# 人間の感性への挑戦　ー「ホール・劇場の音響設計技術」
Human Sensitivity - Our Great Challenge: Acoustic Design Technology for Halls and Theaters

日高　孝之　Takayuki Hidaka＊1

## 梗　概
ホールや劇場にはそこで演じられる舞台芸術に相応しい空間の響きが求められる。これは通常の建築物に普遍的に求められる機能とは大きく異なり，劇場やホールにとってその価値を決定する最優先の品質となる。空間を美しく響かせることを目的とする音響設計は，楽器の設計に例えられる場合があるが，それとは大きく立場が異なっている。それは工期や規模が著しく長大であり，さらには毎回新しい建築デザインに対処しなければならないことからも明らかであろう。従ってその設計プロセスにはより客観性が求められ，必然的に科学技術による裏付けが必要となる。当技術研究所はホール・劇場の音響設計に関わる技術開発とその活用を長年にわたり実施してきた。特に，この約20年間は大きな技術革新がなされ，内外から一定の評価を得るに至った。本報では，そのなかから研究開発とその実プロジェクトの代表例について概要を紹介する。
**キーワード：ホール，劇場，音響設計，主観評価，シミュレータ**

## Summary
Halls and theaters are required to produce sound that best fits the stage art performed therein. This characteristic is quite different from the function universally required of an ordinary building. It is the quality that is given the top priority when determining the value of the theater or hall. Acoustic design, which aims to make a space sound beautiful, is sometimes compared to the design of musical instruments. But in reality, there is a great difference between them, which should be clearly understood if you look at what acoustic design has to deal with. It is“size”and“work period”hat completely differ from project to project. Furthermore, every project has a new architectural design. The acoustic design process requires a greater degree of objectivity and consequently has to be supported by science and technology. Takenaka R&D Institute has been engaged in technical development related to acoustic design of halls and theaters and has applied the technology to actual projects for many years. Especially the past two decades have seen great advances in technical innovation, and what we have so far achieved enjoys a decent reputation both domestically and internationally. Our report outlines some of the major achievements of our R&D efforts and their applications to actual projects.
**Keywords: Concert hall, Theater, Acoustic design, Subjective evaluation, Simulator**

## 1　はじめに

音楽とはピッチ，音色，肌理，リズムなど様々な要素を持った音の連続体である。音楽が演奏される空間の音響効果までを含めれば，音楽の認知プロセスは極めて複雑なものとなる。英国の音楽学者Deryck Cookeは著書「言語としての音楽（1959）」の中で，スピーチと同じく音楽の本質はコミュニケーションであると論じている。しかし，音楽が伝えるものは「概念」ではなく「情緒や感情」といえよう。

古代より民族を問わず，人は空間の音の響きに深い関心を抱いていたことが知られている。建築の音響についての最初の著作は，紀元前初期の建築家ウィトルウィルスによる「建築十書」に遡る。近代科学としての「コンサートホール音響学」は約100年前，ハーバード大学のセイビンがボストン・シンフォニーホールの設計を担当とした

＊1　技術研究所　リサーチフェロー　博士（工学）

時が始まりとされ，その後ヨーロッパでは第二次大戦によって損傷したホールやオペラハウスの復興のため，優れた音響空間をいかにして建設するかという課題に向かって活発な国家的研究が進められた。我国や米国においても経済発展に伴う音楽演奏会場へのニーズが顕在化し，コンサートホール音響学は著しい発展を遂げた。

こうした潮流の下，当技術研究所においてもホールや劇場の音響設計に関する研究開発を推進するとともに，その成果を活用して多数のプロジェクトの音響設計コンサルテーションを行ってきた。幸い，それら一連の活動は独自の成果へと繋がり，内外で一定の評価を得ることができた。本報ではその一部について簡単に紹介する。

## 2　音響設計技術の研究開発

ホール内の音の発生や伝搬は物理現象であるため，適切な数理モデリングを行えば必要な精度で分析が可能になりつつある。しかし，コンサートホールの空間の響きの良否（以下，音響品質と称する）は基本的に人の主観的判断に委ねなければならない。従って，コンサートホールの設計や評価に携わるとき，例えば次のような難問に直面することになる。ヒトの聴覚プロセスは音楽の認知に如何に関係するのだろうか？　コンサートホールの音響の正当な判定者は誰なのか？　コンサートホールの音響特性は，有識ある音楽愛好家が下す心理的判定と相関するだろうか？

これがコンサートホール音響学の最大の難しさであり，すなわち，ホールの物理的性質とヒトの心理的感覚というハードとソフト両方についての知識を集約して，実際の設計業務にあたらなければならない。以下では，Fig.1に示す一連の研究開発活動のなかから代表事例について紹介する。

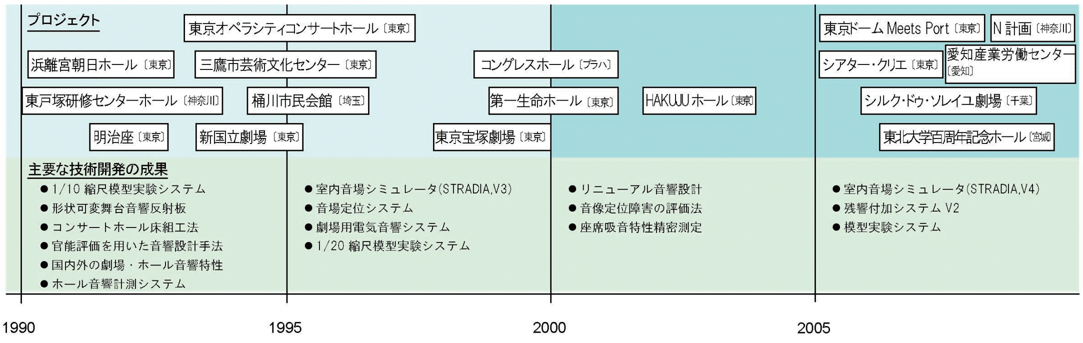



Fig.1　竹中技術研究所の音響設計技術の技術開発と実績の推移
Technological development and actual projects relating to acoustical design technologies of Takenaka Research and Development Institute

### 2.1　室内音場シミュレータ「STRADIA」

音場シミュレータとは仮想空間内の音の響きを，実音で聞くための装置である。コンピュータグラフィック（CG）は仮想の視覚情報を可視化する技術であるが，音場シミュレータは仮想の聴覚情報の可聴化技術であると対比できる。ホールの音響設計の目標は，使用目的に適合した空間の響きを実現させることである。そこで，設計時点では残響時間などを用いて響きを数値化して表示していたが，それがどのように聞こえるかを判断することは，一部の専門家を除いて事実上困難であった。音の響きの評価は極めて高度な判断が求められる主観的体験である。従って，設計時点にホール完成後の音を可聴化して聞くことは極めて有力な手段となる。

Fig.2はホールのステージ上にある楽器から発生した音が，天井・壁など様々な面で反射を繰り返して聴衆の左右の鼓膜面に到達する様子を示している[1)]。つまり，音源から発生した音響信号がホールというシステムを通過して観測点（リスナ）に到達すると考えることができるので，電子回路設計や構造解析と同じように線形システムとして数理的に扱うことができる。すなわち，(1) 楽器の発生音を入力信号とし，(2) ホールの応答を解析し，(3) リスナの鼓膜面に到達する音響信号を合成して，(4) スピーカから再生して評価者に提示することが可聴化の原理となる。これには様々な要素技術が関係するが，以下にその概要を簡単に述べる。

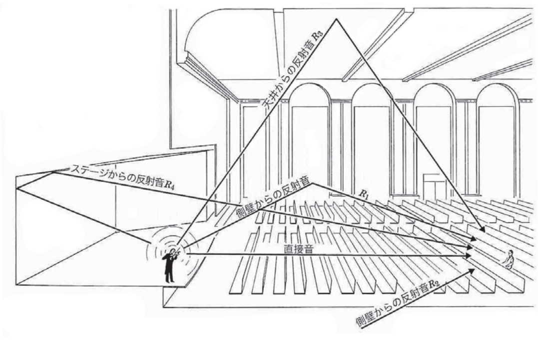



Fig.2　演奏者から聴衆への音の伝搬経路
Sound transmission paths from a musician to an audience

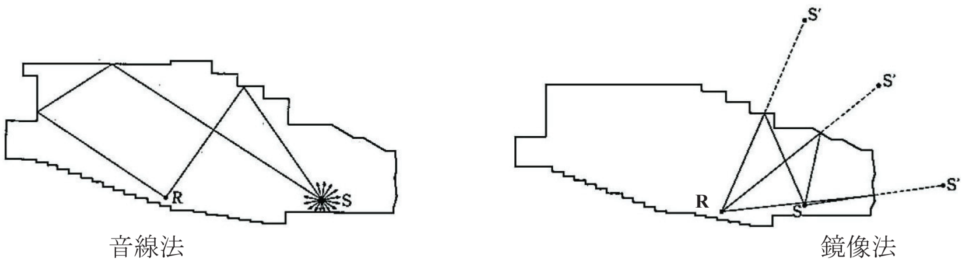



Fig.3 音線法と鏡像法
Ray tracing method and image method

### 2.1.1 ホール内の音の応答解析

ヒトの聴覚が対象とする音の周波数範囲は20-15,000Hzに渡り，ホールの室容積は数万m$^3$に及ぶことから，ホールの音場を解析する場合，有限要素法などの計算力学的方法はコンピュータの処理能力をはるかに超えるため使用できない。このため近似的に音の挙動を追跡する音線法や粒子法，あるいは鏡像法を利用する必要がある（Fig.3）。ただし，単純にこれらを利用しても精度上の問題が存在する。

音線法や粒子法はCGのレイトレーシングと類似した方法である。計算速度の点で優れており，実用上は1つの音源あたり100万本程度の音線を発生すればよい。しかし，音の波動的な性質を含めることができないためそれだけでは不十分である。一方，準波動的方法である鏡像法は比較的良好な精度で音場を表現できるが，計算量の点で大きな制約がある。今，面数$M$によって構成される室を想定し，$k$回反射までを考えると，鏡像の数は

$$N=\sum_{i=1}^{k} M(M-1)^{i-1}$$

で与えられる。例えば300面から構成される室では，3回反射までで2691万個の鏡像音源，5回反射までで2.4兆個の鏡像音源となり，$M$と$N$の増加に応じて急激に増える。これらの鏡像音源がすべて有効とは限らないが，その有効性の判定も含めて膨大な計算量となることから，数回までの低次反射音の計算が限度となる。従って，この解決を図る必要がある。

当研究所は1982年，音線法に基づくホール音響解析システム「AUDIA」を国内で最初に報告した。その後も改良を進め，現在の第4世代の解析システムでは，鏡像法による音場解析を行う新アルゴリズム[1]を開発して大幅な計算時間の短縮を行い，高次までの鏡像計算を実用化している。

実際の設計フローでは，建築設計図書をもとにホール音場のCADモデリング（Fig.4）を行ってこれを解析して鏡像音源を決定する。次に天井・壁・客席面など各面素の形状や材料データ，対応する音響反射率や吸音率を入力データとして各鏡像音源からの反射音を計算し，音源Sから観測点Rまでの時間応答波形（室内インパルス応答[2]）を求める。Fig.5，Fig.6は解析結果の出力例である。

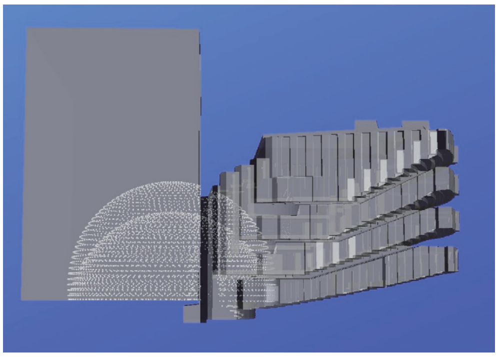


Fig.4 新国立劇場オペラ劇場のCADモデリングの計算例。ステージから生した音のエネルギーが広がっていく様子をシミュレーションしている
An example of CAD modeling, the New National Theater, Tokyo. The propagation of sound energy particles from a sound source above the stage is simulated

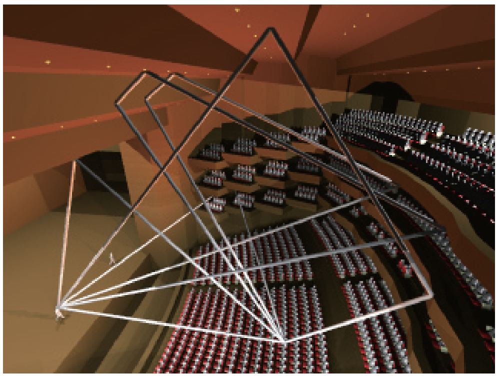


Fig.5 音場解析の出力例。舞台から１階中央の客席への音の伝搬経路の追跡例を示している
An output example of the sound field analysis, which indicates sound transmission tracing from a sound source above the stage to an audience at the middle of the main floor in a hall

1 前処理として音線法を適用して候補となる鏡像音源を抽出した後，さらに逆向きにリスナ（観測点）までの音の伝搬を追跡するバックトレーシング法を開発した。
2 ホール内の音の伝搬は線形システムとして扱えるので，我々が感じる空間の響きの品質情報はすべて，室内インパルス応答に含まれていると考えられる。

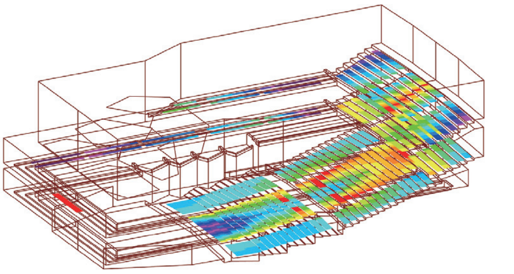


Fig.6 音場解析の出力例。BQI（後述）客席面分布の計算結果
An example of sound field analysis. Distribution of Binaural Quality Index in an audience area

### 2.1.2 音響信号の合成

音場シミュレータが設計ツールとして機能するためには，ホールの形状や材料，あるいは楽曲などの条件を変化させた場合の音を，次々と聞き比べて比較できることが必要となる。従って，音の合成演算を行う信号処理部は実時間の処理能力を持つことが必須条件である。

これは楽器の原音をシステムに入力した場合に，ホールに着座して生の演奏を聞く場合と同じタイミングで合成音が聞こえる高速処理能力であり，シンセサイザーやエコーマシンの持っている機能と同じである。このプロセスは部屋の響きを含まない楽器音信号（無響室録音ソース）に①室内インパルス応答を畳み込み演算する機能，②オーケストラのように複数の音源からの寄与を加算処理する機能，③畳み込んだ信号を複数の再生用スピーカに分配して出力する機能，を持つ信号処理システムが実行する。また，ホールでの音楽聴取は高度な主観判断に委ねられるため，再生する音響信号には高いフィディリティが要求される。従って，民生用CDを基本としてデジタル信号処理によって提示信号を合成することが求められ，それには16×16ビットデータの乗算について，1秒間に約500万回以上の演算速度が必要となる。

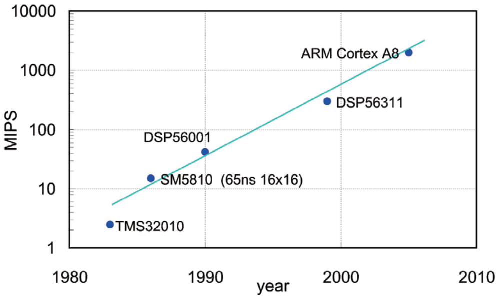



Fig.7 数値演算プロセッサーの処理速度の変遷
Changes of processing speed of digital signal processors

Photo 1 STRADIA（第2世代）のハードウェア外観
Exterior view of Sound field simulator STRADIA (version 2)

幸い，当システムを構想していた時期，これに適用可能な性能の数値演算プロセッサ（DSP）が市場に登場し，極めてタイムリーにハードウェアの開発に着手できた。現在，DSPの処理速度は1000倍に向上し，音響シミュレータのための演算処理は容易となっている。ただしFig.7から，一次開発で採用した当時最新の素子SM5810は，かろうじて必要処理速度をクリアーしていたことがわかる。なお，一次開発に先立って遅延素子BBD（バケットブリゲードデバイス）を用いたアナログシステムを試作してシステムの要求性能を検討したこと，DSPの発展に応じてシステムの改善を逐次図っていることを付記しておく（Photo 1）。

### 2.1.3 音響信号の提示

音場シミュレータは楽器から発生する直接音のみを入力信号として使用するので，反射音の存在しない無響室で録音した音楽ソースが必要となる。このソースを畳み込み演算に用いるには70dB以上のダイナミックレンジが必要であり，国内のトップアーティストの協力を得てマルチチャンネル・デジタル録音を行って，高品質な音楽ソースを作成した（Photo 2）。無響室でのデジタル録音は世界初の試みであり，このソースの一部は民生用CDとして配布され，各国の研究者の研究素材として活用されている[2)]。

Photo 2 無響室録音の様子（演奏者は中道郁代さん）
Anechoic recording in anechoic room (pianist ; Ms. Ikuyo Nakamichi)

Fig.8は音場シミュレータのシステム構成の概念図である。無響室ソースは用途に応じてアナウンス，ソロ演奏からオーケストラま

で様々なソースを用意している。可聴化は無響室内で行い，ヒトの聴覚の方向弁別能に基づいて半球状に配置した24のスピーカから再生した合成音を，その中心で聴取する方式を採用している（Photo 3）。また，この中心点で実際に演奏やスピーチを行って，その信号をマイクで受信したのち，本信号処理システムに入力すれば，ステージ上で実際に演じる時の音の響きを体感することも可能である。

現在，音場シミュレータは世界各国の研究機関に設けられ，必須の研究ツールとしての地位を確立しつつある。可聴化を意味する「オーラリゼーション（Auralization）」という新しい造語が登場し，ホール設計への利用のみならず，次世代の超臨場感音響システム[3]への応用を目指して多岐にわたる研究開発が内外の研究機関で進められている。

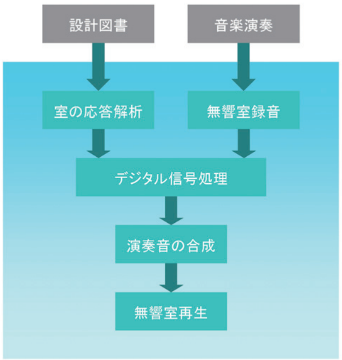



Fig.8 音場シミュレータのシステム構成
System composition of the sound field stimulator

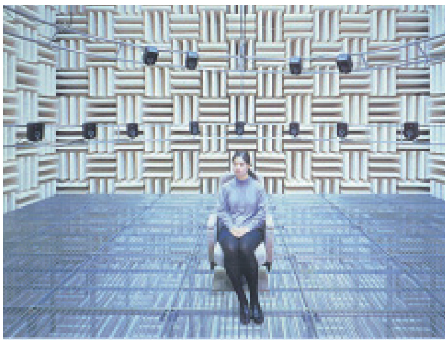


Photo 3 無響室内に立体配置した24個のスピーカから合成音を提示する
Synthesized sound is generated from 24 loudspeakers spatially distributed in anechoic room

## 2.2 コンサートホール音場の主観的評価

70年代当時，空間の響きを表す音場の物理パラメータは残響時間だけであり，我々が実際のホールで経験するさまざまな響きの違いを音響設計に反映することはほとんど不可能であった。このため，近代コンサートホール音響学の最大のテーマは，空間の響きを説明する音場の物理パラメータを解明することであった。

### 2.2.1 既存の音場パラメータの特性

90年頃にはホールの響きに関わる独立な心理属性とそれに対応する物理パラメータの研究が進展した(Table 1)。なかでも，ニュージーランドのMarshallらが提唱した「側方反射理論」[3]は以降の音響設計に多大な影響を与え，ベルリン・フィルハーモニー（Photo 6）などに採用されたワインヤード形式と呼ばれる様式へと繋がった。ただし，こうした既存の研究の大半は，実験室内でリスナ（被験者）に試験音を呈示してその音響品質を判定させる心理学的実験手法を用いて有意な音響パラメータを抽出しているため，実際のホールの評価に対応するかは充分に検証されていない。

ホールの音響品質を研究するためには，その評価順位を示すリストが必要である。これには米国のBeranekとオーストラリアのFrickeが，世界各都市のコンサートホールを対象として行った包括的な調査報告がある（Table 2）[4]。両者の結論はほぼ同一であり，コンサートホールの品質は5つ程度のカテゴリに分類できる。どちらの調査においても，最高位にはウィーン楽友協会大ホール（Photo 4），ボストン・シンフォニーホール（Photo 5）が位置付けられており，上位にはシューボックス形式[4]のホールが多くを占めている。一方，Table 2に示すように下位のカテゴリに属するホールは1件を除き“br”と記されており，音響改修工事が実施あるいは計画されている。

Table 1 空間の響きの空間的な品質とホール音場の物理特性の関係[1]
Relation between subjective qualities of the space and physical parameters of the sound field

| | |
|---|---|
| 初期反射音の品質 | 豊富な側方反射音 |
| | 中音域における初期反射音の両耳間相関の低さ |
| 残響音の品質 | 演目に最適な残響時間 |
| | 適正な音の強さ |
| | ホール内の不規則凹凸面 |
| 低音の品質 | 80－355Hz帯域での適正な音の強さ |
| 音量感 | ホール規模が大きすぎないこと |
| | ホール内の吸音材料を最小化すること |
| 透明感または明瞭性 | 演目に相応しい初期エネルギー比（残響音に対する初期反射音エネルギーの比率） |
| | 過剰でない残響時間 |
| | 演奏速度の影響 |
| ティンバーと音色 | 音場内での音楽のテクスチャー，バランス，ブレンド |
| | ホール内装面の不規則凹凸度 |
| | 音響スペクトルのバランス |
| アンサンブル | 演奏家にとっての互いの聞き易さ |
| ダイナミックレンジ | ホール規模が大きすぎないこと |
| | 暗騒音レベルの最小化 |

3 直接音に続いてリスナに到達する初期の反射音が（正面ではなく）側方から到達した場合，優れた立体的音響効果が得られるという仮説
4 ホールの概形はほぼ直方体で，長手方向の一端にステージが設けられている。両側壁は平行，天井面は水平で，靴箱に似ているのが名前の由来である。

Table 2　客席空間の響きに関するコンサートホールの評価順位[5)]
Rating of concert halls in regard to the acoustical quality

| | | | |
|---|---|---|---|
| VM | ウィーン，楽友協会大ホール | | |
| BO | ボストン，シンフォニーホール | | ミュンヘン，フィルハーモニー，ガスタイク |
| BA | ブエノスアイレス，コロン劇場（演奏会形式） | | 大阪，シンフォニーホール |
| BZ | ベルリン, コンツェルトハウス（シャウシュピールハウス） | | ロッテルダム，デ・デーレン・コンサートホール |
| AM | アムステルダム，コンセルトヘボウ | | 東京，芸術劇場 |
| TN | 東京，東京オペラシティ（TOC）コンサートホール | | 東京，オーチャードホール |
| ZT | チューリッヒ，トンハーレ大ホール | | トロント，ロイ・トムソンホール |
| NY | ニューヨーク，カーネギーホール | | ウィーン，コンツェルトハウス（br） |
| BC | バーセル，スタットカジノ | | ワシントン，JFKコンサートホール（br） |
| CW | カーディフ，聖デービッドホール | | ワシントン，JFKオペラハウス（br） |
| DA | ダラス，マクダモット・メイヤーソンホール | | |
| BN | ブリストル，コルストンホール | SA | ザルツブルグ，祝祭劇場 |
| SO | レノックス，セイジ・オザワホール | ST | シュツットガルト，リーダーハーレ・大ホール |
| CM | コスタメサ，セジャーストロムホール | AF | ニューヨーク，アヴェリ・フィッシャーホール |
| SL | ソルトレイクシティ，アブラバネル・シンフォニーホール | CR | コペンハーゲン，ラジオ放送スタジオ 1 |
| BP | ベルリン，フィルハーモニー | EB | エジンバラ，アッシャーホール（br） |
| TS | 東京，サントリーホール | GL | グラスゴー，ロイヤルコンサートホール（br） |
| TB | 東京，文化会館 | LF | ロンドン，ロイヤル・フェスティバルホール |
| BR | ブラッセル，美術宮殿（改修後） | LV | リバプール，フィルハーモニーホール |
| BM | ボルチモア，メイヤーホフ・シンフォニーホール | MA | マンチェスター，フリートレードホール（閉鎖） |
| | | PP | パリ，ザール・プレイエル（br） |
| | ボン，ベートーベンホール | ED | エドモントン，アルバータ・ジュビリー講堂（br） |
| | シカゴ，シビックセンター | MP | モントリオール, ウィルフレッド・ペルティエホール（br） |
| 21 | シカゴ，オーケストラホール（br） | TK | 東京，NHKホール |
| | クライストチャーチ，タウンホール | SH | シドニー，オペラハウス・コンサートホール（br） |
| – | クリーブランド，セヴァランスホール（br） | SF | サンフランシスコ，デービーシンフォニーホール（br） |
| | ゴーテンブルグ，コンサートホール | TE | テルアビブ，フレデリック・R・マン講堂（br） |
| 39 | エルサレム，ビニヤニハオーマ | LB | ロンドン，バービカン・コンサート劇場（br） |
| | 京都，コンサートホール | BU | バッファロー，クラインハンス音楽堂（br） |
| | ライプチッヒ，ゲバントハウス | LA | ロンドン，ロイヤルアルバートホール（br） |
| | レノックス，タングルウッド音楽堂 | | |

注：（br）は音響改修の実施前であることを示す。これらのホールの音響状態は改修後に大きく変化した可能性がある。

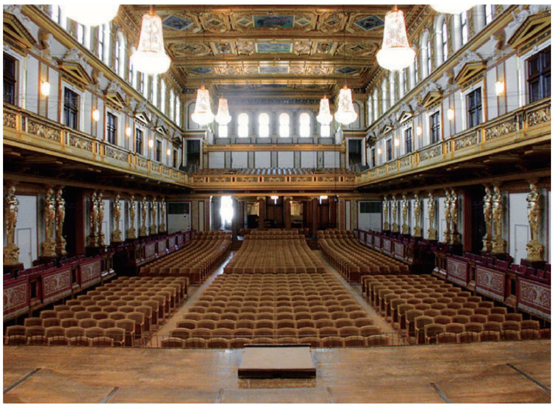


Photo 4　ウィーン楽友協会大ホール（1870年，1680席）
Grossersaal Musikverein in Vienna（1870, 1680 seats）

Photo 5　ボストン・シンフォニーホール（1900年，2625席）
The Symphony Hall in Boston（1900, 2625 seats）

Fig.9は世界の主要なコンサートホールに対する残響時間のプロットである。上位8ホールの残響時間は1.8-2.0秒，下位は1.5-1.8秒となっている。つまり，残響時間だけでは音響品質を充分に層別できないことがわかる。Fig.10は側方反射音理論に基づいて提案されている音響パラメータ（側方エネルギー比$LF_{E4}$）について，その測定値が存在する22ホールの評価順位に対するプロットである。上位6ホールは下位6ホールと分離できるが, 中間に位置するホールの評価順位に関して，$LF_{E4}$が有意とは考えられない。グラスゴーのホール（図中GL）の$LF_{E4}$は最高位評価のホールと同一であるが，このホールは最近，音響の改善を目的とする大規模改修が行われている。

同様な結果は，Table 1に対応する様々な音響パラメータについて成り立つ。つまり，既存のパラメータは満たすべき最低条件を示しているが，それだけではホールの音響品質の違いを充分に説明できないのである。

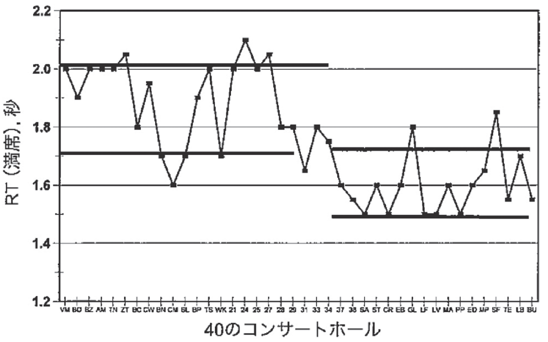



Fig.9　Table1に示す40のコンサートホールについて，その評価順位に対する残響時間のプロット
Reverberation times for 40 concert halls, plotted versus the subjective rank orderings of acoustical quality listed in Table1

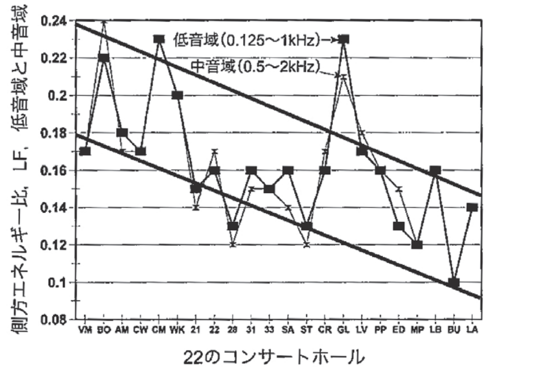



Fig.10　Table1に示す22のコンサートホールについて，その評価順位に対する$LF_{E4}$（側方エネルギー比）のプロット
Plot of LFE（early lateral fraction）vs. the quality ratings of 22 concert halls listed in Table1

## 2.2.2　両耳品質指標（Binaural quality index, BQI）

ヒトの聴覚神経系は左右の耳に入射した音波の微妙な違いから，音の方向性などの空間情報を知覚している。神経生理学によれば，ヒトは後脳橋部の上オリーブ核で，左右の耳の聴神経を伝わるニューロン信号の時間差と大きさの差を判断して上位神経系（聴覚皮質）に伝えるメカニズムが明らかにされている（Fig.11）[6]。つまり，脳内の神経活動では空間情報を認知するため，左右の鼓膜面への音の到達時間差と大きさの違いを判断しているわけであり，このプロセスは数学的には二つの両耳信号の相互相関関数を計算することに該当する。

この概念を手掛かりにすれば，空間内で音楽を快いと感じる要因は，（片方の耳だけでも知覚できる）残響や音量だけではなく，左右の耳に到達する音の振幅と位相の差によるとの仮説が導かれる[7]。このことは，評価の高いホールでは豊かで立体的な響きが存在することからも理解できよう。また，これを支持する多数の基礎的研究が存在している。つまり，空間の響きの品質を評価するためには両耳に入射する音波の相関関数を測定して両耳へ到達する音波の類似性を評価すれば良いと考えることができ（Fig.12），ホールの空間的な響きの評価指標としてBQI（両耳評価指標, Binaural quality index）が定義できる[1]。

Fig.13はTable 2に示した25のコンサートホールの評価順位に対してBQIの測定値のプロットであり[1]，BQIは3つのサラウンド型ホールを除けばすべてのホールを正確に順位付けできることがわかる。サラウンド型ホール（Photo 6）ではステージの両側と背後に多くの席があり，その位置ではBQIは低い値をとるが，正面の席ではBQIは良好な値となる。BQIはコンサートホールの音響品質を評価するために非常に優れた物理パラメータであることがわかる。ただし，実際の音響設計に際してはそれ以外のさまざまな物理パラメータが適正な範囲に存在するべきことは言うまでもない。

Fig.14はBQIの測定値が存在するオペラハウスに対するプロットである。この結果から，BQIはオペラハウスの

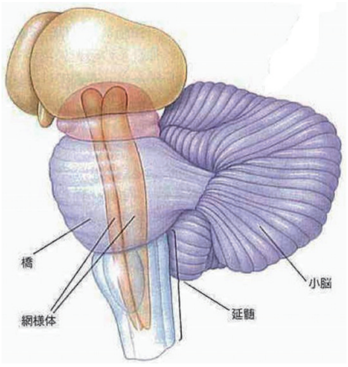



Fig.11　ヒトの髄脳と後脳の構造[6]
Structure of human myelencephalon and hind brain

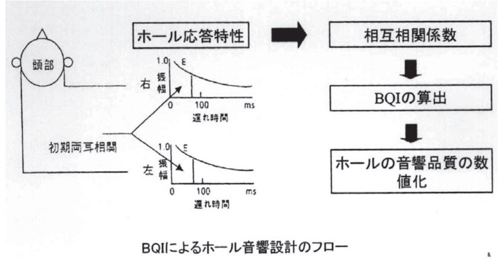



Fig.12　両耳による左右の音の類似性判定と両耳品質指標BQI
Binaural judgment of similarity between left and right sounds vs. binaural quality index BQI

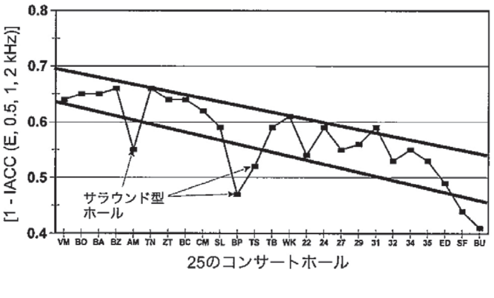



Fig.13　Table 2に示す25のコンサートホールについて，その評価順位に対するBQIのプロット
BQI for 25 concert halls, plotted versus the subjective rank orderings of acoustical quality listed in Table 2

評価順位についても高い相関を示す物理パラメータであることが言える。上位に評価されるオペラハウスでは，パリ・ガルニエ・オペラ座（PG）を除き，コンサートホールの場合と同じようにBQIは0.6以上である。なお，ミラノ・スカラ座（MS）ではボックス席とメインフロアで大きな差を生じている。これは，伝統的なオペラハウスの平面形が馬蹄形（Fig.15）であることによって，特にメインフロアで大きな音のバラツキを生じることが原因と考えられている[8]。

現在，BQIは新しい音響評価指標と認識され，国際コンペの設計要綱においても，ホールの設計指針の一つとして記載されている。

Photo 6 サラウンド型ホールの代表例：ベルリン・フィルハーモニー（1963年，2218席）
A typical surround hall, Berlin Philharmonie（1963, 2218 seats）

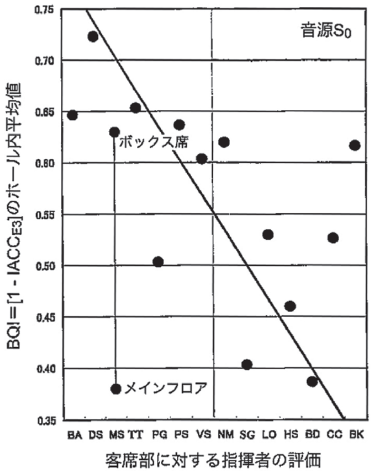



Fig.14 14のオペラハウスについて，指揮者による評価順位に対するBQIのプロット（Fig.16に対応）Plot of BQI vs. quality ratings of 14 opera houses by conductors（in correspond to Fig. 16）

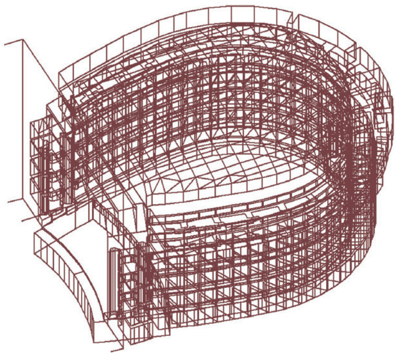


Fig.15 典型的な馬蹄形のミラノスカラ座のCADモデル
A CAD model of a typical horseshoe hall, Teatro Alla Scala in Milan

## 3 音響設計の実施例

劇場やホールの建設プロジェクトには，建築主や建築技術者に加え文化人，音楽家，舞台関係者，特殊技術者など非常に多くの分野の人々が関与し，それぞれが理想とするホールの響きを抱いている。従って，音の響きという極めて感性的なものを追求していく中で，同じ到達目標を共有することが重要となる。音響設計者の役割はそうした意見を集約させることであり，そのためには，様々な音の響きに関するイメージを音の物理的な数値に置き換え，客観化して数値的な目標を提示し，最終的に建築設計図書に反映させるという合理的なフローに沿ってプロジェクトを進める必要がある。多数の工事関係者から支持や同意を得るためには，経験則ではなく，客観的な理論的根拠が意味を持つのである。こうした方針のもと，これまで担当したプロジェクトから，時間軸に沿ってその代表例について紹介する。

### 3.1 新国立劇場オペラ劇場

#### 3.1.1 基本設計

新国立劇場は4半世紀の構想を経て日本に初めて実現したオペラ・バレエなど舞台芸術の上演を専用目的とする複合劇場施設であり，その中核をなすオペラ劇場は，名実とともにワールドクラスの音響性能が求められた（Photo 7）。

オペラハウスの形状は，ヨーロッパの伝統的スタイルであるウィーン国立歌劇場やスカラ座（Fig.15）等に見られる馬蹄形と，ニューヨークのメトロポリタン歌劇場など戦後の多くのオペラ会場のとる扇形に大別される。音響的には前者が，ステージへの視覚線では後者が優れているが，両方を同時に満たすことは困難とされてきた。そこで，オーケストラ用のコンサートホールでは最も美しい響きを得ることができるシューボックス形（矩形）を内壁の輪郭線として，扇型の上階バルコニーを融合させて視覚線の最適化を計り，視覚・音響の課題を同時に解決する新しい形態を基本形として検討を開始した（Fig.16）。

オペラハウスの最大の課題は60人を超えるオーケストラ演奏者に対抗して充分な音量で歌手の歌声を響かせるという点にある。このため新しいコンセプトとして，プロセニアムに向かう6つの各階バルコニー側の端部とプロセニアム直上部を，トランペットなどの金管楽器のラッパ形状に近づけるアイデアを考案した（Photo 8，Fig.17）。物理的には，この方法は舞台と客席空間のインピーダンス・マッチングをとることに該当し，この部分を適正な形態にすればオーケストラの音量を保ったまま歌声を増幅できるので，その結果，歌手にかかる負担が減り，芸術的にも優れた演奏が期待できることになる。

その当時，オペラハウスの音響設計手法に関する文献・資料等は十分と言い難く，欧米の主要なオペラハウスとその関係者から情報提供を受け逐次作業を進めた。さらに，欧米の14のオペラハウスで音響測定を実施して，これらをもとに音響に関する具体的な心理属性とその数値目標を設定した。

Photo 7　新国立劇場オペラ劇場（1997年，1814席，建築設計：TAK建築研究所）
The New National Theater in Tokyo（1997, 1814 seats, architectural design: TAK Associated Architects）

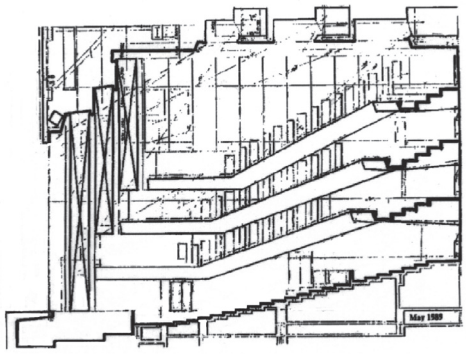


Fig.16　設計着手時の建築設計案（1989年5月）
Architectural drawing at the start of design process（1989, May）

Photo 8　プロセニアムの周囲に構成した音響トランペット構造の初期の模型実験
An early scale model test for the acoustical trumpet constructed around the proscenium

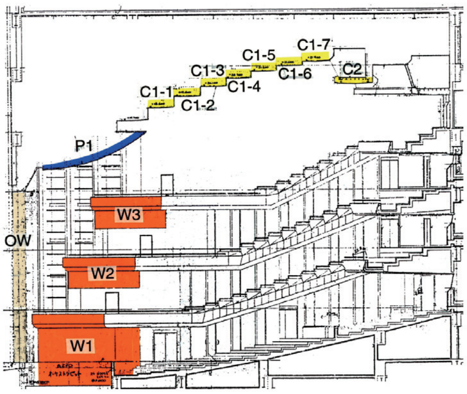



Fig.17　オペラ劇場の竣工図。天井P1とバルコニー側壁W1-3が音響トランペット構造を担っている
Architectural drawing of the opera theater at completion. The ceiling C1 and the side walls W1-3 form a part of the acoustical trumpet

### 3.1.2　実施設計とその結果

音響設計の最初の作業は，原設計の音響的欠陥を把握・修正し，音響トランペット構造を明確化することであった。詳細設計に際しては，CADモデリング（Fig.4）と1/10スケールの音響模型（Photo 9）を用い，両耳品質指標BQI，残響時間・音の透明感・音の大きさ等の音響パラメータの詳細な実験検討を行い，設計図書が正確に目標とする音響特性を達成するまで，繰り返し検証を重ねた。一方，模型による検討の難しい，壁面ディテールによる音の拡散や椅子の吸音性能などは，実寸のモックアップを制作して材料試験を行い正確を期した。

Fig.18は竣工後のホールと1/10縮尺模型で測定した室内インパルス応答の比較例である。両者のパターンの特徴は良好に対応して実験精度が確保されていることが確認できる。内装工事完了後には実際に満席の聴衆による演奏会（チューニングコンサート）を行って，音響パラメータだけでは表現しきれない微妙な響きのニュアンスを確認した。Table 3はその際に実測した音響パラメータを示しており，すべての目標値が達成され，世界のトップクラスのオペラハウスに比肩する音響特性となっていることがわかる。

Photo 9　オペラ劇場の音響実験用1/10縮尺模型
1/10 scale model of opera theater for acoustical experiment

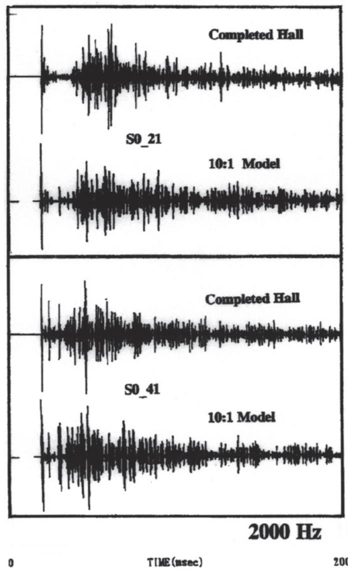



Fig.18　1/10縮尺模型（1994年）と竣工後（1997年）に測定したインパルス応答の比較。満席状態に対応。上：2階席中央，下：4階席中央
Comparison of measured impulse responses of 1/10 scale model（1994）and completed hall（1997）, under occupied condition, upper: a center seat at the 1st balcony, lower: a center seat at the 3rd balcony seat

Table 3　音響パラメータの実測値の比較。4列目は世界的に評価の高いブエノスアイレス・コロン劇場，ドレスデン・ゼンパー劇場，ウィーン国立歌劇場の各測定値の範囲（Fig.19参照）
Comparison of measured acoustical parameters. The 4th column shows the range for the values among Teatro Colon in Buenos Aires,　Semperoper in Dresden, and Staatsoper in Vienna, that are highly evaluated worldwide

| 音響属性 | 音響パラメータ | 新国立劇場 | ブエノスアイレス，ドレスデン，ウィーン |
|---|---|---|---|
| 残響感 | 残響時間，RT | 1.5 s | 1.4－1.6 s |
| | 初期残響時間，EDT | 1.7 s | 1.4－1.8 s |
| 親密感 | 初期時間遅れ，ITDG | 17 ms | 17－20 ms |
| 透明感 | クラリティ，C80 | 1.6 dB | 0.8－2.7 dB |
| 空間性 | 両耳音響指標，BQI | 0.65 | 0.60－0.72 |
| 暖かさ | 低音比，BR | 1.1 | 1.2 |
| 音量感 | （V/EDTmid）×10-2 | 85 | 74－119 |

### 3.1.3　竣工後の評価

当オペラハウスには最初のシーズンの後，「音響は完璧，素晴らしかった。…世界中の劇場でたくさんのオペラを聞いてきたが，ここが一番いい。ホール全体が大きな楽器のようだ（作曲家　團伊玖磨氏）」，「新国立劇場は間違いなく世界で最高のオペラハウスの一つである。この素晴らしい業績を祝福したい（オーストリアの指揮者　グスタフ・クーン氏）」といったコメントを始めとして，各界より多くの賛辞が寄せられた。Fig.19は筆者らが行ったオペラハウスの音響に関するアンケート調査結果である[8]。これは世界各国21名のオペラ指揮者からの回答をまとめたものであり，当オペラ劇場は世界最高水準のオペラハウスと同等の評価が得たと判断できよう。なお，ここで考案したトランペット構造は設計上のロールモデルとの評価を得つつあり，その後さまざまなオペラハウスに採用されている。

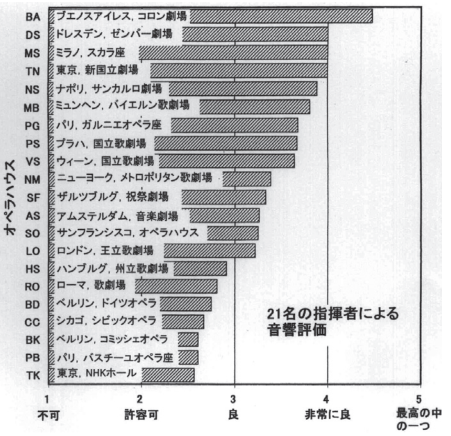



Fig.19　21名のオペラ指揮者による21オペラハウスの客席部の音響品質の評価順位
Acoustical quality ratings in audience areas of 21 opera houses by 21 conductors

### 3.2　いくつかの設計事例

ホールの響きの要求品質を，響きの属性に対応した数値を用いた客観的な目標と定め，CADモデルによる応答解析と模型実験をハイブリッドに活用してその実現を図る設計フローは，コンピュータの発展によって可能となったパイオニア的方法であった。その後，この成果は内外の技術者から大きく注目され，世界的にもオーソドックスな手法の一つとなりつつある。かつて「ホールの音響設計は感性的なもので数値化できない」といった見解が存在し，優れた響きを科学技術によって創ることは困難であるとする向きもあったが，ここで紹介したプロセスは，それに対する一つのソリューションを与えると言えよう。以下に代表的事例について紹介する。

#### 3.2.1　浜離宮朝日ホール

朝日新聞社が新東京本社内に音楽文化の発信基地として計画した室内楽専用コンサートホールである（Photo 10）。時期は前後するが，我々が音響パラメータの設定―CADシミュレーション―縮尺模型実験というフローを初めて採用したプロジェクトである。着工にあたり，建築主からは「ピアノが美しく響くこと」「音を浴びるように聴けること」という要望を受けた。当時，空間の響きと音響パラメータとの関係についての知見は現在の水準にはなかったため，平行して基礎的研究を行って，①音のテクスチャー（肌理）の実現，②初期反射音の拡散，③中低音の残響時間のバランス，④演奏者の音の返り，という音響属性を重視するという方針を定め，音響パラメータの数値目標を設定した。計算機や計測器の性能も充分ではなかったため，膨大な人的パワーを投入して取り組んだ。幸い，完成後の音楽関係者やマスコミによる評価は極めて良好であり，関係者からも大きな満足が示された（Fig.20）[9]。この成果は，以降のプロジェクトに我々の設計手法を適用していく上で客観的根拠をあたえることとなった。

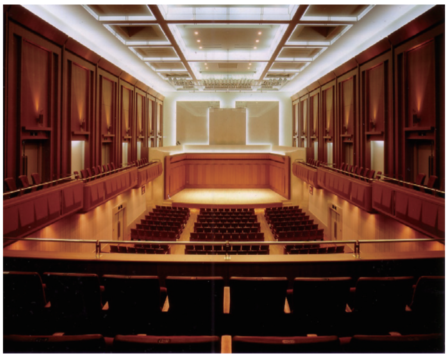
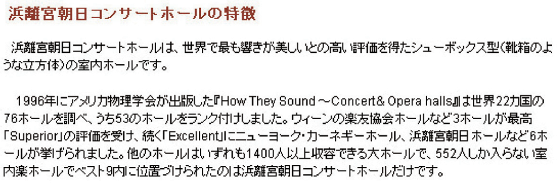


Photo 10　浜離宮朝日ホール(1992年，552席建築設計：竹中工務店)
Hamarikyu Asahi Hall（1992, 552 seats, architectural design: Takenaka Corporation）



浜離宮朝日コンサートホールの特徴

浜離宮朝日コンサートホールは、世界で最も響きが美しいとの高い評価を得たシューボックス型(靴箱のような立方体)の室内ホールです。

1996年にアメリカ物理学会が出版した『How They Sound ～Concert& Opera halls』は世界22カ国の76ホールを調べ、うち53のホールをランク付けしました。ウィーンの楽友協会ホールなど3ホールが最高「Superior」の評価を受け、続く「Excellent」にニューヨーク・カーネギーホール、浜離宮朝日ホールなど6ホールが挙げられました。他のホールはいずれも1400人以上収容できる大ホールで、552人しか入らない室内楽ホールでベスト9内に位置づけられたのは浜離宮朝日コンサートホールだけです。

Fig.20　浜離宮朝日ホールホームページより
An article from a website of Hamarikyu Asahi Hall

#### 3.2.2　東京オペラシティ（TOC）コンサートホール

当プロジェクトは新国立劇場と一体の特定街区に計画された，オーケストラ演奏を主目的とするコンサートホールである（Photo 11）。世界最大の音楽都市の一つである東京を代表しうる最高水準の音響性能と，都市のシンボルとしての，斬新で独創性ある建築デザインが求められた。建築家・柳澤孝彦氏のコンセプトは壮大なピラミッド型の大天井を持つホールであった。それまで音響上の理想形は，前述の3大ホールに代表されるシューボックス形式と考えられており，この前例のない形状の音響的な解決が最大の課題となった(Fig.21)。

設計を開始するにあたり，まず世界の主要なコンサートホールから23ホールを選び，最新の音響計測を実施した。さらに，22カ国，66ホールの設計図書・写真・ディテール・音響データを収集した。これより音響品質に有意に寄与すると判断した音響パラメータを抽出してその適正範囲を決定し，設計目標値とした。18ヶ月におよぶ設計期間には，3度の大幅なモデルチェンジを提案し，意匠・音響の両面を解決する実施案に到達したが，このような新しいデザインのプロジェクトでは，それまでの経験や直感はほとんど無力である。音

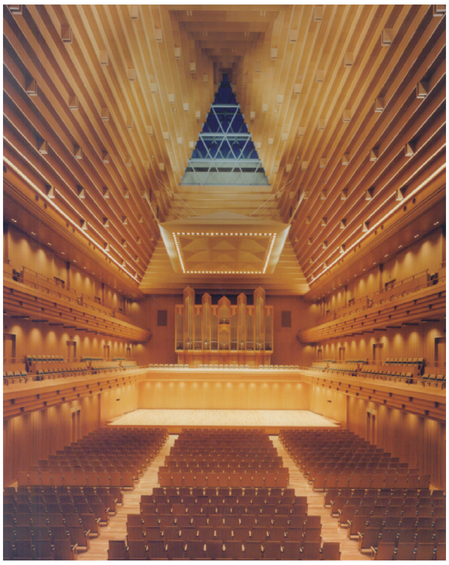


Photo 11　東京オペラシティコンサートホール（1997年，1632席，建築設計：NTTファシリティーズ，都市開発研究所，TAK建築研究所）
Tokyo Opera City Concert Hall（1997, 1632 seats. architectural design: NTT Facilities, Urban Planning and Design Institute, and TAK Associated Architects）

場パラメータの数値評価は客観的な拠り所であり，CADモデルと模型実験は非常に強力なツールとなった。

Table 4はTOCコンサートホールの竣工時の音響パラメータの測定値である。世界最高にランクされるウィーン，ボストン，アムステルダムの3大ホールのデータと比較すれば，TOCホールがすべての指標についての最適値を有していることがわかる。

幸い，当プロジェクトは各界から高い評価を受け，国際的にも注目を集めている（Table 3参照）。チェロ奏者・ヨー・ヨー・マ氏は2夜に渡る演奏会後，「これまで演奏した中で，このホールは最高レベルの音響を持っている。ピラミッド構造による非日常性が，どのホールでも経験したことのない神聖な雰囲気を与え…奇跡が成し遂げられた。」と賛辞を述べている。New York Times誌（2000/04/18）には「科学は良い音響を創りうるか」という見出しで，当プロジェクトをその成功例として紹介する2面にわたる記事が掲載された。こうした評価から（Photo 12），当初は最大の課題であったピラミッド型天井は，優れた音響デザインであることが立証されたと言えよう。現在，ピラミッド型天井はコンサートホールの新たなデザインとして認識され，その地位を確立しつつある[10]。

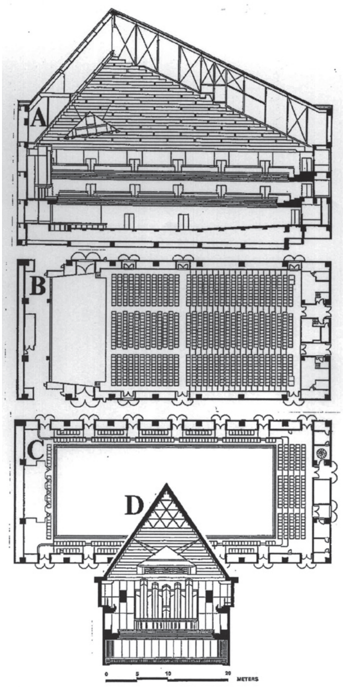



Fig.21 東京オペラシティコンサートホールの平断面図
Plan and cross section of Tokyo Opera City Concert Hall

Table 4 音響パラメータの実測値の比較。4列目は3大ホール（ウィーン楽友協会大ホール，ボストン・シンフォニーホール，アムステルダム・コンセルトヘボウ）の各測定値の範囲（Table3参照）
Comparison of acoustical parameters. The 4th column shows the range for the values among three major halls（Grosser Musikvereinssaal in Vienna, the Symphony Hall in Boston, and Concertgebouw in Amsterdam）, see Table 3）

| 音響属性 | 音響パラメータ | TOC | ウィーン，ボストン，アムステルダム |
|---|---|---|---|
| 残響感 | 残響時間，RT | 1.96 s | 1.9－2.0 s |
| | 初期残響時間，EDT | 2.69 s | 2.4－3.0 s |
| 親密感 | 初期時間遅れ，ITDG | 15 ms | 12－21 ms |
| 透明感 | クラリティ，C80 | －2.7 dB | －3.7－－2.7 dB |
| 空間性 | 両耳音響指標，BQI | 0.72 | 0.62－0.71 |
| 暖かさ | 低音比，BR | 1.05 | 1.03－1.11 |
| 音量感 | Gmid | 6.2 | 5.4－7.8 |
| アンサンブル | サポート，ST1 | －12.1 dB | －17.8 dB以上 |

Photo 12 演奏者へのインタビュー
Interview to a player

### 3.2.3 東京宝塚劇場

当劇場は宝塚歌劇を専用指向する2,069席の大規模劇場であり，要求性能もこれに特化する（Photo 13）。歌声やせりふはマイク―スピーカを介して拡声するため，生音が主体のコンサートホールやオペラハウスとは異なった空間の響きが必要である。また，多目的ホールとは異なる高品位な電気音響再生が求められる。関係者へのヒアリングをもとに，①電気音響システムによる自然な音の再生，②空席（仕込み）と満席（公演）の音響の差が小さいこと，③オーケストラピットからの生音の伝達という目標品質を定めた。

Photo 13 東京宝塚劇場（2000年，2069席，建築設計：竹中工務店）
Tokyo Takarazuka Theater（2000, 2069 seats, architectural design: Takenaka Corporation）

電気音響主体の劇場では，音場のほとんどはスピーカ直接音によって制御されるため，生音には有効な反射音も有害となる場合がある。ここでは，如何にして有害な反射音を制御するかが課題となった。また，一般の商業劇場が1,000席程度であることと比較すれば明らかなように，より緻密な音響設計が求められた。宝塚歌劇の上演では，多数の出演者に対して複雑な電気音響装置を使用して音場をコントロールする。このため歌劇団による実際の演技を幾度も行い，その駆動状態を適正な水準に収束させた。現在，当劇場では連日の満席公演が続いており，高度な劇場装置として充分な機能を果たしている。

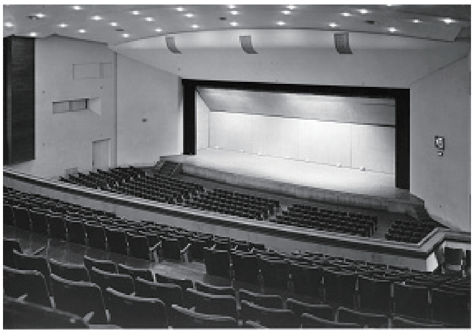
### 3.2.4 HAKUJUホール

小規模な室内楽ホールとして計画されたこのプロジェクトでは，音響に対する高いプライオリティとモダニズムに満ちた建築デザインが要求された（Photo 14）。ここでは，①繊細な室内楽にフィットする透明感ある響きと残響感，②立体的で親密感に満ちたホールトーンと音色のテクスチャー，③適度な音の返りのある演奏しやすいステージを音響コンセプトとした。ホールは古典的な船底天井を持つシューボックス形式としての形態を基調とするが，流線型のフォルムで構成した壁と天井によって現代的で斬新なデザインを特徴としている。ステージ拡散体と側壁上部の音響反射ウィングには，従来，音響材料として好ましくないとされたガラスが効果的に使用され，このウィングを彩る発光ダイオードのインテリア照明がホールにエレガントな魅力を与えている。ホールは高い評価を確立しており，首都圏の代表的な音楽会場として活発に利用されている[11]。

Photo 14 HAKUJUホール（2003年，300席，インテリア設計：アトランティス・アソシエイツ，インテリア 実施設計：竹中工務店）
Hakujyu Hall（2003, 300 seats, interior design: Atlantis Associates）

### 3.2.5 東北大学川内萩ホール

創立100周年記念事業として，老朽化した旧川内記念講堂を再生したホールである（Photo 15）。外観は保存・修復しつつ，内装は類例のない大規模な改修を行って，プロセニアム形式の多目的ホールからシューボックス形式のコンサートホールへとその形態は一新した。同規模の，ヨーロッパのやや小ぶりなクラシックホールが持つ透明感と残響感の両立した響きを実現した。また，大学の施設ということから明瞭な言葉の伝送を意図した電気音響装置を設計して，学術会議やシンポジウムにも相応しい音場を確保している。



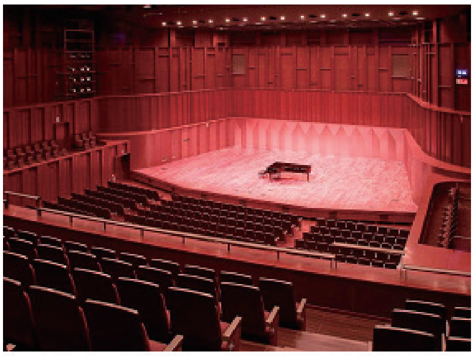


Photo 15 旧東北大学記念講堂（上）と川内萩ホール（下）（2008年，1230席，監修：東北大小野田研究室+阿部アトリエ，建築設計：三菱地所設計，音響設計は東北大鈴木研究室と共同）
The old Tohoku University Memorial Hall（upper）and Kawauchi Hagi Hall（lower）（2008, 1230 seats, supervision: Onoda lab., Tohoku University + Atelier Hitoshi Abe, Architectural Design; Mitsubishi Jisho Sekkei, acoustical design: Suzuki lab. Tohoku University and Takenaka Corporation）

## 4 おわりに

合理的に説明可能であるものこそが本質的と考えてきた近代思想に対して，ショーペンハウエルやニーチェは世界の本質は合理的精神によって捉えることのできない心の深層にあると考えた。作曲家ワグナーは，絵画や彫刻と異なって，音楽は意識の産物でなく，無意識の暗部にひそむ情念を直接的に表現するものであるという考えを示している[12]。

古来，作曲家は特定の空間を念頭において作曲してきた。バッハは当時，前例のなかったライプチヒのトーマス教会の響きを考慮してマタイ受難曲を作り，ワグナーにいたっては自身が創作した「楽劇」を演ずる専用劇場として，バイロイト歌劇場を建設した。音楽芸術の美は空間と共に存在しているのである。すなわち，人間が生理学的に同じ脳を持ち続ける限り，音楽に求めるものは大きく変わることはないであろうし，人はこれを本質的に必要とする。ホールの音響設計の意義と目的は，そこに繋がっていると考えられるのである。

本報告で紹介した数々のプロジェクトは，音楽・オペラ・演劇などの舞台芸術にとって不可欠な音響原理が組み込まれている。本稿を終えるにあたり，今後，その可能性を十分に発揮させ，優れた舞台芸術の公演が繰り広げられて，最高の劇場空間が実現されることを期待するものである。

**謝辞**

本報告で紹介した様々な成果は建築主，建築設計者，工事関係者，当研究所の諸先輩・同僚の方々による不断の努力と支援が結集された成果である。ここに改めて深甚なる謝意を表します。

**参考文献**

1）ベラネク・日高・永田，「コンサートホールとオペラハウス」シュプリンガー東京（2005）
2）DENON, Anechoic Orchestra Music Recording. オーディオCD（1995）
3）鈴木他，「超臨場感音響システム実現への課題と動向」IEEJ 129, 538-541（2009）
4）Beranek, L.L., Concert and Opera Halls, How they sound.（American lnst. Physics）（1996）
5）レオ・ベラネク，訳：日高孝之，「コンサートホール音響：補遺2001」日本音響学会誌58, 61-71（2002）.
6）ピネル「バイオサイコロジー」西村書店 p.52（2007）
7）Hidaka, T., Beranek, L.L. and Okano, T.,“Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low-and high-frequency sound level as measures of acoustical quality in concert halls,” J. Acoust. Soc. Am. 98, 988-1007（1995）.
8）Hidaka, T., and Beranek, L.L., “Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas,” J. Acoust. Soc. Am. 107, 368-383（2000）.
9）http://www.asahi-hall.jp/hamarikyu/hamarikyu/index.html
10）Klepper, D., “Tent-shaped concert halls, existing and future,” J. Acoust. Soc. Am. 124, 15-18（2008）.
11）日本経済新聞2009年7月30日夕刊
12）渡辺裕「マーラーと世紀末ウィーン」岩波現代文庫（2004）