.5}$  秒である。音源出力  $W(watt)$  の点音源から距離  $d(m)$  の点の音の強さ  $I(W/m^2)$  は、半径  $d(m)$  の球面の表面積  $4\pi d^2(m^2)$  を単位時間に通過するエネルギーの総和が  $W(watt)$  である

ことから,

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (3)$$

となって, 距離の2乗に反比例する [3]. ここでは音源から  $d(m)$  の距離における音の減衰率  $Dd(0 < Dd \leq 1)$  を,

$$Dd = \frac{1}{\left(\frac{d}{5} + 1\right)^2} \quad (4)$$

として計算する. また, 伝搬経路から反射する壁面が特定され, 壁面の表面材料に基づいた吸音率によって各音線の吸音によるエネルギーの減少率が計算される. 受信点から音源に到達した各音線について別々にこれらを計算し, すべての音線の演奏を足し合わせることで, 受信点での演奏を合成する.

本研究では, 音源として wavefile を用いる. wavefile のサンプリング周波数が  $F(Hz)$  のとき, 音の到着にかかる時間  $s(sec)$  分のデータ数  $n$  は

$$n = F \times s \quad (5)$$

である. 音源位置での音データを  $n$  個遅らせることによって,  $s(sec)$  遅れて到着する音を作ることができる. 各音線の伝搬距離  $d(m)$  によって音の到着にかかる時間が計算され, その時間分のデータを遅らせた音のデータを  $x_i(\tau)$ , 音源に到達した音線の数を  $m$  とすると, 受信点で合成される音のデータ  $X(\tau)$  は

$$X(\tau) = \sum_{i=1}^m x_i(\tau) \times w_i \times Dd_i \times (1 - \alpha_i) \quad (6)$$

として計算される.  $w_i$  はの伝搬距離  $d(m)$  と基準とする距離  $D(m)$  から計算される重み,  $Dd_i$  は距離による音の減衰率,  $\alpha_i$  は壁面の吸音率である.

### 3 時間周波数解析と周波数の色付け

ホールにおける音環境を視覚化するために, ホール各位置において聞こえる音の主な周波数に対し色付けを行なう. このとき, 各周波数に割り当てられる色はできるだけわかりやすく必要がある. 本研究では, 青から黄緑を経て赤へ変化する光スペクトルの変化に音の周波数を対応させる. 光スペクトルに対応させることにより直感的にわかりやすい視覚化になっている. 低周波数では青, 中間の周波数では黄緑, 高周波数では赤となる. グラデーションに使用する色はできるだけ彩度の高い色を選び, はっきりとした色の変化を作り出す.

前節で述べた方法によってホール各位置における演奏を合成する. 合成された演奏から, 各時刻における周波数の解析を行う. 周波数解析にはフーリエ変換を用いる. フーリエ変換によって最大の振幅を持つ周波数を調べる. 最大の振幅を持つ周波数を主となる周波数とみなしている. サンプリング周波数が  $F(Hz)$  のとき,  $N$  個のデータ数でフーリエ変換した場合, 音の周波数  $f(Hz)$  とフーリエ変換した時の周波数  $f_i(Hz)$  の対応は,

$$f_i = f \times \frac{N}{F} \quad (7)$$

である. 解析された周波数は, 青から赤へ段階的な色の変化によって表現される. 周波数の変化を色の変化として表現するために  $g(f)$  を定義する. 周波数  $f(Hz)$  に対して  $g(f)(0 \leq g(f) < 766)$  は,

$$g(f) = \frac{\log_2 \frac{f}{f_{base}} + 1}{\log_2 \frac{f_{max}}{f_{base}} + 1} \times 512 \quad (8)$$

とする.  $f_{max} = 3000(Hz)$ ,  $f_{base} = 55(Hz)$  である. 色付けを行う上限とした  $3000(Hz)$  は, 音の主音となる範囲を簡単にとらえ, 基準とした  $55(Hz)$  は,  $440(Hz)$  を基準の A の音 (音名イ) としたとき, その3オクターブ下の A の音である. 周波数  $f(Hz)$  に対し,  $g(f)$  を用いて 24bit カラーで色付けを行う. 赤, 緑, 青をそれぞれ  $R(g(f))(0 \leq R(g(f)) < 256)$ ,  $G(g(f))(0 \leq G(g(f)) < 256)$ ,  $B(g(f))(0 \leq B(g(f)) < 256)$  とするとそれぞれ,

$$\begin{aligned} R(g(f)) &= \begin{cases} 0, & g(f) < 255 \\ g(f) - 255, & 255 \leq g(f) < 510 \\ 255, & 510 \leq g(f) \end{cases} \\ G(g(f)) &= \begin{cases} g(f), & g(f) < 255 \\ 255, & 255 \leq g(f) < 510 \\ 765 - g(f), & 510 \leq g(f) \end{cases} \\ B(g(f)) &= \begin{cases} 255, & g(f) < 255 \\ 510 - g(f), & 255 \leq g(f) < 510 \\ 0, & 510 \leq g(f) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

となる. 演奏中のホール内の各観測点で聞こえる支配的音と関係が深い主な周波数の分布を音環境と呼ぶ. ホール各位置において各時刻毎に周波数の解析を行い, それに対応する色を割り当てることによって演奏中の音環境を視覚化する.

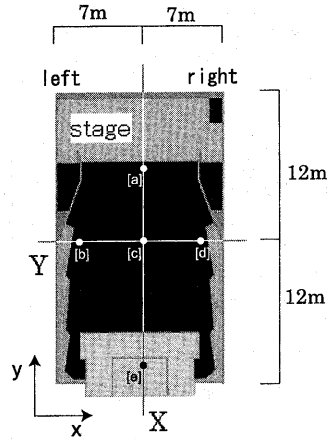


図 3: ホール平面図.

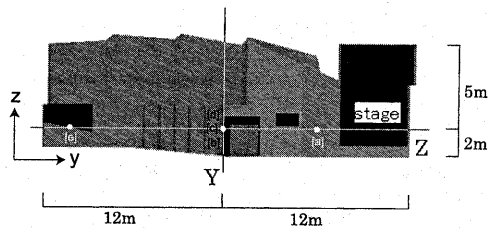


図 4: ホール立面図.

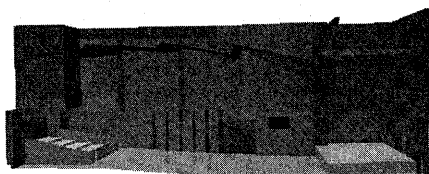


図 5: ホール透視図.

#### 4 演奏中のホールの音環境の視覚化

始めに、視覚化の流れを以下に述べる.

1. ホール内の各受信点において、音の伝搬経路を音線法を用いて求める.
2. 音の伝搬経路から、各受信点における演奏を合成する.
3. 合成された演奏を用いて、時間周波数解析をする.
4. 各時刻毎に解析された主となる周波数によって空間を色付けし、演奏中の音環境を視覚化する.

音環境の視覚化を行うホールは、山口大学学生会館内の多目的ホールとする. 図 3 図 4 図 5 はそれぞれホール平面図、立面図、透視図を示す. 使用した主な吸音率を表 1 に示す [3]. 演

	frequency (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
wall	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.08
ceiling	0.26	0.14	0.09	0.06	0.05	0.05
floor	0.09	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40
stage	0.16	0.14	0.11	0.08	0.08	0.07

表 1: 主なホール壁面の吸音率.

奏を行う奏者となる各音源は、ステージ上 1(m) の位置に図 6 のように配置した. 演奏する曲は、パッヘルベル作曲のカノン [4] である. 編成は、第 1 第 2 第 3 ヴァイオリンとチェロの 4 重奏である. 図 7 に 4 人全員が演奏に加わった 12 小節目の楽譜を示す. 演奏は 4 分音符が 1 分間に 60 個演奏できる速さで行い、音源には各楽器毎にこのテンポで演奏された wavefile を用いる.

ホール全体の音環境を調べるために、1(m) 間隔で  $x$  方向に 13,  $y$  方向に 23,  $z$  方向に 7, 計 2093 の位置において解析を行った. 音線法による音の反射伝搬経路から各受信点における演奏を合成するために、音源の大きさを決める基準距離  $D$  は、ホールの対角線の長さ ( $\sqrt{14^2 + 24^2 + 7^2(m)}$ ) とし、音線を出す等位立体角間隔は  $\theta = 1^\circ$  とした.

演奏開始から 1.0 秒ごとに 4 秒間の音環境を、図 8 から 10 に示す. 各時刻 [1] から [5] は、図 7 に示した楽譜における [1] から [5] の位置に対応する. 図 8 では図 4 における Z 断面、図 9 では図 3 における X 断面、図 10 では図 3, 4 における Y 断面の様子を示している. 時間の経過を追ってこれらの図を見たとき、どの断面を見ても [2] では低い周波数を示す青が多いことがわかる. この位置を図 7 の楽譜で確認すると、全パ-

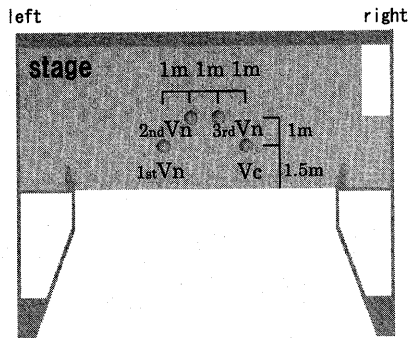


図 6: 奏者の配置.

図 7: 楽譜

トが中音以下の音を出していることがわかる. また [4][5] では黄、オレンジが多く、楽譜からも第 1 第 2 ヴァイオリンが高音域を演奏していることが確認できる. 次に図 8, 10 から、ホールの右半分と左半分で色が変わっていることがわかる. ステージには、左側に高音楽器であるヴァイオリン、右側に低音楽器のチェロが配置されておりその結果このような左右の違いがでている. 図 9, 10 において床面からの高さによる影響を見てみると、特に [3][4] においてヴァイオリンが高音域を演奏しているとき、天井付近に赤やオレンジが集中していることが確認できる.

図 11 は、それぞれの受信点における音環境を視覚化している. 音線法に基づいて得られた各音線の演奏を時間解析し、その入射方向を色付けしている. [a] から [e] は図 3, 4 の [a] から [e] の位置である. ホール中央である [c] を見ると、後方からもたくさんの音が到達していることがわかるが、ステージに近い [a] では前方がとても多く、[c] に比べて後方からの反射音が少ない. ホール後方の [e] では、全体的に音線の数が少ない. [b] と [e] では、壁ぎわのために到達する音線の左右のバランスが悪い.

図 12 では、図 4 における Z 断面と Y 断面が交差する 1 列において、時間変化によって音環境が変化する様子を 1 枚の図として表している. 図は上から下に向かって 0.25 秒毎に 0 秒から 8 秒までの時間変化を表している. この図でも [2] から [3] では低い周波数を示す青が、[4] から [5] では高い周波数を示す黄が表れている. また、[7] から [8] では濃い青が確

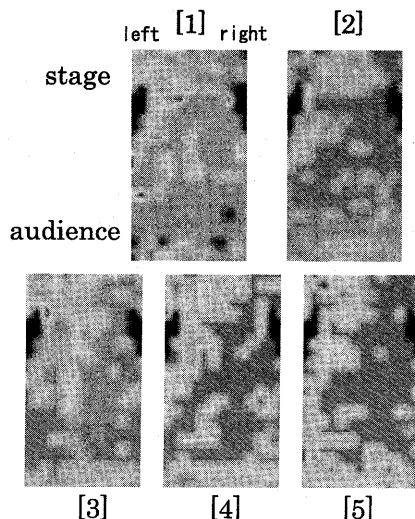


図 8: ホール平面 (Z 断面) における演奏中の音環境の変化。

認できる。

## 5 おわりに

ホール内全体を対象として、音線法を用いて演奏を合成し解析を行うことによって、以下の点が実現された。

1. ホール内のすべての位置で聞こえる音を同時に視覚化すること。
2. ホール内のすべての位置で聞こえる音を音楽に合わせて視覚化すること。
3. 演奏の流れに従って変化する音環境をみること。
4. 音の受信点において、演奏中にどの方向からどんな音が到達しているか見ること。
5. ホール構造の変化、演奏曲目の変更および楽器編成の変更に容易に対応できること。
6. 受信点において音の到来方向へ指向性を持たせることによって、実際にその位置で両耳で聞こえる演奏も合成可能であること。

これらのことから、以下の技術に役立つと考える。

1. 新しく設計されるホールにおける音環境を事前に調べること。
  2. 既存のホールにおいて、実際に演奏を行わなくても演奏者の配置、編成規模、演奏される曲の変更によるホールの音環境の違いを見ること。
  3. ホールの各位置において、音線の数及びその伝搬経路から席の序列を明確にすること。
1. は建築関係者、2. は奏者、3. はホール管理者が主に該当する。しかし、1. は音響学にとつた明確な評価値を出す必要があるだろう。周波数分布と音線法を利用した伝搬経路図だけでは、建築設計のためのデータとしては少なすぎるのが容易に想像できる。2. では、音源として使用できるのが wavefile に限定され、楽器の配置を考慮するために各パート毎のデータを用意する必要がある。また、ここで紹介された

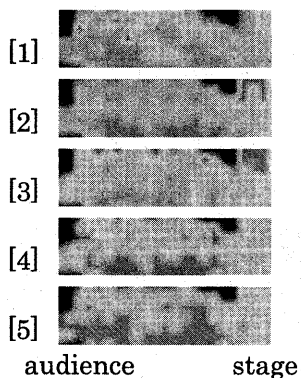


図 9: ホール立面 (X 断面) における演奏中の音環境の変化。

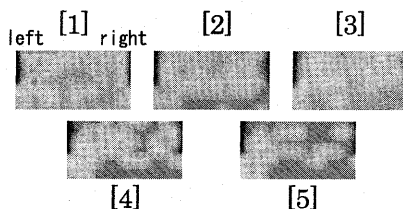


図 10: ホール立面 (Y 断面) における演奏中の音環境の変化。

視覚化のなかでは楽器特性が考慮されていない。しかし、各楽器の音の指向性のデータがあれば、それを追加した演奏を視覚化することが可能である。3. は各楽器配置を考慮した音線図を出すことができるために、演奏される曲や編成によって席の序列が少しずつ変化する場合にも対応できる。このように、広い分野に対して活用が期待できる。

## 参考文献

- [1] N. Tsingos, T. Funkhouser, A. Ngan and I. Carlbom, Modeling Acoustics In Virtual Environments Using the Uniform Theory of Diffraction, proc. of SIGGRAPH2001, pp. 545-552, 2001
- [2] M. Monks, B. M. Oh, J. Dorsey, Audiooptimization Goal-Based Acoustic Design, IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 76-91, 2000
- [3] 前川 純一, 建築・環境音響学, 共立出版, 1990
- [4] J. Pachelbel, Kanon für drei Violinen und Basso continuo oder Streichorchester, B. Schott's Söhne Mainz, 1969

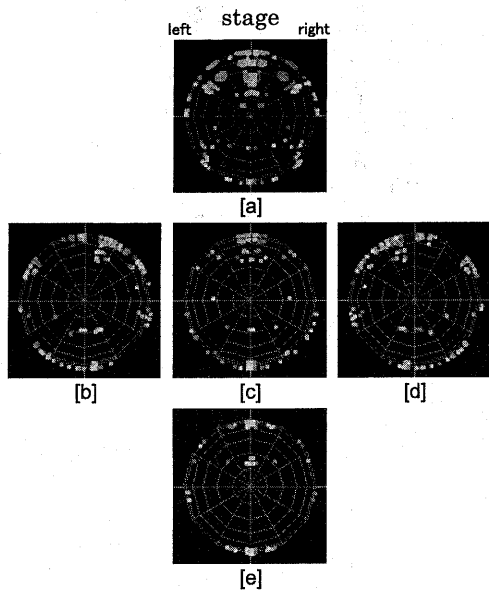


図 11: 受信点における音環境の視覚化. 球の中心が音の受信点.

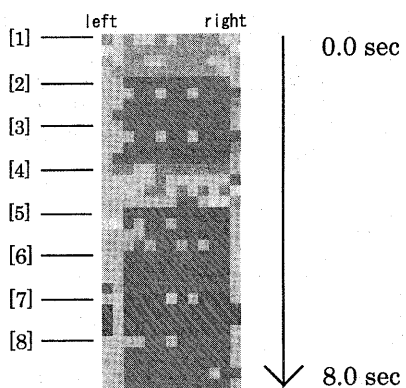


図 12: 時間変化による音環境の変化. 図の上から下に向かって, 0.25 秒毎の時間変化を表す.