



# Acoustic measurements and the Individual Subjective evaluation for sound fields

Sakai, Hiroyuki

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2001-03-09

(Date of Publication)

2008-12-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2503

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002503>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【215】

氏名・(本籍) 酒井 博之 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (学術)

学位記番号 博ろ第86号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成13年3月9日

【学位論文題目】

Acoustic measurements and the Individual Subjective evaluation  
for sound fields

(音場の物理計測と個人の心理評価)

審査委員

主査 教授 安藤 四一

教授 松嶋 隆二 教授 村上 晋一

This study has investigated acoustical measurements and individual subjective evaluations for sound fields based on a model of human auditory-brain system and subjective preference theory. In acoustical measurement part, measurement results in historical opera houses and outdoor sound fields in forests are discussed by analyzing temporal and spatial factors. The measurement procedure used here is based on the previous procedure, which has been applied for concert hall acoustics (MLS method). In subjective evaluation part, especially, individual difference and intra-individual changes of subjective preference as primitive and overall psychological response are focused on. Psychological experiments were conducted in a sound simulation room and in an existing opera house in changing physical factors. In addition, a theory of individual subjective preference is summarized.

In chapter 1, previous studies relating to acoustical measurement for sound fields, individual subjective preference, and orthogonal physical factors are summarized as well as the description of the auditory-brain model. The aim of this study is also described.

In chapter 2, acoustical measurements in historical opera houses and outdoor sound fields including general forest and bamboo forest are described. As historical opera houses usually have specific equipment as orchestra pit, boxes, balcony seats, stage house with huge volume, interior decorations, sound fields in opera houses are necessary to distinguish from those in concert halls because of their complicated conditions. Most remarkable differences between sound field in an opera house and that in a concert hall is performances. Namely, a singer sings on the stage and orchestra plays instruments in a pit in an opera house. In accordance with these facts, sound fields on the stage and in orchestra pit are especially focused here. In addition, sound fields for listeners in a box are investigated as a specific sound field for listeners in an opera house. As measurements in outdoor sound fields, sound fields in a general forest and a bamboo forest including multiple scattering effects from trunks of trees are investigated. Excellent sound fields, especially, for subsequent reverberation time ( $T_{sub}$ ) and IACC are obtained from the measurements, although acoustical environment in a forest has experientially been felt to be fine.

In chapter 3, the subjective preference test conducted in an existing opera house are described to clarify whether the theory can be applied for existing sound

fields. Subjective preference tests for different source locations (two positions on the stage and two positions in the orchestra pit) were conducted by the paired-comparison method at seat area in the stall and in the boxes in an opera house. Vocal and music sources were radiated from the sources on the stage and in the pit, respectively. The relationship between the scale value of subjective preference and the physical factors obtained by acoustical measurement are examined by the multiple dimensional analysis. It is confirmed whether the preference theory using four orthogonal physical factors can be applied to both the stage and the orchestra pit as well as concert halls.

In chapter 4, the individual differences and intra-individual changes of subjective preference for listening level (LL) and  $T_{\text{sub}}$  are investigated. In this study, intra-individual changes are defined as changes of preference among test series in psychological experiments. In sound field simulation rooms, subjective preference tests are conducted in changing each orthogonal factor independently. The individual difference and intra-individual change are represented by the most preferred values for each factor and individual coefficient  $\alpha$ , which is obtained from subjective preference evaluation curve.

The investigation in relation to LL shows that subjects with a large value of  $\alpha$  have small intra-individual changes, so that the range of the most preferred value  $[LL]_p$  was small. On the other hand, subjects with small  $\alpha$  value have minor preference as the parameter changed. The investigation in relation to  $T_{\text{sub}}$  shows that subjects with large  $\alpha$  values indicate smaller intra-individual changes, so the standard deviation of  $\log([T_{\text{sub}}]_{p,m}/[T_{\text{sub}}]_p)$  is small as well as the investigation for LL. On the other hand, subjects with small  $\alpha$  values without sharp curves show minor preference as  $T_{\text{sub}}$  changed.

In chapter 5, as applications for the investigations described as acoustical measurements and individual subjective evaluations, a concert hall with a number of columns and acoustical measurements for environmental noises are described. The concert hall is an application for the effect of multiple scattering from trees or bamboo described in chapter 2. Also, acoustical measurement system for environmental noises based on the model of auditory-brain system is described with measurement results of aircraft noise.

In chapter 6, the studies are summarized. Main conclusions are as follows. (1)

It was found that initial reflection components in impulse responses are quite complicated due to reflective surfaces near a sound source or a receiver on the stage, in the orchestra pit, in a box of an opera house in comparison with a sound field in a concert hall. (2) It is found that attenuation of a direct sound is occurred due to the overhanged stage and the pit rail. (3) In acoustical measurements in a general forest and in a bamboo forest, it is found that multiple scattering effects between trees or bamboos improve  $T_{sub}$  and IACC. (4) Through these measurements, it is found that MLS method can be applied to obtain temporal and spatial factors as well as concert halls. Note that it is necessary to take care with calculation of temporal factors as  $\Delta t_1$  and  $T_{sub}$ . (5) Coefficient  $\alpha$  is introduced for individual preference in a sound field. (6) The investigations in relation to preference test for LL and  $T_{sub}$  in a sound field simulation room show that subjects with a large value of  $\alpha$  have small intra-individual changes, so that the range of its preferred value was small. On the other hand, subjects with small  $\alpha$  value have minor preference as the parameter changed. (7) Result of preference test in existing opera house shows that subjective preference theory can be applied to opera houses including the orchestra pit, the box seats and so on.

(988 words)

## (要旨和訳)

本論文は、聴覚-大脳機能モデルおよび音場の主観的プリファレンス理論に基づく、音響計測および個人の主観的評価に関する研究である。音響計測に関する箇所では、伝統的オペラ劇場および木立や竹林内といった野外音場において行った測定結果について述べる。計測手法として、コンサートホール内で行ってきた疑似ランダム2値信号(MLS信号)によるインパルス応答測定法を適用する。音場のプリファレンス評価には両耳におけるインパルス応答から算出される時間的・空間的ファクターを用いる。主観的評価に関する箇所では、特に主観的プリファレンスの個人差および個人内変動に焦点をあてる。心理実験は主観的プリファレンスに関連する音場の直交する物理ファクターを独立に変化させることによって音場シミュレーション室および実際のオペラ劇場内において行われた。

第1章では、本研究に関連する音響計測、音場の主観的プリファレンス評価について過去の研究をまとめ、本研究に用いられる物理的ファクターの算出方法について解説を行っている。また、本研究の目的を述べている。

第2章では、オペラ劇場および森林内において行った音響測定について述べる。第2.1節ではオペラ劇場の音響測定について述べる。伝統的オペラ劇場は、オーケストラピット、ボックス席、ステージハウスなど、一般的なコンサートホールと比べると室内の境界条件が極めて複雑なことが特徴である。最も注目すべきコンサートホールとの相違は、オペラハウスではステージ上では歌手が、ピット内ではオーケストラが演奏するという点にある。これらを踏まえ、ステージ上およびピット内の音楽家のための音場に関する音響測定およびボックス席内の聴衆のための音場に関する音響測定を行った。特にいずれの測定においても反射面が音源あるいは受音点近傍に存在するため、初期反射音構成が通常のコンサートホールと比べ、非常に異なることを明らかにしている。音源と受音点間の直接音経路内にステージやピット・レール等の障害物が存在する場合、直接音振幅が反射音振幅よりも小さくなることが多々あり、初期反射音振幅の遅れ時間( $\Delta t$ )や全反射音振幅(A値)決定の際にコンサートホールとは異なる性質を見い出した。ボックス内の聴者のための測定では、ボックス内での受聴者の位置や人数により音場(ファクター)が変化することを明らかにした。第2.2節では野外音場の音響計測について述べる。木立と竹林内において行った野外音場に関する測定では、木または竹からの多重拡散効果により、特に後続残響時間( $T_{sub}$ )およびIACCの観点から聴者にとって優れた音場となり得る可能性を指摘している。また、このような音場においては残響曲線がコンサートホールのように直線的に減衰せず、後続残響成分が保持されるという特徴を見い出した。

第3章では、現地イタリアのオペラは劇場内で実施した主観的プリファレンス実験について述べている。ボーカルおよび音楽の音源を用いて、ステージ上およびオーケストラピ

ット内の音源の位置を切り替えて一対比較法による心理実験を行った。被験者（40名）はストール内およびボックス席内に着席して貰った。音響測定によって得られた音場の直交ファクターと主観的プリファレンス尺度値の関連性を多次元尺度法によって解析した。すでにコンサートホール内では主観的プリファレンス理論が適用できることが明らかにされているが、本研究により、複雑な境界条件を持つ実際のオペラ劇場においてもこの理論が適用できることを示している。

第4章では、音場シミュレーション室内において行った音場の主観的プリファレンスの個人差・個人内変動に関する心理実験について述べる。これまで多くの聴者の平均的な心理量が取り扱われてきたが、その最小単位である個人の心理的反応を取り扱った例は極めて少ない。変化させたファクターは、聴取音圧レベル (LL) および後続残響時間 ( $T_{sub}$ ) である。本研究において、個人内変動は、短期間内のプリファレンスの変動として、通常は平均操作として繰り返し行われる心理実験のシリーズ毎のパラメータの変化と定義している。個人差および個人内変動を表すパラメータとして、変化させる物理ファクターの最適値およびプリファレンス曲線から得られる重み係数 $\alpha$ を用いて議論している。なお、主観的プリファレンス尺度値の導入には、サーストンの比較判断の法則に基づいた簡易導出法を用いている。これらの心理実験から、 $\alpha$ の値が大きな被験者は、心理実験におけるシリーズ毎の個人内変動においてもファクターの最適値の変動幅が小さく、主観的プリファレンスに関する個人内変動が小さくなることを明らかにした。逆に、 $\alpha$ の値が小さい被験者は、各シリーズにおいて最適値が決まらないなど、最適値の変動幅が大きくなる。

第5章では、音響測定および個人の主観的評価の適用例として、第5.1節に第2.2節で述べた森の木立の特性を生かすため、列柱を配置したコンサートホールを紹介し、第5.2節では環境騒音の測定例について述べている。ここで述べるコンサートホールは第2章で述べた野外音場測定の多重拡散効果を利用した典型的な適用例である。また、聴覚—大脳機能モデルにもとづく環境騒音の測定・評価システムについて述べ、ボローニャ地域で行った航空機騒音の測定例について述べる。この測定法は、これまでの騒音計を用いた（単耳的）環境騒音測定とは異なり、人間の心理を反映するべく両耳の測定を行うものである。評価のための物理ファクターは、聴覚—大脳機能モデルに基づき音場の自己相関関数および相互相関関数から時々刻々解析、抽出される。

第6章は、本論文の結論を述べている。主要な結論は以下の通りである。（1）オペラ劇場内のステージ上、オーケストラ・ピット内、ボックス席では、音源または受音点の近傍に存在する反射面により、初期反射音構成がコンサートホール内の音場に比べ極めて異なる音場になる。（2）直接音経路上に存在するステージ、ピット・レールなどによる直接音の減衰を見い出した。（3）木立および竹林内の音響計測において、木および竹の幹

による多重拡散効果が後続残響時間 ( $T_{sub}$ ) や IACC を改善すべく機能していることを明らかにした。(4) オペラ劇場および野外での音響計測を通じ、これまでのコンサートホールと同様に、MLS 信号を用いたインパルス応答の計測法が適用できることを示した。ただし、 $\Delta t_1$ 、 $T_{sub}$  といった時間的ファクターを算出する際には、オペラ劇場内では初期反射音構成が複雑であることや木立では残響曲線が直線的に減衰しないことなどから注意が必要となる。(5) 音場の主観的プリファレンスに対して個人差を示す係数  $\alpha$  を導入した。

(6) 音場シミュレーション室内の主観的プリファレンスの個人内変動に関する心理実験から、 $\alpha$  の値が大きな被験者は、心理実験におけるシリーズ毎の個人内変動においてもファクターの最適値の変動幅が小さく、主観的プリファレンスに関する個人内変動が小さくなることを明らかにした。逆に、 $\alpha$  の値が小さい被験者は、各シリーズにおいて最適値が決まらず、最適値の変動幅が大きくなった。(7) 実際の伝統的オペラ劇場内において実施した心理実験から、これまでコンサートホールにおいて行ってきた主観的プリファレンス理論が、ボックス席を含むオペラ劇場においても適用できることを示唆している。

(和文 : 3,056 字)

## 論文審査の結果の要旨

氏名	酒井 博之		
論文題目	Acoustic measurements and the individual subjective evaluation for sound fields 音場の物理計測と個人の心理評価		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	安藤 四一
	副査	教授	松嶋 隆二
	副査	教授	村上 晋一
	副査		
	副査		
要 旨			
<p>本論文は、聴覚-大脳機能モデル及び音場の主観的プリファレンス理論に基づく、音響計測及び個人の主観的評価に関する研究である。音響計測に関しては、多重散乱波を含む伝統的オペラ劇場および木立や竹林内において行った測定結果について述べている。音場のプリファレンス評価には両耳におけるインパルス応答から算出される時間的・空間的ファクターを用いている。これらの時・空間ファクターに基づき、音場の主観評価に関しては、特に主観的プリファレンス判断の個人差及び個人内変動に焦点をあてている。心理実験は主観的プリファレンスに関わる音場の直交する物理ファクターを独立に変化させることにより音場シミュレーション室及び実際のオペラ劇場内において実施したものである。以下、各章ごとに述べる。</p> <p>第1章では、本研究に関連する過去の研究をまとめ、本研究に用いられ</p>			

る物理的ファクターの算出方法について解説を行っている。また、本研究の目的を述べている。

第2章では、多重散乱波を含むため現在の科学技術では極めて予測困難なオペラ劇場及び森林内において行った音響測定について述べている。まず第2.1節ではオペラ劇場において実施した音響測定について述べている。伝統的オペラ劇場は、オーケストラピット、ボックス席、ステージハウス等、コンサートホールと比べると室内の境界条件が極めて複雑なことが特徴である。コンサートホールとの最たる相違点は、オペラ劇場ではステージ上で歌手が、ピット内でオーケストラが演奏する点にある。これらを踏まえ、ステージ上及びピット内の音楽家のため、さらにボックス席の聴衆のための音場に関する音響測定を実施し、直交する物理ファクターを導出している。特にいずれの測定においても反射面が音源又は受音点近傍に存在するため、多重散乱波を含む初期反射音構成が通常のコンサートホールと比べ極めて異なることを明らかにしている。また、音源と受音点間の直接音経路内に障害物が存在する場合、直接音振幅が反射音より小さくなることが多々あり、初期反射音の遅れ時間 ( $\Delta t_1$ ) や全反射音振幅 ( $A$ )、決定の際にコンサートホールとは異なる性質があることを見出ししている。ボックス内の測定では、ボックス内の受聴者の位置や人数により音場 (ファクター) が著しく変化することを明らかにしている。第2.2節では野外音場の音響計測について述べている。木立と竹林内において行った測定では、木又は竹からの多重拡散効果により、特に後続残響時間 ( $T_{sub}$ ) およびIACCの観点から聴者にとって優れた音場となり得る可能性を指摘している。また、このような音場においては残響曲線がコンサートホールのように直線的に減衰せず、後続残響成分が保持されるという特徴を見出ししている。

第3章では、イタリア、フェラーラのオペラ劇場内で実施した主観的プリファレンス実験について述べている。ボーカルおよび音楽の音源を用いて、ステージ上およびオーケストラピット内の音源の位置を切り替え一対比較法による心理実験を行っている。被験者 (48名) はストール内およびボックス席に配置している。音響測定によって得られた音場の直交ファク

ターと主観的プリファレンス尺度値の関連性を多次元尺度法によって解析している。その結果、複雑な境界条件を持つオペラ劇場においても主観的プリファレンス理論が適用できることを明示している。

第4章では、直交した物理ファクターを踏まえ、音場シミュレーション室内において行った音場の主観的プリファレンスの個人差・個人内変動に関する心理実験について述べている。これまで多くの聴者の平均的な心理量が取り扱われてきたが、その最小単位である個人の心理的反応を取り扱った例は極めて少なかった。変化させたファクターは、聴取音圧レベル(LL)及び $T_{sub}$ である。本研究では、個人内変動は短期間のプリファレンスの変動として、通常は平均操作として繰り返し行われる心理実験のセッション毎のパラメータの変化と定義している。個人差および個人内変動を表すパラメータとして、変化させる物理ファクターの最適値およびプリファレンス曲線から得られる重み係数 $\alpha$ を用いて検討している。なお、主観的プリファレンス尺度値の算出には、サーストンの比較判断の法則に基づいた簡易導出法を用いている。これらの心理実験から、 $\alpha$ 値が大きな被験者は個人内変動においてもファクターの最適値の変動幅が小さく、プリファレンスに関する個人内変動が小さくなり、逆に、 $\alpha$ 値が小さい被験者は、各セッションにおいて最適値が決まらないなど最適値の変動幅が大きくなることを明らかにしている。

第5章では、音響測定および個人の主観的評価の適用例について述べている。第5.1節に第2.2節で述べた森の木立の多重拡散効果を応用した列柱を配置したコンサートホールの設計例を示している。第5.2節では聴覚—大脳機能モデルに基づく環境騒音の測定・評価システムについて述べ、ポーロニヤ空港周辺で行った航空機騒音の測定例について述べている。この測定法は、これまでの騒音計を用いた単耳的音圧測定とは異なり、人間の心理を反映するべく両耳での測定を行うものである。評価のための時・空間ファクターは、聴覚—大脳機能モデルに基づき音場の自己相関関数および相互相関関数から時々刻々抽出されている。

第6章は、本論文の結論を述べている。主な結論は以下の通りである。(1)

オペラ劇場内のステージ上、オーケストラ・ピット内、ボックス席では、音源または受音点の近傍に存在する反射面により、初期反射音構成がコンサートホール内の音場に比べ極めて複雑な音場となっている。(2) 野外音響計測においては、木および竹の幹による多重拡散効果が後続残響時間( $T_{sub}$ )やIACCを改善すべく機能していることを明らかにしている。(3) 複雑な境界条件から成るオペラ劇場および野外での音響計測を通じ、これまでのコンサートホールと同様に、MLS信号を用いたインパルス応答の計測法が適用できることを示している。ただし、 $\Delta t_1$ 、 $T_{sub}$ といった時間的ファクター算出の際には、オペラ劇場内では初期反射音構成が複雑であることや木立では残響曲線が直線的に減衰しない現象を明らかにしている。(4) 音場の主観的プリファレンスに対して個人差を示す係数 $\alpha$ を導入している。(5) 音場シミュレーション室内の主観的プリファレンスの個人内変動に関する心理実験から、 $\alpha$ 値が大きな被験者は、心理実験におけるセッション毎の個人内変動においてファクターの最適値の変動幅が小さく $\alpha$ 値も個人内変動が小さくなること、逆に、 $\alpha$ 値が小さい被験者は、各セッションにおいて最適値が決まらないなど、最適値の変動幅が大きくなることを明らかにしている。(6) オペラ劇場内において実施した心理実験から、これまでコンサートホールにおいて行ってきた主観的プリファレンス理論が、極めて小空間のボックス席においても適用できることを示唆している。

本研究は、聴覚—大脳機能モデルおよび音場の主観的プリファレンス理論に基づき、多重散乱波を含むオペラ劇場や森林内の音響計測及び個人の主観的評価を研究したものである。特にオペラ劇場においても主観的プリファレンス理論が適用できることを明らかにし、また、主観的プリファレンス判断の個人差・個人内変動についての新たな知見を得たものである。このように本研究は、室内音響学と音響心理学について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者酒井博之は、博士(学術)の学位を得る資格があると認める。