

建築音響の新分野

渡 辺 要・石 井 聖 光

1. は し が き

建築物の内外の音響の問題は、戦後著しい進歩をとげ、音楽堂、公会堂など音響効果のすぐれたものが各地に建てられている。これらの設計に当たって、室の形、容積、内部仕上げ材料の選定などについて、いろいろの工夫がされてきた。このような研究が進められている一方で、今日注目され将来を期待されてよい新しい分野に、室の音響特性の電氣的制御と、空中超音波を利用した模型実験による研究方法とがある。これらはまだ一部の人々によって研究されているに過ぎないが、近い将来に建築音響界に革命をもたらすに十分な素質を持っている。

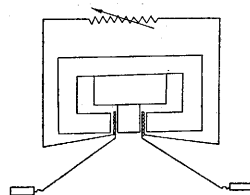
2. 室の音響特性の電気音響的制御

今日まで普通に行なわれている室の音響設計で、その特性を支配するものは、室の形、容積、仕上げ材料とその配置などであり、他の制約(たとえば工費、敷地の形)によってそのあるものに制限が加えられると、室の音響設計がたいへんむずかしくなり、ある場合にはそれらの条件によって初めから室の音響特性が規定されてしまうようなこともあった。

このような点を一挙に打開してゆこうとするのがこの電気音響的制御であり、さらにありがたいことには、この方法によると室の音響特性を相当広い範囲にわたって連続的に変えられることである。たとえば残響時間が1秒の室をこの方法によって1~2秒程度の範囲を自由に変えられる。したがって演奏曲目によってそれに適した残響時間にすることもできるし、オペラの屋外の場面、教会の場面などそれぞれに応じた残響時間にすることが可能である。

(1) 電気音響吸音器

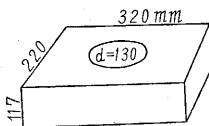
たとえばラジオに用いられる第1図のようなダイナミックスピーカと同様な構造のものに音が当たると、コーンが振動し音のエネルギーが機械エネルギーに変わることによって吸音がおこる。これと同時にコーンにつながるムービングコイルに起力電圧を生じる。そこでこの電圧を適当な抵抗 R を通じてターミネートすることによってコーンの振動に制動を加えることができ、この R を可変にすれば、その吸音性が変えられる。



第1図

この種の吸音器の性能を表すには、それが吸音率1の吸音材のどれだけの面積に相当するかという方法によっている。

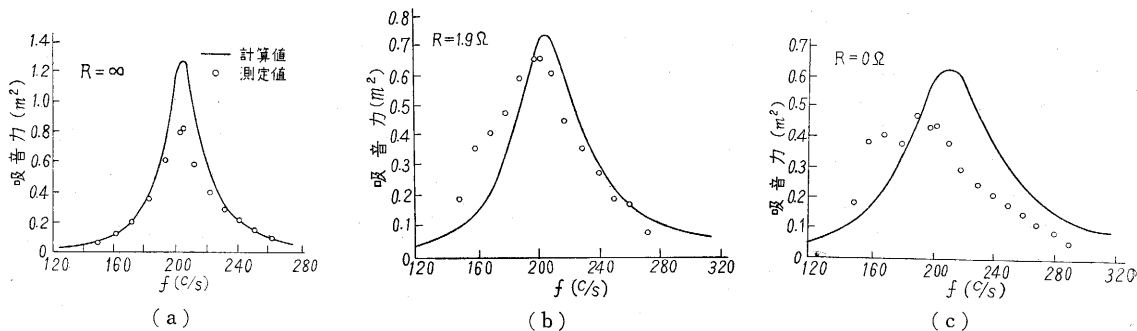
奥田氏外の研究によれば、第2図のような箱に入れたつぎのような定数の6.5インチの普及型ダイナミックスピーカ6箇を残響室内に分散配置して求めた吸音力は第3図のようである。共振周波数付近の音をよく吸音し、それが負荷の抵抗の値によって変化することが解る。



第2図

箱に入れたスピーカの定数

有効半径 = $6.5 \times 10^{-2} \text{m}$ 等価質量 = $4.84 \times 10^{-3} \text{kg}$
 有効面積 = $1.33 \times 10^{-2} \text{m}^2$ 力係数 = 3.48Weber/m
 共振周波数 = 203Hz スティフネス = $9.25 \times 10^3 \text{N/m}$
 $Q = 16$ 可動線輪抵抗 = 3.1Ω
 機械抵抗 = $3.19 \times 10^{-1} \Omega$ インダクタンス = $317 \mu\text{H}$



第3図 6.5 インチスピーカ6箇の吸音力

(2) 残響室による方法

舞台の音をマイクロホンでとり、増幅してスピーカから残響室内に出す。そして残響の加わった音を再びマイクロホンでとり、舞台のマイクロホンからのものと適当に混合して再び増幅して場内のスピーカから出す方式のもので、その混合させる割合によって見掛けの残響時間を変えることができる。この方法はすでに放送の効果用として実用に供せられており、これを室の残響時間の制御に応用するものである。

この目的に使う残響室は、それ自体の音響特性が優れたものでなければならない。また実用的な立場からあまり大規模なものにしたいという要求があり、その設計はかなりむずかしいものである。民間放送局などではしばしば建物の隅の利用価値の少ない室（たとえば物置にしたりするような）をあてる場合があるが、室の形が制限され、いろいろな不利な問題が起こる。その大きさと形状によってノルマルモードの分布がきまり、それが一様でなければ音響効果がよくなるということから、その室が残響付加に利用できる最低周波数がきまってくる。

またこの残響室の残響時間の周波数特性をフラットにすることも大切な要素であって、そのために仕上げ材料にも多くの工夫が必要である。

ただこの残響室が一般の室と違う唯一の利点は、音源と受音の位置を自由にえらべるということ、実用的には種々実験の結果、もっともよい点に固定するわけである。

(3) 鉄板を利用した残響付加の方法

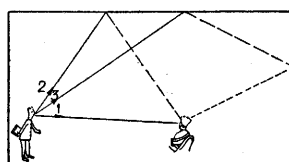
原理としては残響室によるものと同じであるが、前にのべたように良い残響室を作ることばなかなかたいへんなことであるので、残響室のかわりに鉄板を用いるのがこの方法である。

すなわち板の振動は室内の空気振動とくらべて2次元と3次元の相異はあるが、ともに無限の自由度をもっている。そこで板の一部を音声電流によって駆動すれば、板は2次元の室内と同じように励振される。したがって板の他の部分の振動をピックアップして板を駆動した電流と混合すれば残響が付加された音声電流が取り出されるわけである。さらにこの板の振動に制動を加える装置を取り付けると板の振動の減衰率を変えることができるから付加される残響時間が変わるわけである。

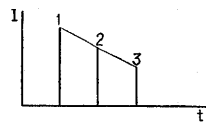
放送用に用いるこの種の装置はNHK技術研究所で研究されており、すでに製品化されているものは、残響時間を1.5秒～4.5秒の間変えることができ、重量200kg程度で残響室にくらべるとはるかに小型軽量であり、装置の移動も自由であるなどの多くの特徴を有している。

(4) 磁気録音機による方法

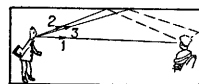
残響室や鉄板を利用した残響付加装置による残響の欠



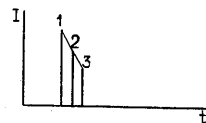
1a



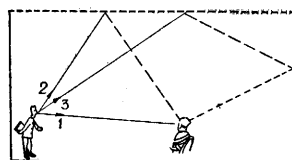
1b



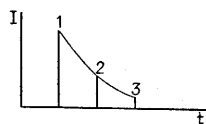
2a



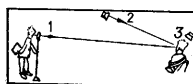
2b



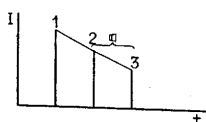
3a



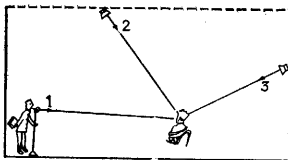
3b



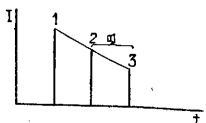
4a



4b



5a



5b

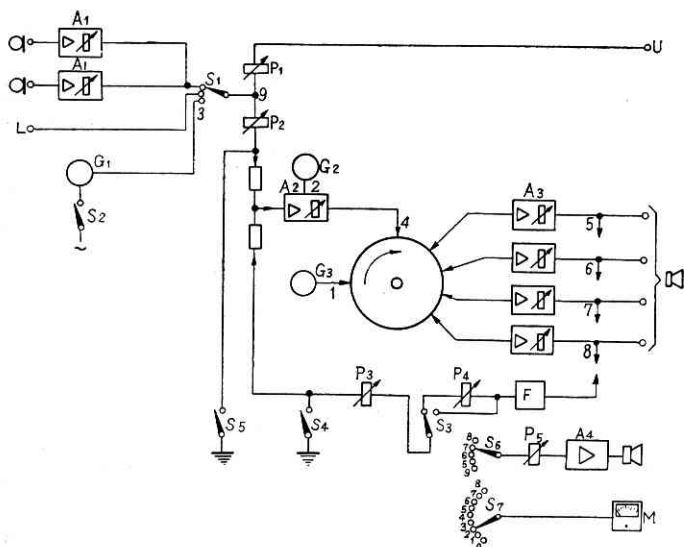
第4図

点は、本当の室内の残響のような室の広さを感じさせるものが欠けていることだといわれている。いわゆる残響に似た感じはしても本物とは別のものだということである。これは室内の残響が不規則な時間間隔でいろいろな方向から音がくるのとくらべて、はるかに単純なものだからであろう。

この意味で磁気録音機を利用する方法は、はるかに実際に近いもので、オランダのフィリップス社で製作されたこの種の装置がミラノのスカラ座に備えられ好評を博したと伝えられている。

磁気録音器をうまく利用すると、適当な時間的の遅れのある音を出すことができ、室内に多数のスピーカをうまく配置すると、実際の残響とよく類似した音場を室内に作り出すことができ、しかも残響時間を自由に変えられるというのが特徴である。

たとえば第4図の1aのような室で音を出したとき、聴く人には音源からの直接音、1回反射音、2回反射音が1bのように到達する。室が小さいと仕上げ材料が同じでも音が到達する時間間隔が狭くなり2bのような



第 5 図

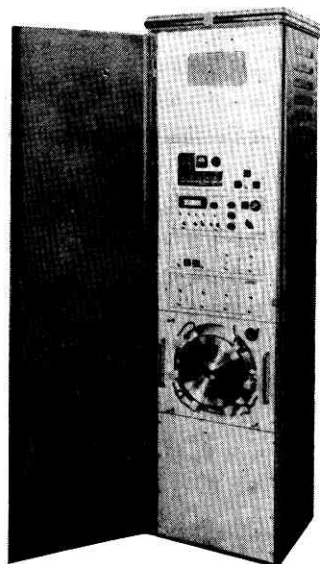
る。大きい室で、3a のように天井、壁などに吸音処理をした場合には反射音が弱くなり 3b のようになる。そこで 2a, 3a のような室でも磁気録音機を利用して時間の遅れをつけて室内各所におかれたスピーカから適当な音量で出し、4a, 5a のようにすると、1a の室についての 1b と同じ、4b, 5b のような音場を作り出すことができる。

フィリップス社の残響付加装置は、第 5 図のような構成で、舞台上のマイクロホンで拾った音は増幅されて“reverberation disc”の磁気帯に録音される。この disc は周辺に磁粉がコートされており、周辺自体がエンドレステープの役目をし、モータで駆動されている。また disc から約 30 μ の距離を保って録音ヘッド 1 箇、再生ヘッド 4 箇 (1, 2, 3, 4) および消去ヘッドがその周辺に配置されている。

4 箇の再生ヘッドによってつぎつぎに再生された音はそれぞれ増幅器を経て、室内に配置された多数のスピーカ群から場内に出る。スピーカの数 は 20 箇～50 箇程度で、時間の遅れの大きいヘッドからの再生音ほど弱くなるように調整されている。

また最後のヘッドからの再生電流の一部は、再び録音ヘッドへ feed back されて録音—再生をくりかえし、残響が付加されるわけで、この feed back の量を変えることによって残響時間を変えることができる。

disc の周辺速度は 1.5 m/sec (half) 3 m/sec (full) の 2 種で、遅延時間は第 1 再生ヘッドについて最小 50 msec (half) 25 msec (full)、第 4 再生ヘッドについて最大 450 msec (half) 225 msec であり、周波数特性は 100～7,000% ± 2 dB (half), 100～15,000% (full) ± 2 dB とのことである。残響時間の可変範囲は、室自体の特性に関係し、残響時間の最小値は、この装置を使用しない



第 6 図 フィリップス社製残響付加装置の外観

ときの室自体の残響時間であり、最大値は 5～7 秒まで延ばすことができる。ただ一般に残響を付加すると、その周波数特性が悪くなり、HiFi を望むためには、この値よりかなり短い残響時間までしか延ばせないようである。

3. 建築音響における模型実験法

建築というものは普通の製品と違って同じものを多数作るということはほとんどなく、試作品について十分検討してから製品化するという過程が存在しない。しかもその一つ一つの価格が相当な額になり、小規模な改造にも多くの費用を要する。したがって実験を必要とする系統的な研究を実物について行なうには、非常な不便がある。これを解決するための有効な手段は模型実験である。

(1) 過去に行なわれた模型実験法

このように建築音響の分野では模型実験が研究を進める上の重要な手段であるにもかかわらず、実験技術上の問題のために、建築技術の進歩にあまり役立っていなかった。

過去に行なわれた模型実験法には、1926 年に Davis 外により、室の 2 次元模型に水を張り、水面上を伝わる波によって室内の音の伝播を推定しようとする研究が発表されている。この方法の根本的な欠点は波の伝播にもなり減衰が大きく、2 次反射以上を検討することが困難なことであり、さらに 3 次元的研究ができないなどの点もあって、ごく特別な目的以外には用いられていない。

Foley 外は 1912 年に模型室内で発生させた音波に瞬間光を当てて、空気粗密から生じる影を写真に撮影するいわゆるシュリーレン法によって音の伝播状態を研究

する方法を発表し、後に W.C. Sabine, Davis などの人々によってこの方法が研究された。しかしこの方法もきわめて強力な発音体を必要とし音が弱くなるとうまく撮影できないなどの問題のためにその後ほとんど利用されていない。

1929年にわが国の佐藤武夫博士は光の反射を利用してその分布状態から音の分布を類推しようとする方法を発表した。この方法も光を用いる関係から音の波動性にとりなう性質を知ることができないこと、過渡現象の観察ができないことなどの理由で一般に普及しなかった。

(2) 音波によって模型実験を行なう場合の相似則

たとえば A という強さの音源から r の距離の点の速度ポテンシャル ϕ は反射音の影響を考えなければつぎの式のようになる。

$$\phi = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

$\omega = 2\pi f$ $k = \omega/c$ f : 周波数 c : 音速

そこでこれが n 分の 1 に縮小された模型の音場内での ϕ を実物についてと等しくするためには、 c の値は常に一定であるから A を $1/n$ とし、 f を n 倍にすればよい。音源の強さ A は音源の出力 (W) の 2 乗に比例するから、 W は n^2 分の 1 にすればよいわけである。

同様に直方体の室の共鳴周波数 (f) を示す式

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

L_x, L_y, L_z : 室の三辺の長さ

n_x, n_y, n_z : 正の整数でこの値で空気の振動様式を規定する。

c : 音速

について考えると、 $1/n$ の模型では L_x, L_y, L_z が $1/n$

になるので、同じノルマルモードに対する周波数は n 倍になる。

いいかえれば模型で縮小しただけ逆に音の周波数を高くして、物体の寸法に対する音の波長の割合を同じにすればそれだけでよいわけである。

音源の出力などに関しては、直線性が成立する範囲で実験を行なうので、特に相似性を考えなくとも、後で容易に換算できる性質のものである。

室の残響時間は

$$T = \frac{0.161V}{\bar{\alpha}S}$$

で示されるから $f\%$ に対する室内平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 、残響時間が T の場合に、その $1/n$ の模型の中では、 $nf\%$ に対する室内平均吸音率を実物と同じ $\bar{\alpha}$ とすれば、残留時間は T/n となる。

この外に換気用ダクト内の消音効果などについても音の周波数を n 倍にするだけで簡単に相似則が成立する。

ただこの相似則をたててゆく場合にどうしてもそれが成り立たないものは空気中の音の吸収である。これは実物について 1000% 以下では無視することができるが、これより上の周波数では無視できない場合がある。特に模型では周波数を実物の n 倍にするのでこの点では不利のように考えられるが、実は音の伝播距離が $1/n$ になるので、単位長さ伝播するときの吸収は n 倍であることが望ましいわけで、実用上ほとんど問題にならない。しかし模型実験の際には一応この点を検討する必要がある。

(3) 空中超音波による模型実験技術

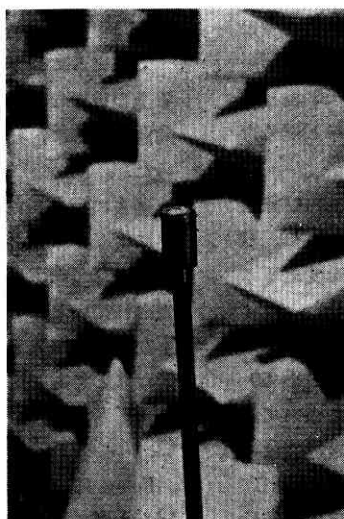
このように模型室内で音波を利用して実験することが建築音響の模型実験としてはもっとも確実な方法である。

それにもかかわらず今日までそれがほとんど研究の手段として利用されなかった原因は空中超音波用のスピーカ、マイクロホンなどの Transducer に適当なものが得られなかったためである。これまでの超音波の工業界における利用が主として水、油その他の空気以外の媒質中で、しかも水晶、チタン酸バリウム、磁歪振動子などで共振を利用した Transducer が多く、空中超音波による建築音響の模型実験に利用できるものがなかなか見当たらなかった。

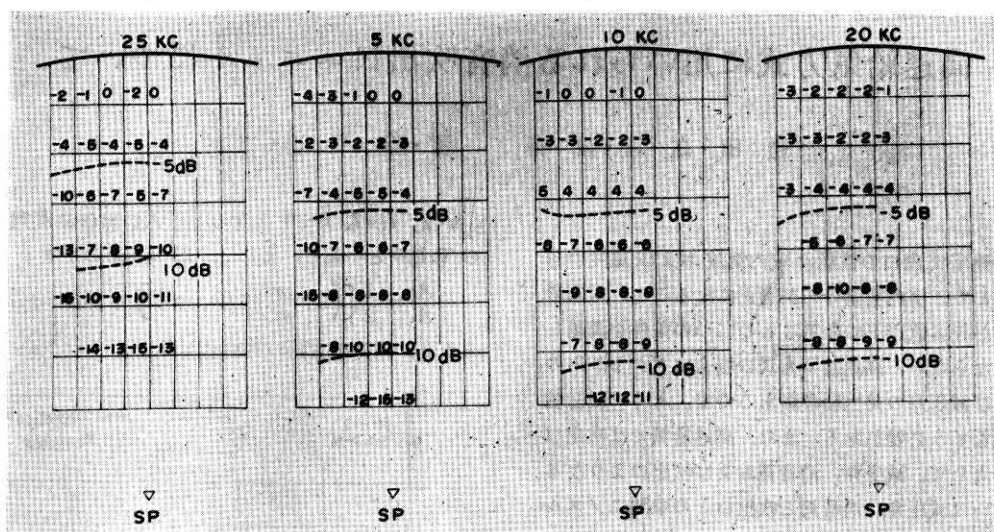
幸いなことに 1954 年 Kuhl 外の人々によって、薄いプラスチック膜を振動膜とする空中超音波用のマイクロホン、スピーカの研究が発表され、わが国でも松沢喜一郎氏(愛媛大)によって理論と実



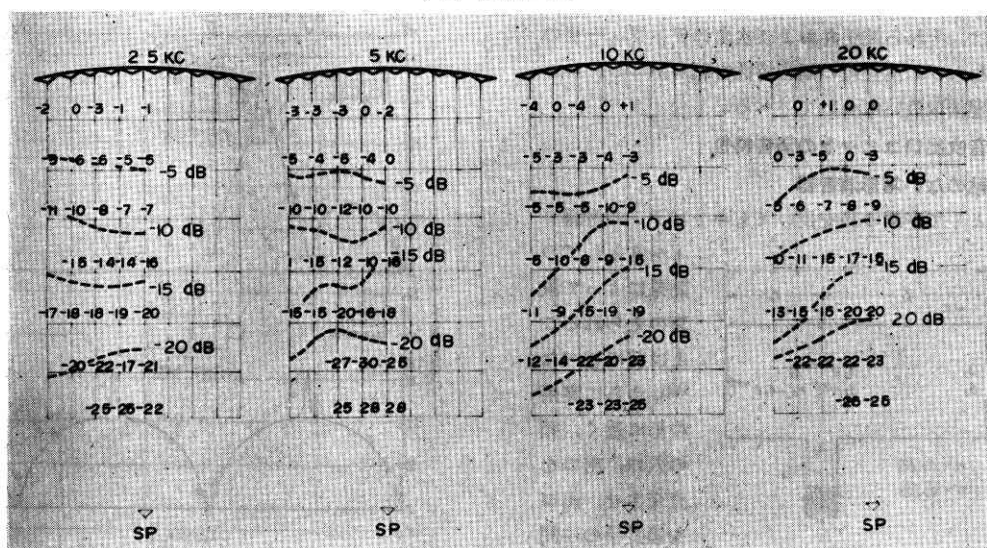
第7図 試作したスピーカ



第8図 試作したマイクロホン



(a) 拡散体なし



(b) 拡散体あり

第 9 図 模型実験によって壁面からの反射音を減少させるための拡散体の効果を検討した例

験の両面からの研究がなされ、これが模型実験に利用できるようになった。筆者らは早速これを利用してエコーに関する研究を行ない、壁に拡散体を取り付けることによってエコーがいかに減少するかを調べた。第 7 図、第 8 図は筆者らが試作したマイクロホンとスピーカの外觀であり、第 9 図 (a), (b) は 1/10 の模型を用いて拡散体がエコーを減少させる効果を測定した結果である。

この種の Transducer は現在 150 kc 付近まで一様な感度を持ったものを比較的容易につくることができる。しかしこの程度の周波数になると指向性が鋭くなって実験に適さなくなる。この点を改善するには Transducer の寸法を小さくすればよいが今度は感度が低下して SN

比が悪くなる。これらの点を総合すると現在のところ 60 kc 程度までが無難なところである。とくにスピーカは無指向性にするために球状、もしくは半球状のものが望ましいのであるが、まだ開発されていない。

これらの問題点は速からず解決されるであろうし、また解決しなければならない問題である。

いずれにしてもこれらの Transducer の出現は建築音響の研究の上に画期的なことで、それが改良され広く応用されることを望むものであり、さらに一般音響学、空中超音波工学へ貢献するところが大きいと思われる。

(1960. 4. 18)