## 2008年度修士論文

## 旧東京音楽学校奏楽堂における室内音響特性の分析 建築的特徴及び改修の影響について

Room acoustic analysis of the old Sogakudo, Tokyo Music School: effect of architectural factors and renovation

萬木 智子

Yurugi, Tomoko

2009年1月26日

東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻

Department of Socio-Cultural Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	5
1.3	論文構成	5
1.4	音響物理指標について	6
	1.4.1 各種音響物理指標	6
	1.4.2 各指標の推奨範囲	9
第 2 章	旧東京音楽学校奏楽堂について	11
2.1	はじめに	11
2.2	旧奏楽堂の歴史について	11
	2.2.1 旧奏楽堂の歴史	11
	2.2.2 建物について	13
	2.2.3 2 階ホール部分の改修	15
2.3	旧奏楽堂の建築的特徴	17
2.4	まとめ	23
第3章	幾何音響解析による検討	25
3.1	はじめに	25
3.2	室内音場シミュレーションについて	25
	3.2.1 室内音響設計の種類	25
	3.2.2 幾何音響解析手法について	26
3.3	検討方法	28
	3.3.1 CATT の特徴と設定	28
	Echogram calculation	29

ii 目次

			Audience area mapping	30
			Early part detailed ISM	30
			Full detailed calculation	30
		3.3.2	吸音率の設定	31
		3.3.3	乱反射率の設定	31
		3.3.4	モデリングの方針・形状について	33
		3.3.5	音源・受音点位置	33
	3.4	移築	・改修における音響特性の変化	35
		3.4.1	解析ケース	35
		3.4.2	結果と考察	36
	3.5	建築的	内特徴が音響特性に与える影響	40
		3.5.1	解析ケース	40
		3.5.2	結果と考察	40
			天井の違いによる影響	44
			舞台側壁角度による影響	46
			化粧方杖・窓の有無による影響	49
	3.6	まと	か	51
į	第4章	音響》	則定による現状の把握・分析	53
	4.1	はじ	めに	53
	4.2	測定区	内容	53
	4.3		- 結果と考察	
		4.3.1	幾何音響解析との比較	85
		4.3.2	既存のホールとの比較	100
	4.4	まと	b	101
į	第 5 章	まと	か	103
į	参考文献	‡		105
į	謝辞			109
F	関連発表	€論文		111

## 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

あらゆるコンサートホールやオペラハウスは,固有の響きを持っている.演奏会場で音楽を聴いた時の印象には,作品,指揮者,オーケストラなど多くの要因が関係するが,ホールの響きもその印象を決める大きな一因となっている.

一般的に世界最高と評価されているホールは3つある.ウィーンの楽友協会大ホール(1870年, Fig. 1.1 [1]),アムステルダムのコンセルトへボウ(1888年, Fig. 1.2 [2]),ボストンのシンフォニーホール(1900年, Fig. 1.3 [3])である.しかし,この3つのホールをはじめとした古いホールに素晴らしいと言われているものが多いのに対し,1950年以降に建設された多くのホールは月並みであったり,どうしようもないとさえ言われることがある[5].

コンサートホールの響きを決定するのは,その壁面や天井などを構成する材料や空間の大きさである.したがって,それらの諸元さえ明らかになっていれば現存する最高水準のホールの正確なレプリカを作ることは可能であり,それらの素晴らしいと言われる音響状態を正確に再現することができるだろう.しかし,世の中に求められているのは既存の素晴らしいホールのコピーではなく新しい建築作品であり,その新しいホールの音響が素晴らしいことが期待されているのである.素晴らしい音響のホールを作ろうとすると,既存の優れたホールの音響特性を目標に設計されることがあるため,その結果,既存のすぐれたホールを踏襲したデザインになってしまう可能性が少なくない.

そもそも「良いコンサートホール」とは何か.良いコンサートホールを表す表現として,静かである,明瞭である,残響時間が十分に長いなどの他に,あたたかみがある,親密感がある,音に包まれている感じがある,心地よい響きがするなど,言葉で言い表すのは困難であるが,聴感的に感じ取れるものがあり,最近ではさまざまな音響評価指標が提

2 第1章 序論



Fig. 1.1 Großer Musikvereinssaal [1].

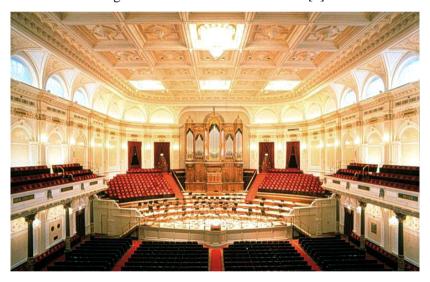


Fig. 1.2 Concertgebouw Grote Zaal [2].

案され,音響測定によってそれに対応する物理量が求められている.そしてホール音響計画の目標として,エコー障害や音像のシフト,カラレーションが起こらないこと,室全体の音場の分布が良いことや邪魔な騒音がないことなどがあげられる.しかし,音響学の分野が発展しだしたのは 1900 年に Sabine が残響理論を表してからであり,最初で述べた3つのホールは建築音響学的に検討を重ねて理論的に設計されたものではないのである.

1.1 研究背景 3



Fig. 1.3 Symphony Hall interior [3].

日本での室内音響設計の基本的な理念は,1960年頃までは残響理論とハース効果であり,残響室吸音率の測定が開始されたのが1950年代,資料がほぼ整備されたのが1960年頃だという[5].最適残響時間はホールの音響設計の中で古くから論じられ,計算され,計測されてきたが,日本で1975年以前に建てられた多目的ホールは残響時間が短く,豊かな響きを聴くには物足りなかったとされている[16].最近のコンサートホールに関する分野は,室内音場の様々な物理評価量に関する研究や,コンピュータシミュレーションに関する技術開発が盛んにおこなわれてきた[15].ホールに関する音響研究の対象としては,客席における聴取条件に主眼が置かれてきた[14]が,近年ではステージ音響に関する研究も盛んにおこなわれている.また,音楽ホールを設計する時には専門の音響コンサルタントに音響設計を依頼するのが普通になってきた.

このような流れの中で,近年ではコンサートホールの設計指針が明確化かつ画一化しつつある.そのため素晴らしいホールは多いが,個性と言えるような特徴をもつホールは近年少ない.

ここで旧東京音楽学校奏楽堂(以下,旧奏楽堂)を紹介したい. Fig. 1.4 に外観を示したこの旧奏楽堂は,東京芸術大学音楽学部の前身であった東京音楽学校の校舎施設として1890(明治23)年に建造された日本初の音楽ホールである. 1980年まで同学部内唯一の演奏会場として使用されてきており,日本の西洋音楽教育・演奏史における役割は大

4 第1章 序論



Fig. 1.4 The old Sogakudo seen from the outside[33].

きい.国の重要文化財に指定されているにもかかわらず,現役のホールであり,現在でもクラシック音楽をはじめ各種演奏会に利用されている.また,およそ120年の歴史の中で数回の改修及び移築を経ており,その過程で舞台形状や内装が変化してきた.そのため,旧奏楽堂の音響特性は,建設当初から現在までに変化してきたと考えられる.そして,この旧奏楽堂の形状は,最近の音響設計で良しとされるものと大きく異なっている.

例えば、旧奏楽堂の天井には大きなかまぼこ型のヴォールト型天井がある.しかし、一般的に音波が波長よりも大きな凹曲面で反射すると、ある場所に集中して音圧が異常に上昇するとされている.これは音の焦点(sound focus)といい、室内の音場分布を悪くする.さらに、その時他の場所では音圧の小さい場所(dead spot)を生じる恐れがあるため、大きな凹曲面を持つコンサートホールはほとんど見かけない.また、旧奏楽堂の舞台側壁は平行になっている.しかし、平行した剛壁は音波がこの平行面の間を多重反射してフラッターエコー(flutter echo)を生じることがあるため、これも避けるべきとされている.以上のような室内音響計画上はあまり良くないとされている形状をしているにもかかわらず、旧奏楽堂でかつて演奏をし、または演奏を聴いた人々によるこのホールの音響についての評判は非常に高く、現在でも利用希望者は後を絶たないという(旧奏楽堂館長、鮎川勝正氏談).

1973 年に東京芸術大学音響研究室,1975 年に NHK 総合技術研究所,1981 年に東京大学生産技術研究所がそれぞれ旧奏楽堂の音響測定をしているが[34],どれも移築前の時期であり,移築後に関しては音響測定が行われたという文献は見当たらない.また,ヴォールト型天井などの特殊な形状を音響学的視点から言及している文献はいくつかみ

1.2 研究目的 5

られる [34,36,40] が,それらは推定の域を出ないようである.

コンサートホールの設計指針が明確化かつ画一化しつつある現在において,あえてこのような形状のホールを設計することはまずないと言って良いだろう.しかし,このような建築的特徴が音響特性に及ぼしている影響を明確に位置づけることができれば,これからのコンサートホール設計にも寄与するものが大きいと考えられる.

### 1.2 研究目的

コンサートホールの設計指針が明確化かつ画一化しつつある現在において,旧奏楽堂のような特殊な建築的特徴をもつホールが,長い期間好まれて使用され続けており,また,その音響についての評判が良いということは大変興味深いと考えられる.そこで本研究では,旧奏楽堂の建築的特徴が音響特性に及ぼす影響を明確にすることで,今後の音響設計に生かす可能性に対する新たな知見を得ることを目的とする.

また,旧奏楽堂の建設当初からの音響特性の変化を歴史的変遷に伴い明らかにしていくとともに,音響測定を行うことにより,歴史的・文化的価値の高い旧奏楽堂の音響特性や特徴を明確にし,将来,施設の維持管理のために改修工事がおこなわれる可能性も考えて現在の状態を把握することを目的とする.

## 1.3 論文構成

以上を研究の目的とした本論文の構成を述べる.

第1章では研究の背景と既往研究の概説,研究目的と本論文の構成を示す.

第2章では旧奏楽堂の歴史について延べ,旧奏楽堂の価値やその特殊性を明確にする.特に,音響特性の変化があったと考えられる改修や移築について詳しく整理する.また,旧奏楽堂の建築的特徴についても述べる.

第3章ではまず室内音響設計手法の種類や特徴,位置付けを整理し,本研究で用いた手法や設定を述べる.幾何音響解析でケーススタディを行うことにより,移築・改修による音響特性の変化や建築的特徴が音響特性に及ぼす影響を考察する.移築・改修による音響特性の変化については,歴史的変遷という視点から,改修によるステージの大きさの変化や各部位の変化などが音響特性にどのような影響を与え,年代を追っていくに従って奏楽堂の音響特性がどのように変化していったかを明らかにし,文献に残っている移築前の旧奏楽堂の良い評判が,現在の旧奏楽堂でも得られうる音響となっているのかを確認する.建築的特徴が及ぼす影響については,特殊な建築的特徴の形状を変化させたり,有無を変化させることにより検討する.

6 第1章 序論

第4章では音響測定を行い、まず旧奏楽堂の現在の音響特性を把握する.音響測定の結果と第3章の幾何音響解析の結果との比較を行い、傾向が一致するかを確認する.また,各種物理量を比較することにより他の同程度の規模のホールとの相違点を明確にし、旧奏楽堂の特徴として位置づける.

第5章で本論文の総括を述べる.

### 1.4 音響物理指標について

室内音響設計を,経験だけに頼るのではなく,科学的裏付けによって進めるために室内音響指標が用いられる.室内音響指標値は音場の特性を数値で表した物理量である.一方,音を聞いた印象は心理量である.従って,物理量と心理量の対応関係が明らかになってはじめて音響指標による設計が可能になる[6].ここでは本研究に関連する音響物理指標について述べる.

#### 1.4.1 各種音響物理指標

#### 残響時間 ( $T_{30}$ , $T_{20}$ , $T_{15}$ )

室内の平均エネルギー密度が定常の値から 60dB 減衰するのに要する時間である.測定された残響減衰波形の初期レベル(定常状態のレベル)に対して, $-5 \sim -35$  dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める場合を  $T_{30}$ , $-5 \sim -25$  dB を回帰区間とした場合を  $T_{20}$ , $-5 \sim -20$  dB を回帰区間とした場合を  $T_{15}$  と呼ぶ.Fig. 1.5 に各種用途の最適残響時間(500Hz)の範囲,Fig. 1.6 に残響特性の推奨曲線を示す [4].文献 [4] によると,音楽は Fig. 1.6 内の(4),講演は同図(5)の曲線にするのが最も一般的とされ,斜線部分は多目的の場合の許容範囲とされている.また,残響時間の周波数特性は全域にわたって平坦であること,音楽の場合は低音域でやや上昇し,Fig. 1.6 の斜線の範囲にあることが好ましいとされる.周波数によって凹凸が激しいことは,特定の音色を付ける恐れがあるので好ましくない.

#### 初期残響時間 (EDT)

残響減衰波形の初期レベル(定常状態のレベル)に対して, $0\sim-10~\mathrm{dB}$  を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める残響時間を初期残響時間 (early decay time: EDT)と呼ぶ.EDT は残響時間より主観的な残響感に対応するとされている [8].残響時間よりも優れた,空間の響きの品質評価指標であると言われる場合がある.推奨値は Table 1.2 に示すとおり  $1.9\sim2.3$  秒であるが,これは椅子の布張りが平均的な仕様である

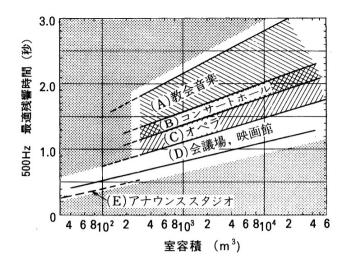


Fig. 1.5 各種用途の最適残響時間の範囲 [4]

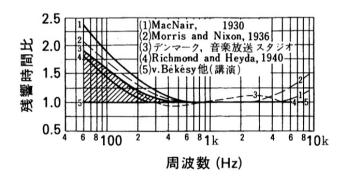


Fig. 1.6 残響特性の推奨曲線 [4]

と想定しており,革張りの椅子,あるいは布張りされていない椅子ではEDTの値は大きく異なる[5].

#### Clarity ( $C_{80}$ )

音楽に対する透明感(明瞭度)を表す指標で,次式で定義される.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80 \text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [dB]$$
 (1.1)

ここで,p:音圧,t:時間.

**8** 第 1 章 序論

#### 時間重心 ( $T_s$ )

減衰波形の評価値で,音声明瞭度とよく対応する.次式で定義される.

$$T_s = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \quad [dB]$$
 (1.2)

ここで, p:音圧, t:時間.

#### Sound Strength G

ほとんどの指標が直接音に対する反射音の相対レベルを用いて定義されている.しかし,受聴レベルが様々な心理量に影響を及ぼすため絶対レベルが見直されてきた [6].受聴レベルは音源によって変化するが,Sound Strength G は音源の出力レベルに依存しない音場の特性である.自由空間において音源から  $10\,\mathrm{m}$  の距離で測定した応答で基準化され,次式で定義される.

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\infty p_{10m}^2(t)dt} \quad [dB]$$
 (1.3)

ここで,p:音圧,t:時間, $p_{10m}(t)$ :室内測定と同一の測定系(音源出力も同じ)を用い自由空間において音源から  $10\,\mathrm{m}$  の距離で測定した応答.

#### 初期側方エネルギー率 LF

初期側方反射音を定量化する指標には LE [7] などもあったが , ISO[45] では LF ( Lateral energy Fraction ) が取り上げられている.初期反射音エネルギー全体に対する側方エネルギーの比率を示しており , 側方から到来する反射音ほど空間印象 ( spatial impression: SI ) に対する寄与が大きいという Barron の心理実験結果 [9] が根拠となっている.次式で定義される.

$$LF = \frac{\int_{5}^{80 \,\text{ms}} p_{\rm L}^{2}(t)dt}{\int_{0}^{80 \,\text{ms}} p^{2}(t)dt} \quad [dB]$$
 (1.4)

ここで,p:音圧,t:時間, $p_{\rm L}(t)$ :ゼロ感度方向を音源方向に向けた双指向性マイクロホンで測定した応答.

#### 相対音圧レベル

ある点の音圧レベルで基準化された音圧レベルのことで,音の強さに関係する.客席位置によって大きな差がない方が望ましいとされる.自由音場における音源から 10 m 離

れた点における音圧レベルで基準化すれば,ストレングスGと等しくなる.

#### 話声伝送指数 (STI)

振幅変調波を室に放射すると,測定点では残響により変調振幅が平坦化すると同時に時間遅れを生じる.この変調の度合を表すものとして変調伝達関数(modulation transfer function: MTF)があり,話声伝送指数(STI)は MTF から算出される.音声の明瞭度を表す指標で,値が高いほど明瞭となる.

#### Support ( $ST_1$ )

演奏家の発した音がどの程度自分自身に帰るかを示し、自分の音の聞き取り易さに関係する. $ST_1$ は聴衆席の音響空間としての品質には影響しない[5].次式で定義される.

$$ST_1 = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ms}}^{100 \text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{10 \text{ms}} p^2(t) dt} \quad [dB]$$
 (1.5)

ここで,p:音圧,t:時間.値が大きいほど演奏しやすいとされている.

#### 1.4.2 各指標の推奨範囲

音響物理指標とその Typical range 等との関係を Table 1.1 に ,700 席以下の室内楽ホールにおける音響物理指標の推奨値を Table 1.2 に示す . 表中の "single" は ,Table 1.1 に示した single number frequency averaging の範囲で算術平均された単一指標値を指す .

10 第1章 序論

Table 1.1 音響物理指標 ( 文献 [46] から抜粋 . Typical range は , 空席時における  $25,000~\mathrm{m}^3$  までのコンサートホール・多目的ホールにおける単一受音点での周波数平均値 .)

Acoustic	Single number	Just noticeable	Typical
quantity	freq. ave. [Hz]	difference (JND)	range
$T_{30}$ or $T_{20}$ [s]	500 to 1k	_	_
EDT [s]	500 to 1k	Rel. $5\%$	1.0; 3.0
$C_{80}$ [dB]	500 to 1k	1	-5; +5
G [dB]	500 to 1k	1	-2; +10
LF	125 to 1k	0.05	0.05; 0.35
$ST_1$ [dB]	250 to 2k	Not known	-24; -8

Table 1.2 音響物理指標の推奨値 ( 文献 [5] から抜粋 . \* は Table 1.1 と異なる条件であることを示す . )

Acoustic	Chamber music			
quantity	(less than 700 seats)			
$T_{30}$ or $T_{20}$ [s] (occupied*)	1.6; 1.8			
EDT[s]	1.9; 2.3			
$C_{80}$ [dB] (500 to 2kHz*)	-2.0; +2.0			
$G\left[dB ight]$	10; 14			
$ST_1$ [dB]	> -12			

## 第2章

## 旧東京音楽学校奏楽堂について

### 2.1 はじめに

旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)とは、明治23年2月に竣工した旧東京音楽学校の講堂のことである。この講堂の事を奏楽堂と称するのは、当時、演奏の事を「奏楽」と言い、音楽学校のコンサートホールとしての用途を意図していたからである[35].重要文化財に指定されていることから分かるように、その歴史的・文化的価値は非常に高い。しかしこの旧奏楽堂も、「2.2.1 旧奏楽堂の歴史」で触れるように、老朽化が進み使用禁止になっていた時期があり、芸大内で新奏楽堂建設の案が出された頃は、この旧奏楽堂は明治村に移転されることになっていた。しかし、卒業生らによって「奏楽堂を救う会」が結成され、現在のように上野公園内に移築再建されることになったのである。

また, Figs. 2.1, 2.2 に旧奏楽堂二階ホール部分の様子を示すが, 現在多数存在する一般のコンサートホールとは大きく異なる建築的特徴を有している. その特徴は, 前章でも紹介したようなかまぼこ型のヴォールト型天井や平行な舞台側壁に代表されるが, これらは音響的に何らかの影響を及ぼしていると考えられる.

本章では,旧奏楽堂の歴史と建築的な特徴について触れ,その歴史的・文化的価値について述べる.

## 2.2 旧奏楽堂の歴史について

#### 2.2.1 旧奏楽堂の歴史

旧奏楽堂は,明治23年5月に日本最初の洋式音楽ホールとして東京音楽学校(現在の東京芸術大学音楽学部)の本館の一部として建築された.明治初期の擬洋風の学校建築



Fig. 2.1 The old Sogakudo seen from the stage[33].

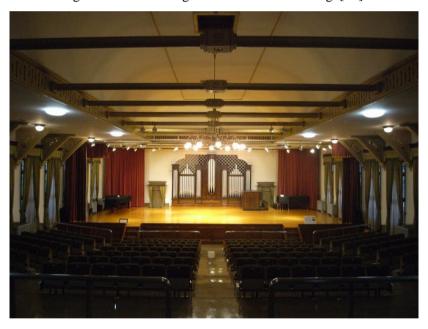


Fig. 2.2 The old Sogakudo seen from the seat.

から本格的な洋風学校建築へと変遷した当時の先駆的な一例であり [33], 木造建築の二階にホールを設置している. Fig. 2.3 は明治 30 年頃の本館外観の全景である.

設計は文部省で行われており、設計者として官報に山口半六、入留正道の名前が記されている[41].山口半六(1858~1891)は18歳の時にフランスに渡り、パリの工業中央専門学校を卒業し、フランスの土木建築をおさめた最初の人である。また、音響設計は、当時東京音楽学校主事の上原六四郎が受け持ったとされている。



Fig. 2.3 Main building of Tokyo Music School[33].

旧奏楽堂の歩みは日本の西洋音楽教育・演奏史にとって非常に重要であり,旧奏楽堂が日本の音楽界に果たしてきた役割は計り知れないものがあると言っても過言ではないだるう.

Table 2.1 [40] に、旧奏楽堂の歴史年表を示す、このように、旧奏楽堂はその保存問題をめぐって関係者間の度重なる折衝が続けられていたが、1983 年 7 月に台東区が建物を譲り受け、東京都より上野公園内の一部の土地を借用して移築保存することに合意がなされ、移築工事が着手された、奏楽堂の明治村への移転計画が持ち上がったときに、奏楽堂保存のために「奏楽堂を救う会」が卒業生らによって結成されたが、そのメンバーには芥川也寸志、黛敏郎をはじめとする著名な音楽家も数多くいた、奏楽堂の明治村移転反対の根拠のひとつとして、もし明治村なら建築基準法によって公開施設として使えないということ、また演奏できたとしても聴衆が集まるような場所ではないことがあった[38]、「奏楽堂も楽器のようなものだから、やはり常時使わなくては生きた楽器とは言えないし、生きたホールとしての機能を発揮したとは言えない」(森正)[42]、文化はその土地を離れては文化ではない[37]との主張があったようである。

#### 2.2.2 建物について

建設当初の奏楽堂は一階を学校本部の諸室にあて,二階に奏楽堂を備える中央家と,教室および練習室にあてられた左右の翼家から成り,その長さは現在のおよそ二倍に当た

Table 2.1 A chronological table of the Sogakudo's history[40].

		· · ·
年 	月	出来事
1890年	5月	旧東京音楽学校(現東京芸術大学)の本館として建造
1928年	9月	侯爵徳川 貞氏より奏楽堂にパイプオルガンが寄贈される
1972年	10月	東京芸術大学,老朽化した奏楽堂を明治村へ移築する合意書を財団
		法人博物館明治村ととりかわす
1979 年	10月	日本建築学会及び音楽家グループが奏楽堂の現地保存の要望書を文
		部大臣,文化庁長官,東京芸術大学長に提出
1980年	2月	「奏楽堂を救う会」発足
1980年	3月	奏楽堂の使用全面禁止
1980年	10月	東京芸術大学,奏楽堂の明治村への移転決議
1981年	7月	台東区長,東京芸術大学に奏楽堂の区内移転保存を申し入れる
1982 年	1月	文部省・東京芸大,東京都,台東区,奏楽堂を救う会,関係国会議
		事団の五者会談で,奏楽堂の上野公園移築保存について協定成立
1983年	2月	奏楽堂保存の敷地が旧都美術館跡地に決定
1983 年	4月	東京芸術大学より台東区長へ移築費の負担額を要請
1983 年	7月	事業主体が台東区となる
1984年	5月	「奏楽堂お別れの会」が東京芸術大学主催で催される
1984年	6月	台東区議会,解体工事契約案件を議決
1984年	8月	奏楽堂の解体工事を開始
1984年	12月	解体工事完了,角材木,部品などに番号を付して東京芸術大学構内
		に保管
1985 年	4月	「奏楽堂のパイプオルガンをよみがえらせる会」結成
1985 年	6月	台東区議会,復元移築工事契約案件を議決
1987 年	3月	奏楽堂復元移築工事完了
1987 年	9月	パイプオルガン修復工事完了
1987 年	10月	奏楽堂オープン
1988年	1月	国の重要文化財に指定される
1990年	5月	奏楽堂百周年.奏楽堂日本歌曲コンクール発足

#### る 78m あまりであった.

移築工事の際は基本的に当初の状態へ復元する方針であったが,実際に活用していく関係で当初の状態に復せなかった部分がある.当初との変更点は,以下の通りである[40].

- 敷地の関係で,翼家の胴部を約 19m 切縮めた形とし,この間取りを新たに設計した.
- 1938年に設置されたパイプオルガンを復旧したため,舞台は1932年拡張時(「2.2.3 2 階ホール部分の改修」参照)の規模に整備された.
- 奏楽堂の段床幅を安全条例に適するよう,仮設床を継ぎ足して拡大した。
- 客席出入り口の階段を安全条例に適するよう仮設床で覆って踊り場を確保し、各階段への仮設階段を設けた。
- 客席後方の回転窓は,はめ殺しで,壁際の天井換気口もなかったが,換気を考慮して移築直前のままとした。
- 玄関右の土間は,現状の床を存置した.
- 玄関ホール左右の室を前後に仕切る壁は復さず,袖壁と垂壁を設けて,これを示す に止めた。
- 床仕上げは,修理前の状態に倣ったが,リノリウムの代わりに塩ビシートを敷いた。
- 奏楽堂の証明は,残存していた大正末期のシーリングライトを清掃・補修して再用 し,中央には大正期のシャンデリアを復した。
- 各室には,必要に応じて蛍光灯による補助照明を施した.
- 各室の暖房は,大正末から始められた蒸気暖房の替わりに温水暖房とし,管理室など一部の室には空調機を設置した。
- この他,防災と警備設備を施した。

#### 2.2.3 2階ホール部分の改修

舞台周りの拡張は Table 2.2, Fig. 2.2 に示すように 8 回行われたことが,旧舞台の残部や床のペイント色の差などから確認されている [33]. Fig. 2.5 (1893 年 12 月撮影)に示すように,当初はパイプオルガンがなく,舞台も小人数しか乗れないようなとても小さなものであった.2回目の改修で二重ステージが取り付けられ,移築直前まで二重ステージはあったようである (Fig. 2.6 参照). 客席は,建設当初は置椅子式であり,前半部が10段で個別椅子,後半部が7段で長椅子を置いていたとされる [40]. 1914 年頃には,照明器具が客席後方だけでなく舞台上にも配備され,客席中央には10 灯シャンデリアが一基

改修回数 *1	改修年	奥行き [m]	間口 [m]	高さ [m]	備考
建設当初	1890年5月12日	1.5	6.8	0.76	*2
1回目	1896 年頃	3.9 (2.4)	6.8 (6.8)	0.76 (0.39)	*3
2回目	1899 年頃	5.1	6.8	0.76	*4
3回目	1901 年頃	6.7	7.3	0.8	*5
4 回目	1902 年頃	7.3	9.0	0.8	
5 回目	1905 年頃	7.3	14.2	0.8	
_	1915 年頃	7.3	14.2	0.8	*6
_	1928 年	7.3	14.2	0.8	*7
6回目	1932 年	7.85	16.17	0.8	*8
7回目	1954 年頃	9.75	16.17	0.8	
8回目	1959 年	11.65	16.17	0.8	*9

Table 2.2 Changes of the stage shape with renovation.

設置された.移築に際しては,オルガン設置後に整えられた昭和7年改造後の形態に整備された.客席が固定式座席が整えられたことにより,移築前は388席(別に補助席50)であったが,現在は338席となっている.建設当初は天井は漆喰塗であったとされるが,1970年に客席後部天井に吸音テックスが貼り替えられた[33].

<sup>\*1</sup> 舞台の大きさが変化した時を 1 回分と数える.

<sup>\*2</sup> 両端は弧形,3段の階段有り.

<sup>\*3 (</sup>張り出しステージの大きさ)

 $<sup>^{*4}</sup>$  1 回目の改修で設けた張り出しステージを撤去,当初のステージ上に高さ約  $46\mathrm{cm}$  の二重ステージが載せられる.両脇の階段も前側を少し外開きとなるように外側へそれぞれ  $30\mathrm{cm}$  移動.

 $<sup>^{*5}</sup>$  在来の舞台に高さを  $4\mathrm{cm}$  高めて覆いかぶせた.二重ステージも前方に  $2\mathrm{m}$  拡張.

<sup>\*6</sup> 舞台周囲に舞台 框 が取り付けられ,前面に2か所の昇降段を設置.

<sup>\*7</sup> サイクロラマを取り壊し,パイプオルガンを設置.

<sup>\*8</sup> 舞台 框 、腰羽目、昇降段は再用 .

<sup>\*9</sup> エプロンステージを設置.

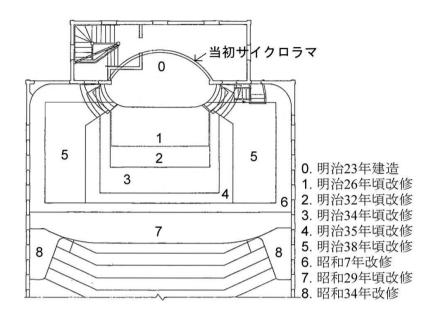


Fig. 2.4 Change of the stage shape with renovation[33].

### 2.3 旧奏楽堂の建築的特徴

さて、旧奏楽堂は、最近のコンサートホールには見られない様々な特徴を持っている.音楽ホールの材質は、そのホールの音響特性を決定づける重要な要因であるため、建物自体の特徴として、木造であることがまず第一にあげられるだろう.木造であることに対しては、木質のホールの方が音に順応性があり、柔らかい音ができると指摘されている[36].ヴァイオリニストの江藤俊哉氏は、カーネギー・ホールと旧奏楽堂の響きがそっくりだと体験を語っており、「木造建築にはどことなく音にまるみがあり、コンクリートと鉄、合板の新しいホールは音がパタンパタンと帰ってきて、モダンであるが、どうしても丸みにかけ、線の細い音になる」と木質のホールの響きについて語っている[39].

また,旧奏楽堂の客席は階段状に傾斜しており,前席の客の頭が邪魔にならないようになっている.現在,コンサートホールの客席部分が階段状になっていることは別段珍しいことではないと考えられるが,明治24年12月の『音楽雑誌』に奏楽堂で催された大日本音楽会の印象記事の中では,段状の客席が珍しかった様子が伝えられている[40].

さらに,舞台を含め箱状であることがあげられる.平行壁は多重反射を起こす可能性があるため,避けられたり,拡散体を設置するなどの対策をする場合がある.旧奏楽堂の場合は,多数の窓やカーテン,化粧方杖等が拡散体の働きをしている可能性があると考えられるが,舞台を含めて箱状であるというのはやはり特徴として良いだろう.

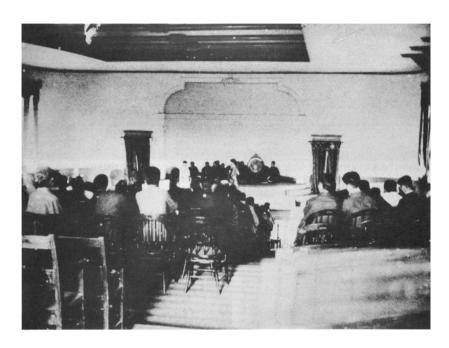


Fig. 2.5 Scene of hall (1893, 12)[33].

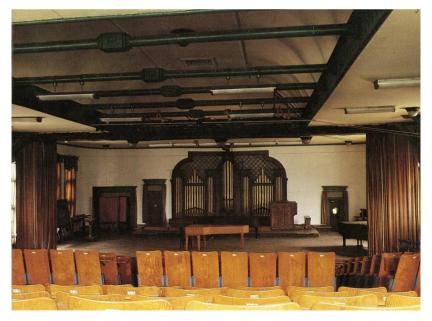


Fig. 2.6 Scene of the stage before the Sogakudo is dismantled and reconstructed[33].

Table 2.3 Material of interior.

部位	材料
壁面上部,天井	漆喰
腰壁(壁面下部)	板張り(杉、フタル酸樹脂調合ペイント塗)
ドレープカーテン	キュプラ 55% ,スパンレーヨン 45%
客席床	ロンリウム敷き
舞台床	フローリング張り(楢,ポリウレタン樹脂塗装)
舞台正面腰部分	板張り(杉,ワニス塗り)
窓	回転窓,木製サッシュ
客席椅子	連結椅子 ((株) コトブキ製, TS-6122)

また,四隅の壁が丸くアールを付けて漆喰で仕上げられているのにも注目したい.アールの付け方は,舞台側の方が大きく客席後部の方が小さくなっている.現在はパイプオルガンが収められているサイクロラマ部分も両入隅と上方を弧形としてあり,これらは音響効果を求めたものであったとされる[33].現在舞台側のアール部分は,通常は幕で覆われている.

そして,一番目につくであろうヴォールト型の天井である.これについては,少し詳しく後述する.

なお, 主な内装は Table 2.3 のようになっている.

以下に各部位ごとの特徴を述べていく.

#### ヴォールト型天井・7本の浮き梁

ヴォールトとは,アーチをもとにしてつくられた曲面状の構造体であり,梁とは小屋組や床組の荷重を柱などと連結して支える水平材の事である [47]. Figs. 2.1, 2.2(p. 12)の上部を見ても分かるように,天井の中央部分を蟻壁で立ち上げ,その上をかまぼこ型に持ち上げられている.ヴォールトの一部の拡大写真を Fig. 2.7 に示す.蟻壁とは,蟻壁長押と天井にはさまれる細長い部分のこと [48] であり,Fig. 2.8 にも示すこの蟻壁板には透かし彫りがあり,棟上に突出する太い二基の換気棟に排気できるようになっている [33]. ヴォールト下部には水平に丸棒状の化粧梁が浮かぶように渡されている.この浮き梁は,その位置から陸梁と呼ばれ,一見装飾用にも見えるが,実は構造的にも非常に重要な役割を果たしている.梁の中央部分を Fig. 2.9 に示す.このような装飾があることで,梁の単





Fig. 2.7 Vault of ceiling.

Fig. 2.8 Panel board under vault.



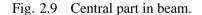




Fig. 2.10 An ventilating opening.

調さを破り、梁に表情を与え効果的であるとされている[36].

このヴォールト型天井をデザインした設計者に関する資料は見つからない [35] が,文献 [36] では以下の3点がヴォールト型天井が採用された要件として考えられている.まず一つに,旧奏楽堂の客席部分の天井高は,最後部で2.55 m と非常に低いが,この天井による圧迫感を避けるために中央天井をヴォールト型に高くしたのではないかということ.第二に,客席で生じる熱気を排出するために,天井の一部を高くし,そこに換気口を設けたのではないかということ(Fig. 2.10 に示すような換気口が,ヴォールト型天井の中央に2か所設置されている).第三に,床と天井が平行になると多重反射する可能性があるために天井を曲面にしたのではないかということである.

#### パイプオルガン・サイクロラマ

Fig. 2.11 にパイプオルガンの正面写真, Fig. 2.12 にオルガンの演奏台の写真をを示す. 「2.2.3 2 階ホール部分の改修」でも述べたように,このパイプオルガンは創建当初から





Fig. 2.11 Pipe organ of stage.

Fig. 2.12 Console of pipe organ and a cembalo.



Fig. 2.13 Braces in the upper part of sidewall.

あったものではなく,昭和 3 年に紀州徳川家の頼貞侯から学校に寄贈されたものである. 大正 9 年にイギリスのアボット・スミス社によって輸入されたもので,パイプ総数 1400 本近い日本で初めての本格的コンサート用オルガンだった [37].

昭和 3 年にパイプオルガンが設置されるまでは,固定式サイクロラマがあった.サイクロラマとは舞台後方の壁や幕の事で,ホリゾントと同義である[49].



Fig. 2.14 Windows of sidewall.

#### 側壁上部の化粧方杖

方杖とは,水平荷重による変形防止のために,垂直材と水平材の隅角部に取り付ける斜材の事である[47]. Fig. 2.13 に化粧方杖の写真を示す.この化粧方杖は陸梁から吊り下げられたもので,側壁の上部に左右に7か所ずつ設置されている.

#### 漆喰壁と多数の窓

一般のコンサートホールでは,遮音の問題から普通窓は設置されない.その点旧奏楽堂には,Figs. 2.1, 2.14 に見られるように,客席後壁と側壁は舞台横までに窓が設置されており,外の音がそのまま入ってくる.芸大時代には,他棟での楽器練習の音や,構内に飛んで来る鳩の鳴き声などが容赦なく侵入し,時には鳩が入ってきて糞を落とすこともあったようだ[36]が,交通騒音に関しては立地条件が恵まれていたので障害とはなっていなかったようである[34].

また,木造で漆喰壁であることと合わせて,指揮者の森正氏が「奏楽堂には凹凸が少ない.漆喰壁であることもよい.しかし,奏楽堂はステージ以外の三面の壁にはガラス窓がある.このガラス窓が漆喰壁と調和していい音質音色をつくっている.ガラス窓がプラスに働いていると思う」と述べている[36].

2.4 まとめ 23



Fig. 2.15 Door to seats.



Fig. 2.16 Door to stage.

#### その他

以上の他に,各種部位の様子を示す. Fig. 2.15 に客席扉の写真, Fig. 2.16 に舞台上の扉の写真を示す. 両扉とも木製であり,舞台上の扉にはカーテンが設置されている.

Figs. 2.17, 2.18 に客席の椅子の写真を示す.他の一般のコンサートホールの椅子よりも座面の高さがだいぶ低く,また,布張り製ではあるが,とても薄いものである.通常はFig. 2.17 のように閉じられている.

部屋の側壁下部には Fig. 2.19 のような暖房器具が多数設置されている.表面がでこぼこしており,多少音の拡散に関係してくるように感じられる.また,現在は使われていないようである.舞台前面には, Fig. 2.20 のような階段が設置されている.

## 2.4 まとめ

旧奏楽堂の歴史と,建築的特徴をまとめた.

まず,日本で初めての音楽専用ホールである旧奏楽堂の現在までの歩みを追っていくことで,その歴史的・文化的価値を確認することができた.旧奏楽堂が現在まで存在し続けるには様々な出来事があった.旧奏楽堂の移築・保存問題は,単に東京都や台東区といった限られた地域の問題ではなく,ましてや一大学の内部問題ではありえなかった.この問題は,中央官庁や多くの政治家,著名な音楽家や建築家を巻き込み,文化のあり



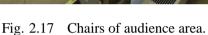




Fig. 2.18 A chair (open).



Fig. 2.19 A heating apparatus.



Fig. 2.20 The stairs to stage.

方,文化財保護の在り方に関心を持つ全国の人々の注目を集めたと言えよう.

また,実用的な問題から拡張されてきた舞台の大きさや,音響を意識して作られたと考えられるヴォールト型天井をはじめとした建築的特徴などをまとめ,何が旧奏楽堂の特徴になり得るかを確認した.

## 第3章

## 幾何音響解析による検討

### 3.1 はじめに

旧奏楽堂の建設当初から現在までの移築・改修による音響特性の変化や,旧奏楽堂の建築的特徴が音響特性に及ぼす影響を考察する.移築・改修による音響特性の変化は,歴史的変遷という視点から,改修によるステージの大きさの変化や各部位の変化などが音響特性にどのような影響を与え,年代を追っていくに従って奏楽堂の音響特性がどのように変化していったかを明らかにし,文献に残っている移築前の旧奏楽堂の良い評判が,現在の旧奏楽堂でも得られうる音響となっているのかを確認する.建設当初,オルガンが設置される直前,移築直前,現在の形状について検討する.建築的特徴が及ぼす影響については,天井の高さやヴォールトの有無,舞台側壁の角度,化粧方杖や窓の有無を変化させることにより検討する.

室内音響設計のために模型実験やコンピュータシミュレーションが行われ,そのコンピュータシミュレーションの一つとして幾何音響シミュレーションがある.本研究では,商用幾何音響解析ソフト CATT-Acoustic v8 [17] (以下, CATT)を用いて検討を行う.

## 3.2 室内音場シミュレーションについて

#### 3.2.1 室内音響設計の種類

音楽ホールなど,音響的に特別な配慮が必要となる空間を設計する際,設計終盤や施工初期段階でのエコーチェックや詳細な形状の検討を行う場合,縮尺模型実験が行われることがある [18,19].日本でコンサートホールの建設ブームが訪れた 1980 年代には,ザ・シンフォニーホール(大阪),サントリーホール(東京)をはじめ多くのプロジェク

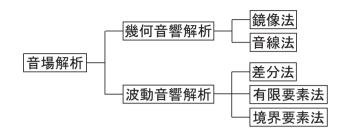


Fig. 3.1 The types of acoustic simulation.

トの音響模型実験が報告されている [20,21]. しかしながら模型実験は,モデル製作に時間と費用がかかり,また,大がかりな形状変更も困難である.

一方,計算機技術の急速な発展とともに,コンピュータによる音場シミュレーションが盛んにされるようになってきた.コンピュータシミュレーションでは,模型実験に比べて低コストかつ短期間でモデルを作成することができ,また,形状の変更も容易である.

建築音響分野での数値解析手法は Fig. 3.1 に示す「幾何音響解析手法」と「波動音響解析手法」に大きく分けられる、「幾何音響解析手法」は音の波動性を無視した手法であり、「波動音響解析手法」は波動方程式(または Helmholtz 方程式)から解を導く手法である。音の波動性を無視している幾何音響シミュレーションは,精度の点で波動音響シミュレーションに劣ることは理論的には明白であるが,道具としてみた場合,目的によっては,幾何音響シミュレーションで十分である事も多い [22] . 視覚的にもわかりやすいためエコーも発見しやすく,プレゼンテーション等にも向いていると言える。ホールのような大空間であっても CAD (Computer Aided Design) の図面データから読み込んでパソコンで数十分程度で計算できるため,大規模空間の時系列応答を求めるには非常に重宝され,様々な商業用のソフトウェアが売り出されている.

#### 3.2.2 幾何音響解析手法について

幾何音響学(geometrical acoustics)とは,音の波動性を無視して,そのエネルギーの伝搬を幾何学的に考える手法のことである.非常に直観的で理解しやすい方法であり,現在も建築・環境音響学,室内音響学の分野における音場シミュレーションにおいて広く用いられている方法である[23].音の波動性を無視しているということは,音波の回折や干渉などの現象は考慮されておらず,精度の保証はなく曖昧な部分も多い.しかし,初期反射音の到来方向や時刻を近似的に手っ取り早く求めるには有効な方法であると考えられる.室内における音場の予測には当初2次元的な作図が用いられ,断面形状の決定が行われいていたが,今日のようにパーソナルコンピューターが自由に使えるようになる

概ね 1980 年代以降,幾何音響手法を用いた反射音の3次元的な予測が頻繁に行われ,音線が可視化されるとともに,反射音の到来方向や初期のインパルス応答を瞬時に示すことが可能となった[24].

幾何音響学に基づいた数値シミュレーション手法には,鏡像法(虚像法)や音線法がある.鏡像法(Image Source Method)では,閉空間の音場に対し,離散的に分布する実音源及び虚音源群のそれぞれの寄与が各反射音の強さになり,それらの総和を算出することにより,ある受音点の音の強さが求められる.直接音を含む全ての反射について距離減衰(逆二乗側)が与えられ,さらに反射する境界面の吸音率を $\alpha$ とすると,反射一回ごとに $(1-\alpha)$ のエネルギー反射率が考慮される.この手法では,室内の任意の位置に受音点を設定することができる.しかし,反射次数の増加とともに鏡像音源の総数が指数関数的に増加するため,高次の反射音まで求めることは困難である.解析の上限は,反射音レベルや観測時間ではなく反射次数によって決定されるため,高次の反射音の方が時間的には早く受音点へ到達する場合もあり,任意の時刻においてすべての反射音が含まれない場合も生じる.

一方の音線法(Ray Tracing Method)は,音源位置に無指向性の点音源を設定し,全空間に等立体角になるように多数の音線を放射し,その反射履歴を時間とエネルギー,入射方向のデータとして順次追跡していく手法である.距離減衰は,時間経過に伴う音線間の広がり(密度の減少)によって考慮され,反射については前述の鏡像法と同様にエネルギー反射率が考慮される.ある特定の受音点を設定しても,有限の間隔で放射された音線がちょうどその点を通過する確率はほぼゼロであり,有限の大きさを持った受音領域を設定することが一般的である [23].受音点が領域であることと,音線の間隔が時間とともに広がることが原因となって,音線法で抽出された反射経路は,重複した音線や,現実にはない経路の音線を含んでいる.この誤差をなくすため,Backtracing(combined ray tracing and image source method: Lehnert[25], Sekiguchi[26], Naylor[27], Vorländer[28]),Cone tracing method(Naylor[27]),Beam tracing method(Vian and Maercke[29])などの手法が提案されている.

鏡像法,音線法のいずれも,初期反射音の検討には非常に有用であると考えられるが,時間とともに回折波や散乱波の影響が大きくなり,誤差が大きくなってしまう.そこで,近年では Scattering Coefficient (乱反射率)[30] などの指標が提案され,幾何音響シミュレーションでの後期反射音の計算アルゴリズムへの導入が行われており,ISO (International Standarization Organization)[43] においてもその測定法が規格化されつつある.

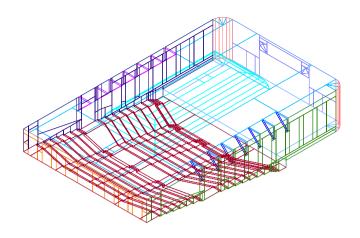


Fig. 3.2 A model displayed with AutoCAD.

### 3.3 検討方法

#### 3.3.1 CATT の特徴と設定

CATT は商用の幾何音響解析ソフトであり,以下の手法に基づく3つの独立した解析タイプ(Early part detailed ISM,Audience area mapping,Full detailed calculation)を選ぶことができる.その3つの解析タイプはそれぞれ,鏡像(Image Source Model,ISM)法,音線法,そして音線法の一種であるRandomized Tail-corrected Cone-tracing(RTC) method に基づいて計算されている.125Hz から 16kHz の8オクターブバンドの計算が行うことができ,一部の計算ではA特性の重みを付けたパワーの合計も算出される.8kまたは16kHzでは入力すべき吸音率などのデータがない場合が多いが,それらは2kおよび4kHzの値に基づいて推定される.CATTには,AutoCAD上のある特定のレイヤーにある形状を書き出す命令がプログラムされたAutoLISPファイルが付属しており,そのAutoLISPを介して,Fig. 3.2 のようにAutoCADで作成した形状データを簡単にCATTへ書き出すことができる.また,CATTでは空気吸収を考慮することができ,本研究では気温 20°C,相対湿度50%,空気の比重を1.2 kg/m³に設定した.

CATT では SabT , EyrT , EyrTg ,  $T_{15}$  ,  $T_{30}$  の 5 種類の残響時間が計算できる .1 番目がもっとも代表的な Sabine の残響式によるもの , 次の 2 つは Eyring の公式に基づいた残響式 [31] によるもの , 最後の 2 つは計算結果から得られる受音点ごとの残響時間である . 以下に , それぞれの残響時間の簡単な説明を示す .

3.3 検討方法 29

SabT 閉空間でのみ計算できる.以下に Sabine の残響式を示す.

$$T = K \frac{V}{A} \quad [s] \tag{3.1}$$

ここで, $K=24/c\log_{10}\mathrm{e}$ ,T:残響時間,V:室容積  $[\mathrm{m}^3]$ ,A:室の全吸音力.

EyrT, EyrTg EyrT は全ての音線が反射した壁面の吸音率を算術平均して求めた平均吸音率から算出された平均自由行路に基づいており, EyrTg は室全体の平均吸音率から算出された平均自由行路に基づいている.以下に Eyring の残響式を示す.

$$T = \frac{KV}{-Sloq_e(1-\overline{\alpha})} \quad [s]$$
 (3.2)

また,空気吸収を考慮した Eyring-Knudsen の残響式を以下に示す.

$$T = \frac{KV}{-Slog_e(1-\overline{\alpha}) + 4mV} \quad [s]$$
 (3.3)

ここで, $K=24/c\log_{10}e$ ,T:残響時間,V:室容積  $[\mathrm{m}^3]$ , $\overline{\alpha}$ :平均吸音率,m:空気吸収による 1 m あたりの減衰率.

 $T_{15}$  ,  $T_{30}$  計算されたエコーグラムから算出される .  $T_{15}$  ,  $T_{30}$  については「1.4.1 残響時間 (p.6)」を参照 .  $T_{30}$  は良い結果が得られる残響時間だとされており,後工程モジュールで後期応答部分へ外挿するのに使用される . Audience area mapping の算出指標には RT' という特別な残響時間があり, $T_S$  から求められ(RT'= $13.8\,T_S$ ),EDT とよく対応する . RT'が使用されるのは,Audience area mapping のために  $T_{30}$  のエコーグラムを記録していくと使用メモリが膨大になってしまうためであり,音源から遠い位置では  $T_{30}$  とよく対応する .

#### Echogram calculation

直接音が到来した時刻がエコーグラムの開始時刻となっている.初期の積分されたエコーグラムは以下の式で近似される.

$$F(t) = \int_0^t h^2(\tau)d\tau \tag{3.4}$$

また,後期の積分されたエコーグラムは以下の式で近似される.

$$B(t) = \int_{t}^{\infty} h^{2}(\tau)d\tau \tag{3.5}$$

ここで,h(t):インパルス応答 [Pa<sup>2</sup>].

以下では,CATTの3つの解析タイプ(Early part detailed ISM, Audience area mapping, Full detailed calculation)について触れる.

#### Audience area mapping

"Audience area mapping"では,ある一定の大きさの球体の受音領域を持った標準的な音線法が用いられており,音源の指向性なども考慮されている.拡散反射は拡散面から反射された音線の方向をランダマイズすることによって扱われ,乱反射率係数によってその量が決められる.客席面を指定すると,その面の上に計算結果が任意の大きさの格子状に分割したカラーマップで表示される.受音領域の直径は,その格子の大きさよりわずかに大きく設定される,最終的に単位面積当たりに必要となる音線の数が最初に計算され,音線数が調節されてから計算されるので,音線の数が大幅に少なくても,同レベルの結果を得ることができる.また,30 dB 減衰した時点(残響時間の半分の時間)で計算が打ち切られる.

本研究では,カラーマップの高さは  $1.2~\mathrm{m}$  に設定し, $C_{80}$ ,LF,音圧レベル(SPL),RT',G を算出した.音線数は,有意義な計算をするためには最低  $10^4$  本必要とされており [17],本研究では  $10^5$  本とした.

#### Early part detailed ISM

"Early part detailed ISM"では 1 次の拡散反射が加えられた鏡像法が用いられている.鏡像法では拡散反射を考慮することは非常に難しいため,この手法は初期の反射経路算出のために使われ,音響評価指標を算出することはできない.鏡面反射次数( $0\sim9$  回)と拡散反射次数(0 または 1 回,ただし鏡面反射次数以下)が設定できる.拡散反射次数は通常"1"に設定するとされており [17],本研究でもそれに倣った.

反射次数に関しては,旧奏楽堂のそれぞれの解析ケース(Table 3.2,Table 3.5)の室容積と表面積より  $80~{
m ms}$  までの平均反射回数 n=0.08cS/4V を求め, $n=3.59\sim4.65$  回であったため,便宜的に  $5~{
m O}$  回に設定した.

#### Full detailed calculation

"Full detailed calculation"では Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC) method が用いられている。後期反射音の誤差を改善するために音源から放射した音線の先に円の有限領域をもたせる Cone-tracing,標準的な音線法,鏡像法が組み合わさった手法であり、音線が移動した距離にが長くなるに従って、受音領域である円錐部分が大きくなっていく。他の手法同様の欠点があるため、直接音、1次の鏡面反射と拡散反射、および2次

3.3 検討方法 31

の鏡面反射は, ISM によって決定付けられる.反射成分が乱反射成分とみなされた場合は, Lambert 則によってその方向はランダマイズされる.計算は,-60 dB 減衰するまで行われる.

いくつかの指標値では, Barron's revised theory による理論値 [10] が解析値との差で示される. Barron's revised theory による理論値を以下に示す. まず音のエネルギーを直接音(d), 80 ms まで( $e_r$ ), 80 ms より後(l) の 3 つの要素に分ける.

$$d = 100/r^2 (3.6)$$

$$e_r = (31200T/V)e^{-0.04r/T}(1 - e^{-1.11/T})$$
(3.7)

$$l = (31200T/V)e^{-0.04r/T}e^{-1.11/T}$$
(3.8)

ここで,T: 残響時間,V: 室容積,r: 音源からの距離.これより,以下の指標が算出される.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{d + e_r}{l} \text{ [dB]}$$
 (3.9)

$$G = 10\log_{10}(d + e_r + l) \text{ [dB]}$$
(3.10)

CATT マニュアル [17] には,この Barron's revised theory による理論値を算出するのに" 残響時間を使用する"とだけ書かれており,実際に,CATT で算出できる SabT,EyrT,EyrTg, $T_{15}$ , $T_{30}$ (p. 28,3.3.1 参照)のうちのどの残響時間が使用されているかの明確 な記述がない.各残響時間による Barron's revised theory による理論値を実際に算出し,比較してみたところ,(式 3.7,3.8 の T) は SabT より算出されているのではないかと推定される.

音線数は有意義な計算をするためには最低  $5\times 10^3$  本必要とされており [17] , 本研究では  $10^5\sim 2\times 10^5$  本とした .

#### 3.3.2 吸音率の設定

吸音率については, Eyring-Knudsen の残響式による値が文献実測値 [34] と概ね合致するよう, 文献 [5,11,12] の残響室法吸音率等を参考に Table 3.1 の値に決定した.

#### 3.3.3 乱反射率の設定

CATT における乱反射率の推奨値は,通常の大きさの面には最低 0.2 (大きな平滑面では 0.1) とされており,また,客席部では  $125 \sim 4 \, \mathrm{kHz}$  の帯域ごとにそれぞれ  $0.3 \sim 0.8$  とされている [17]. 本研究ではこの推奨値に従った.

部位	材料	125	250	500	1k	2k	4k
壁面上部,天井	漆喰 + 木摺下地 [12]* <sup>1</sup>	0.13	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05
腰壁	合板 [12]	0.20	0.20	0.10	0.08	0.08	0.10
舞台後方幕	吸音用カーテン [11]	0.10	0.25	0.55	0.65	0.70	0.70
羽目板 *2	あなあき板 [12]	0.45	0.31	0.31	0.30	0.30	0.28
化粧方杖 *3	板 *1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
客席後部天井	吸音テックス $^{st 1,4}$	0.25	0.29	0.15	0.12	0.14	0.23
扉	合板 [12]* <sup>1</sup>	0.15	0.10	0.05	0.05	0.06	0.05
舞台扉	合板 + カーテン [11, 12]* <sup>1</sup>	0.23	0.30	0.49	0.57	0.62	0.61
舞台床	板張床 [11]	0.15	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08
舞台正面腰部分	合板 [12]	0.22	0.13	0.10	0.06	0.06	0.08
客席床	板張床 [11]	0.15	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08
客席椅子	椅子 + 板張床 [5,11]*1	0.51	0.59	0.67	0.70	0.70	0.68
客席窓	カーテン + 窓 [11,12]* <sup>1</sup>	0.43	0.45	0.62	0.64	0.63	0.60
舞台オルガン	パイプオルガン $[5]^{*1}$	0.77	0.52	0.42	0.39	0.38	0.37
天井換気口	換気口 [11]	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80

Table 3.1 Absorption Coefficients in this analysis.

また,波長の 1/4 以下の大きさが小さな面では十分に有効な鏡面反射が起こらないと考えることができるが,CATT ではそのような面に対し edge diffusion を考慮することができる.edge diffusion を考慮する面は任意で設定でき,指定した面の縁に  $s_{\rm edge}=0.5$  (50% )の乱反射率が与えられる.通常,大きさが波長に対して小さく拡散に大きく影響すると考えられる,窓やテーブルのような家具などに適用される.乱反射率自体の大きさよりも,Fig. 3.3 のように周波数によって変化する edge の領域の大きさによって影響が出てくる.

"Audience area mapping" ,"Full detailed calculation" の場合 ,1 次反射での edge diffusion は,鏡面反射成分に  $(1-s_{edge})$  がかけられ,拡散反射成分に  $s_{edge}$  がかけられる.それ

<sup>\*1</sup> 参考文献等を元に独自に設定

<sup>\*2</sup> ヴォールト下部, 天井後方隅部

<sup>\*3</sup> 側壁上部

<sup>\*4</sup> 移築前のみ

3.3 検討方法 33

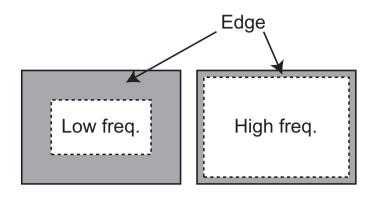


Fig. 3.3 Example of edge area size according to frequency.

以降の反射では, 乱反射率は以下のようになる.

$$s_{\text{effective}} = s_{\text{surface}} + s_{\text{edge}} * S_{\text{edge}} / S_{\text{surface}}$$
 (3.11)

 $s_{
m effective}$ : 乱反射率

 $s_{
m surface}$ : 通常の面の乱反射率 (もし使用するなら)

 $S_{\mathrm{edge}}$ :縁から波長の 1/4 の領域

 $S_{
m surface}$ :完全な面かそれに準ずる領域

低周波数帯域では,小さすぎる面は全てが edge とみなされて拡散体のように機能する可能性がある.

本研究では、側壁上部の化粧方杖にこの edge diffusion を適用した.

### 3.3.4 モデリングの方針・形状について

図面 [33] を基に座標の位置出しを行った.モデル化については文献 [17,32] 等を参考にし,細かい凹凸を無視,客席部の階段上の床を斜面とする,客席形状を無視し床面に吸音率・乱反射率を与える,浮き梁・舞台への小階段を無視,等の簡略化を行った.

Fig. 3.4 に現在の形状の解析モデルを示す . 「3.4 移築・改修における音響特性の変化」 (p. 35~), 「3.5 建築的特徴が音響特性に与える影響」(p. 40~)では,この形状を基本として検討を行う.

#### 3.3.5 音源・受音点位置

音源は高さ 1.5 m とし,水平位置は Fig. 3.5 に示すように舞台幅方向の中央,舞台 6 (現在,または 1932 年改修時)の端部から奥行き方向に 2 m (3.4「移築・改修における

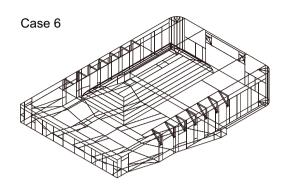


Fig. 3.4 An analysis model of the old Sogakudo(Case 6).

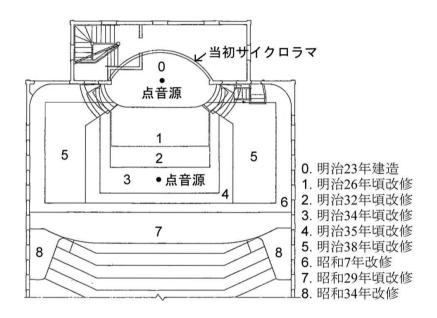


Fig. 3.5 Change of the stage shape with renovation[33].

音響特性の変化」の Case 0 のみ 8 m)とした.受音点は高さ 1.2 m とし,水平位置は室形状が左右対称であるため,室の半分に  $2\times2$  の格子状に  $60\sim65$  点を設けた.分析をする際の受音点位置の分類は center は客席中央部分,lateral は客席側方部とする (Fig. 3.6 参照).

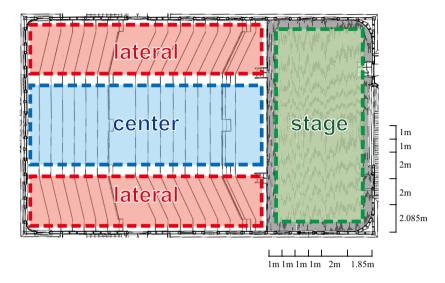


Fig. 3.6 Classification of receiving points.

Case	6	0	5	8
舞台形状 (Fig. 3.5)	6 回目改修	建設当初	5 回目改修	8 回目改修
舞台後壁	オルガン	サイクロラマ	サイクロラマ	オルガン
舞台隅部	カーテン	漆喰	カーテン	カーテン
客席後部天井	漆喰	漆喰	漆喰	吸音テックス
体積 $V[m^3]$	2,005	2,138	2,051	1,969
表面積 $S[m^2]$	1,270	1,307	1,331	1,264

Table 3.2 Difference of conditions among cases.

# 3.4 移築・改修における音響特性の変化

## 3.4.1 解析ケース

建設当初のもの (Case 0: サイクロラマ有り), オルガン設置直前のもの (Case 5: サイクロラマ有), 移築直前のもの (Case 8) 現在のもの (Case 6: 1932 年改修時と同様)を比較し, 改修に伴う音響特性の変化について検討する. Table 3.2 にケースごとの条件の違い, Fig. 3.7 に解析モデルを示す.

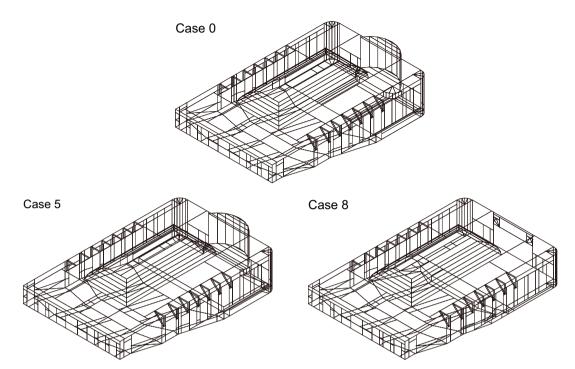


Fig. 3.7 Analysis models of the old Sogakudo(Case 0, Case 5, Case 8).

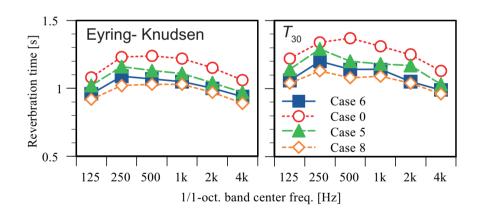


Fig. 3.8 Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

## 3.4.2 結果と考察

残響時間の理論値 (Eyring-Knudsen)と解析値 ( $T_{30}$ の受音点での平均値)を Fig. 3.8 , Tables 3.3 , 3.4 に示す.全体的に解析値が理論値より大きいものの , ケース間の関係は類似している.体積が大きく吸音材量が少ない Case 0 が最も大きく , 建造当初は後年ほど 残響時間が短くなかったと考えられる.

Freq.[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Case 6	0.96	1.09	1.07	1.05	1.00	0.94
Case 0	1.08	1.23	1.24	1.22	1.15	1.06
Case 5	1.02	1.16	1.13	1.11	1.04	0.97
Case 8	0.92	1.02	1.03	1.03	0.97	0.89

Table 3.3 Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula [s].

Table 3.4 Reverberation time obtained by a geometrical acoustic program [s].

Freq.[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Case 6	1.06	1.20	1.14	1.14	1.05	0.99
Case 0	1.22	1.34	1.37	1.31	1.25	1.13
Case 5	1.14	1.29	1.20	1.18	1.17	1.03
Case 8	1.04	1.13	1.08	1.09	1.04	0.96

 $C_{80}$  各ケースの 500Hz 帯域における  $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.9 に示す.いずれのケースも客席中央部での値が客席側方部の値より大きくなっているが,Case 0 では理論値(Fig. 3.9 の Barron)に比べ全体的に値が大きく,特に客席中央部では音源位置が客席に近い Case 6, 5, 8 に比べても大きい.これはサイクロラマによる音波の集中に起因していると考えられる.Case 5 でもサイクロラマがあるが,Case 0 に比べて値が小さいのは,音源位置がサイクロラマのカーブの焦点から外れているためと考えられる.

G 各ケースの 500Hz 帯域における G を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.10 に示す.いずれのケースも理論値を概ね下回っており客席中央部での値が客席側方部の値より大きくなっているが,Case 0 では理論値自体が大きく, $C_{80}$  同様客席中央部で特に Case 6,5,8 に比べて大きな値となっている.

LF 各ケースの  $500{
m Hz}$  帯域における LF を  ${
m Fig.~3.11}$  に示す.客席位置によらず  ${
m Case}$  0 では値が小さくなっており,前方からの反射音が大きいことが分かる.これより, $C_{80}$  及び G が大きいことが側方からの寄与でないことが確認できる.

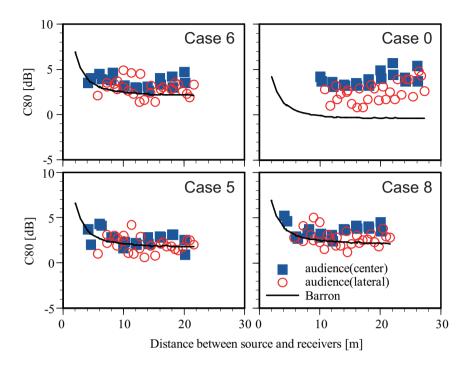


Fig. 3.9 Effect of the renovation on  $C_{80}$  for 500Hz octave band obtained by Barron 's revised theory and a geometrical acoustic program.

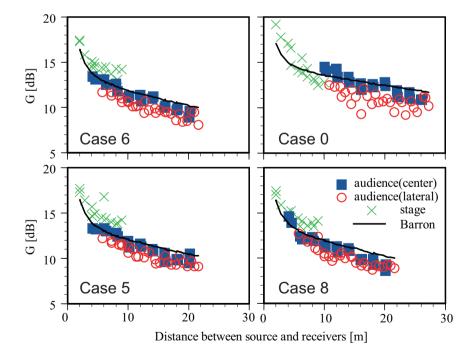


Fig. 3.10 Effect of the renovation on G for 500Hz octave band obtained by Barron 's revised theory and a geometrical acoustic program.

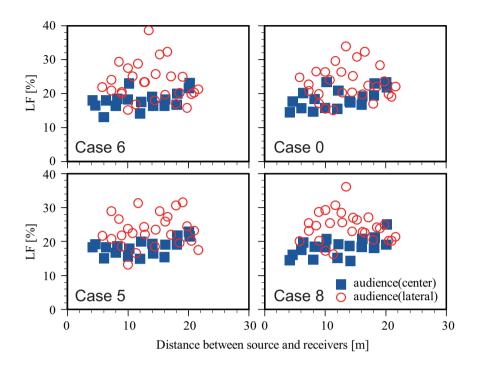


Fig. 3.11 Effect of the renovation on LF for 500Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

サイクロラマの影響 サイクロラマの影響を調べるため, Case 6, 0, 5 の 3 つのケースについて, Fig. 3.12に示す受音点に到達した音線のうち, サイクロラマ(Case 6 ではサイクロラマ位置の壁面)で1次または2次反射した音線数を反射回数5回のものまでカウントした. 結果を Fig. 3.13に示す. Case 6 と Case 5 では, サイクロラマ位置の壁面からの1次または2次反射成分の割合が非常に小さいのに対し, Case 0 では47番の受音点以外では割合が大きく, 特に客席中央部(center)の受音点においては特に顕著であり, 到達音線数の総数の約半分が1次反射であるため, サイクロラマで反射した音線数が多いだけでなく, エネルギーの大きい反射成分が多く受音点へ到達していると言える. Case 0 と Case 5 ではどちらにもサイクロラマがあるが, Case 5 の結果は Case 6 の結果に類似している. サイクロラマにより客席への音波が強められるが,音源位置によってその影響は大幅に変わってくるといえる. また,サイクロラマにより反射成分が一部のある領域に集中するため,逆に47番の受音点のように反射成分が少ない点が出てくるなど,客席位置による差が顕著になると考えられる.

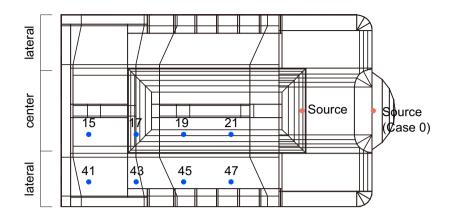


Fig. 3.12 Position of receiving points for counting sound rays.

## 3.5 建築的特徴が音響特性に与える影響

### 3.5.1 解析ケース

旧奏楽堂の現在のもの ( Case 6: 1932 年改修時と同様 , Fig. 3.4 参照 ) を基本形状とし , 天井高さとヴォールトの有無を変化させたもの ( Case low\_ c, mid\_ c, high\_ c ) , 舞台側壁の角度を変化させたもの ( Case 10deg , 30deg ) , 化粧方杖の無いもの ( Case NiDiff ) , 窓の無いもの ( Case NoWin ) を基本形状 ( Case 6 ) と比較する . Case NoWin は , 窓の吸音率を Table 3.1 で設定した「客席窓」から「漆喰」にしたものである . 条件の違いを Table 3.5 に示す . Table 3.5 にケースごとの条件の違い , Fig. 3.14 に高さを変化させた解析モデル , Fig. 3.15 に舞台側壁角度を変化させた解析モデル , Fig. 3.16 に化粧方杖無しの解析モデルを示す .

## 3.5.2 結果と考察

残響時間の理論値(Eyring-Knudsen)と解析値( $T_{30}$  の受音点での平均値と標準偏差)を Fig. 3.17 , Table 3.6 ( stage 上の値は除く ) に示す . ( stage ) は舞台上での値を示す . 全体的に解析値が理論値より大きく , ケースによっては 0.1 秒以上の乖離が見られるものの , ケース間の傾向は類似している .

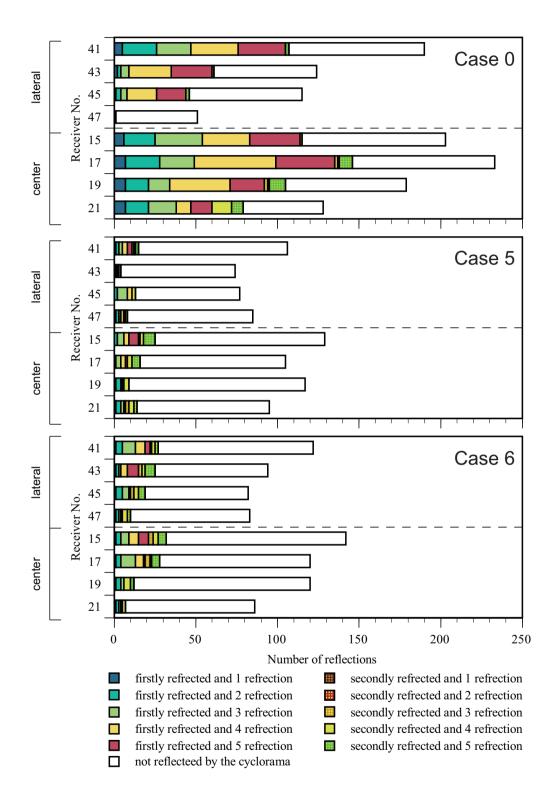


Fig. 3.13 Number of sound rays firstly or secondly reflected by the cycrorama.

Case	6	high_ c	mid_ c	low_c	10deg	30deg	NoDiff	NoWin
天井高 [m]	5.45	7.45	5.88	5.45	<u> </u>	_		
ヴォールト	有	· <del>無</del>	無	無	   –	_	   –	   –
舞台側壁角度	0°	   –	_	_	10°	$30^{\circ}$	   —	   –
化粧方杖	有	   –	_	_	   –	_	· ! <b>無</b>	   –
窓	有	   –	_	_	   –	_	   –	· <del>無</del>
体積 $V[m^3]$	2,005	2,631	1,986	1,786	1,957	1,860	2,005	2,005
表面積 $S[{ m m}^2]$	1.270	1.390	1.259	1.223	1.246	1.181	1.240	1.270

Table 3.5 Difference of conditions among cases.

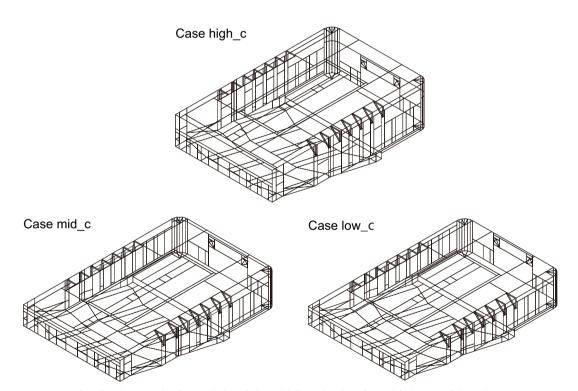


Fig. 3.14 Analysis models of the old Sogakudo (Case high\_c, mid\_c, low\_c).

Table 3.6 Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program [s].

Case	6	high_c	mid_ c	low_c	deg10	deg30	NoDiff	NoWin
Eyring	1.09	1.39	1.08	0.98	1.09	1.03	1.09	1.36
$T_{30}$	1.14	1.52	1.22	1.06	1.13	1.08	1.11	1.52

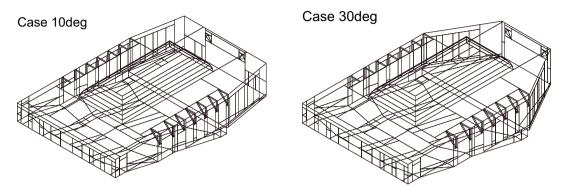


Fig. 3.15 Analysis models of the old Sogakudo(Case 10deg, 30deg).

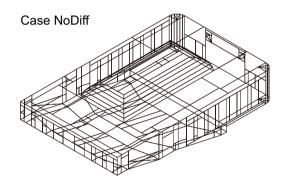


Fig. 3.16 An analysis model of the old Sogakudo(Case NoDiff).

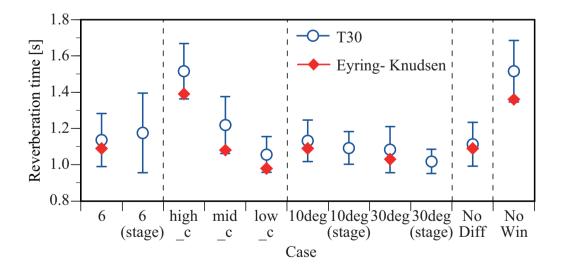


Fig. 3.17 Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

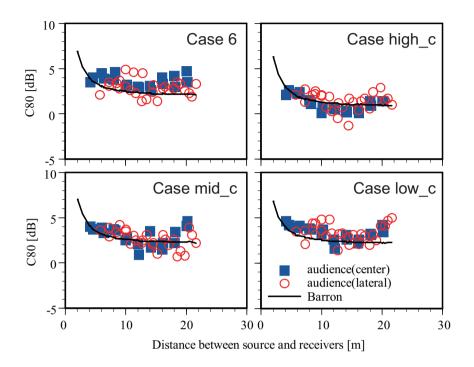


Fig. 3.18 Effect of the ceiling height on  $C_{80}$  for 500Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

#### 天井の違いによる影響

残響時間 体積の大きい Case high\_c では残響時間が長く,体積の小さい Case low\_c では残響時間が短い (Fig. 3.17). 体積の差は  $845~\mathrm{m}^3$  であり,残響時間の差は 0.5 秒近くになる.体積のほぼ等しい Case 6 と Case  $\mathrm{mid}_{-}$  C では,残響時間もほぼ等しいと言える.

 $C_{80}$  500Hz 帯域における  $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.18 に示す.体積がほぼ同じである Case 6 と Case mid\_ c を比較すると,残響 時間はほぼ等しいため理論値(Fig. 3.18,Barron)はほとんど同じであるが,一方解析値は Case 6 の値が客席位置によらず大きい.これは「最近の音楽ホールにはない明瞭な音色を体験できる」[5] という評価と対応している可能性がある.一方,Case 6 と Case low\_ c では,体積の小さい Case low\_ c の残響時間の方が短いにもかかわらず, $C_{80}$  の値に大きな違いがみられない.このことから, $C_{80}$  はヴォールト部の有無によらず,その他の天井高に概ね依存していると考えられる.

G 500Hz 帯域における G を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.19 に示す. ヴォールト部が無い場合では, 天井高によらず G が客席中央部で小さくなり,

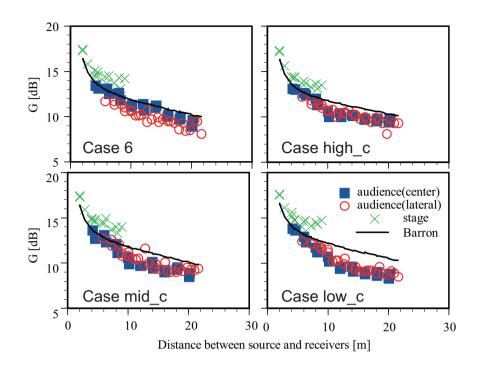


Fig. 3.19 Effect of the ceiling height on G for 500Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

理論値との乖離がみられる.また,客席位置による値のばらつきが減っている.このことから,ヴォールト部により反射波が客席中央部へより多く供給されていると言える.

LF 500Hz 帯域における LF を Fig. 3.20 に示す.Case 6 では客席中央部における LF が低く側方での値のばらつきが顕著であるのに対し,ヴォールトのないその他の 3 ケースでは中央部の値がより大きく,側方の値のばらつきが小さい.このことから,ヴォールト型天井が LF の客席位置による偏りを生んでいる可能性がある.また,ヴォールトのない 3 ケース間で比較すると,天井が高いほど客席中央後部での LF が大きい傾向が見られる.

ヴォールトの影響 ヴォールトの影響を調べるため, Case 6 と Case mid\_c について, Fig. 3.12 に示した受音点に到達した音線のうち,ヴォールト(Case mid\_c ではヴォールト位置の天井面)で1次または2次反射した音線数を反射回数5回のものまでカウントした.結果を Fig. 3.21 に示す.両ケースとも,全受音点において各受音点へ到達する音線の本数のうちヴォールト部分から到達した音線の本数の割合は同程度であるが,到達した音線の総数が Case 6 の客席中央部(center)では Case mid\_c の客席中央部(center)より非常に多くなっている.特に17番の受音点では約3倍近くの音線が到達している.

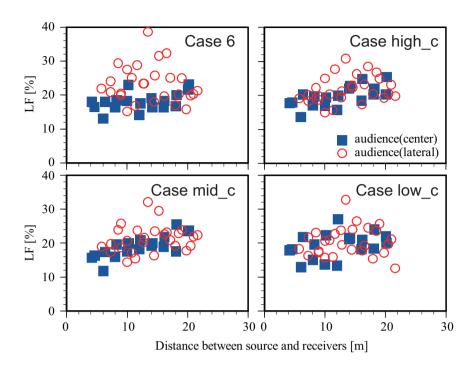


Fig. 3.20 Effect of the ceiling height on LF for 500Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

このことから,ヴォールト部により反射波が客席中央部へより多く供給されていることが確認できた.

#### 舞台側壁角度による影響

残響時間 Case 6 に比べて,体積の小さい Case 30deg では残響時間が短くなっているが,Case 10deg では残響時間はほぼ等しくなっている (Fig. 3.17). なお,Case 6 と Case 10deg の体積の差は 48 m³ であり,Case 6 と Case 30deg の体積の差は 145 m³ である. Case 6 では全点での解析値 ( $T_{30}$ ) の平均値より舞台上の値の方が大きいのに対し,Case 10deg,30deg では舞台上での値の方が大きくなっている.

 $C_{80}$  500Hz 帯域における  $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.22 に示す. Case 10deg では Case 6 よりも全体的に値が小さくなり,理論値の値と近くなったが, Case 30deg では Case 6 より全体的に値が大きくなっており,特に客席側方で値が大きくなっている. また,理論値よりも解析結果が大きくなっている. 舞台側壁に角度を付けたことにより客席への初期反射音が増加し,特に客席側方で値が大きくなったと考えられる.

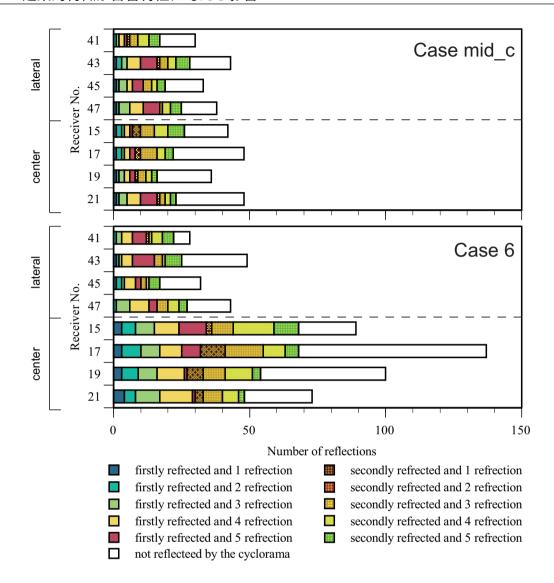


Fig. 3.21 Number of sound rays firstly or secondly reflected by the vault.

G 500Hz 帯域における G を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.23 に示す.舞台上での値に注目すると,Case 30deg では理論値に近いのに対し,Case 6 では理論値より著しく大きくなっている.これは Case 6 の舞台側壁が平行であるためと考えられ,舞台上の残響時間 (Fig. 3.17) と合わせて「舞台上で音がよく響く」「極めて演奏しやすい」[34] という評判と関連している可能性がある.

LF 500Hz 帯域における LF を Fig. 3.24 に示す . ケース間で大きな変化は見られなかった .

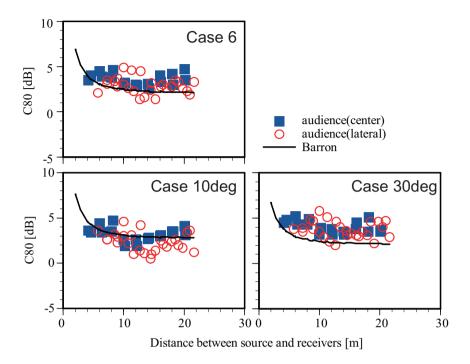


Fig. 3.22 Effect of the angle in stage sidewall on  $C_{80}$  for 500Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

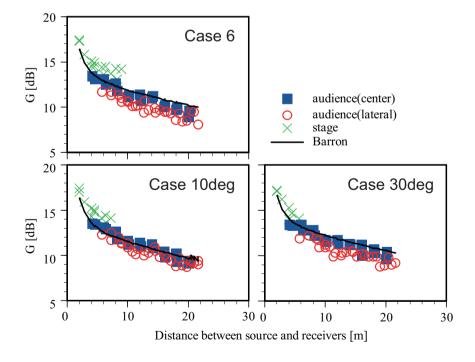


Fig. 3.23 Effect of the angle in stage sidewall on G for 500Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

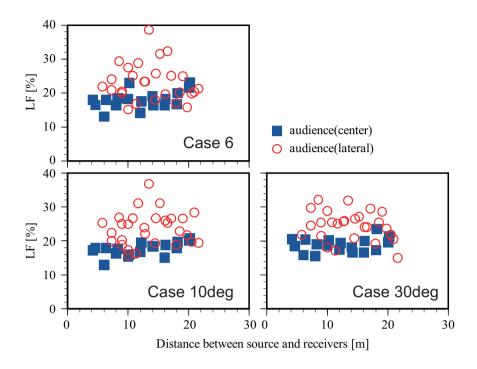


Fig. 3.24 Effect of the angle in stage sidewall on LF for 500Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

#### 化粧方杖・窓の有無による影響

残響時間 Case 6 と Case NoDiff の残響時間はほぼ等しくなっている. Case NoWinでは,窓部分の吸音率を変化させた影響で Case 6 に比べて著しく大きくなっている.

 $C_{80}$  500Hz 帯域における  $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.25 に示す. Case NoDiff では Case 6 より客席後部で値が多少小さくなり,理論値にあっている. Case NoWin では,理論値,解析値ともに値が著しく小さくなっているが,これは残響時間の増加に起因すると考えられる.

G 500Hz 帯域における G を Barron's revised theory による理論値とともに Fig. 3.26に示す.Case NoDiff と Case 6 では大きな変化は見られない.Case NoWin では,値が全体的に大きくなっており,これは  $C_{80}$  同様残響時間の増加に起因すると考えられる.

LF 500Hz 帯域における LF を Fig. 3.27 に示す. Case NoDiff では客席中央部分で LF の値が大きくなっている. 化粧方杖が壁付近での拡散に影響していることが示唆される. Case NoWin では値が全体的に大きくなっており,これは  $C_{80}$ , G と同様残響時間

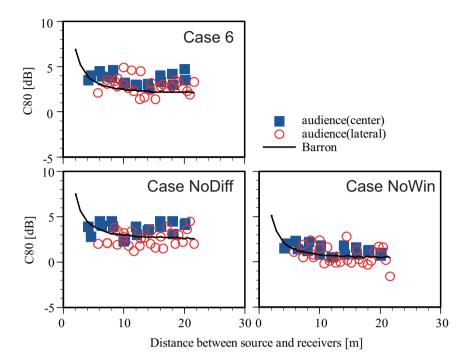


Fig. 3.25 Effect of diffuser on  $C_{80}$  for 500Hz octave band obtained by Barron 's revised theory and a geometrical acoustic program.

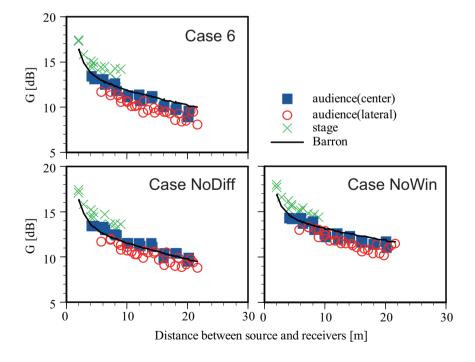


Fig. 3.26 Effect of diffuser on G for 500Hz octave band obtained by Barron 's revised theory and a geometrical acoustic program.

3.6 まとめ 51

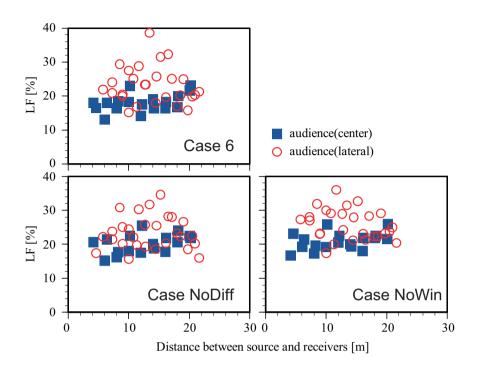


Fig. 3.27 Effect of diffuser on LF for 500Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

の増加に起因すると考えられる.

# 3.6 まとめ

室内音響設計の手法を紹介し,幾何音響解析手法の種類や特徴についてまとめ,解析に使用した商用幾何音響解析ソフト,CATT の特徴や本研究での設定についてを述べた.また,旧奏楽堂における改修・移築,及び特殊な建築的特徴が音響特性に与える影響について,商用幾何音響ソフトによる解析を通して考察した.

改修・移築による音響特性の変遷に関しては,建造当初は残響時間が現在ほど短くなかったこと,その一方で明瞭度や音量感は大きかったことが示唆された.これには当初存在した舞台サイクロラマ(現オルガン部分)の効果が大きかったと考えられる.

建築的特徴に関しては,天井,舞台側壁,化粧方杖,窓の影響について調べた.天井に関しては,ヴォールトがあることで客席幅方向中央部における音量感が増加し,客席位置での LF のばらつきが増加すること,明瞭度はヴォールト部以外の天井高さに依存しており,同程度の体積の矩形ホールに比べてより明瞭度が高いことが示唆された.舞台側壁に関しては,平行壁が舞台上の G の増加に寄与している可能性があり,「舞台上で音

がよく響く」などの評判と対応していた.化粧方杖に関しては,客席中央部における LF の低下に,窓に関しては,残響時間及び LF,G の低下, $C_{80}$  の増加に寄与していることが示唆された.

# 第4章

# 音響測定による現状の把握・分析

## 4.1 はじめに

旧奏楽堂の解体移築が検討されていた 1981 年の 11 月から 12 月にかけて,種々の演奏の録音や室内音響特性に関する諸測定とが実施されていたようで,音響測定に関しては,1973 年に東京芸術大学音響研究室,1975 年に NHK 総合技術研究所,1981 年に東京大学生産技術研究所がそれぞれ音響測定をしている [34].しかし,移築後に関しては音響測定が行われたという文献は見当たらない.本章では音響測定により旧奏楽堂の現在の音響性能を物理的に把握する.また,3章で行った幾何音響解析の結果との対応も確認する.

# 4.2 測定内容

音響測定は 2008 年 10 月 8 日 (水)に行った.インパルス応答,音圧レベル分布,話声伝送指数 (STI)を測定し,インパルス応答からは各種音響物理指標を算出した.

#### 音源・測定点位置

音源,測定点の位置を Figs. 4.6, 4.7 に示す. インパルス応答,音圧レベル分布測定用の音源には 12 面体スピーカーを用い,ステージ上幅方向中央に 1 点設置した (Fig. 4.6 の五角形印). また,その測定点はステージ上 11 点,客席 32 点の計 43 点とした (Fig. 4.6 の 印, は $ST_1$  測定用の点,Figs. 4.1, 4.2, 4.3 参照). STI 用の音源には専用の指向性スピーカーを用い (Fig. 4.4 参照),同様にステージ上幅方向中央に 1 点設置した (Figs. 4.6, 4.7 の台形印). 測定点は距離減衰を考慮して設定した 2 列を設けた (Fig. 4.5





Fig. 4.1 Speaker and microphons for impulse response measurement.

Fig. 4.2 Scene of sound pressure level measurement.



Fig. 4.3 Microphones for impulse response measurement.



Fig. 4.4 Cone type speaker for STI measurement.



Fig. 4.5 Microphones for sound pressure level and STI measurement.

参照). いずれも音源高さは  $1.5~\mathrm{m}$  , 測定点高さは  $1.2~\mathrm{m}$  ( 但し  $ST_1$  算出用の X0 , Y0 の み  $1.5~\mathrm{m}$  ) とした .

## 測定手順

### インパルス応答測定

音源として,12 面体スピーカーから Lin-TSP 信号を放射した(サンプリング周波数 48 kHz,次数 17,インパルス応答長 2.73 秒). S/N 比改善のための同期加算回数は 5回と

4.2 測定内容 55

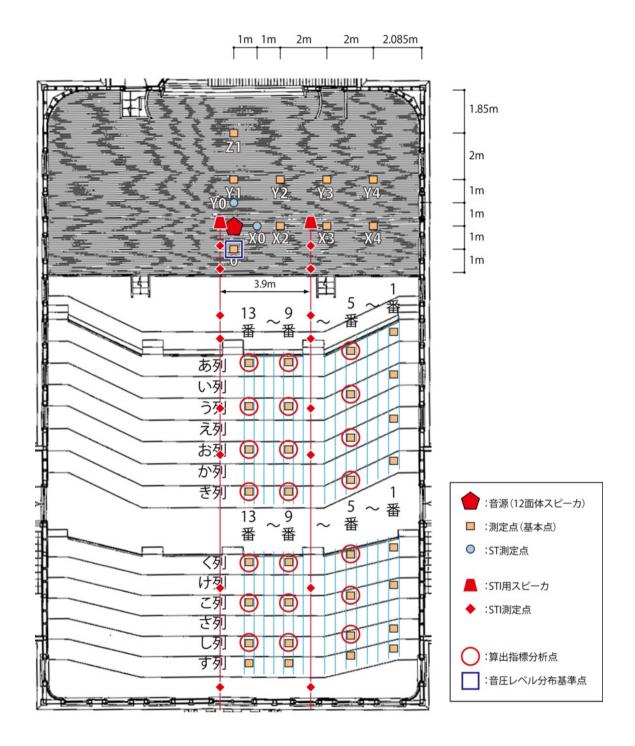


Fig. 4.6 Position of a source and receiving points[33].

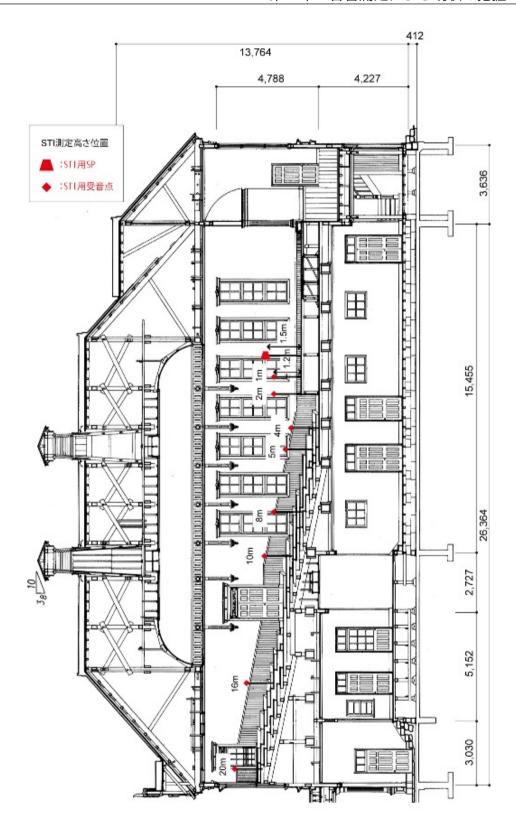


Fig. 4.7 Position of a source and receiving points for STI (Cross section) [33].

4.2 測定内容 57

した.測定点位置で得られた応答に逆 TSP を畳み込み,インパルス応答を得た.

#### 音圧レベル分布測定

音源として,12 面体スピーカーからピンクノイズを放射した.受音点位置で精密騒音計により 1/1 オクターブバンドごとの音圧レベルを測定した.

#### STI 測定

音源として,音声伝送性能測定用の指向性スピーカーから Log-TSP 信号を放射した(サンプリング周波数  $48~\mathrm{kHz}$ ,次数 16,インパルス応答長  $1.37~\mathrm{秒}$ ). S/N 比改善のための同期加算回数は  $5~\mathrm{回}$ とした.測定点位置で得られた応答に逆 TSP を畳み込み,得られたインパルス応答から STI を算出した.

## 測定条件

測定は以下の2条件で行った.いずれも空席時のみ測定した.

- 幕・カーテン収納状態 (Fig. 4.8): 幕を収納し,カーテン(レースカーテン以外)を開いた状態 (等価吸音面積最小).
- 幕・カーテン設置状態 (Fig. 4.9): 幕を設置し,カーテンを閉めた状態 (等価吸音 面積最大).

## 測定系統

以下に示す2つの測定系統を用いた.

測定系統 1:インパルス応答算出用 系統図を Fig. 4.10 に示す.機材を以下に列挙する. Fig. 4.12 参照.

- 音源系: 12 面体スピーカ (Brüel & Kjær, 4296), 三脚 (Brüel & Kjær, KE-0364), パワーアンプ (Brüel & Kjær, 2716), 測定用 PC (Dell, Latitude C400), ドッキングステーション (Dell, C-Dock II), AC 電源延長コード (ドラム, 30 m), ケーブル・コネクタ類
- 受音系 (×2): 騒音計 (ONO SOKKI, LA-1350), 三脚, マイクスタンド, BNC マイク延長コード (ドラム, 50 m), ケーブル・コネクタ類

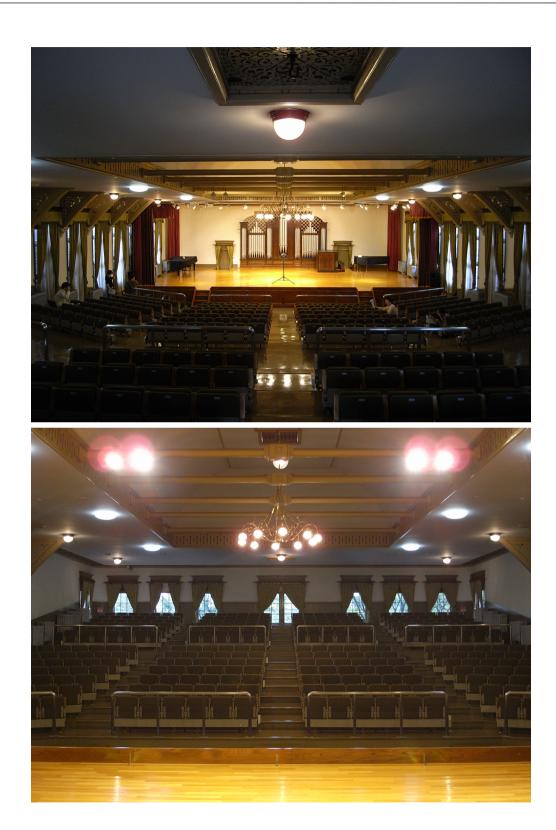


Fig. 4.8 Measurement situation (Open: Screens and curtains is stored).

4.2 測定内容 59

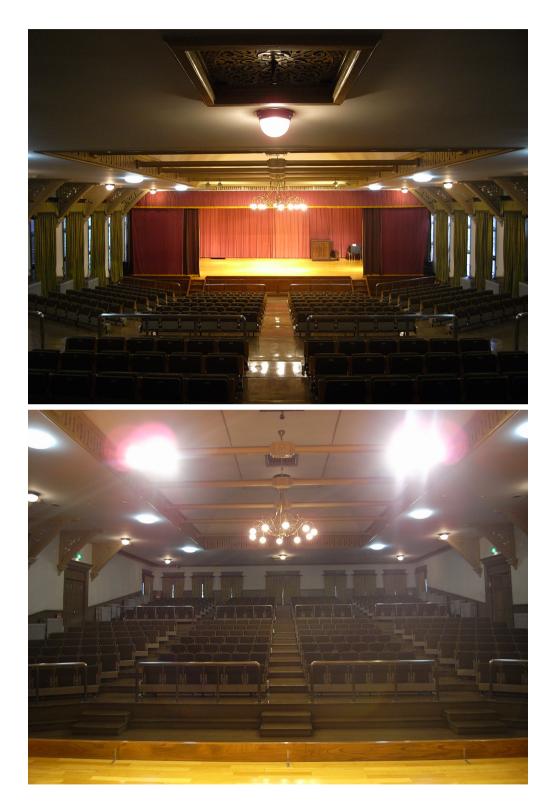


Fig. 4.9 Measurement situation (Close: Screens and curtains is set up).

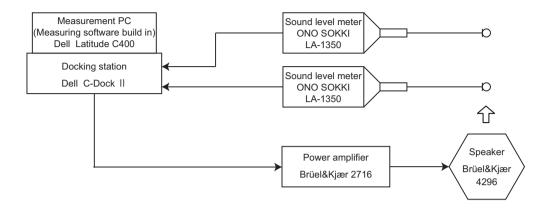


Fig. 4.10 Measurement system 1 (for impulse response).

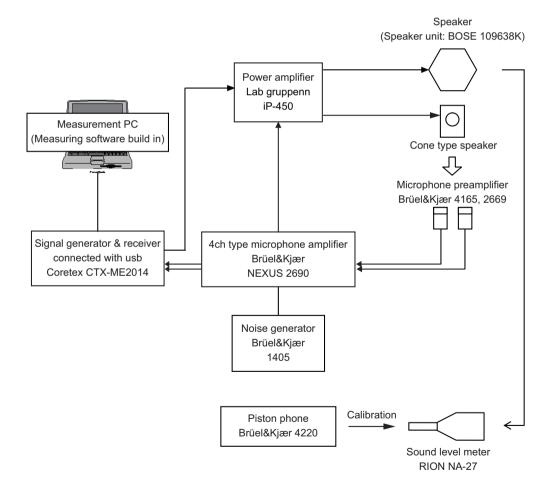


Fig. 4.11 Measurement system 2 (for Sound pressure level and STI).





Fig. 4.12 Measurement system 1.

Fig. 4.13 Measurement system 2.

測定系統 2:音圧レベル分布・STI 測定用 系統図を Fig. 4.11 に示す.機材を以下に列挙する. Fig. 4.13 参照.

- 音源系: 12 面体スピーカ (Speaker unit: BOSE, wide range SP), コーンタイプスピーカ, 三脚 (×2), パワーアンプ (Lab gruppenn, iP-450), 4ch タイプマイクアンプ (Brüel & Kjær, NEXUS 2690), USB 接続インパルス応答信号発生受信機 (Coretex, CTX-ME2014), 測定用 PC, ノイズジェネレーター (Brüel & Kjær, 1405), ケーブル・コネクタ類
- 受音系:マイクプリアンプ (Brüel & Kjær, 4165, 2669)(×2), 騒音計 (RION, NA-27), マイクスタンド (×2), ピストンホン (Brüel & Kjær, 4220), ケーブル・コネクタ類

## 4.3 測定結果と考察

ここでは,室内音響に関連する各種音響物理指標を測定結果を基に算出し,考察を加える.関連する音響物理指標やその Typical range 等との関係については 1.4.1 各種音響物理指標(p.6~, Tables 1.1, 1.2)を参照.以下,図・表中の"Open"は「幕・カーテン収納状態」,"Close"は「幕・カーテン設置状態」を表す.また,周波数特性の値は客席代表点(Fig. 4.6「算出指標分析点」) 21 点での値を算術平均したものであり,標準偏差も合わせて示している.図・表中の"single"は, Table 1.1 に示した single number frequency averaging の範囲で算術平均された単一指標値を指す.

## 測定時温湿度

測定時の気温・相対湿度を Table 4.1 に示す.気温  $\pm 1~^{\circ}\mathrm{C}$  ,相対湿度  $\pm 5~\%$  の範囲で測定を行うことが望ましいとされており [46],本測定はその範囲内である.

	Temperature [°C]	Relative humidity [%]
「幕・カーテン収納状態」測定前	22.9	72
「幕・カーテン設置状態」測定前	23.4	70
「幕・カーテン設置状態」測定後	23.4	71

Table 4.1 Temperature and relative humidity at the time of measurement.

## 残響時間 ( $T_{30}$ , $T_{20}$ )

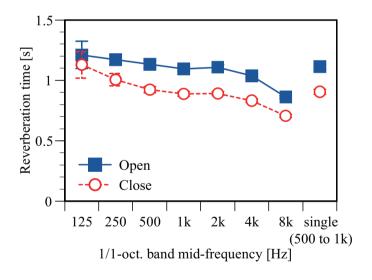


Fig. 4.14 Reverberation time obtained by measurement.

残響時間の周波数特性を Fig. 4.14 , Table 4.2 に示す . 125Hz 帯域では S/N 比の観点から  $T_{20}$  を , その他の帯域では  $T_{30}$  を採用した . また , 各種用途の最適残響時間 (500Hz) の範囲を示した図 [4] に旧奏楽堂の値をプロットしたものを Fig. 4.15 に示す . Fig. 4.15 より , 残響時間の長い「幕・カーテン収納時 (Open )」においても旧奏楽堂の残響時間は一般的なコンサートホールよりかなり短いことが読み取れる . 同様に , Table 1.2 の満席

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k	single (500 to 1k)
Open	1.21	1.17	1.13	1.09	1.11	1.04	0.86	1.12
Close	1.13	1.01	0.92	0.89	0.89	0.83	0.71	0.91

Table 4.2 Reverberation time obtained by measurement [s].

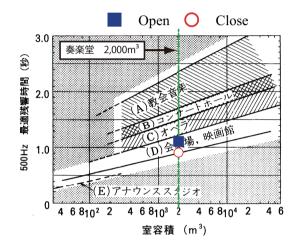


Fig. 4.15 Range of best reverberation time (500Hz) of various usages [4] and data of the old Sogakudo.

時の推奨値  $1.6 \sim 1.8$  秒と比較しても,測定が空席時であることを考慮すると非常に短い. 周波数特性に関しては低域から高域となるに従って短くなっている.この特性は,一般に言われる「音楽において好ましい」傾向と概ね一致しているものの,高周波数域での残響エネルギー減衰がやや顕著である.幕・カーテン収納状態(Open)と幕・カーテン設置状態(Close)では, $125~\rm Hz$ , $8~\rm kHz$  帯域を除き約  $0.2~\rm$ 秒( $0.16 \sim 0.22$ )程度である.

残響時間の分布を 1/1 オクターブバンドごとに Figs.  $4.16 \sim 4.19$  に示す.幕・カーテン設置の有無によらず,値の空間的なばらつきは 125~Hz 帯域を除いて小さい.また,ばらつきは高周波数域ほど小さくなっている.

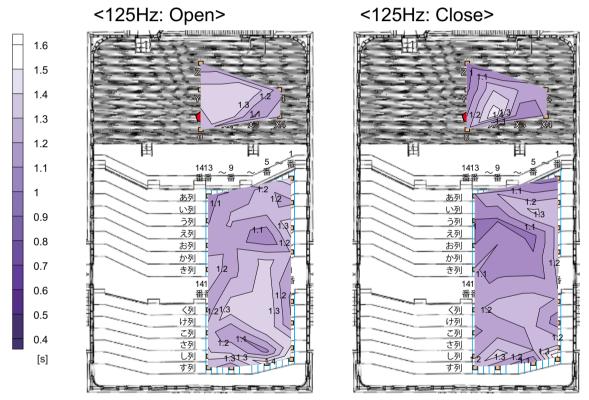


Fig. 4.16 Distribution of reverberation time (1) (left: Open, right: Close).

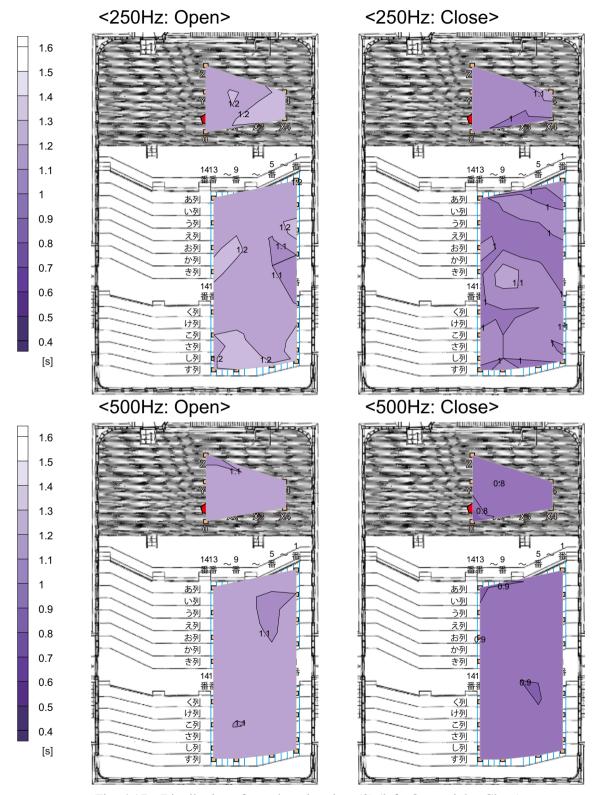


Fig. 4.17 Distribution of reverberation time (2) (left: Open, right: Close).

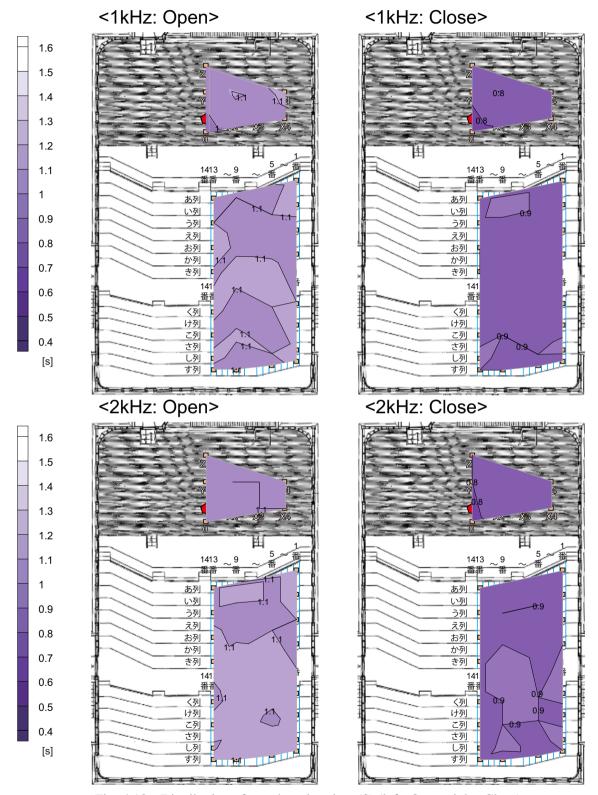


Fig. 4.18 Distribution of reverberation time (3) (left: Open, right: Close).

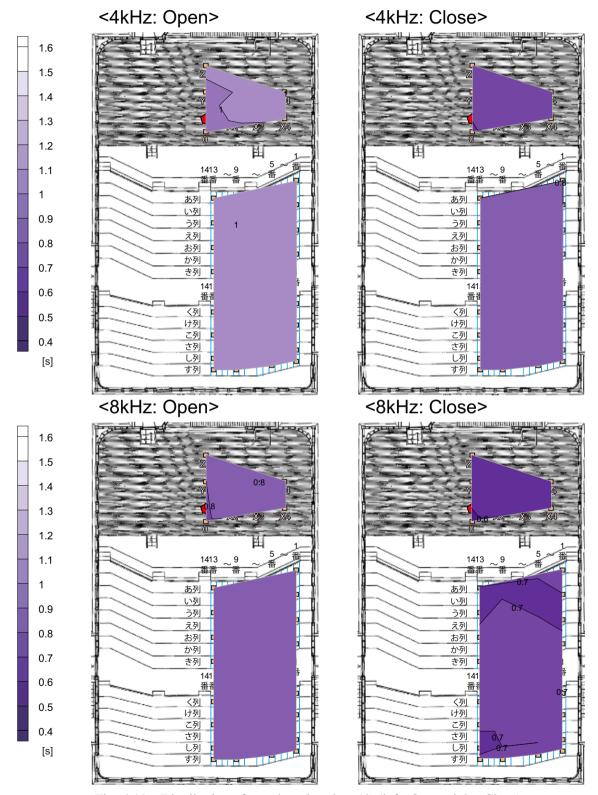


Fig. 4.19 Distribution of reverberation time (4) (left: Open, right: Close).

## 初期残響時間 (EDT)

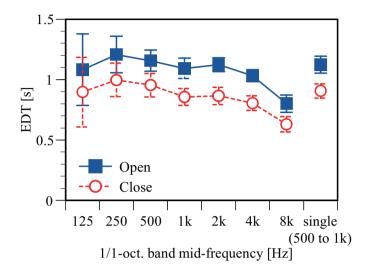


Fig. 4.20 Early decay time (EDT) obtained by measurement.

Table 4.3 Early decay time (EDT) obtained by measurement [s].

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k	single (500 to 1k)
Open	1.08	1.21	1.16	1.09	1.12	1.03	0.80	1.11
Close	0.90	1.00	0.95	0.86	0.86	0.81	0.63	0.91

初期残響時間 (EDT) の周波数特性を Fig. 4.20 , Table 4.3 に示す.残響時間と概ね同傾向であるが,全体的に偏差が大きく,特に低周波数域で顕著である.125 Hz , 8 kHz での値は残響時間よりもかなり短い."single" の値は推奨値(Table 1.2)の範囲を大きく下回っており,Typical range(Table 1.1)の下限値である 1.0 秒前後となっている.一般の室内楽ホールと比べて残響感が少ないと言える.幕・カーテン収納状態(Open)と幕・カーテン設置状態(Close)では,周波数帯域によらずおよそ  $0.2 \sim 0.3$  秒の差がある.JND(Table 1.1)が 5% < 0.1 秒 であることから,幕・カーテンの設置状況で聴衆に与える残響感を変化させることができると言える.

EDT の分布を 1/1 オクターブバンドごとに Figs.  $4.21 \sim 4.24$  に示す.残響時間と比べて空間的に値がばらついており,特に低周波数域で顕著である.また,幕・カーテン設置時の方がばらつきが大きい.測定点位置による違いとしては,低周波数域では傾向が見

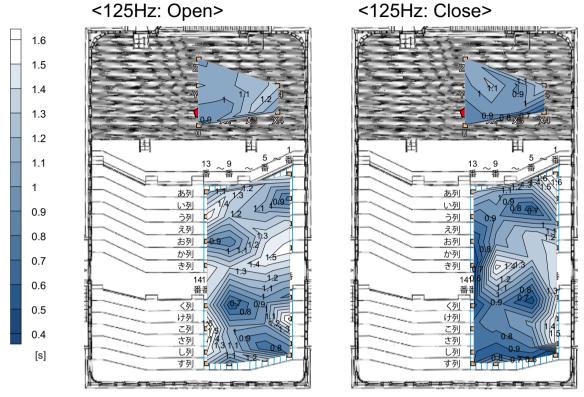


Fig. 4.21 Distribution of early decay time (1) (left: Open, right: Close).

られないが,高周波数域では客席前方付近で値が小さくなっており,この付近での高域での残響感が特に少ないと考えられる.

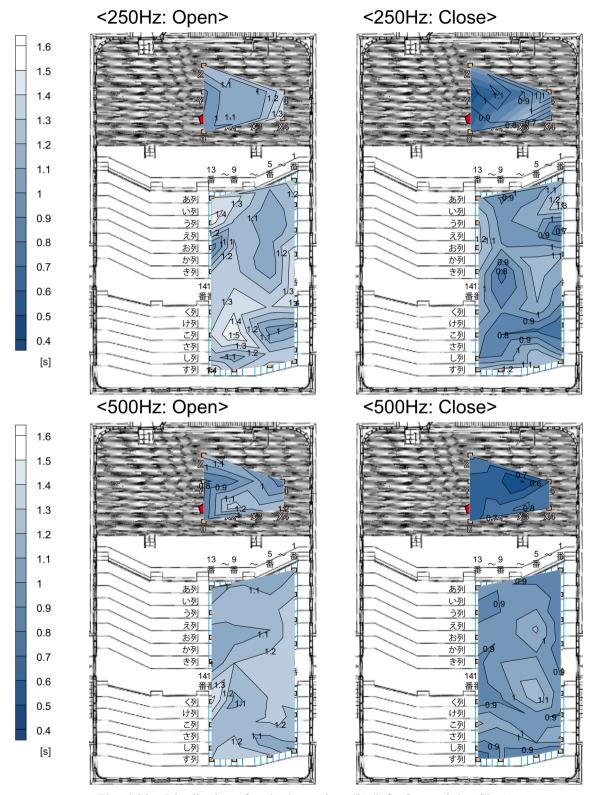


Fig. 4.22 Distribution of early decay time (2) (left: Open, right: Close).

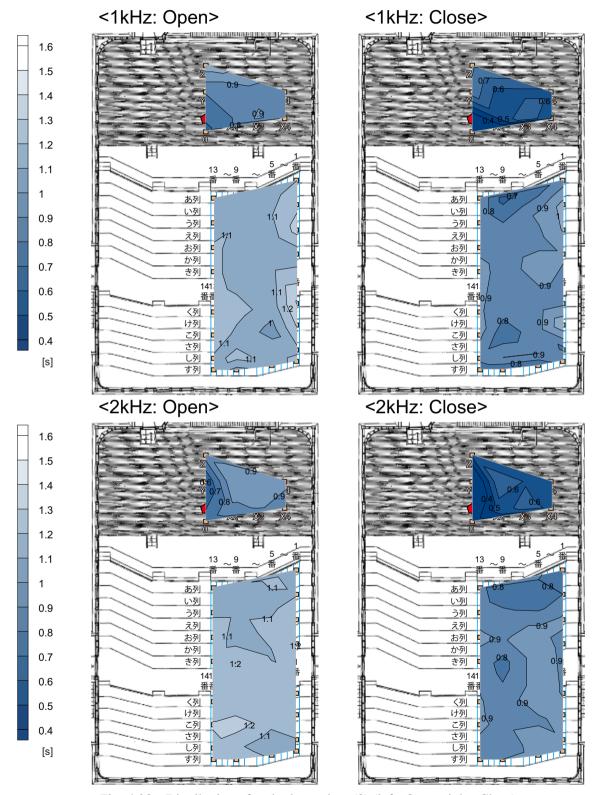


Fig. 4.23 Distribution of early decay time (3) (left: Open, right: Close).

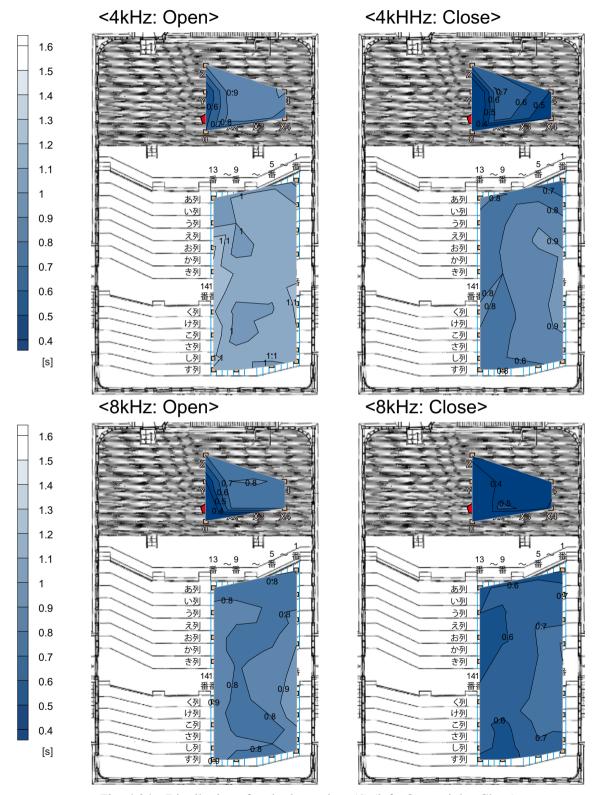


Fig. 4.24 Distribution of early decay time (4) (left: Open, right: Close).

## Clarity ( $C_{80}$ )

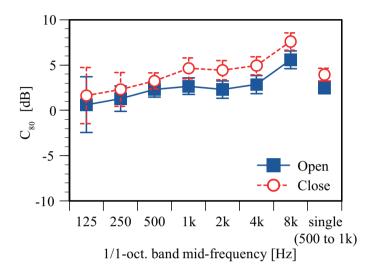


Fig. 4.25 Clarity ( $C_{80}$ ) obtained by measurement.

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k	single (500 to 1k)
Open	0.6	1.3	2.3	2.7	2.3	2.8	5.6	2.5
Close	1.6	2.3	3.2	4.6	4.4	4.9	7.6	3.9

Clarity ( $C_{80}$ ) の周波数特性を Fig. 4.25, Table 4.4 に示す.測定条件によらず,高周波数域ほど値が大きい.残響時間や EDT と比較すると,負の相関が非常に高いことがわかる."single" の値は測定条件によらず Typical range (Table 1.1) の範囲内であるが,いずれも推奨値(Table 1.2) の上限を上回っており,一般の室内楽ホールと比べて明瞭度が高いホールであると言える.幕・カーテン収納状態(Open)と幕・カーテン設置状態(Close)では,低周波数域で 1 dB 程度,高周波数域では 2 dB 程度の差がある.JND(Table 1.1)が 1 dB であることから,幕・カーテンの設置状況で明瞭度を変化させることができると考えられる.

 $C_{80}$  の分布を 1/1 オクターブバンドごとに Figs.  $4.26 \sim 4.29$  に示す.総じて客席中央前部で値が高くなっている傾向が見られる.低周波数域では空間的な値のばらつきが見られる.また,幕・カーテン設置状態(Close)の方が値が大きく,明瞭であると言える.

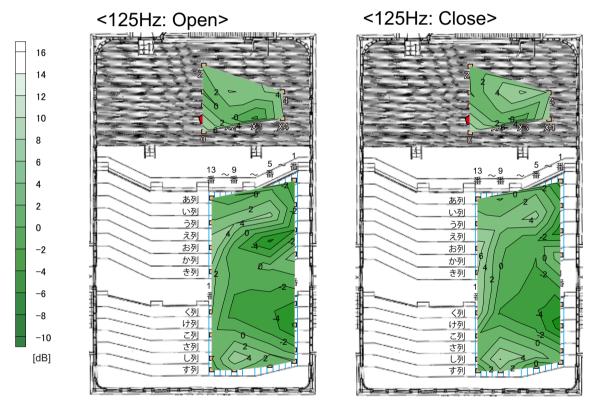


Fig. 4.26 Distribution of  $C_{80}$  (1) (left: Open, right: Close).

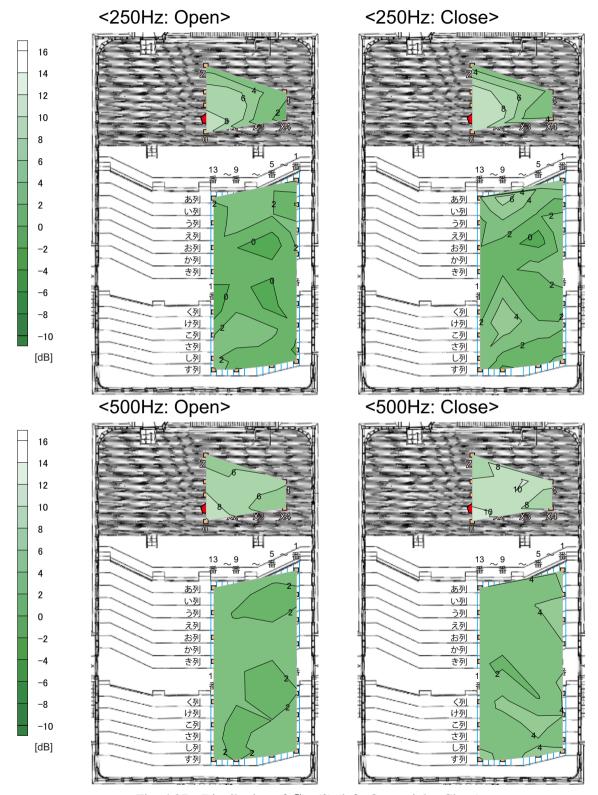


Fig. 4.27 Distribution of  $C_{80}$  (2) (left: Open, right: Close).

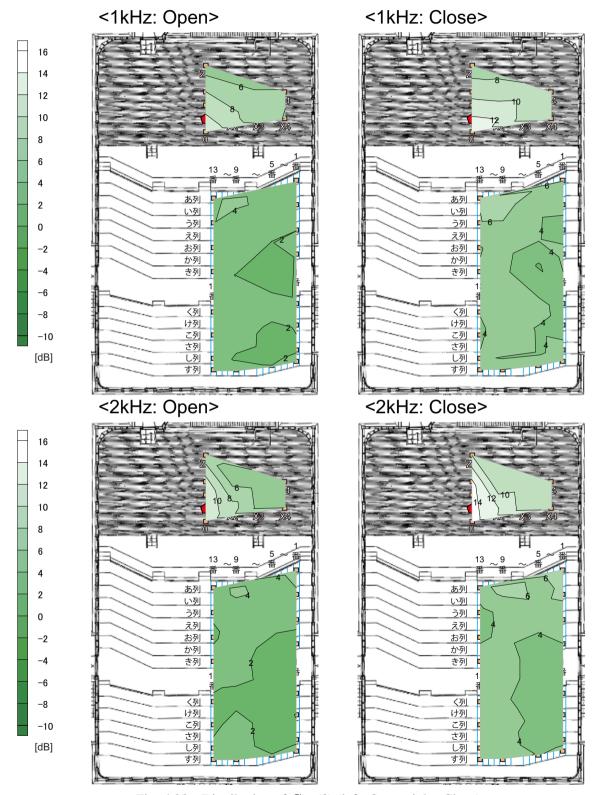


Fig. 4.28 Distribution of  $C_{80}$  (3) (left: Open, right: Close).

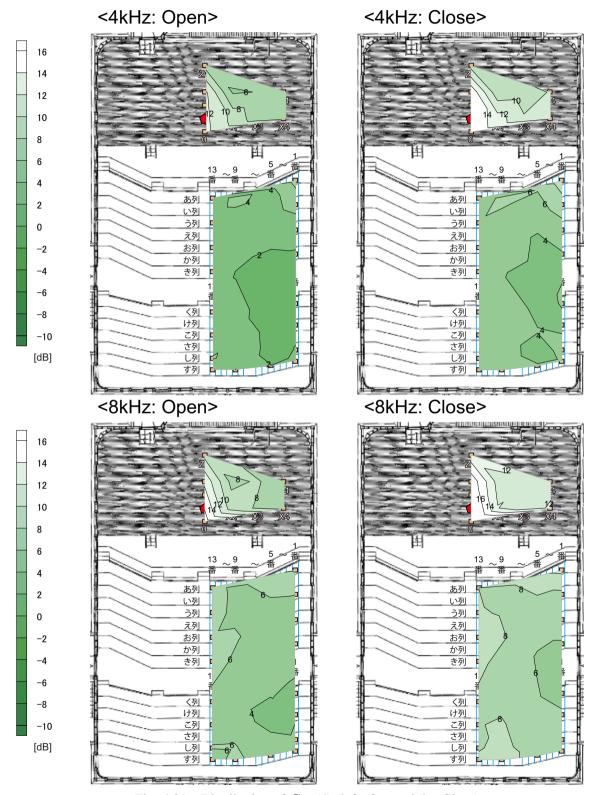


Fig. 4.29 Distribution of  $C_{80}$  (4) (left: Open, right: Close).

#### 相対音圧レベル

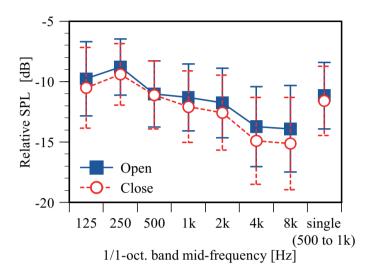


Fig. 4.30 Relative sound pressure level obtained by measurement.

Table 4.5 Relative sound pressure level obtained by measurement [dB].

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k	single (500 to 1k)
Open	-9.8	-8.8	-11.0	-11.3	-11.8	-13.7	-13.9	-11.2
Close	-10.5	-9.4	-11.1	-12.1	-12.6	-14.9	-15.1	-11.6

相対音圧レベルの周波数特性を Fig. 4.30 , Table 4.5 に示す.ここでの "single" は,ストレングス G に合わせ,500Hz と 1kHz の 1/1 オクターブバンド値を算術平均している.高周波数域ほど値が小さくなっている.これは残響時間が短くなっていることと対応している.標準偏差については,周波数域や測定条件に起因する傾向は見られない.測定条件間では,高周波数域(4 kHz,8 kHz:1.2 dB 差)を除いて 1 dB 未満の差となっており,ストレングス G の JND ( Table 1.1 ) である 1 dB より小さい.従って,幕やカーテンの設置状況を変化させても,残響感や明瞭度と比べて音量感には変化を与えにくいと考えられる.

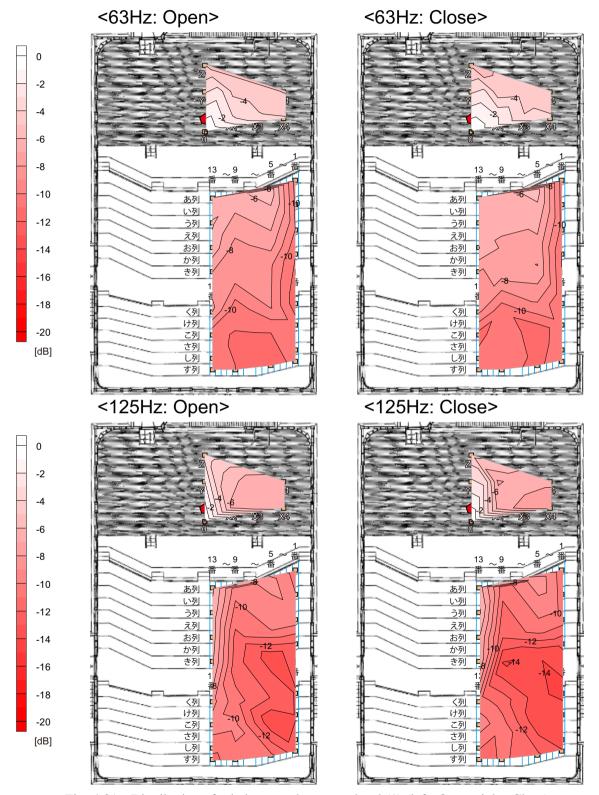


Fig. 4.31 Distribution of relative sound pressure level (1) (left: Open, right: Close).

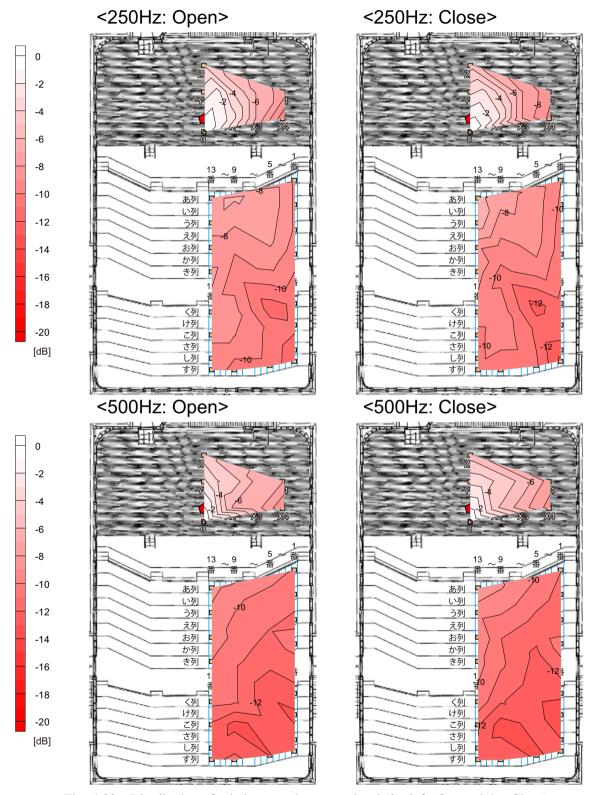


Fig. 4.32 Distribution of relative sound pressure level (2) (left: Open, right: Close).

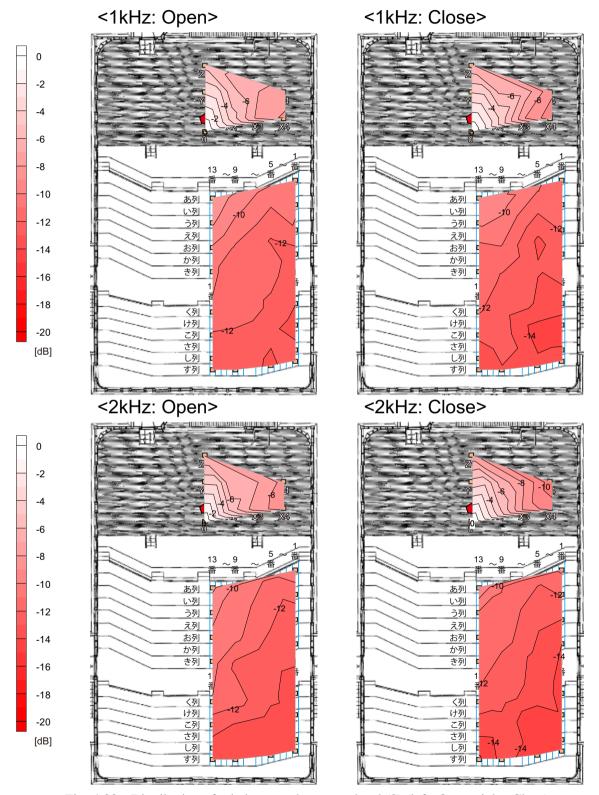


Fig. 4.33 Distribution of relative sound pressure level (3) (left: Open, right: Close).

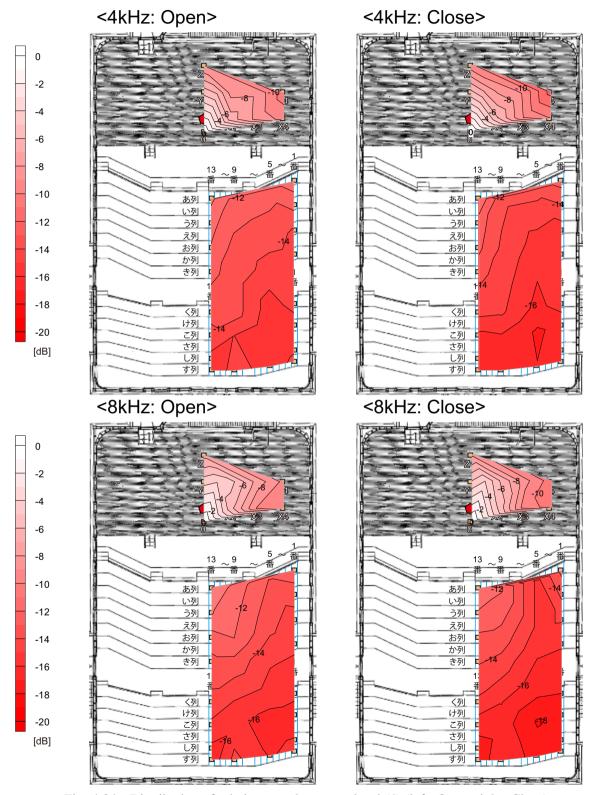


Fig. 4.34 Distribution of relative sound pressure level (4) (left: Open, right: Close).

#### 話声伝送指数 (STI)

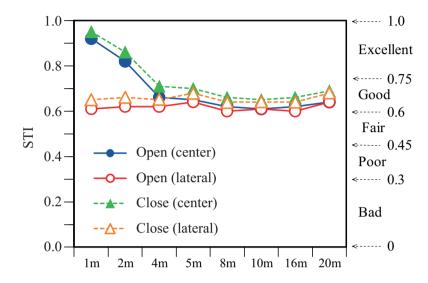


Fig. 4.35 Speech Transmission Index (STI).

Distance [m]	1	2	4	5	8	10	16	20
Open (center)	0.92	0.82	0.66	0.65	0.62	0.61	0.62	0.64
Open (lateral)	0.61	0.62	0.62	0.64	0.60	0.61	0.60	0.64
Close (center)	0.95	0.86	0.71	0.70	0.66	0.65	0.66	0.69
Close (lateral)	0.65	0.66	0.65	0.68	0.64	0.64	0.64	0.68

Table 4.6 Speech Transmission Index (STI).

測定点ごとの STI を Fig. 4.35 , Table 4.6 に示す . Fig. 4.35 の右側に , ISO 9921:2003 における Rating [44] を併記する . ここで , 図中の "center" はスピーカー正面 (中央通路) の測定点列を , "lateral" はスピーカー正面列から 3.9 m 平行に離れた測定点列を指す (Fig. 4.6 参照 ) . 全体的に音声の明瞭度は高く , 音源と測定点の距離が 2 m 以内の点では特に高い . 音源から 4 m 程度以上の距離であれば , 舞台上 , 客席によらず値はほとんど変わらない . また , 幕・カーテンの設置により , 測定点によらず多少の改善が見られる . 20 m の点で少し値が大きくなっているのは , 客席後壁からの反射音の影響と思われる .

## Support ( $ST_1$ )

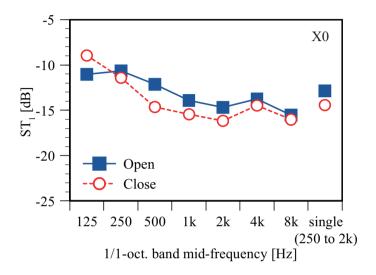


Fig. 4.36 Support ( $ST_1$ ) obtained by measurement (receiving point: X0).

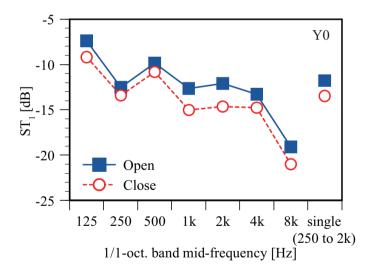


Fig. 4.37 Support ( $ST_1$ ) obtained by measurement (receiving point: Y0).

Support ( $ST_1$ ) の周波数特性を Figs. 4.36, 4.37, Table 4.7 に示す.測定点により傾向が異なっており,ステージ幅方向の中央に位置している測定点 Y0 での値は帯域の違いによる変動が大きい.測定点による違いは  $8~\rm kHz$  帯域で顕著であるが,これは高周波数域におけるスピーカーの指向性の違いが一因と考えられる.測定条件の影響について

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k	single (250 to 2k)
X0 (Open)	-11.0	-10.7	-12.1	-13.9	-14.7	-13.7	-15.5	-12.9
X0 (Close)	-9.0	-11.4	-14.6	-15.5	-16.2	-14.5	-16.0	-14.4
Y0 (Open)	-7.4	-12.5	-9.8	-12.6	-12.1	-13.3	-19.1	-11.8
Y0 (Close)	-9.2	-13.4	-10.8	-15.0	-14.6	-14.8	-21.0	-13.5

Table 4.7 Support ( $ST_1$ ) obtained by measurement[dB].

は,幕・カーテン収納状態(Open)の方が X0 の 125 Hz 帯域を除き値が大きく,その差は  $0.5 \sim 2.5$  dB である."single" の値はいずれも Typical range (Table 1.1) 内であり,Y0 (Open)では推奨値(Table 1.2)範囲内,その他の場合でも下限(-12 dB)をやや下回る程度である.幕やカーテンの設置状況によらず比較的演奏しやすいホールであると考えられる.

#### 4.3.1 幾何音響解析との比較

音響測定によって実際に得られた現在の旧奏楽堂の音響特性と,幾何音響解析結果と を比較する.

#### 残響時間

音響測定で得られた残響時間の周波数特性(受音点代表点での算術平均値, Fig. 4.14 の Open の値)を,幾何音響解析値(Fig. 3.8 の Case 6 の値)とともに Fig. 4.38 に示す. 周波数特性は,低域から高域となるに従って穏やかに短くなっており,125Hz 帯域を除き解析値とよく対応している.

#### 初期残響時間(EDT)

音響測定で得られた残響時間の周波数特性(受音点代表点での算術平均値, Fig. 4.20 の Open の値)を,幾何音響解析値とともに Fig. 4.39 に示す. 1kHz 帯域において 0.1 秒程度の乖離はあるものの,残響時間同様,解析値とよく対応している.

Fig. 4.40, 4.41 に幾何音響解析で得られた EDT の分布を示す. プロット点は,音響測 定時の受音点と等しい. 測定値(Figs. 4.21~4.24)と比較すると,測定値は,低域ほど受

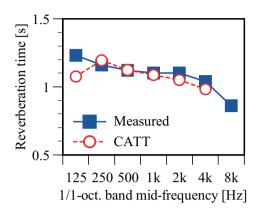


Fig. 4.38 Reverberation time obtained by measurement and a geometrical acoustic program.

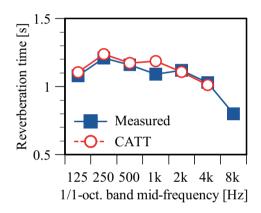


Fig. 4.39 Early decay time obtained by measurement and a geometrical acoustic program.

音点位置によって著しくばらついているのに対し,幾何音響解析値では周波数によるばらつきの差がほとんどないと言って良い.測定値の分布では,若干モードのようなものが見て取れるため,幾何音響解析が音の波動性を無視している手法である事によってこの違いが生じていると考えられる.

#### $C_{80}$

 $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値とともに Figs. 4.42, 4.43 に示す.幾何音響解析値は理論値に比べ全体的に値が大きい傾向であったが,測定値はむしろ理論値を下回るものが多い.客席位置による違いとしては,高域となるに従って客席中央後部付近の値が側方後部より大きくなる傾向が見られる.概して高域ほど(特に 8kHz 帯域において)理論値との関係が幾何音響解析結果と類似しており,客席中央付近での値が側方付近

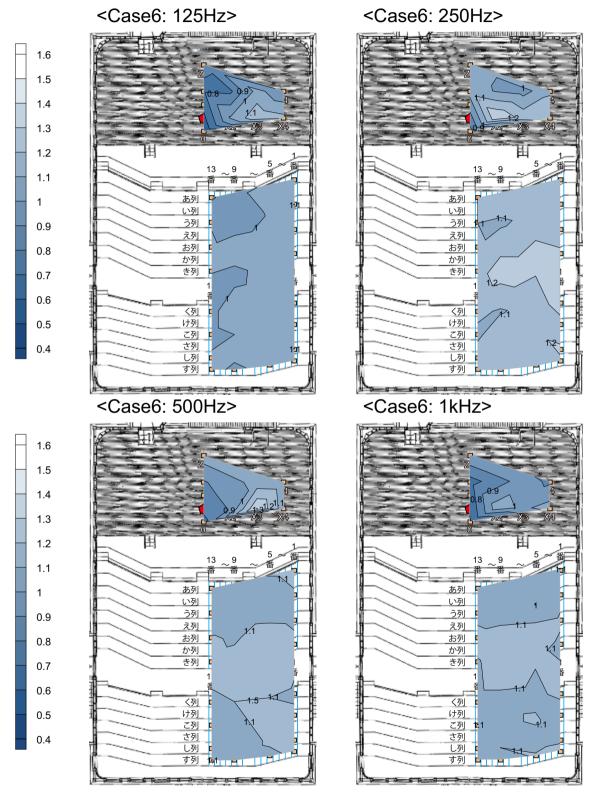


Fig. 4.40 Distribution of early decay time (1)  $(125 \sim 1 \text{kHz})$ .

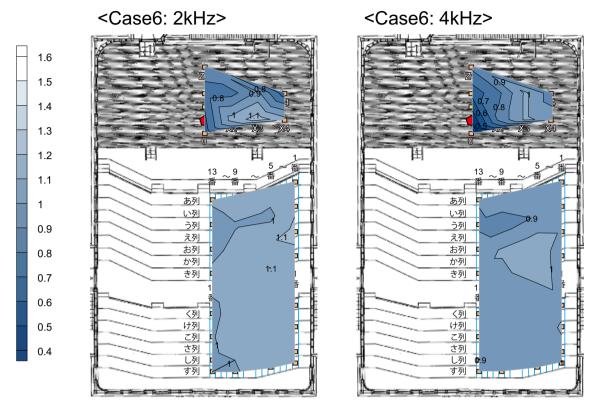


Fig. 4.41 Distribution of early decay time (2) (2k, 4kHz).

#### より大きく理論値よりも大きい傾向が見られる.

Figs.  $4.44 \sim 4.46$  に Case 0,6 での  $C_{80}$  の平面分布を示す.Figs.  $4.26 \sim 4.29$  と比較すると,Case 6 と測定値では,客席中央前部で値が高くなっているなど,多少傾向の類似がみられる.また,Case 0 を見ると,測定値や Case 6 と比べ客席中央部分での値が大きくなっているのがよく分かり,第 3 章で示唆されたサイクロラマの影響が見て取れる.

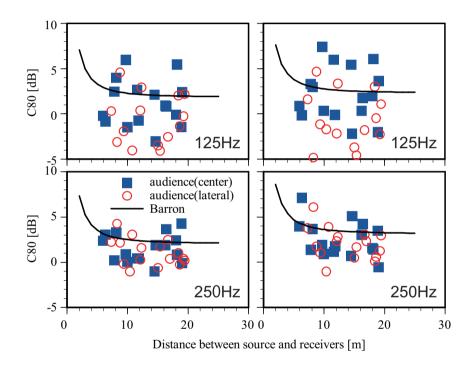


Fig. 4.42  $C_{80}$  obtained by Barron 's revised theory and measurement (1) (left: Open, right: Close).

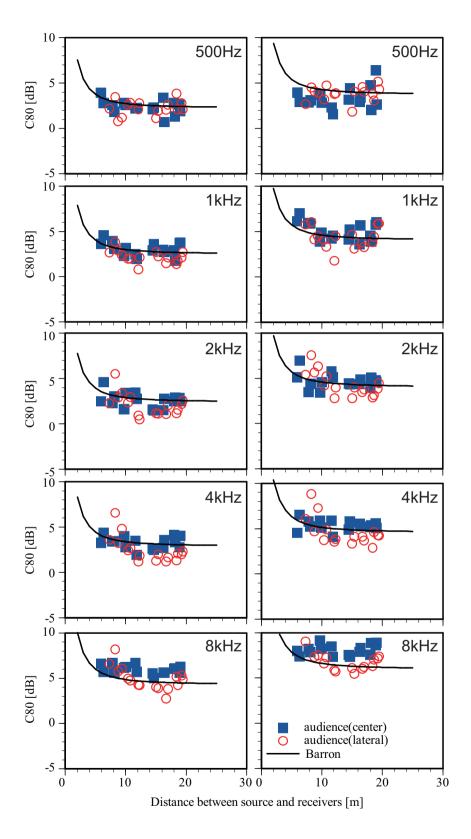


Fig. 4.43  $C_{80}$  obtained by Barron 's revised theory and measurement (2) (left: Open, right: Close).

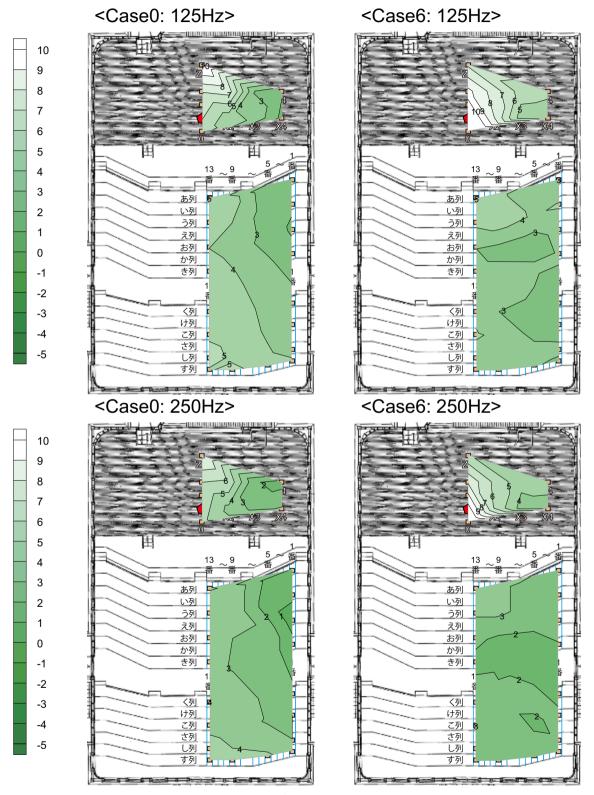


Fig. 4.44 Distribution of  $C_{80}$  (1) (left: Case 0 , right: Case6).

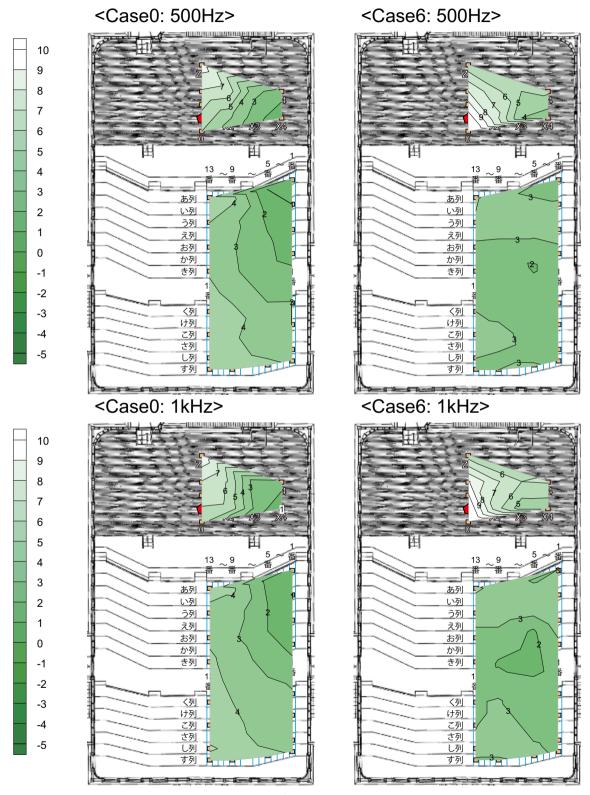


Fig. 4.45 Distribution of  $C_{80}$  (2) (left: Case 0 , right: Case6).

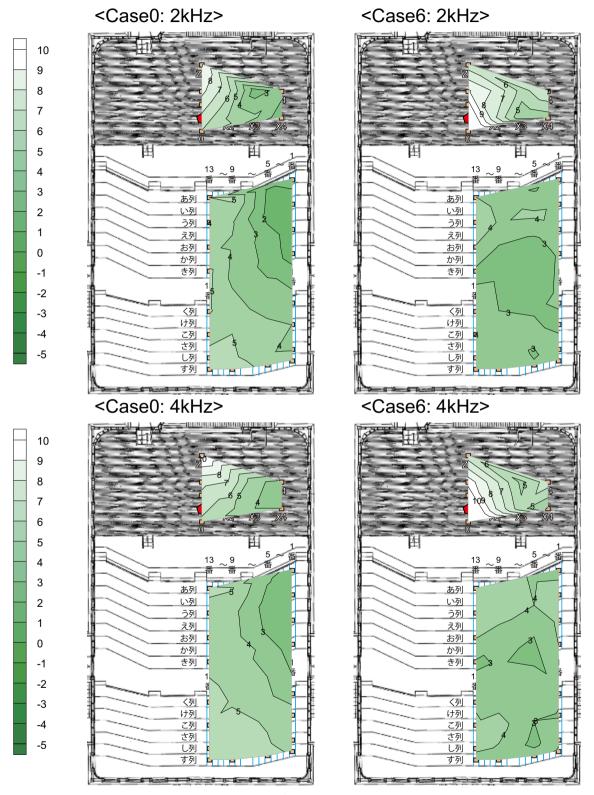


Fig. 4.46 Distribution of  $C_{80}$  (3) (left: Case 0 , right: Case6).

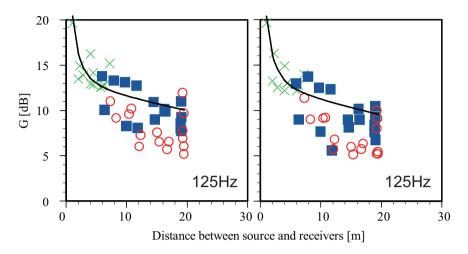


Fig. 4.47 G obtained by Barron 's revised theory and measurement (1) (left: Open, right: Close).

#### G (相対音圧レベル)

G を Barron's revised theory による理論値とともに Figs.  $4.47 \sim 4.49$  に示す.ただし,音源の最近紡受音点(音源からの距離  $1.04~\mathrm{m}$ )における音圧レベルが,同じ点での Barron's revised theory による G と一致するように基準化することで,近似的に求めている.広域になるほどばらつきが減少する一方,理論値からの乖離は大きくなっており,特に音源からの距離が大きいほど顕著である.これは幾何音響解析では見られなかった現象であり,座席による過剰減衰が原因と考えられる.客席中央付近の値が側方より大きめである点,舞台上の値が(若干ではあるが)大きめである点は幾何音響解析における G と対応している.音源からの距離  $20~\mathrm{m}$  の付近において値がばらつき上昇しているが,これは後壁からの反射の影響と考えられる.

Figs.  $4.50 \sim 4.52$  に Case 0,6 での G の平面分布を示す.Figs.  $4.31 \sim 4.34$  と比較すると,Case 6 と測定値では,客席中央前部で値が高くなっている点は類似している.また,Case 0 を見ると,測定値や Case 6 と比べ客席中央部分での値が大きくなっており, $C_{80}$  と同様,第 3 章で示唆されたサイクロラマの影響が見て取れる.

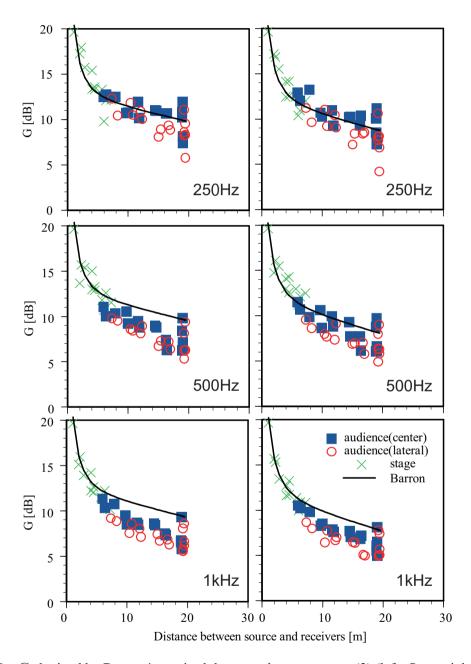


Fig. 4.48  $\,$   $\,$   $\,$   $\,$   $\,$   $\,$  obtained by Barron 's revised theory and measurement (2) (left: Open, right: Close).

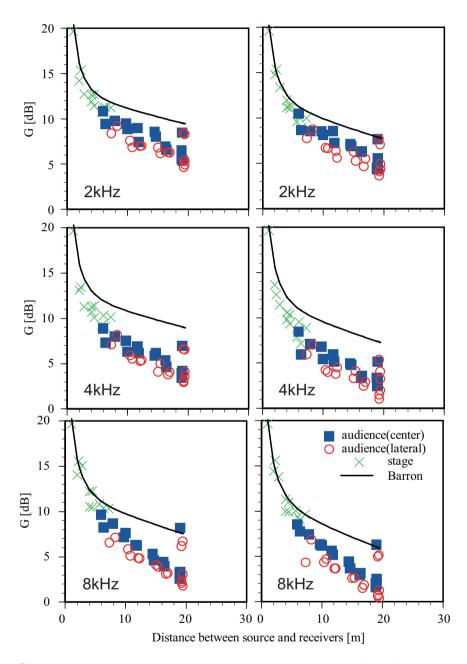


Fig. 4.49  $\,$   $\,$   $\,$   $\,$   $\,$   $\,$  obtained by Barron 's revised theory and measurement (3) (left: Open, right: Close).

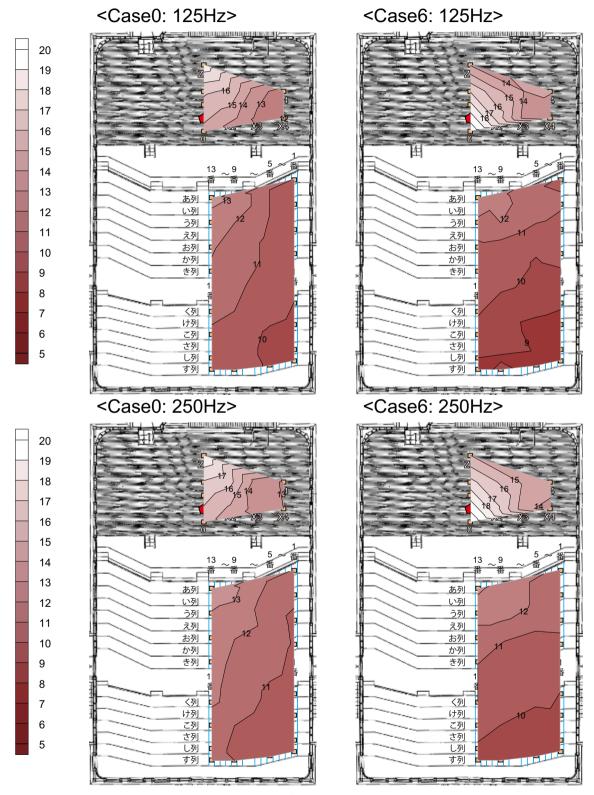


Fig. 4.50 Distribution of G (1) (left: Case 0 , right: Case6).

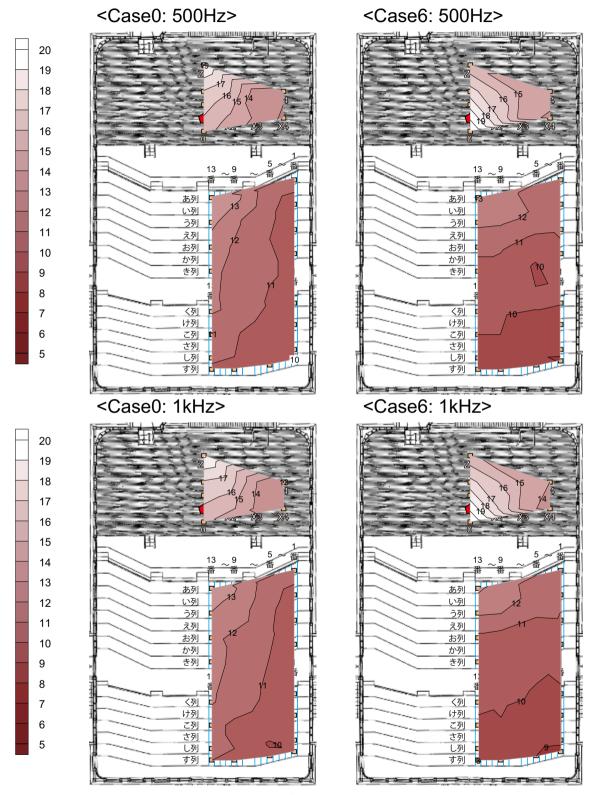


Fig. 4.51 Distribution of G (2) (left: Case 0 , right: Case6).

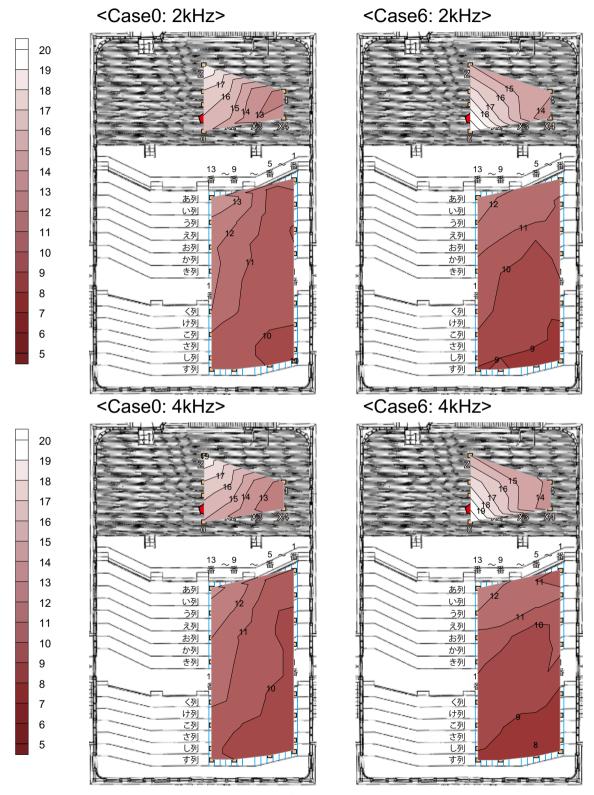


Fig. 4.52 Distribution of G (3) (left: Case 0 , right: Case6).

#### 4.3.2 既存のホールとの比較

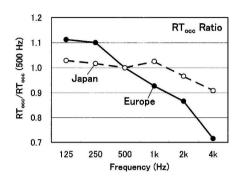


Fig. 4.53 Median values of the normalized RTs for European and Japanese halls[13].

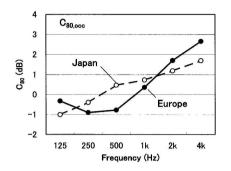


Fig. 4.54 Median values of the  $C_{80}$ 's for 18 chamber halls in two categories, Europe and Japan[13].

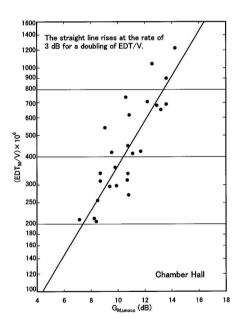


Fig. 4.55 The early decay time  $EDT_M$  divided by the volume V is plotted against the strength factor  $G_M[13]$ .

Fig. 4.53[13] に,日本とヨーロッパに存在するいくつかの室内音楽ホールの満席時の 残響時間を 500 Hz で基準化した平均値を示す. Fig. 4.14 と比べると,旧奏楽堂の残響時間の周波数特性は, Japan の平均値と Europe の平均値のちょうど中間に位置しているようである.

4.4 まとめ 101

Fig. 4.54[13] に , 日本とヨーロッパに存在する 18 の室内音楽ホールの満席時の  $C_{80}$  の平均値を示す . Fig. 4.25 と比べると , 旧奏楽堂の  $C_{80}$  の周波数特性は , この Japan の平均値と類似しているが , 全体的に値は大きくなっている .

Fig. 4.55[13] に , EDT と G との関係を表す図を示す ( いずれも空席時の値 ).ここでの EDT $_M$  は 500Hz と 1kHz の平均の EDT を表し , 直線から離れた位置にプロットされて いるホールは , メインフロアへの初期反射音の集中あるいはその反対の現象といった建築 的特徴があることを示している.旧奏楽堂の場合 ,  $EDT_M/V \times 10^6 = 554$  , G = 9[dB] であり , 示された直線よりも上方に離れた位置にプロットされることになる.

### 4.4 まとめ

旧奏楽堂の現在の音響性能を物理的に把握するため,音響測定を行った.得られた音響物理指標値について,以下に概略をまとめる.

残響時間については,測定条件によらず,コンサートホールにおける一般的な推奨値よりかなり短いことが確認された.一方その周波数特性に関しては,音楽において好ましいとされるやや低周波数域の持ち上がった特性であった.残響感と相関が高いとされる初期残響時間(EDT)についても文献推奨値 [46] を大きく下回っており,これらと対応して,クラリティ $C_{80}$  も推奨値の上限を上回った.これらのことから,旧奏楽堂は一般の室内楽ホールと比べて残響感が少なく,明瞭度が高いと言える.相対音圧レベルに関しても残響時間等と対応しており,高周波数域ほど値が小さい結果であった.話声伝送指数(STI)については,全ての測定点で"Good"以上の評価値であり,音源から 4 m 程度以上の距離であれば舞台上・客席によらず値はほとんど変わらなかった.Support( $ST_1$ )については,文献推奨値の下限をやや下回る程度であり,比較的演奏しやすいホールであると考えられる.

音響物理指標値の空間分布に関しては、いくつかの指標において客席位置による違いが見られた。具体的には,EDT は高周波数域において客席前方付近での値が小さく, $C_{80}$  は周波数域によらず概して客席中央前部で値が高めであった。相対音圧レベルは周波数域によらず客席中央付近の音圧レベルが高く,高周波数域ほど中央前方がより高くなる傾向が見られた。

幕・カーテンによる影響については , 設置した場合と収納した場合とで , EDT ,  $C_{80}$  において Just Noticeable Difference (JND) [46] を超える差が見られた . このことから , 残響感 , 明瞭度に関しては幕・カーテンの設置状況により変化を与えることができると考えられる . 一方相対音圧レベルに関しては , 同様の意味を持つストレングス G の JND を超

える変化は見られず,音量感には変化を与えにくいと考えられる.

幾何音響解析値との比較は,残響時間 ( $T_{30}$ , EDT) は解析結果とよく一致していた.  $C_{80}$  については,値の大きさについては対応が見られず,基本的には理論値との関係にも対応が見られなったが,高周波数域に限り,理論値との関係に対応が若干見られた.また,空間分布は対応が見られた.また,G についても値の大きさに対応は見られなかったが,空間分布や舞台上の値が大きいなど傾向の類似は確認できた.

## 第5章

# まとめ

コンサートホールの設計指針が明確化かつ画一化しつつある現在において,特殊な形状をしたコンサートホールは生まれにくく,近年誕生したホールには素晴らしいものも多いが,特別な個性を持っていないことが多いのが現状である.その中で,特殊な建築的特徴を持ちながらも長い期間好まれて使用され続けており,また,その音響についての評判が良い旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)は大変興味深い対象であった.そこで本研究では,旧奏楽堂の建築的特徴が音響特性に及ぼす影響を明確にすることで,今後の音響設計に生かす可能性に対する新たな知見を得ることを目的とした.また,旧奏楽堂の音響特性の変化を歴史的変遷という視点から明らかにし,さらに音響測定を行うことにより,歴史的・文化的価値の高い旧奏楽堂の現在の状態を把握することを目的とした.

第1章では研究背景と目的,論文構成について述べた.

第2章では奏楽堂の歴史と建築的特徴をまとめることにより,旧奏楽堂の歴史的・文化的価値を再確認した.日本で初めての音楽専用ホールであることの他に,旧奏楽堂の移築・保存問題を通して文化のあり方にも問いを投げかけたという意味で,歴史的・文化的価値は非常に高いと考えられる.また,音響を意識して作られたと考えられるヴォールトなどをはじめとした建築的特徴をまとめ,その特殊性を確認した.

第3章ではまず、室内音響設計手法の一つとして幾何音響解析手法の種類や特徴を整理し、解析に使用した商用幾何音響解析ソフト、CATT の特徴や本研究での設定についてを述べた。また、旧奏楽堂における改修・移築、及び特殊な建築的特徴が音響特性に与える影響について、商用幾何音響ソフトによる解析を通して考察した。改修・移築による音響特性の変遷に関しては、建造当初は残響時間が現在ほど短くなかったこと、その一方で明瞭度や音量感は大きかったことが示唆された。建設当初の小さい舞台とサイクロラマ(現オルガン部分)によるの効果が大きかったと考えられる。建築的特徴に関しては、天

104 第5章 まとめ

井高さとヴォールトの有無,舞台側壁角度,化粧方杖や窓の有無の影響について考察した.ヴォールトと低い天井・舞台側壁角度・化粧方杖・窓のそれぞれのケースにおいて各種音響特性に変化が見られ,旧奏楽堂の建築的特徴はその音響特性に影響を与えていることが確認できた.

第4章では旧奏楽堂の現在の音響性能を物理的に把握するため,音響測定を行った.旧奏楽堂は一般の室内楽ホールと比べて残響感が少なく,明瞭度が高いと言える結果となった.相対音圧レベルに関しても残響時間等と対応しており,高周波数域ほど値が小さい結果であった.話声伝送指数(STI)については,全ての測定点で"Good"以上の評価値であり,音声に関しても明瞭であった.Support ( $ST_1$ )の値は,文献推奨値の下限をやや下回る程度であり,比較的演奏しやすいホールであると言えることがわかった.また,残響感,明瞭度に関しては幕・カーテンの設置状況により変化を与えることができると考えられる結果になった.一方,相対音圧レベルに関しては幕・カーテンの設置状況により音量感には変化を与えにくいと考えられる.幾何音響解析値との比較は,残響時間は解析結果とよく一致していた.その他の指標では,値の大きさや理論値との関係にも対応があまり見られなかったが,高周波数域に限り,理論値との関係に対応が若干見られた.また,空間分布には多少対応が見られた.

旧奏楽堂の(主に舞台周りの)改修は,演奏形態の拡張や使い勝手の改善のために行われたものであったが,本研究では,その歴史的変遷を追う事で,音響の変化を意図していなかった改修が実際に音響特性に大きな影響を与えており,建設当初の音響特性と現在の音響特性では異なる点が明らかにされた.また,一般的なコンサートホールの設計では敬遠されがちな,凹面や平行な壁面によって,良い音響効果が与えられている事も確認され,今後の研究によっては新たな設計指針が提案されることもあり得るのではないかと考えられる.

# 参考文献

## 建築音響関係

- [1] http://www.musikverein.at/startseite.asp
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Concertgebouw
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Boston\_Symphony\_Hall
- [4] 前川純一,森本政之,阪上公博:建築・環境音響学(第2版),共立出版,2000.
- [5] L. L. ベラネク他: コンサートホールとオペラハウス,音楽と空間の響きと建築,シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005.
- [6] 羽入敏樹:室内音響指標值,日本音響学会誌 Vol. 60, No. 2, pp. 72-77, 2004.
- [7] V.L. Jordan: Acoustical Design of Concert Halls and Theatres, Applied Science Publishers, London, p. 179, 1980.
- [8] V.L. Jordan: A group of objective acoustical criteria for concert halls, Applied Acoustics, Vol. 14, pp. 253-266, 1981.
- [9] M. Barron, A.H. Marshall: Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure, Journal of Sound and Vibration, Vol. 77, pp. 211-232, 1981.
- [10] M. Barron, L-J. Lee: Energy relations in concert auditoriums.I, J.Acoust. Soc. Am. Vol. 84 (2), pp. 618-628, 1988.
- [11] 日本建築学会編:日本建築学会設計計画パンフレット 4 "建築の音環境設計「新訂版」", 彰国社, 1983.
- [12] 日本騒音制御工学会編:騒音制御工学ハンドブック,技報堂,2001.
- [13] Takayuki Hidaka and Noriko Nishihara: Objective evaluation of chamber-music halls in Europe and Japan, J.Acoust. Soc. Am. Vol. 116 (1), pp. 357-372, 2004.
- [14] 橘秀樹: ステージ音響, 小特集—室内音響設計の現状と課題—, 日本音響学会, Vol. 53, No. 4, pp. 306-310, 1997.
- [15] 小口恵司:最近のホール音響設計,小特集—室内音響設計の現状と課題—,日本音

106 参考文献

- 響学会, Vol. 61, No. 1, pp. 29-32, 2005.
- [16] 石井聖光: 小特集にあたって, 小特集—室内音響設計の現状と課題—, 日本音響学会, Vol. 53, No. 4, pp. 290-291, 1997.

## 音響シミュレーション関係

- [17] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden, 2002.
- [18] 小口恵司:ホール室内音響設計における模型実験,日本音響学会, Vol. 63, No. 9, pp. 531-536, 2007.
- [19] 坂本慎一:音場の可視化・可聴化技術の現状及び将来展望,小特集 –室内音響における最近の話題–日本音響学会誌, Vol. 61, No. 9, pp. 45-49, 2005.
- [20] 新井昭義,大川平一郎,石井聖光,橘秀樹:ザ・シンフォニーホールの音響について,日本音響学会建築音響研究会資料,AA-82-23,24,1982.
- [21] 豊田泰久,小野朗,浪花克治,稲生真,永田穂:サントリーホールの音響設計 その2:音響模型実験と音響特性,日本音響学会建築音響研究会資料,AA-86-29, 1986.
- [22] 石田康二:幾何音響学の考え方,特集:されど幾何音響シミュレーション,音響技術 No. 129, pp. 2-7, 2005, 3.
- [23] 尾本章:幾何音響学の考え方,特集:されど幾何音響シミュレーション,音響技術 No. 129, pp. 2-7, 2005, 3.
- [24] 日本建築学会編:室内音場予測手法—理論と応用—,日本建築学会,2001.
- [25] Hilmar Lehnert: Systematic errors of the ray-tracing algorithm, Applied Acoustics, Vol. 38, pp. 207-221, 1993.
- [26] Katsiaki Sekiguchi, Sho Kimura, and Tomoyuki Sugiyama: Approximation of impulse response thorough computer simulation based on finite sound ray integration, J.Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol. 6 (2), 1985.
- [27] G.M. Naylor: ODEON-Another hybrid room acoustical model, Applied Acoustics, Vol. 38, pp. 131-143, 1993.
- [28] Michael Vorlander: Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm, J. Acoust. Soc. Am. 86 (1), 1989.
- [29] J. Vian and D. Maercke: Calculation of the room impulse response using a ray tracing method, ICA symposium at Vancouver, pp. 74-78, 1986.
- [30] M. Vorländer and E. Mommertz, Definition and measurement of random-incidence

- scattering coefficients, Applied Acoustics Vol. 60, pp. 187-199, 2000.
- [31] L. Cremer, H. A. Müer, T. Schultz: Principles and Application of Room Acoustics. Volume 1, Applied Science Publishing.
- [32] Xiangyang Zeng, Claus Lynge Christensen, Jens Holger Rindel: Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model, Applied Acoustics, Vol. 67, pp. 771-786, 2006.

# 奏楽堂関係

- [33] 東京都台東区:旧東京音楽学校奏楽堂 移築修理工事報告書,1987.
- [34] 中村俊一,白砂昭一:東京芸術大学奏楽堂の建築と音響,音響技術 No. 41, pp. 51-55, 1983.
- [35] 前野まさる:旧東京音楽学校奏楽堂について,日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984,10.
- [36] 前野まさる:楽器としての奏楽堂, SPACE MODULATOR, 61, pp. 19-25, 1982.
- [37] 栗田晃穂:移築復元された奏楽堂-演奏公開はオルガン修復後の今秋から,音楽芸術, Vol. 45, No. 5, pp. 82-84, 音楽之友社, 1987, 5.
- [38] 栗田晃穂:奏楽堂の新たな出発-奏楽堂にふさわしいテ-マ性ある自主企画演奏会を音楽芸術, Vol. 45, No. 12, pp. 72-75, 音楽之友社, 1987, 12.
- [39] 朝日新聞, 1979年12月13日(木), ひと.
- [40] 東京新聞出版局·奏楽堂取材班:上野奏楽堂物語,東京新聞出版局,1987.
- [41] 官報 明治 23 年 5 月 15 日
- [42] 上野か犬山か-奏楽堂の行方混沌: 音楽芸術, Vol. 39, No. 3, pp. 70-72, 音楽之友社, 1981, 3.

#### 測定関係

- [43] ISO 17497-1:2004, Acoustics Sound-scattering properties of surfaces Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, International Organization for Standardization, 2004.
- [44] ISO 9921:2003, Ergonomics Assessment of speech communication, International Organization for Standardization, 2003.
- [45] ISO 3382:1997, Acoustics Measurement of room acoustic parameters International Organization for Standardization, 1997.
- [46] ISO/DIS 3382-1:2006, Acoustics Measurement of room acoustic parameters Part

108 参考文献

1: Performance rooms, International Organization for Standardization, 2006.

# その他

- [47] 建築用語辞典編集委員会編:図解建築用語辞典,理工学社,1998.
- [48] http://www.sekkeisekkei.net/sekkei\_ky/index.html
- [49] http://www.geocities.co.jp/Hollywood-Stage/9275/page008.html

# 謝辞

本論文は,筆者が東京大学新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻佐久間研究室修士課程在学中に行った研究をまとめたものです。この二年間,指導教官である佐久間哲哉准教授には,研究テーマ決めから物事の考え方,資料の作り方まで真摯に指導してくださいました.謹んで感謝の気持ちを申し上げます.

また, 佐久間研究室特任研究員の安田洋介氏には研究の具体的なアドヴァイスにとどまらず, 生活の様々な局面においても, 時には厳しく, 時には冗談も交えながら細かにご指導していただきました.

副指導教官の神田順教授には,自分では気づかずに通り過ぎてしまった問題に気づけるようなアドヴァイスをいただきました.

佐久間研究室博士課程の土屋裕造氏には,旧奏楽堂の測定の際には技術的なご指導に加え,実務経験のある方ならではの大変有益なご助言をいただきました.

旧奏楽堂館長の鮎川勝正様をはじめとしたスタッフのみなさまには,音響測定の際に 親身に対応して下さり,測定にご協力いただきました.

佐久間研究室の先輩である太刀岡勇気さん,江川健一さん,同期の上猶優美さん,三浦 啓祐君,李孝振さん,後輩の江田和司君,永井優花さん,孫媛媛さん,また,同じ院生室 で論文を書いた社会文化環境学専攻空間環境系の学生の皆様に大変お世話になりました. 多くの方々のご助力に対して,深く感謝申し上げます.

2009年1月26日 萬木 智子

# 関連発表論文

- 修士論文梗概
- 安田洋介, 萬木智子, 佐久間哲哉: 旧東京音楽学校奏楽堂の幾何音響解析 -改修による音響特性の変化-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp.397-398, 2008.
- 萬木智子, 安田洋介, 佐久間哲哉: 旧東京音楽学校奏楽堂の幾何音響解析 –建築的 特徴が音響特性に及ぼす影響–, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp.399-400, 2008.
- 安田洋介, 萬木智子, 佐久間哲哉: 旧東京音楽学校奏楽堂における室内音響特性の分析 –建築的特徴及び改修による影響–, 音響学会建築音響研資料, AA2009-9, (2009, 1).

# 旧東京音楽学校奏楽堂における室内音響特性の分析 —建築的特徴及び改修の影響について—

# Analysis of acoustical characteristics of the old Sogakudo, Tokyo Music School: Effects of architectural factors and renovation

学籍番号 076858

氏 名 萬木 智子(Yurugi, Tomoko)

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

#### 1. はじめに

旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)は、東京芸術大学音楽学部の前身であった東京音楽学校の校舎施設として1890(明治23)年に建造された日本初の音楽ホールである. 1980 年まで同学部内唯一の演奏会場として使用されてきており[1]、著名な音楽家たちの多くがこの旧奏楽堂から巣立っていった. そのため、日本の西洋音楽教育・演奏史においてとても重要な建造物であるといえる. また、国の重要文化財に指定されていながら現役のコンサートホールとして使われており、クラシック音楽をはじめ各種演奏会に利用されている.

旧奏楽堂は、およそ 120 年の歴史の中で数回の 改修及び移築を経ており、その過程で舞台形状や 内装が変化してきた。また、音響に影響を与えていると考えられる建築的特徴を有しており、現在多数 存在する一般的なコンサートホールとは大きく異なる形状をしているが、旧奏楽堂の音響を好ましいとする意見は多く、利用希望者は後を絶たないという。この生きた文化財である旧奏楽堂の歴史的・文化的価値を建築音響学の視点から考察し、歴史的変遷を明確にすることは重要であると考えられる。また、旧奏楽堂の持つ建築的特徴が、音響に及ぼしている影響を明確に位置付けることができれば、今後のコンサートホールの音響設計にも寄与するものが大きいと考えられる。

本研究では,歴史的変遷に伴う音響特性の変化

と建築的特徴が音響特性に与える影響の 2 点を軸 として旧奏楽堂を考察する. また,音響測定により 旧奏楽堂の現状の音響特性を把握し,数値解析結 果や利用者の評判と対応させながら考察する.

#### 2. 旧奏楽堂の概要

現在の旧奏楽堂について、断面図・平面図をFig. 1 [2] に示す. 木造であり、特徴として、床の階段状の傾斜、低い天井+ヴォールト型天井、舞台を含む箱形状、多数の窓とカーテン(舞台横含む)などが挙げられる. 舞台正面にオルガンが、側壁上部に化粧方杖が設置されている. 客席は現在 338 席で、椅子は薄い布張りである.

改修は舞台まわりの拡張を中心として, Fig. 2 [2] に示すように 8 回行われた. これ以後の大きな改修 は移築時に行われたのみであり, その際に昭和 7 年改修時(6 回目)の舞台形状に戻された.

#### 3. 幾何音響解析における検討

#### 3.1. 検討方法

商用幾何音響解析ソフトCATT-Acoustic v8 を用いて解析を行った.解析モデルの例を Fig. 3 に示す.図面 [2] を基に座標の位置出しを行った.モデル化については文献 [3,4] 等を参考にし,細かい凹凸を無視,客席部の階段状の床を斜面とする,客席形状を無視し床面に吸音率・乱反射率を与える,浮き梁・舞台への小階段を無視,等の簡略化を行った.吸音率については,Eyring-Knudsen の残響式による値が文献実測値(移築前) [5] と概ね

合致するよう, 文献 [1,6] 等を参考に決定した. 点音源は高さ 1.5 m とし, 水平位置は舞台中央の舞台端部から奥行方向に 2 m  $(Table\ 1$  の  $Case\ 2$  のみ 8 m)とした $(Fig.\ 2)$ . 室形状は左右対称であるため, 受音点は舞台・客席を含め, 室の半分に  $2\times 2$  m の格子状に  $60\sim 65$  点を設けた $(高さ\ 1.2\ m)$ .

#### 3.2. 移築・改修における音響特性の変化

建造当初(Case 0:サイクロラマあり), 移築直前(Case 1), 現在(Case 2:昭和7年改修時と同様)を比較する. 条件の違いを Table 1 に示す.

#### <u>結果と考察</u>

以下では代表して 500Hz 帯域の値を示す.

残響時間 理論値 (Eyring-Knudsen) と解析値 ( $T_{30}$ ) を Fig. 4 に示す。全体的に解析値が理論値より大きいものの,ケース間の関係は類似している。 体積が大きく吸音材料が少ない Case 0 が最も大きく,建設当初は後年ほど残響時間が短くなかったと考えられる。

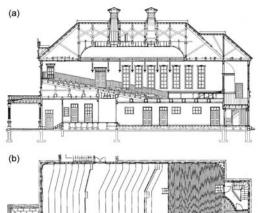
 $C_{80}$  Fig. 5 に  $C_{80}$  (明瞭度に関する指標)を示す(以下の図では適宜 Barron's revised theory による理論値を付記する). Case 0 では理論値に比べ全体的に値が大きく、特に客席中央部では音源位置が客席に近い Case 1,2 に比べても大きい. これはサイクロラマによる音波の集中に起因していると考えられる.

G Fig. 6 に G(音量感に関する指標)を示す. いずれのケースも理論値を概ね下回っているが, Case 0では理論値自体が大きく,  $C_{80}$  同様客席中央部でCase 1, 2 より大きな値となっている.

以上の結果より、旧奏楽堂は、当初は残響時間

Table 1: Difference of conditions among cases (renovative factors).

Case	0	1	2
舞台形状 (Fig. 2)	当初	8 回目改修	6回目改修
舞台後壁	サイクロラマ	オルガン	オルガン
舞台隅部	漆喰	カーテン	カーテン
客席後部天井	漆喰	吸音テックス	漆喰
体積 V [m³]	2,138	1,969	2,005
表面積 S [m <sup>2</sup> ]	1,307	1,264	1,270



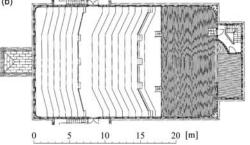


Fig. 1: (a) Cross section and (b) plan [2].

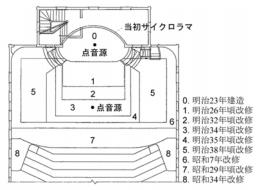


Fig. 2: Changes of the stage shape with renovation

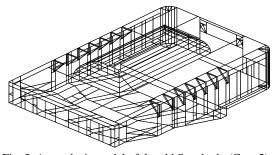


Fig. 3: An analysis model of the old Sogakudo (Case 2).

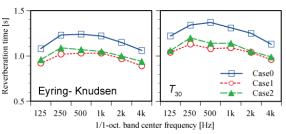


Fig. 4: Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

が現在ほど短くなく, その一方で明瞭度や音量感は大きかったことが示唆された.

## 3.3. 建築的特徴が音響特性に与える影響

ヴォールト無しで天井高さを変化させたもの (low\_c, mid\_c, high\_c), 舞台側壁角度を変化さ

せたもの、(10deg, 30deg), 化粧方 杖の無いもの(NoDiff), 窓の無いも の(NoWin)を基本形状(Case 2)と比 較する. 条件の違いを Table 2 に示 す.

#### <u>結果と考察</u>

天井の違いによる影響 天井高を 変化させた場合の  $C_{80}$ を Fig. 7に示 す. 体積がほぼ同じである Case 2と mid\_c では、残響時間はほぼ等しい 一方  $C_{80}$ は Case 2 の値が客席位置 によらず大きい. これは「最近の音楽 ホールにはない明瞭な音色を体験 できる」[1]という評価と対応している. 一方, Case 2 と low\_c では, 残響時 間は low\_c の方が短いにもかかわら ず,  $C_{80}$  の値はほぼ等しい. このこと から, C80 はヴォールト部の有無によ らず, その他の天井高に概ね依存し ていると考えられる. Gを Fig. 9 に示 す. ヴォールト部が無い場合では, 天井高によらず G が客席中央部で 小さくなり、客席位置による値のばら つきが減っている. このことから, ヴ オールト部により客席中央で音 が強まっていると考えられる.

舞台側壁角度による影響 舞台上での G は、舞台側壁に角度をつけると理論値とよく一致する (結果省略) のに対し、Case 2 では理論値より著しく大きくなっている (Fig. 8). 平行な

舞台側壁が舞台上の音を強めていると考えられ、「舞台上で音がよく響く」「極めて演奏しやすい」[5] という評判と対応している可能性がある.

**化粧方杖・窓の有無による影響** 方杖無しでは客 席中央部で *LF*(見かけの音源の幅に関係)の値が

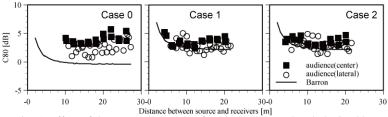


Fig. 5: Effect of the renovation on  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

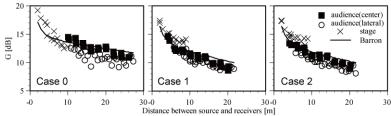


Fig. 6: Effect of the renovation on G for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

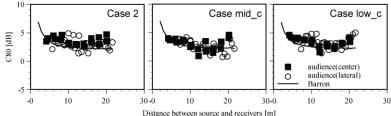


Fig. 7: Effect of the ceiling height on  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

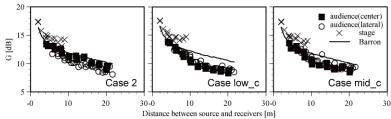


Fig. 8: Effect of the ceiling height on *G* for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

Table 2: Difference of conditions among cases (Architectural factors).

Case	2	high_c	mid_c	low_c	10deg	30deg	NoDiff	NoWin
天井高 [m]	5.45	7.45	5.88	5.45	-	-	-	-
ヴォールト	有	無	無	無	-	-	-	-
舞台側壁角度	0°	-	-	-	10°	30°	-	-
化粧方杖	有	¦ -	-	-	-	-	無	-
窓	有	<u> </u>	-	-	-	-	-	無
体積 V [m³]	2,005	2,631	1,986	1,786	1,957	1,860	2,005	2,005
表面積 S [m²]	1,270	1,390	1,259	1,223	1,246	1,181	1,240	1,270

大きくなった. 方杖が壁付近での拡散に影響していると考えられる.  $C_{80}$ , G は大きな変化はなかった. 窓無しの場合は, 吸音率の変化が影響したと考えられる結果になった.

#### 4. 音響測定による現状の把握・分析

音源・測定点の位置を Fig. 9 に示す. 音源点・受音点高さはそれぞれ 1.5 m, 1.2 m である.

#### 4.1. 結果と考察

残響時間 周波数特性(受音点代表点での算術平均値)を幾何音響解析値と共に Fig. 10 に示す. 周波数特性は高域になるに従い短くなっており, 125Hz 帯域を除き解析値とよく対応していた.

**C**<sub>80</sub> 500, 8kHz 帯域の値を Fig. 11 に示す. 幾何音響解析値(Fig. 5, Case 2)は理論値に比べ全体的に値が大きい傾向であったが, 500Hz 帯域での測定値は理論値と同程度である. 8kHz 帯域においては幾何音響解析結果と類似しており, 客席中央部の値が側方付近より大きく, 理論値より大きい傾向が見られる.

G 500,8kHz帯域の値をFig.12に示す.8kHzではばらつきが減少しているが、理論値からの乖離は大きく、特に音源からの距離が大きいほど顕著であ

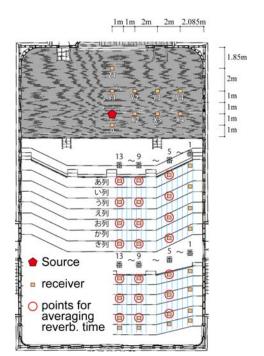


Fig. 9: Position of a source and receiving points.

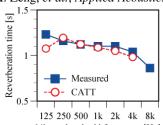
った. 客席中央付近の値が側方より大きめである点は幾何音響解析における G(Fig. 6, Case 2)と対応している. 音源からの距離 20 m の付近において値がばらつき上昇しているが, これは後壁からの反射の影響と考えられる.

#### 5. まとめ

本研究により、旧奏楽堂の建設当初の音響特性 を推定することができ、また、建築的特徴が旧奏楽 堂の音響特性に影響を与えていることが確認でき た. また、音響測定を行い、幾何音響解析結果との 傾向の類似をある程度確認することができた.

**参考文献** [1] L. L. ベラネク他, コンサートホールとオペラハウス, 音楽と空間の響きと建築, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005. [2] 東京都台東区, 旧東京音楽学校奏楽堂 移築修理工事報告書, 1987. [3] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden, 2002. [4] X. Zeng, *et al.*, *Applied Acoustics* 

67, 771-786, 2006. [5] 中村 他,音響技術 41,51-55,1983. [6] 日本騒音制 御工学会編,騒 音制御工学ハン ドブック,技報堂, 2001.



1/1-oct. band mid-frequency [Hz] Fig. 10: Reverberation time obtained by measurement and a geometrical acoustic program.

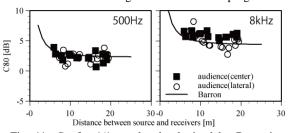


Fig. 11:  $C_{80}$  for 1/1-oct. bands obtained by Barron's revised theory and measurement.

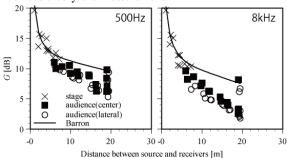


Fig. 12: G for 1/1-oct. bands obtained by Barron's revised theory and measurement.

音場解析室内音響幾何音響ホール奏楽堂室形状

#### はじめに

旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)は、床が一階段状が傾斜・天井が高くなく中央にヴォールト部を持つ・舞台も含めて箱状である・舞台横まで窓が設置されている[1]・側壁上部に化粧方杖が設置されている等、現在多数存在する一般のコンサートホールとは大きく異なる建築的特徴を持っているが、利用者からの評判は高い。前報[2]では旧奏楽堂の改修・移築に伴う音響特性の変化について考察した。本報では、旧奏

Table 1: Difference of conditions among cases.											
Case	Org	Org high_c mid_c low_c dig10 dig30 NoDiff NoWi									
天井高 [m]	5.45	7.45	5.88	5.45	-	-	-	-			
ヴォールト	有	無	無	無	-	-	-	-			
舞台側壁角度	0°	-	-	-	10°	30°	-	-			
化粧方杖	有	-	-	-	-	-	無	-			
窓	有	-	-	-	-	-	-	無			
体積 V [m³]	2,005	2,631	1,986	1,786	1,957	1,860	2,005	2,005			
表面積 S [m <sup>2</sup> ]	1,270	1,390	1,259	1,223	1,246	1,181	1,240	1,270			

楽堂の建築的特徴が音響特性に与える影響と利用者の評判との対応を,幾何音響手法を用いて考察する.

#### 解析手法

商用幾何音響解析ソフト CATT-Acoustic v8 を用いた. 本ソフトの特徴や本報で採用した設定,解析対象のモデリングについては前報[2]に準ずる.

解析ケース 旧奏楽堂の現在の形状を基本形状(Case Org)とし、モデル化したものを Fig. 1 に示す。天井高を変化させヴォールト部をなくしたもの(Case low\_c: ヴォールト部を除いた高さ、mid\_c: Case Org と体積がほぼ等しくなる高さ、high\_c: ヴォールト頂部の高さ)、舞台側壁の角度を客席側に変化させたもの(Case dig10、dig30)、化粧方杖のないもの(Case NoDiff)、窓のないもの(Case NoWin)を基本形状と比較する。条件の違いを Table 1 に示す。点音源は高さ 1.5m とし、水平位置は舞台中央の舞台端部から奥行方向に 2m とした。室形状は左右対称であるため、受音点は舞台・客席を含め、室の半分に  $2\times 2m$  の格子状に  $60\sim65$  点を設けた(高さ 1.2m).

#### 結果と考察

以下では代表して 500Hz 帯域のデータを示す. 各ケースの残響時間の解析値( $T_{30}$  の受音点での平均値と標準偏差)と 理論 値(Eyring-Knudsen)を Fig. 2 に示す. (stage) はステージ上での値を示す.

天井の違いによる影響 天井高を変化させた場合の LF を Fig. 3 に示す. ヴォールト部が無い場合, 天井高によらず 客席中央部の LF は大きくなり, 客席位置による値のばら つきが減っている. また, 天井が高い場合は客席中央後 部での LF が大きくなっている. このことから, ヴォールト部が LF の客席位置による偏りの, 天井の低さが客席後 方における LF の減少の原因といえる.  $C_{80}$  を Fig. 4 に示す

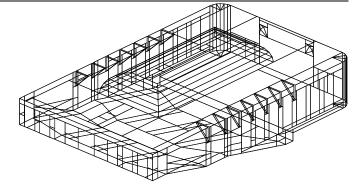


Fig. 1: An analysis model of the old Sogakudo.

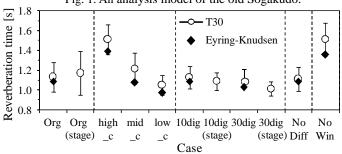


Fig. 2: Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

(以下の図では適宜 Barron's revised theory による理論値を付記する). 体積がほぼ同じである Case Org と Case mid\_c では、残響時間はほぼ等しい一方  $C_{80}$  は Case Org の値が客席位置によらず大きい. これは「最近の音楽ホールにはない明瞭な音色を体験できる」[3]という評価と対応している. 一方、Case Org と Case low\_c では、体積が小さい Case low\_c の残響時間が短いにもかかわらず、 $C_{80}$  の値はほぼ等しい. このことから、 $C_{80}$  はヴォールト部の有無によらず、その他の天井高に概ね依存しているといえる. G を Fig. 5 に示す. ヴォールト部が無い場合では、天井高

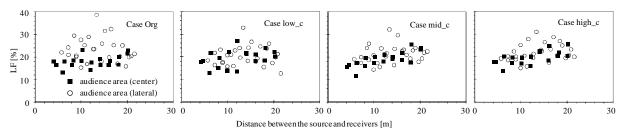
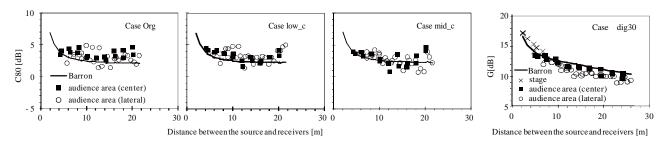


Fig. 3: Effect of the ceiling height on LF for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.



C80[dB]

Fig. 4: Effect of the ceiling height on  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

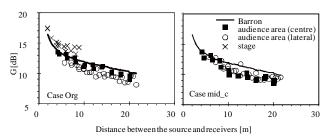
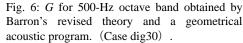
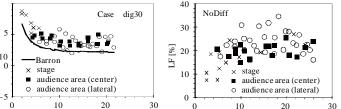


Fig. 5: Effect of the ceiling height on G for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

によらず G が客席中央部で小さくなり、客席位置による値のばらつきが減った. このことから、ヴォールト部により客席中央で音が強まっていると考えられる.

舞台側壁角度による影響 舞台角度が 30° の場合の G を Fig. 6 に示す。舞台上での値に着目すると、30° の場合は 理論値に近いのに対し、Case Org(Fig. 5)では理論値より著しく大きくなっている。これは Case Org(Fig. 5)の 舞台側壁が平行であるためと考えられ、舞台上の残響時間(Fig. 2)と合わせて「舞台上で音がよく響く」「極めて演奏しやすい」[1]という評判と対応している。角度 30° の場合の  $C_{80}$  を Fig. 7 に示す。Case Org(Fig. 4)と比べ客 席側方で値が大きい。これは初期反射音が増えたためと 考えられる。LF については大きな変化は見られなかった。 化粧方杖・窓の有無による影響 方杖を削除した場合の LF を Fig. 8 に示す。方杖無しでは客席中央部で LF の値が





Distance between the source and receivers [m]

Fig. 7  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program (Case dig30).

Distance between the source and receivers [m]

Fig. 8: *LF* for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program (Case NoDiff).

大きくなり、方杖が壁付近での拡散に影響していることが示唆される.  $C_{80}$ 、G は大きな変化はなかった. 窓無しの場合、残響時間の増加の他 (Fig. 2), LF、G 値では全体的に値が大きくなり、 $C_{80}$  は全体的に値が小さくなった. 吸音率の変化が結果に表れたと考えられる.

#### まとめ

旧奏楽堂の建築的特徴であるヴォールト部分,平行な舞台側壁,化粧方杖は音響特性に影響しており,一部の利用者の評価とも対応していることが示された.

#### 参考文献

- [1] 中村, 白砂, 音響技術 41,51-55 (1983).
- [2] 安田他, "旧東京音楽学校奏楽堂の幾何音響解析 一改修による音響特性の変化一", AIJ 梗概集 D-I (2008).
- [3] L. L. ベラネク他, コンサートホールとオペラハウス, 音楽と空間の響きと建築, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2005).
- \*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程
- \*2 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 特任研究員・博士(環境学)
- \*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授·博士(工学)
- \*1 Master Course, Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, B. Eng.
- \*2 Project Researcher, Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, Ph. D.
- \*3 Assoc. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

音場解析室内音響幾何音響ホール奏楽堂改修

#### はじめに

旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)は、東京芸術大学音楽学部の前身であった東京音楽学校の校舎施設として1890(明治23)年に建造された日本初の音楽ホールであり、国の重要文化財に指定されている.1980年まで同学部内唯一の演奏会場として使用されてきており[1]、日本の西洋音楽教育・演奏史における役割は大きい.現在でもクラシック音楽をはじめ各種演奏会に利用されている.一方、およそ120年の歴史の中で数回の改修及び移築を経ており、その過程で舞台形状や内装が変化してきた.本報では、文献[2]を基に旧奏楽堂改修の変遷を追い、商用幾何音響ソフトによる解析を通して、改修に伴う音響特性の変化について考察する.

#### 旧奏楽堂について

建築的特徴 現在の旧奏楽堂について、断面図・平面図を Fig. 1 [2] に示す. 木造であり、特徴として、床の階段状の傾斜、低い天井+ヴォールト型天井、舞台を含め箱状であること、多数の窓とカーテン(舞台横含む)などが挙げられる. 内装については、壁面:漆喰(腰壁:板張り)、床:リノリウム張り、天井:漆喰(移築前まで客席後部は吸音テックス張り)となっており、舞台正面にオルガンが、側壁上部に化粧方杖が設置されている. 客席は 388 席で、椅子は薄い布張りである.

改修・移築 [2,3] 改修で特記すべきは舞台まわりの拡張であり、Fig. 2 [2] に示すように 8 回行われた. これ以後の大きな改修は移築時に行われたもののみであり、これにより昭和 7 年改修時(6 回目)の舞台形状に戻された.

#### 検討方法

幾何音響解析手法 商用幾何音響解析ソフト CATT-Acoustic v8 [4] を用いた. 本ソフトは Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC) method を採用しており、特徴は以下のとおりである. (i) 1 次反射では、面の乱反射率に応じて鏡面反射と Lambert 則に応じた散乱反射成分を与える. (ii) 2 次反射以降では乱反射率に応じた確率でいずれかの反射成分を 1 方向のみ与える. 散乱成分とみなされた場合は、その方向はランダマイズされる. (iii) edge diffusion の効果を周波数毎に考慮し、面の乱反射率に組み込むことができる. (iv) 音線間隔が増大する後部時間応答部分は、初期・中期の応答から外挿される.

モデリングと設定 図面 [2] を基に座標の位置出しを行

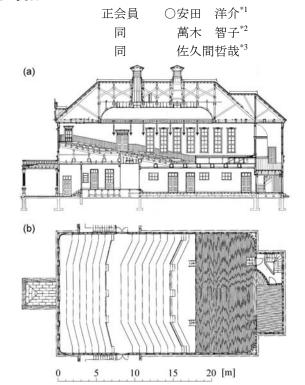


Fig. 1: (a) Cross section and (b) plan [2].

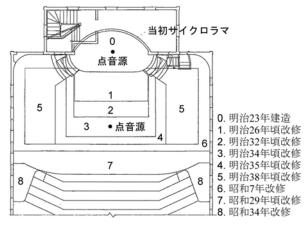


Fig. 2: Changes of the stage shape with renovation [2].

った. モデル化については文献 [4,5] 等を参考にし、細かい凹凸を無視、客席部の階段上の床を斜面とする、客席形状を無視し床面に吸音率・乱反射率を与える、浮き梁・舞台への小階段を無視、等の簡略化を行った.解析モデルの例については次報 [6] 参照.吸音率については、Eyring-Knudsen の残響式による値が文献実測値 [3] と概ね合致するよう、文献 [1,7] 等を参考に決定した.乱反射率については、客席部には  $125\sim4$ kHz の帯域ごとにそれぞれ  $0.3\sim0.8$  を与え、その他の面には帯域によらず 0.2 を与えた [4].側壁上部の化粧方杖には edge diffusion を考慮した.音線数は  $10^5\sim2\times10^5$  とした.

解析ケース 建造当初のもの (ケース 0:サイクロラマあ

り), 移築直前のもの (ケース 1), 現在のもの (ケース 3: 昭和 7 年改修時と同様) を比較する. 条件の違いを Table 1 に示す. 音源は高さ 1.5m とし, 水平位置は舞台幅 方向の中央, 舞台 6 の端部から奥行方向に 8 m (ケース 0), または 2 m (ケース 1, 2) とした (Fig. 2).

#### 結果と考察

残響時間の理論値(Eyring-Knudsen)と解析値( $T_{30}$ )を Fig. 3 に示す。全体的に解析値が理論値より大きいものの、ケース間の関係は類似している。体積が大きく吸音材料が少ないケース 0 が最も大きく、建造当初は後年ほど残響時間が短くなかったと考えられる。各ケースの 500Hz 帯域における  $C_{80}$ , G を Barron's revised theory による理論値と共にそれぞれ Figs. 4, 5 に示す。 $C_{80}$  に関しては、ケース 0 で理論値に比べ全体的に値が大きく、特に客席中央部では音源位置が客席に近いケース 1, 2 に比べても大きい。これはサイクロラマによる音波の集中に起因していると考えられる。G に関してはいずれのケースも理論値

を概ね下回っているが、ケース 0 では理論値自体が大きく、 $C_{80}$  同様客席中央部でケース 1, 2 より大きな値となっている。各ケースの 500Hz 帯域における LF を Fig. 6 に示す。客席位置によらずケース 0 では値が小さくなっており、 $C_{80}$  及び G が大きいことが側方からの寄与でないことが確認できる.

#### まとめ

旧奏楽堂は、当初は残響時間が現在 ほど短くなく、その一方で明瞭度や音 量感は大きかったことが示唆された.

#### 参考文献

[1] L. L. ベラネク他, コンサートホールとオペラハウス, 音楽と空間の響きと建築,シュプリンガー・フェアラーク東京 (2005). [2] 東京都台東区, 旧東京音楽学校奏楽堂 移築修理工事報告書 (1987). [3] 中村他,音響技術41,51-55 (1983). [4] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden (2002). [5] X. Zeng, et al., Applied Acoustics 67,771-786 (2006). [6] 萬木他, "旧東京音楽学校奏楽堂の幾何音響解析 一建築的特徴が音響特性に及ぼす影響—", AIJ 梗概集 D-I (2008). [8] 日本騒音制御工学会編,騒音制御工学ハンドブック,技報堂 (2001).

Table 1: Difference of conditions among cases.

Case	0	1	2
舞台形状 (Fig. 2)	当初	8 回目改修	6 回目改修
舞台後壁	サイクロラマ	オルガン	オルガン
舞台隅部	漆喰	カーテン	カーテン
客席後部天井	漆喰	吸音テックス	漆喰
体積 V [m³]	2,138	1,969	2,005
表面積 S [m²]	1,307	1,264	1,270

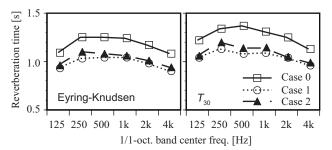


Fig. 3: Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

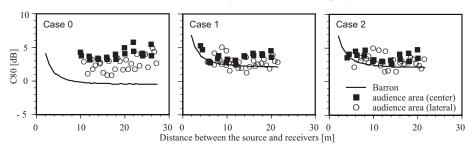


Fig. 4:  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

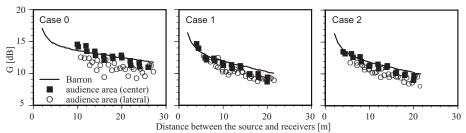


Fig. 5: G for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

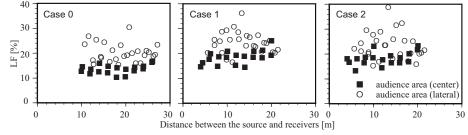


Fig. 6: LF for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

- \*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 特任研究員・博士(環境学)
- \*2 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程
- \*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授·博士(工学)
- \*1 Project Researcher, Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, Ph. D.
- \*2 Master Course, Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, B. Eng.
- \*3 Assoc. Prof., Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

## 旧東京音楽学校奏楽堂における室内音響特性の分析 一建築的特徴及び改修による影響―

Room acoustic analysis of the old Sogakudo, Tokyo Music School: effects of architectural factors and renovation

安田洋介,萬木智子,佐久間哲哉 Yosuke Yasuda, Tomoko Yurugi and Tetsuya Sakuma

東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 Department of Socio-Cultural Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

**内容概要** 旧東京音楽学校奏楽堂における改修・移築,及び特殊な建築的特徴が音響特性に与える影響について,商用幾何音響ソフトによる解析を通して考察した。改修・移築による音響特性の変遷に関しては,建造当初は残響時間が現在ほど短くなく,その一方で明瞭度や音量感は大きかったことが示唆された。建築的特徴に関しては,天井のヴォールトが客席中央部における音量感の増加,客席位置でのLF のばらつきの増加に寄与し,明瞭度はその他の天井高さに依存していること,平行な側壁が舞台上のG の増加に寄与していることなどが示唆された。また,音響測定により旧奏楽堂の現状の把握,及び幾何音響解析結果との対応の確認を行った。

#### 1. はじめに

旧東京音楽学校奏楽堂(旧奏楽堂)は、東京芸術大学音楽学部の前身であった東京音楽学校の校舎施設として1890(明治23)年に建造された日本初の音楽ホールであり、国の重要文化財に指定されている. 1980年まで同学部内唯一の演奏会場として使用されてきており[1]、日本の西洋音楽教育・演奏史における役割は大きい. 現在でもクラシック音楽をはじめ各種演奏会に利用されている. 一方、現在多数存在する一般のコンサートホールとは大きく異なる建築的特徴を持っており、コンサートホールの設計指針が明確化かつ画一化しつつある現在においては興味深い対象であると言える. また、およそ120年の歴史の中で数回の改修及び移築を経ており、その過程で舞台形状や内装が少しずつ変化してきた.

本報では、旧奏楽堂の特殊な建築的特徴がその音響特性に与える影響について、また、数回の改修・移築が音響特性に与えてきた影響について、商用幾何音響ソフトによる解析を通して考察する。解析において必要となる旧奏楽堂の建築的特徴及び改修・移築の変遷に関する情報については、主として移築

修理報告書 [2] に拠ることとする. また, 旧奏楽堂の音響測定を行い, 現状の把握及び幾何音響解析結果との対応の確認を行う.

#### 2. 旧奏楽堂について

#### 2.1. 建築的特徴

現在の旧奏楽堂について、断面図・平面図を Fig. 1 [2] に示す。木造であり、特徴として、床の階段状の傾斜、低い天井+ヴォールト型天井、舞台を含め箱状であること、多数の窓とカーテン(舞台横含む)などが挙げられる。内装については、壁面:漆喰(腰壁:板張り)、床:リノリウム張り、天井:漆喰(移築前まで客席後部は吸音テックス張り)となっており、舞台正面にオルガンが、側壁上部に化粧方杖が設置されている。客席は338 席で、椅子は薄い布張りである。

#### 2.2. 改修・移築 [2,3]

改修で特記すべきは舞台まわりの拡張であり、Fig. 2[2] に示すように8回行われた.これ以後の大きな改修は移築時に行われたもののみであり、これによ

り昭和7年改修時(6回目)の舞台形状に戻された.

#### 3. 検討方法

#### 3.1. 幾何音響解析手法

商用幾何音響解析ソフトCATT-Acoustic v8 [4] を用いた. 本ソフトは Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC) method を採用しており、特徴は以下のとおりである. (i) 1 次反射では、面の乱反射率に応じて鏡面反射と Lambert 則に応じた散乱反射成分を与える. (ii) 2 次反射以降では乱反射率に応じた確率でいずれかの反射成分を1 方向のみ与える. 散乱成分とみなされた場合、その方向はランダマイズされる. (iii) edge diffusion の効果を周波数毎に考慮し、面の乱反射率に組み込むことができる. (iv) 音線間隔が増大する後部時間応答部分は、初期・中期の応答から外挿される.

#### 3.2. モデリングと設定

図面 [2] を基に座標の位置出しを行った. モデル化については文献 [4,5] 等を参考にし、細かい凹凸を無視、客席部の階段上の床を斜面とする、客席形状を無視し床面に吸音率・乱反射率を与える、浮き梁・舞台への小階段を無視、等の簡略化を行った. 解析モデルの例を Fig. 3 に示す. 吸音率については、Eyring-Knudsen の残響式による値が文献実測値(1981 年測定) [3] と概ね合致するよう、文献 [1,6,7] 等を参考に決定した. 乱反射率については、客席部には 125~4kHz の帯域ごとにそれぞれ 0.3~ 0.8 を与え、その他の面には帯域によらず 0.2 を与えた [4]. 側壁上部の化粧方杖には edge diffusion を考慮した. 音線数は  $10^5$ ~ $2\times10^5$ とした.

#### 4. 改修による影響

#### 4.1. 解析ケース

建造当初のもの (ケース 0: サイクロラマあり), 移築直前のもの (ケース 1), 現在のもの (ケース 2: 昭和 7 年改修時と同様) を比較する. 条件の違いを Table 1 に示す. 点音源は高さ 1.5 m とし, 水平位置

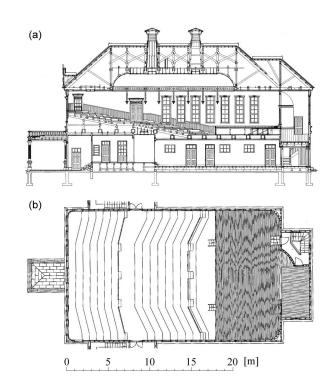


Fig. 1: (a) Cross section and (b) plan [2].

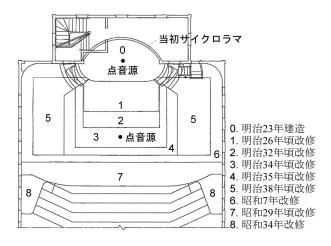


Fig. 2: Changes of the stage shape with renovation [2].

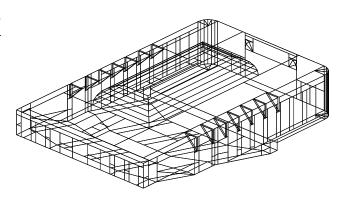


Fig. 3: An analysis model of the old Sogakudo (Case 2 in Table 1 = Case org in Table 2).

Table 1: Difference of conditions among cases (renovative factors).

Case	0	1	2
舞台形状 (Fig. 2 参照)	当初	8回目改修時	6回目改修時
舞台後壁	サイクロラマ	オルガン	オルガン
舞台隅部	漆喰	カーテン	カーテン
客席後部天井	漆喰	吸音テックス	漆喰
体積 $V[{ m m}^3]$	2,138	1,969	2,005
表面積 $S[m^2]$	1,307	1,264	1,270

Table 2: Difference of conditions among cases (architectural factors).

Case	org	highCeil	midCeil	lowCeil	10deg	30deg	noDiff	noWin
天井高 [m]	5.45	7.45	5.88	5.45	-	-	-	: -
ヴォールト	有	無	無	無	-	-	-	-
舞台側壁角度	0°	-	-	-	10°	30°	-	-
化粧方杖	有	-	-	-	-	-	無	-
窓	有	-	-	-	-	-	-	無
体積 $V[m^3]$	2,005	2,631	1,986	1,786	1,957	1,860	2,005	2,005
表面積 $S[m^2]$	1,270	1,390	1,259	1,223	1,246	1,181	1,240	1,270

は舞台幅方向の中央,舞台6の 端部から奥行方向に8 m (ケース 0),または2 m (ケース1,2)と した (Fig.2).受音点については, ホールの対称性を考慮し,ホール 幅方向半分の客席及び舞台上に 60~65点(2 m グリッド,高さ1.2 m)を設けた.

# 1.5 eugling 1.0 Case 0 Case 0 Case 1 To a Case 1 To a Case 2 125 250 500 1k 2k 4k 125 250 500 1k 2k 4k 1/1-oct. band center freq. [Hz]

Fig. 4: Reverberation time obtained by the Eyring-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

#### 4.2. 結果と考察

#### 残響時間 残響時間の理論値

(Eyring-Knudsen) と解析値 ( $T_{30}$ : 受音点での平均値) を Fig. 4 に示す. 全体的に解析値が理論値より大きいものの、ケース間の関係は類似している. 体積が大きく吸音材料が少ないケース 0 が最も大きく、建造当初は後年ほど残響時間が短くなかったと考えられる.

 $C_{80}$  各ケースの 500Hz 帯域における  $C_{80}$  を Barron's revised theory による理論値と共に Fig. 5 に示す. ここで, center は客席中央部を, lateral は客席側方部を表す (Fig. 8 参照). ケース 0 で理論値に比べ全体的に値が大きく, 特に客席中央部では音源位置が客席に近いケース 1, 2 に比べても大きい. これはサイク

ロラマによる音波の集中に起因していると考えられる.

G 各ケースの 500Hz 帯域における G を Barron's revised theory による理論値と共に Fig. 6 に示す. いずれのケースも理論値を概ね下回っているが、ケース 0 では理論値自体が大きく、 $C_{80}$  同様客席中央部でケース 1、2 より大きな値となっている.

LF 各ケースの 500Hz 帯域における LF を Fig. 7 に示す. 客席位置によらずケース 0 では値が小さくなっており、 $C_{80}$  及び G が大きいことが側方からの寄与でないことが確認できる.

サイクロラマの影響 サイクロラマの影響を調べるため、Fig. 8 に示す受音点に到達した音線のうち、

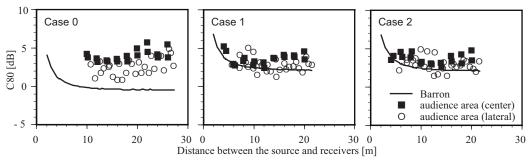


Fig. 5: C<sub>80</sub> for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

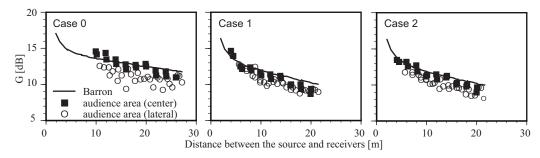


Fig. 6: G for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

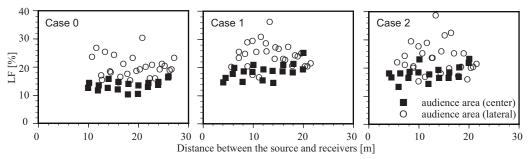


Fig. 7: LF for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

サイクロラマ (ケース 1, 2 ではサイクロラマ位置の壁面) で 1 次反射した音線数を反射回数 5 回のものまでカウントした. なお 5 回の反射回数については, 80 ms までの平均反射回数  $n=0.08\ cS/4V=4.16$  回 (ケース 2 の場合) から便宜的に設定した. 結果を Fig. 9 に示す. サイクロラマのないケース 2 ではサイクロラマ位置の壁面からの反射成分の割合が非常に小さいのに対し、サイクロラマのあるケース 0 では受音点によらず割合が大きく、特に客席中央部 (center) の受音点において顕著であることが確認できる.

#### 5. 建築的特徴が及ぼす影響

#### 5.1. 解析ケース

旧奏楽堂の現在の形状を基本形状 (org: Table 1 の Case 2 と同じ, Fig. 3 参照) とし, 天井高さとヴ

オールトの有無を変化させたもの (lowCeil, midCeil, highCeil), 舞台側壁の角度を変化させたもの (10deg, 30deg), 化粧方杖のないもの (noDiff), 窓のないもの (noWin) を基本形状 org と比較する. midCeil は, org と体積がほぼ等しくなるように天井高さを設定した. 条件の違いを Table 2 に示す. 点音源・受音点位置は前節の Case 1,2 と同様である.

#### 5.2. 結果と考察

前節同様,以下では代表して 500Hz 帯域のデータを示す.各ケースの残響時間の解析値( $T_{30}$ の受音点での平均値と標準偏差)と理論値(Eyring-Knudsen)を Fig. 10 に示す.ケースによっては 0.1 秒以上の乖離が見られるものの,ケース間での傾向は類似している.

天井の違いによる影響 天井高を変化させた場合  $O(C_{80})$  を Fig. 11 に示す (適宜 Barron's revised theory

による理論値を付記する). 体積がほぼ同じである org と midCeil を比較すると、残響時間がほぼ等しい ため理論値(Barron)はほとんど同じであるが、解 析値は org の値が客席位置によらず大きい. これは 「最近の音楽ホールにはない明瞭な音色を体験でき る」[1]という評価と関連している可能性がある. 一 方, org と lowCeil では、体積が小さい lowCeil の残 響時間が短いにもかかわらず、C80の値に大きな違い が見られない. このことから,  $C_{80}$ はヴォールトの有 無によらず、その他の天井高に概ね依存していると 考えられる. LF を Fig. 12 に示す. org では客席中央 部における LF が低く側方での値のばらつきが顕著 であるのに対し、ヴォールトのないその他のケース では中央部の値がより大きく、側方の値のばらつき が小さい. このことから, ヴォールト型天井が LF の客席位置による偏りを生んでいる可能性がある. また、ヴォールトのないケース間で比較すると、天 井が高いほど客席中央後部での LF が大きい傾向が 見られる. GをFig. 13 に示す. ヴォールト無しでは, 天井高によらずGが客席中央部で小さくなり、理論 値との乖離が見られる. このことから, ヴォールト により反射波が客席中央部へより多く供給されてい ると言える.

**舞台側壁角度による影響** 舞台角度が  $30^\circ$  の場合の G を Fig. 14 に示す、舞台上での値(stage)に着目すると、 $30^\circ$  の場合は理論値に近いのに対し、org (Fig. 13) では理論値より著しく大きくなっている、これは org の舞台側壁が平行であるためと考えられ、

舞台上の残響時間 (Fig. 2) と合わせて「舞台上で音がよく響く」「極めて演奏しやすい」[3]という評判と関連している可能性がある.  $C_{80}$ については、初期反射音の増加のため org と比べ客席側方で値が大きくなっており、LFについては大きな変化は見られなかった.

化粧方杖・窓の有無による影響 方杖を除いた場合の LF を Fig. 15

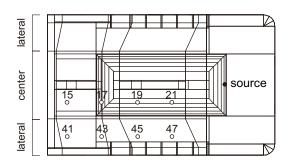


Fig. 8: Position of receiving points for counting sound rays.

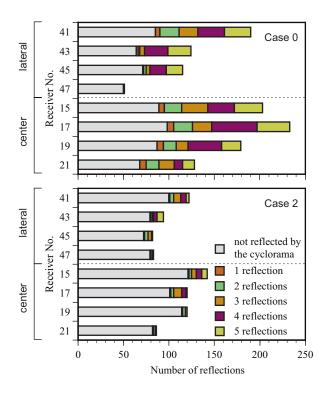


Fig. 9: Number of sound rays firstly reflected by the cyclorama.

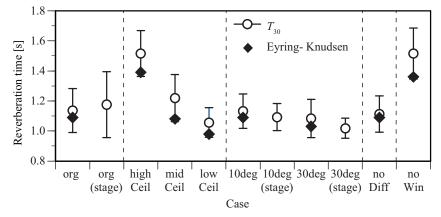


Fig. 10: Reverberation time obtained by the Eying-Knudsen formula and a geometrical acoustic program.

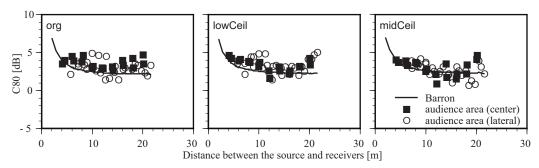


Fig. 11: Effect of the ceiling height on  $C_{80}$  for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

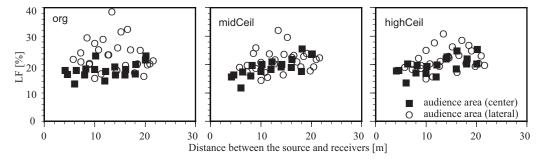


Fig. 12: Effect of the ceiling height on LF for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program.

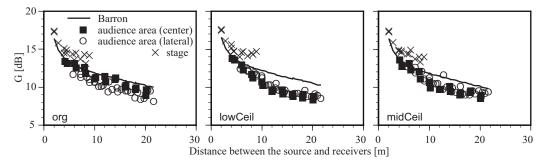


Fig. 13: Effect of the ceiling height on *LF* for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program.

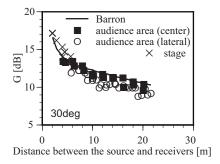
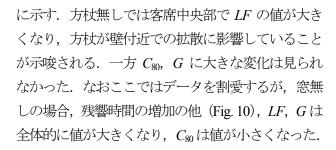


Fig. 14: *G* for 500-Hz octave band obtained by Barron's revised theory and a geometrical acoustic program (30deg).



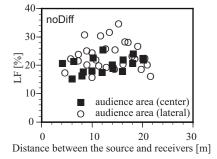


Fig. 15: *LF* for 500-Hz octave band obtained by a geometrical acoustic program (noDiff).

吸音率の変化が結果に表れたと考えられる.

#### 6. 音響測定

ここでは旧奏楽堂の現状の把握,及び上記の幾何 音響解析で見られた傾向の確認を目的として行った 音響測定の結果について述べる.

#### 6.1. 測定方法

音源・測定点の位置を Fig. 16 に示す. 音源点 (12 面体スピーカ)・受音点高さはそれぞれ 1.5 m, 1.2 m である. インパルス応答測定では音源として TSP 信号を用い,同期加算回数 5 回とした. インパルス応答からは各種音響物理指標を算出した. 音圧レベル分布測定ではピンクノイズを用い,受音点位置で精密騒音計により 1/1 オクターブバンドごとの音圧レベルを測定した.

#### 6.2. 結果と考察

**残響時間** 残響時間の周波数特性(受音点代表点での算術平均値)を幾何音響解析値と共に Fig. 17 に示す. 125Hz 帯域の測定値のみ  $T_{20}$ を、その他では  $T_{30}$ を採用した。周波数特性は低域から高域となるに従って緩やかに短くなっており、125Hz 帯域を除き解析値とよく対応している。500-1kHz での平均値は1.12秒であり、ホールとしては非常に短い、なおEDTについても、低域における空間的ばらつきが大きいことを除いてほぼ同様の結果であった。

 $C_{80}$  1/1 オクターブバンドごとの  $C_{80}$  を Fig. 18 に示す.幾何音響解析値は理論値に比べ全体的に値が大きい傾向であったが,測定値はむしろ理論値を下回るものが多い.客席位置による違いとしては,高域となるに従って客席中央後部付近の値が側方後部より大きくなる傾向が見られる.概して,高域ほど(特に 8kHz 帯域において)幾何音響解析結果と類似しており,客席中央付近での値が側方付近より大きく,理論値よりも大きい傾向が見られる.

G 1/1 オクターブバンドごとの Gを Fig. 19 に示す. ただし、音源の最近傍受音点(距離 1.04 m)における音圧レベルが同じ点での Barron's revised theory による Gと一致するよう基準化することで近似的に求めている. 高域になるほどばらつきが減少する一方、理論値からの乖離は大きくなっており、特に音源からの距離が大きいほど顕著である. これは幾何音響解析では見られなかった現象であり、座席による過剰減衰が原因と考えられる. 客席中央付近の値が側

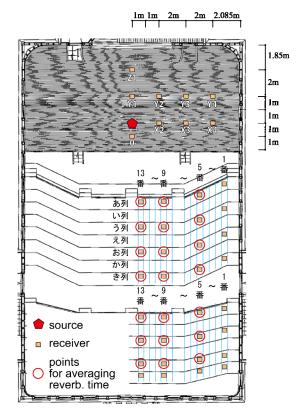


Fig. 16: position of a source and receiving points.

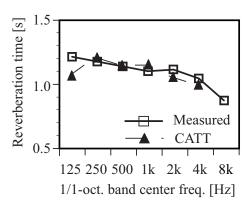


Fig. 17: Reverberation time obtained by measurement and a geometrical acoustic program.

方より大きめである点、舞台上の値が(若干ではあるが)大きめである点は幾何音響解析における G と対応している. 音源からの距離 20 m の付近において値がばらつき上昇しているが、これは後壁からの反射の影響と考えられる.

#### 7. まとめ

旧東京音楽学校奏楽堂における改修・移築,及び 特殊な建築的特徴が音響特性に与える影響について, 商用幾何音響ソフトによる解析を通して考察した.

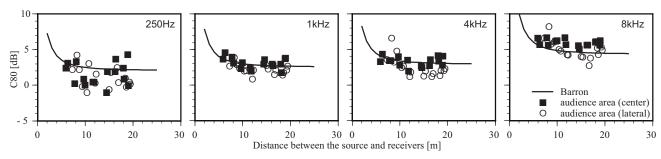


Fig. 18:  $C_{80}$  for 1/1-octave bands obtained by Barron's revised theory and measurement.

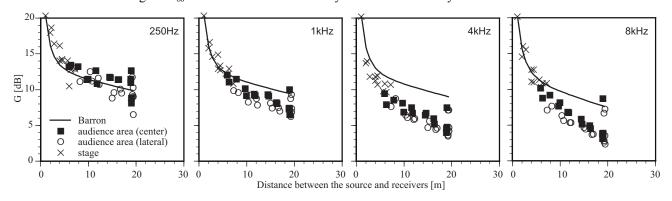


Fig. 19: G for 1/1-octave bands obtained by Barron's revised theory and measurement.

改修・移築による音響特性の変遷に関しては、建造当初は残響時間が現在ほど短くなかったこと、その一方で明瞭度や音量感は大きかったことが示唆された.これには当初存在した舞台サイクロラマ(現オルガン)の効果が大きかったと考えられる.

建築的特徴に関しては、天井、舞台側壁、化粧方杖、窓の影響について調べた。天井に関しては、ヴォールトがあることで客席幅方向中央部における音量感が増加し、客席位置でのLF のばらつきが増加すること、明瞭度はその他の天井高さに依存しており、同程度の体積の矩形ホールに比べてより明瞭度が高いことが示唆された。舞台側壁に関しては、平行壁が舞台上のGの増加に寄与している可能性があり、「舞台上で音がよく響く」などの評判と対応していた。化粧方杖に関しては、客席中央部におけるLF の低下に、窓に関しては、残響時間及びLF、G の低下、 $C_{80}$ の増加に寄与していることが示唆された。

また、旧奏楽堂の現状の把握、及び幾何音響解析結果の確認を目的として音響測定を行った。残響時間の測定結果は解析結果とよく一致していた。  $C_{80}$ 、 G等の音響物理指標ついては、値の大きさや理論値との関係に対応は見られなかったものの、傾向の類似は確認できた.

#### 参考文献

- [1] L. L. ベラネク他, コンサートホールとオペラ ハウス, 音楽と空間の響きと建築, シュプリン ガー・フェアラーク東京 (2005).
- [2] 東京都台東区,旧東京音楽学校奏楽堂 移築修理工事報告書 (1987).
- [3] 中村他,音響技術 **41**, pp. 51-55 (1983).
- [4] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden (2002).
- [5] X. Zeng, et al., Applied Acoustics **67**, pp. 771-786 (2006).
- [6] 日本騒音制御工学会編,騒音制御工学ハンドブック,技報堂 (2001).
- [7] 日本建築学会編,日本建築学会設計計画パンフレット4 建築の音環境設計,彰国社 (1983).