

コンサートホールの形と音

橘 秀樹 (東京大学生産技術研究所 人間・社会部門 教授)

おはようございます。この前の講演は地震についての興味深い内容でしたが、私の話は気楽に楽しんでいただけるような内容にいたします。

今日のテーマは「コンサートホールの形と音」ということですが、まず最初に、いまま紹介をしてもらいましたけれども、私と坂本助教授とが一緒に組んで進めている研究について、自己紹介がてらにごく簡単に紹介させていただきます。

(パワーポイント)

私どもの研究室は応用音響工学という看板を掲げておりまして、研究内容としましてはまず環境音響すなわち主に環境騒音の問題があります。それをいかに防ぐかというようなテーマ、それから建築に絡む音の問題。きょうの話は、その中の室内の音響、コンサートホールをはじめとする部屋の中での音響の話を行います。また、何の分野でもそうですが、計測というのは非常に大事でして、音響に絡む計測技術の開発研究も進めております。それから、音はなんといっても耳で聞いて感じるものですので、心理的なアプローチというのが欠かせないわけです。ということで、心理学的な音響の研究もやっております。きょうの話も多少それに絡むかと思えます。

(パワーポイント)

建築音響における音響というとコンサートホールということになるわけで、今日の話もこの辺にしたいと思いますが、その前に、広く音の問題といいますと社会的には騒音の問題があります。例えば道路交通騒音、これは世界中どこでもそうですが大変深刻な状況にあるわけです。こういうことについても研究をやっております。

(パワーポイント)

これは神戸の地震で倒れた高架道路です。18カ月で復旧しましたが、いまや外から見るとシェルターみたいな道路になってしまっております。これも騒音を防ぐためです。いま建設中の、ほんとにできるかどうか心配ですが、新東名高速道路も、高さ8mのこういう塀がつくられています。

ここで、ちょっとおもしろい絵がありますので見ていただきます。これは一番単純な塀ですけども、この点から音が出たらどういうふうに音が伝搬するかを波動的に計算したもので、こういう回折現象を可視化したのは初めてで、大変おもしろいのでご紹介します(アニメーション)。

それから、先ほどのような曲がった塀が最近ずいぶん建てられるようになりましたけれども、こういう場合にはさらに複雑な反射あるいは回折現象を起こします(アニメーション)。ご覧のとおり何回も何回も音が反射されながら回り込んでいく様子が分かります。こういう塀を建てたときにどのぐらい音を減衰させられるかというようなことも研究の対象になっているわけです。

(パワーポイント)

それから、建物に入ってまいりますと、例えば住宅で生活をしている場合に、いろんな騒音が身のまわりにあるわけです。まずは外から来る騒音を防がなければいけないということでいろんな研究をしております。

(パワーポイント)

これはわかりやすい例ですが、窓を二重にする。二重窓というのは、ただ二重にすればいいというものではなくて、ちゃんと設計しないとかえって性能が劣ることもあるわけです。そういう研究もやっております。

(パワーポイント)

これは窓などから音がどこからどういうふうに漏れてくるかというのを、音響インテンシティ法というの新しい測定法を用いて調べている様子です。

(パワーポイント)

それから、建物の中でも部屋どうしの間でも音を遮ることが必要です。最近では軽量でかつ遮音性能のいい壁がいろいろ開発されておまして、どういうふうに材料を組み合わせればよいかというような研究もしております。

(パワーポイント)

さらに、集合住宅などの建物で最も大きな問題は床衝撃音です。上の階で子供が飛び跳ねたり遊んだりして床を加振した音が下の階で問題になる。本来は、建物側でこの種

の音をある程度防ぐ性能を持っていないといけないのですが、実際にしばしば問題となっています。

(パワーポイント)

それでいろんな床構造が工夫されているわけです。それを知らずして、いままで絨毯だったのを急にフローリングなんかに直してしまいますと設計と違ったことになってしまいまして、非常に大きな音の問題を起こします。

(パワーポイント)

つぎに、これは元・生産技術研究所教授の原広司先生の設計になる京都駅です。それからこれは羽田の新しい空港ビルです。こういう建物と音が何の関係があるのかと思われる方もいらっしゃるかと思いますが、実はこういうところもわんわんしていたり、非常に落ち着かなく話もできないという状況になりやすいわけです。いわんや非常事態のときには非常放送も聞こえず阿鼻叫喚の世界になってしまう恐れがあるわけです。こういうところこそ音響が大事なんです。もちろん音だけではございませんが、

(パワーポイント)

さらには最近では学校建築についても音の研究がされています。学校というのは子供たちが長い時間生活する空間でいろんな活動が行われるわけですから、いろいろな要素の一つとして音のことを考えておかないといけません。最近ではクラスがつながっているような学校もずいぶん増えてきておりまして、当然音は筒抜けなわけです。そういうところでいかに制御をするかが大事です。最近ではこのような音の問題、クラスルームアコースティクスが国際的にも重要視されるようになってきました。

(パワーポイント)

それからこの写真は、この建物の地下にある無響室の中でスピーカから騒音を出して、その中で会話がどのくらいしづらくなるか、という心理的な実験をしているところです。

(パワーポイント)

先ほどもご紹介がありましたが、ホールのステージの上で演奏家がなにを感じながら演奏しているかという大変難しいのが大変おもしろい研究もやっております。この写真はヴァイオリニストの千住真理子さんですが、彼女にはこの研究所の研究員をお願いしており、このような実験に協力していただいています。

(パワーポイント)

さて本題に戻りまして、まずイントロダクションとして「部屋の形と音」ということで、まず古いお話から始めたいと思います。

皆様ご存じだと思いますけれども、日光の鳴き竜、陽明門に向かって左手に小さなお堂があります。本地堂です。徳川家康の念持仏の薬師如来像を祭ってあるということで薬師堂とも呼ばれていますが、むしろここは鳴き竜という

ことで有名です。

(パワーポイント)

このように真っ平らな天井に竜の絵が描かれておりまして、その下でかしわ手を打つとこんな音がするわけです(音)。実はこの写真の鳴き竜は昭和36年に失火で焼けてしまいました。いまの音はNHKの古い放送から録音してあったものです。

なぜ鳴き竜が鳴くのだろうということで、これはもちろん明治になって一般公開されてから発見されたわけですが、まことしやかな説がいろいろあったようです。アインシュタインがここを訪れたときに、どうして鳴くのですかと聞かれたそうです。アインシュタインに聞けば何でも答えてくれると思ったのですが、彼はただニコニコ笑って答えなかった、というか答えられなかったそうです。

(パワーポイント)

実はいろいろ調査したところ、これはちょっと大げさに描いていますが、天井が少し曲面になっている。すなわち、むくりという日本の伝統的な建築技術でありまして、こういう天井を幾何学的に本当に真っ平らに張ってしまうと、目の錯覚で垂れて見えるのだそうです。それを補正するために真ん中を少し吊る。壁も本当にまっただけに塗ると野暮ったくなるんだそうですね。腕のいい左官屋さんには真ん中を薄く塗るという話も聞きましたけれども。

そういう伝統的なやり方であって、特別ここでそういう仕掛けをしたわけではなさそうだというのが結論なのですが、いずれにせよ天井、鏡天井と呼ばれている平らな天井と平らな床の間に音が往復反射する。さらに天井が少し曲面になっていますので、それが強調されるということで、あのような音がするわけです。

焼けた後、この鳴き竜を再建するというので、この研究所で私の前任の石井聖光教授の研究室で、こういう模型実験をしまして、昔の鳴き竜と同じように鳴くようにするにはどうすればいいかという研究をした結果、今の鳴き竜が再建されたわけです。

(パワーポイント)

堅山南風画伯の筆になる新しい竜の絵が描かれてありまして、いまも元気に鳴いているわけです(音)。

鳴き竜の場合は、こういうビリビリビリッという音が一つの売りになっているわけですが、実際のホールで、あるいはこういう教室みたいなところでこういうのが起こると大変まずいわけで音響障害になってしまいます。しかし、ときどき竜の絵を描かせたくなるようなホールがあることはあるんですね(笑い)。

(パワーポイント)

話が変わりまして、これはパリのルーブル美術館で、これは観光案内書とかそういうのには一切紹介されていませんが、われわれ音響の仲間と一緒に行ったときに、あっ、

ここはやってるな、とすぐ気づきました。回転楕円体みたいな断面の部屋、これは彫刻を飾ってある部屋だと思いましたが、そこに水盤のようなものが二つ置かれていました。それで仲間と二人でここに身を乗り出して話をしてみたら非常によく話が伝わりました。

(パワーポイント)

簡単に描けばこういうことで、楕円形では二つの焦点の間で音が行き交うということです。

(パワーポイント)

このような現象はよく知られていたらしく、これは1673年に出された非常に古い本ですが、タイトルは『新音響学』になっていますが、ここにもこういう絵がありまして、昔の人は経験的にそういうことを知っていたのだろーと思えます。日本ではこういう建築、一種のアーチ構造みたいなものはないですね。われわれ日本人は響きには鈍感なんじゃないかと思えます。カラオケのブアな響きで皆さん楽しんでいる反面、さっきも言いましたように駅とか、ああいふ所でわんわん響いていても何とも感じない、そんなことがあるような気がいたします。響きの良さも悪さも知らないというか。

(パワーポイント)

つぎは囁きの回廊。これはご存じの方いらっしゃると思いますけれども、ロンドンのセントポール寺院が有名で、あそこには案内が書いてあります。たしか、ここに上っていくのにアディショナルな入場料を取られたと思います。

(パワーポイント)

このようにドームの内側にぐるっと回廊がまわっていきまして、遠くでしゃべっている声が意外なほどよく聞こえる。囁くぐらいでは本当は聞こえませんが、ふつうの声でしゃべっているのが、どこから聞こえてくるのだろうというぐらいによく聞こえる。

(パワーポイント)

これは断面図ですが、こういうふうに音がすべて伝わっていくわけで、当然といえば当然なんです。ふだん経験しないような音の伝わり方が体験できる。私も何回か行ったのですが、見物客が多くてわーっとしていてなかなか体験できなかったのですが、数年前、ここを閉める直前に飛び込んでいって、みんなが帰るのを待って実験してきましたが、大変よく聞こえました。

(パワーポイント)

なにも囁きの回廊はここに限ったものでありません。中国の北京へ行くと必ず皆さん行かれると思いますが、天壇公園という観光の名所があります。そこに、漢字でも回音壁と書いてありますが、正式の名前はあるんでしょうが、音が回る壁というのがあります。このように円形の土塀がめぐらされておりまして、この写真のように壁際にいると遠くの音がよく聞こえてきて不思議な感じがするというこ

とで有名です。タネを明かせばなんてことはないわけですが。

(パワーポイント)

さてこの辺でホールの形と音という話に移りたいと思いますが、その前に、ホールということになりますと、響きというのが大事ですので、これはいつも大学の講義でやっているところの一番最初のものなんです。聞いていただきます(音)。

(パワーポイント)

これはベートーベンのコリオラン序曲の冒頭部ですが、楽譜で見ると、ここは休止、音がないということになっていますが、いま聞いていただいたように響きが残っています。ベートーベンの時代になりますと、コンサートホールでの音楽というのが確立されてきていまして、コンサートホールでの演奏を前提に作曲するという時代になっています。ですからベートーベンもここは休符としていますが、音は残っているということを計算づくで作曲をしているはずで、あとはホールが音をつくっているということになります。建築の立場から口幅った言い方ですが、音楽の最後の仕上げはホールがしているということになります。

よく、「コンサートホールは最大の楽器である」ということを言われますが、まさにそうでした。音楽をつくる上で建築というのは非常に大事な役目をしている。響きが長すぎても短すぎてもいけないわけです。

先ほど紹介がありましたが、実は昨夜、この建物のアトリウムで実験コンサートと称して千住真理子さんにヴァイオリンを弾いていただきました。このアトリウムは音がよく響くのですが、ここでヴァイオリン弾けるかなということになったわけです。後でご本人もおっしゃっていましたが、ふつうのテンポでは弾けない、また速い曲は弾けないということで、ある意味では楽しみながら、ある意味では苦勞しながらの演奏だったようです。

(パワーポイント)

そういうことで響きというのは非常に大事です。もしヴァイオリンを屋外で弾くとこんな音に聞こえます。ただしこの部屋の響きについてはしまいますので、その辺は考えながらお聞きください(音)。

(パワーポイント)

つぎにホールの中で弾けば、こういう音になるわけです(音)。これは残響時間が2秒ぐらいのホールの響きです。このような反射や残響が非常に大事になってくるわけです。

(パワーポイント)

このような響きの長さをあらわすために残響時間という量がよく使われております。これは音がして、それを止めた後、音のエネルギーの密度が60デシベルだけ減衰

する時間です。音響ではデシベルという単位を使いますが、マイナス 60 デシベルというのは 100 万分の 1 に相当します。例えば残響時間 2 秒というのは、音が 60 デシベル減衰するのにかかる時間が 2 秒ということです。ふつうのコンサートホールの残響時間は 1.5 秒ぐらいから 2 秒ちょっとぐらいです。もっとも演奏する音楽によっても違いますけれども。

(パワーポイント)

じゃあ何でも残響があればいいかというとは決してそんなことはありません。音楽ではなくてスピーチで試してみます。まず残響がないと (音)、つぎに、ちょっと残響が長めの場合で、残響時間が 1.5 秒。これは小型のコンサートホールぐらいです (音)、つぎに残響時間 5 秒 (音)。前に聞いてますから内容が何となくわかるような気がするかもしれませんが、これを外国語でやられたら 100% わかりませんね。というふうに、駅の空間などの公共空間でも響きの調整は非常に大事なわけです。もちろんこういうレクチャーをする部屋でも、響きは大変大事なわけです。ちゃんとした設計ではそういうことを事前に計算して建物を建てるわけですが、往々にして、いわゆる見た目のデザインだけで建てしまって、あとで大騒ぎということも少なくありません。竜の絵を描かなきゃいけないようなホールができちゃう。

(パワーポイント)

いま響きの話をしましたけれども、響きと同時に部屋の形というのが非常に大事だという今日のテーマにやっとたどり着くわけでございます。

(パワーポイント)

まずオペラ劇場。オペラというのは、1600 年前後、イタリアで、ギリシャ、ローマ古代劇の復活という形で誕生したといわれています。

(パワーポイント)

これはフランスのオーランジュにある古代ローマの野外劇場で、今でもオペラで使っているようです。6,000 人入るそうですが、オペラはこういう古代劇場から根を發しているわけです。

(パワーポイント)

オペラ劇場というのはもともと小さいんですが、だんだんと大きな建物が建てられるようになってきました。これは 1778 年に建てられた有名なミラノのスカラ座ですが、形もこういう馬蹄形になっていくわけです。半円形あるいは扇形から馬蹄形、こういう形になっていくわけです。

(パワーポイント)

つぎにオーケストラ音楽についてみてみます。もともとオーケストラというのは野外劇場の平土間の場所の名前なんですけど、だんだんそこで伴奏していた楽士たち、演奏家たちの集団をオーケストラというようになってきたわけで

す。

(パワーポイント)

もとはオペラの伴奏役であったオーケストラのメンバーは、自分たちも主役になって音楽をやろうやということ、今度ステージ上に上ってきて、オーケストラの音楽だけをやり始めたというのがいまのオーケストラ音楽の発祥だと言われています。

これは、ドイツのライプツヒにあった 1781 年のゲヴァントハウスの建物の絵です。いまここには新しいコンサートホールが建てられていますが、この建物はもともと繊維織物か何かの組合の建物だったそうですが、ここの響きがよいということで、コンサートが定期的に開かれるようになったわけです。これは一つの例ですが、こういう形でコンサートホールが生まれてきました。

(パワーポイント)

それ以降、1800 年代になりますと、コンサート専用の建物、コンサートホールが造られるようになってきました。これはウィーンのムジークフェラインスザール、日本語では学友協会ホールと呼ばれていますが、このホールでお正月に開かれるニューイヤーコンサートが衛星放送で送られてきますね。これは学生たちと一緒に測定に行ったときの写真です。

(パワーポイント)

つぎにこれはアムステルダムムのコンセルトヘボウ、これも大変有名なホールです。これが建てられたのは 1888 年です。

(パワーポイント)

それからこれは 1900 年ちょうどに建てられたボストンのシンフォニーホールで、先ほどのヨーロッパの二つのホールのようなよいホールをアメリカにもつくろうという意気込みでつくられたホールです。

(パワーポイント)

これはいまの三つのコンサートホールの図面ですが、特にウィーンのホールなど、建築的にはなんということもない直方体ですが、そのプロポーションが靴を買ったときに入れてくれる箱に似ているということで、シューボックススタイルと呼ばれています。この形はコンサートホールの一つの典型的な形です。

(パワーポイント)

しかし、建築的には直方体ばかりではおもしろくないということで、1900 年代になりますと、いろいろな形のホールがつくられます。これは有名なベルリンフィルハーモニーです。最初はカラヤンのサーカス小屋なんて悪口も言われたようで、まさにサーカス小屋のような形をしており、客席がステージを取り巻いていて、これはアリーナ形式と呼ばれています。この形は日本語でいえば段々畑、向こうでいえばワインをつくるブドウ畑に似ていることから、ヴ

インヤードスタイルなどと呼ばれています。この形のホールでは、真ん中にオーケストラがいて、それをみんなが取り囲んでいる。非常に雰囲気がいいんです。みんながステージに集中して、みんなで一緒になっているという感じがするので、大変いい雰囲気が作られます。しかし、音響的には非常に難しい形です。

(パワーポイント)

それとは違う例で、これはミュンヘンのフィルハーモニー。これは扇形です。

(パワーポイント)

それから、これはニュージーランドのクライストチャーチにあるタウンホールですが、このホールの平面形は楕円です。このホールでは、横方向からの反射音を作るためにこのような大きな反射板がたくさん吊されています。

(パワーポイント)

これはケルンのフィルハーモニー。実は何回か行ったのですが、リハーサル中とかなんとかでまだ中に入ったことはありませんで、写真とか図面で見ていただけです。ここは舞台まわりはほとんど円形に近い形をしています。

(パワーポイント)

ここで日本のホールも少し紹介しますと、これは1982年にできた大阪のザ・シンホニーホール。ザ (the) とはすごいですね、これぞシンホニーホールという意味ですね。このホールは日本で初めての本格的なコンサートホールということで、私どももこの音響設計をお手伝いしたのですが、大変いい経験になりました。とにかく初めてのコンサートホールだったので、手探りでつくったようなホールです。幸いうまくできて、いまでも評判はなかなかいいようです。

(パワーポイント)

それから、これは多少遅れて1986年に東京、赤坂に建てられたサントリーホール。これもご覧のように客席が段々畑状になっています。このホールができたときにワインヤードという言葉が日本でできたんです。ワインヤード、どうもサントリーホールだからかなと思うんですが (笑)。私もこの形をワインヤードと言っていたのですが、ある人から「ワインというのはビンに詰まった葡萄酒をいうで、畑にビンが詰まったワインがあるはずがない、ヴィンヤード形式と呼ぶべきだ」と言われました。

(パワーポイント)

日本にも直方体のシューボックス形式のホールがたくさんございます。これはこのすぐ近くにある渋谷のオーチャードホール、基本形は直方体です。

(パワーポイント)

これは1997年にできました横浜のみなとみらいホールで、これも直方体の形です。このホールも私どもが音響のお手伝いしたところなんです、これについてはまたあと

でお話しします。

(パワーポイント)

ということで、ホールといってもいろんな形があり、またなくちゃいけないと思います。そこで、このようなホールの基本的な形の違いを比較してみようということで、私どもの研究室の若い人たちにコンピュータを使って調べてもらいました。いまの若い人たちはコンピュータが好きですし、また強いですから、こういうのをやってみようよというですぐ計算してくれるのです。その結果をお見せします。

(パワーポイント)

ホールの床面積が大体同じで形が違っていると、どのように音の伝わり方が違うかを調べてみました。こういうところで数式をお見せするのは野暮ですが、一応、波動計算をちゃんとやっていますという意味でございます。

音のシミュレーションでは幾何学的に計算する方法もよく使われていますが、それでは音の周波数とか波動性をまったく無視することになり、音響現象を正確に計算したことになりません。ここではちゃんとやっていますということです。

(パワーポイント)

初期条件として、こういうサイン半波の形の音圧の分布を音源のところへ与えておいて、それを解き放ったあとそれがどう伝搬するかというのを計算しました。

それから最初にお話しておきますけれども、このようにコンピュータが進んだ時代でも、こういう何千立方m、何万立方mの容積をもつコンサートホールの中の音響を波動性まで考慮して正確に計算するというのはいまだにできないんです。能力が足りないんです、コンピュータの。この部屋でもやっと3000か4000 Hz ぐらいまでしか計算できない。

人間の耳で聞える音の周波数は、よく教科書に書かれているのは20 Hz から2万 Hz といわれています。なんと10オクターブも聞いているわけです。まあ私の歳になりますと2万 Hz は危ない、1万 Hz がやっと思ひますけれども、それにしても9オクターブぐらい聞いているわけです。

さてホールの形によってどう違うかということですが、3次元にしますととたんにコンピュータが苦しくなりますので、計算はまず2次元でやります。

(アニメーション)

最初に、直方体と扇形でどう音の伝わり方が違うか。この白い点からパルスが出ます。直方体の場合には、音波が均一になっていくのがわかると思いますが、扇形では、音の焦点ができる傾向がみえます。さて、目で見ただけではなくて音で聞いてみようということで、ここからパルスが出たときに、この赤い点に届く音について計算した結果を

聞いていただきます。まず直方体（音）。最後のほうでさっきの鳴き竜と同じような音が聞こえます。これは平行な面の間での往復反射が残ってしまうためです。つぎに扇形（音）。大変荒れた感じの音になります。これは音が一旦広がっていった、また集中するということが繰り返しが起こるためです。扇形というのは、人がたくさん前の方へ集まれるということで、視距離を短くできるというメリットがあるので劇場などではよく使われる形ですが、音響的には非常にこわい形であるわけです。

(アニメーション)

つぎに、楕円形あるいはその特殊な形としての円形。ご覧のとおり図形的には大変おもしろいのですが、音響的には大変こわい。音で聞いてみますと、まず楕円形（音）。これは音が行ったり来たりしているためです。それから円形（音）。面白い音がします。

ということで、基本的な部屋の形として、この中で何とかかなりそうなのは長方形だけです。あとはこのままの形ではとても音を出すことが目的の部屋には使えない。

(パワーポイント)

そこで、この写真にありますように、ふつうホールといいますと、壁とか天井の形をギザギザにしています。いわゆる拡散処理をしているわけです。左の写真は、私と同級生の石井和紘という建築家が設計した北九州市のひびきホールです。余談になりますが、彼とこのホールを設計したとき、「ホールは木でつくと音がよいと音楽家だけでなく一般にもそういうふうに言うが、決してそんなことはない、材料の前に形が大事だ」、「材料は何でもいいのか」、「何でもよい、石でも鉄でもガラスでも何でもよい」、「じゃあガラスにしよう」ということになりまして、最初の設計は天井まで全部ガラスだったんです。そうしたら施主側からも実際に担当する建設会社からも猛反対をくらい、実現しませんでした。それでも、このかまぼこ状の壁、これは全部ガラスです。またこの膝隠し、手すり、これも全部ガラスです。この屏風折れ型の壁は、溶鉱炉で一回焼いた耐火レンガで、非常にいい色をしています。とにかくこういうふう凹凸をつけるということにしました。

(パワーポイント)

それから右の写真は、東大和市に数年前にできたホールで、これも私たちが音響設計をしまして、このような浪型の壁を作りました。この形も一回やってみたかったのですが、設計者も賛成してくれてこのホールで実現しました。結果的には非常によかったですね。

(パワーポイント)

先ほどもお見せしたウィーンのもジークフェラインスザールには、こういう女神の像が立っています。もともとはバルコニーを支えるための柱ですが、よくこの女神がこのホールの音をよくしていると言われていています。学生たちと

一緒に行ったときに、よし本当かどうか調べてみようということになったわけです。

(パワーポイント)

これは有名なプラハのドボルザークホールで、この建物はもともと議事堂かなんかだったらしいのですが、こういう列柱が見えます。このホールも大変音がいいと言われています。私も2回ほど聞いてきました。2回や3回聞いたぐらいで音の良し悪しを言うのは控えなければいけないのですが、大変いい印象でした。

(アニメーション)

さてこのような拡散効果がどうなるのかということで、もう一度長方形の場合からいきます。上は基本形で先ほどお見せしたものです。それに対して下は三角形といいますか、屏風折れ型の拡散壁を全面につけた場合です。この辺から全然違ってきます。下の法では音波が非常に細くなってブレンドされている、ミックスされている。一方、上の方では波面がいつまでもシャープに残っています。

音にして比較しますと（音）、これは先ほどの音です。それに対して拡散しますと（音）、非常に滑らかな音になります。

こういう波形をエコータイムパターンと呼んでいます。その評価はなかなか難しいのですが、大雑把に言えば、もみの木を横に寝かしたような指数減衰の形をしてれば自然な残響になるわけです。

(アニメーション)

つぎに、長方形で、先ほどのウィーンのもジークフェラインスザールのように柱が立っていたらどうなるか。実を言いますと、私は最初はこんなあまり役に立たないのではないかと思っていたのですが、そうでもないんですね。非常によく音をブレンドする効果が出ています。この場合の音はというと、最初にこれはもう何回も聞いていただいた拡散がない場合の音（音）、つぎに柱があるとき（音）。このように柱をたてることによってナチュラルな残響になることが分ります。

(アニメーション)

つぎに先ほどもお見せした扇形ですが、基本形と、それにてこぼこの屏風折れをつけた場合です。屏風折れをつけた場合には、扇形の特徴がまだやや残っていますが、基本形に比べれば非常に音がブレンドされている様子が目で見えてわかるかと思います。しかし、音はやはり聞いてみないとはいけません。これは基本形（音）、それに対して拡散をしますとこういう音（音）。だいぶましになりますね。

(アニメーション)

さらに楕円形の場合です。拡散をすることによって、最初ちょっと焦点を結ぶ傾向は残っていますが、基本形の場合に比べれば非常に拡散がよくなる様子がわかります。音にしますと、まず基本形の場合の音と拡散をしたときの音

(音)．だいぶよくなりますね．ただよく聞くと低音のほうでドスドスという音が残っています．

(パワーポイント)

これは先ほどお見せしたミュンヘンフィルハーモニーで、基本形は扇形ですので、その欠点を無くするためにいろいろな工夫がされています．この側壁の部分は、照明が多少ありますが、音響の目的だけに取り付けられており、音を下に叩き落とすような反射板がたくさんつけられています．

(パワーポイント)

これも先ほどお見せしたケルンのフィルハーモニーですが、ステージまわりはかまぼこ状となっており、これは拡散のためです．ホールの設計では、基本形状はいろいろな目的・条件で決まるわけですが、それに何かの欠点があれば、それを改善するためのデザインがいろいろとされるわけです．

(パワーポイント)

これは四谷にあるイグナチオ教会で、97年につくりなおされましたが、これも私どもお手伝いしました．これも基本形は楕円なんです．

(パワーポイント)

設計者は、いろいろな意図で楕円形を選んだわけですが、音響的にもなんとか工夫をすればなんとかなる、ということとで模型実験とかいろいろな検討をしました．

(パワーポイント)

これはこの教会の後壁で、隙間をあけて積んだレンガ壁の裏に吸音材が入っていて吸音も兼ねてますが、大きく褶曲させて音の拡散もはかっています．このような音響的なデザインを建築デザインとして成立させなければいけないわけです．その辺が建築デザインと音響とのせめぎあいにもなるのですが．

(パワーポイント)

つぎに、これはもう4、5年前に出来上がった桐生市民会館の小ホールです．これも楕円形です．私もホールの設計でいろいろ相談を受けますが、こういう難しい形の楕円形などをもってこられると、かえってうれしくなるんです．このホールでも、結果的にはこの写真のようにこういう屏風折れの壁にさらに上の方で前にせり出したような面をつけた形になりました．その効果を調べるために、それと同時に建築家を説得するためにこういう数値シミュレーションをやったわけです．

(アニメーション)

さっきは2次元の計算でしたが、これは3次元で計算しています．天井はほとんど吸音性なので、天井に行くと音が返って来ないという条件で計算した結果です．楕円形のままですと、2次元の場合と同じようにやはり焦点を結ぶ様子が見えます．そこで、このように拡散壁をデザインし

たらどうかということで調べてみました．

(アニメーション)

そうすると、この辺で一回焦点らしきものが見えるのですが、先ほどの結果に比べれば非常によく改善されています．音がよく拡散されている．そこでこれならいけるということで、実物がつくられたわけです．

(パワーポイント)

では、計算した結果と実物ができあがったあとと測定した結果とがどのくらい合うかを調べてみました．この図は、この点からパルスを出したときのエコータイムパターンについて、計算結果と実測結果を比較したのですが、非常によく似た結果になりました．

(パワーポイント)

いままではコンピュータによるシミュレーションについてお話しました．先ほども言いましたように、本当はコンピュータで全部やりたいのですが、計算できる周波数に境界があること、またその他にも壁、床、天井などの境界の音響特性をどう入れるかという数学的な問題など、まだまだ皆さんの問題が残っています．

そこで、いまでは数値シミュレーションが非常に進んでいる風の現象についても、風洞実験をするのと同じように、音響の場合にも物理的なシミュレーション、すなわち模型実験がいまだに信頼できるツールとして使われます．その辺のお話をさせていただきます．

(パワーポイント)

これは歴史的なものになってしまいましたが、1963年という40年前ですか、村野藤吾先生の設計になる日比谷の日生劇場、ガウディ調の劇場です．これをつくるときに、下にありますような10分の1の模型実験をやっています．これもこの研究所でやられたものですが、実は私も学生になっていたかどうかという頃で、詳しくは知りません．聞いた話によりますと、建築家が入っていったいろいろデザインを考える、つぎに音響的な実験をして修正点を指摘する、また設計者が入っていった直す、というようなことを繰り返して設計が決まったのだそうです．本当の話らしいんですが、最後はこの模型を現場へ運び込んで、このとおりつくれといったそうです（笑い）．村野藤吾先生でなくちゃできない話です．

(パワーポイント)

これは先ほどご紹介しました大阪のザ・シンホニーホールですが、このホールについても大成建設の研究所で10分の1の模型実験がやられております．

(パワーポイント)

これは講義のときなどの息抜き用につけた絵で、ガリバー旅行記の小人の国です．その縮尺は何分の1かというのが問題．これは阿刀田高の本に載っている話ですが、それによれば縮尺は約12分の1ぐらいだろうということです．

どうしてかという、この兵士の背の高さが6インチと書いてあるのだそうです。そうするとだいたい12分の1、このホールの模型が10分の1ですから、だいたいこんな感じですね。この絵本探すの、結構大変だったんです(笑い)。

(パワーポイント)

さて模型実験の原理ですが、音響の場合には非常に簡単です。たとえば実物を10分の1に縮尺するとすると、音の波長も10分の1にしなければいけない。ということは、音の周波数が10倍になるということです。100 Hzが1000 Hzになる。それと同時に時間は10分の1になります。テープを早回しするようなものですから、ですから模型の中へ首を突っ込んで音を聞いてもまったく意味がないわけですね。その他に、壁、床、天井の吸音や空気も音を吸収しますのでそのシミュレーションなど、細かい技術が必要です。

(パワーポイント)

これは今から25年ぐらい前にやっていた実験ですが、響きのついてない音楽を一回テープレコーダに録音しておいて、それを10倍のテープスピード再生する。超音波になってしまいます。それを超音波が出せるようなスピーカを使ってホールの中で再生して、聞きたいところにマイクロホンを置いて録音する。それを元の10分の1のスピードに戻して聞けばホールの中で聞いた音になる。原理的にはそういうことです。25年ほど前にやったこのような実験の例を聞いていただきます。

(パワーポイント)

これは神奈川県民ホールの10分の1縮尺の模型実験で、これは若かった頃の私です。まず、これは響きのない部屋で録音したヴァイオリンの音です(音)。これを模型の中で再生しますと、これです(音)。これは模型の中の音ですから、本当は聞いても意味がないんですが、それを10分の1にしますと、こういう音になります(音)。ホールの響きがついたのはおわかりになったと思います。最初は、響きがついたついたら喜んだのですが、よく聞いてみるとこのような音質ですから、音楽を云々しようとするのは無理だということで、がっかりしちゃったんです。もちろんいろんな物理測定には有効なんです、ホールの音を直接聞いてみようというのはちょっと無理だなということであきらめてしまいました。

ところがそのうちにデジタルの技術が非常に進んでまいりまして、少し方法を変えてもう一度やってみようということになりました。先ほど言いましたように、部屋のインパルス応答をコンピュータで完全に計算するのは無理なので、これはフィジカルな実験、模型実験で測定する、その後の信号処理は最近進んできたデジタル信号処理技術を使う、という一種のハイブリッド技術です。そこで音源とし

ては、先ほどはスピーカから音を直接出しましたが、そういうことは一切やめて、インパルス音源を使います。

(パワーポイント)

実際にはこういうスパーク放電パルスを使っています。

(パワーポイント)

それから音を受けるマイクロホンですが、左のほうは実物のダミーヘッドあるいは疑似頭、すなわちマネキンの両耳にマイクロホンを入れたものですが、これで音をとってヘッドホンで聞くと方向感も正確に出る。それと同じ原理で、模型実験にも10分の1の小さな頭をつくりまして、両耳に小さなコンデンサーマイクロホンを仕込んであります。これは次郎君です。この前の太郎君はまんまるの真球の両側にマイクロホンつけたものですから、前後が対称で、前後の見境のつかない奴だったのですが、次郎君はもう少し利口になっています。いまは三郎君までいます。(笑い)

(パワーポイント)

ここで一番最近の応用例をご紹介します。これは横浜みなとみらいホールですが、このホールの音響設計は建設会社3社で組んでやったのですが、模型実験は東急建設が担当しました。その技術は我々が提供したのですが。

ここで、まず模型ホールの中の前の方、真ん中、後ろの席の3点で測定したインパルス応答を聞いていただきます。まず前の席(音)、真ん中の席(音)、ほとんど一番後ろの席(音)。

実はこういうインパルス応答のデータには物理的な情報がすべて含まれています。残響時間をはじめいろんな量が提案されていますけれども、すべてこれから求まるわけです。ですから、これでもうおしまいなのですが、やはり音楽を聞いてみたいですね。そこで、まず響きのついてない音楽(音)。これはスタジオで録音したフルートの曲ですが、これを先ほどのインパルス応答と合成します。数学的にはたたみこみ積分という演算です。それでは先ほどの3点のうちの真ん中の席のインパルス応答と合成した音がこれです(音)。

というふうに、このホールができあがったらこんな響きがするぞということが事前に予測できるわけです。実験としても、この程度の音質ならまあまあ使えるかなということまでできました。最近では、大型の本格的なホールつくるときには、こういう模型実験がよく行われています。

(パワーポイント)

これが出来上がったホールです。実物ができあがってからの比較もしています。問題は模型実験の結果とどのくらい合ったかということですが、詳しい説明をする時間ありませんので、ここでは非常によく合いましたということにしておきます。

(パワーポイント)

コンサートホールでは客席での音響というのが非常に大

事なことはもちろんで、多くの研究はそちらへ目が向かっているのですが、考えてみますと、音楽を聞くという場合には、それ以前に演奏家が演奏しやすいホールであるという条件が必要なわけです。そうであればこそ、われわれはいい音楽を楽しむことができるわけです。

(パワーポイント)

そこで、ステージアコースティックス、ステージ音響という一つの研究分野ができつつあるわけです。

(パワーポイント)

いまのところ、こういうオーケストラ全員についてまでやるわけにまいませんので、まずソロ、一人で演奏したときのシミュレーションから始めました。よく演奏家はステージ上の板1枚変わると音が変わるとおっしゃる。板1枚というのは十数センチです。十数センチ立ち位置が変わるともう違うというわけです。そのくらい微妙なものらしいですね。これは千住真理子さんで、実物のホールでもいろいろ調べるのですが、現場では条件を変えることもできませんし、違うホールを比較することもできません。そこで、ホールの音場、音の場をそのまま切り取って実験室に再現したいわけです。

(パワーポイント)

そこで、ちょっと無茶といえば無茶なんですけど、楽器と演奏者の位置関係をこの絵に描いてありますようにモデル化します。これは楽器にみたてた無指向性のスピーカ、その30センチ背後の演奏者の頭の位置に相当する点にマイクロホンを置きまして、ホールでインパルス応答をとってくるわけです。その場合、音の方向感も大事にしようということで、マイクロホンを回転させて6方向のデータを取ってくる。

(パワーポイント)

この絵では一つしか描いてませんけれども、6チャンネルのデータがあるわけですが、これをコンピュータに入れておく。この無響室の中には、スピーカーを6個組み合わせたシステムができてまして、その中心で実際に演奏してもらう。その音をこのマイクロホンで拾って、いまのインパルス応答と合成、たたみこみ積分する。この演算もいまやリアルタイムでできるようになったわけです。私が学生のころには、こんなことは夢みtainな話だったのですが、今はすごいことになってきています。それはともかく、そのようにして合成した音を6チャンネルのスピーカーから出しますと、演奏者はあたかもデータを取ってきたホールのステージで弾いているような感じがするというようになります。

(パワーポイント)

そこで、千住真理子さんだけではなく、プロの音楽家のいろいろな方々に来ていただいて実験をしています。ただし、この種の心理実験では、騒音の評価のように、うるさ

いですか、やかましいですか、気になりますか、というふうにこちらから一方的に質問することができないのです。演奏家がなにを感じてどう演奏しているか、ということは我々には全くわからないことですから、それをなんとか聞き出さなくてはならないということで、認知論だとかいろいろな知識が必要となります。おもしろいけど難しいですね。

(パワーポイント)

いまの話は一人での演奏ですが、アンサンブル演奏ということになると、お互いの音を聞きながらやるわけです。それであるホールはアンサンブルがとりやすいとかとりにくいとかいろいろ言われるわけです。それはどういう要因によるのだろう、それからわれわれ建築を作る立場から言えば、アンサンブル演奏がしやすいホールをつくるためにはどうデザインすればいいのだろうということをいま模索しているところで、そのための実験を始めたところです。いまはとりあえず二人のアンサンブルについてやっています。

(パワーポイント)

この絵にありますように、Aさん、Bさん、二人が演奏しているとしますと、Aさんは自分で出した楽器の音がホールで響いて返ってくるのをまず聞きます。それと同時にBさんの音も少し離れた位置から聞こえてくるわけです。Bさんもまったく同じで、自分の音、相手の音を聞いているわけです。ですから全体で4経路あるわけです。先ほどのシステムを使いますと、一つの経路について6チャンネルということで、合計24チャンネルのインパルス応答を実際のホールで測定してくるわけです。

(パワーポイント)

このようなホールのデータを取ってきて、24チャンネルのたたみ込み装置、コンボルバーに入力します。それで、この無響室ではAさんの音にホールのインパルス応答をリアルタイムでたたみ込む。それと同時にBさんの音もたたみ込んで同じスピーカから出す。Bさんについても同様に、自分の音と相手の音を同時に出す。したがってこの実験には二つの無響室が必要です。幸い、私どもの実験室にはこのような無響室が二つありますので、それらを連結して実験をしています。

(パワーポイント)

さてこれで最後になりますが、ひとつ実験の様子を見ていただきます。プロのオーボエ奏者とファゴット奏者が合奏しているところです(ビデオと音)。二人で、このホールだったらどう演奏しようかという打ち合わせをしています。この後、彼らがこのホールの音をどう感じているか、いろいろ聞いて調べるわけです。この実験は、まだ始まったばかりで、結果が出るのはこれからです。

(パワーポイント)

いまのは一例でしたが、いろんなプロの演奏家に来ていただいています実験をやっているところです。大変おもしろい実験ですが、装置もお金がかかります。またアマチュアで楽器がちょっとできますぐらいではだめで、やはりステージでの演奏経験が豊かなプロの人でないと被験者になれないということがありまして、制約の多い実験なんです。最初、演奏者の方々は嫌がるかんじじゃないかと思いました。最初、最初はみんなちょっと警戒気味なんです。そのうち

慣れてくるとすごい楽しんでいる。

最後に宣伝になりますが、C棟の一階から入れる音響実験室でいまお見せしたようなシミュレーションの実験を実演しておりますので、どうぞ時間がございましたらお越しください。ということで、私の話をおしまいにさせていただきます。ありがとうございました。

(了)