

パーソナル・スタジオ設計の音響学 その4

「高域の世界」

～残響の振る舞い～

SONA
PERSONAL Studio Design

連載4回目となります「パーソナル・スタジオ設計の音響学」。今回も前半の理論編は株式会社ソナの Dr. 中原が、後半の実践編はミカミタカシが解説を担当させて頂き、皆様を音響学の世界へご案内致します。

今回のテーマは「高域」です。これまで皆さんと「低域」「中域」の順に音の世界を垣間見てきましたが、今回はいよいよ最後の「高域」です。「高域」は様々な反射音のぶつかり合いがものすごい頻度で発生している世界であり、そのような世界では反射の1つ1つを丁寧に検討しているような余裕はありません。また、仮に1つ1つを丁寧に観測していったとしても、それでは「木を見て森を見ず」ということになってしまい、高域全体がどのような世界を描いているかといった高域本来の性格をつかむことができません。

「高域」を理解するためには、部屋全体の大まかな振る舞いを把握するための「統計音響学」の技が必要になります。統計音響学で有名なものは残響公式ということになりますが、その残響理論は1890年代後半に W.C. Sabine (セイビン) によって生み出されました。

残響時間という物理量が定義されてからおよそ115年。今回は、室内音響の三大分野の最後として「統計音響学」を皆様にご紹介致します。

理論の最終回となる今回は、いつもより学術的要素が濃い内容となっておりますが、根気よくお付き合いいただけますと幸いです。

それでは、Dr. 中原とミカミタカシのスタジオ音響の科学をお楽しみ下さい。

第1部 理論編

部屋をひとまとまりのエネルギーで考える。響きとはエネルギーのサステイン成分。

(中原 雅考)

今回は、部屋の中での高域のふるまいとして「残響＝部屋の響き」を詳しく眺めてゆくことにします。

残響は、床・壁・天井などの反射面からの反射音の集合体です。従って、前号で解説させていただいた虚像法など反射を追いかける手法を使用してゆけば、原理的には解析できることになります。

反射音の元となるその虚像ですが、音が発生された後、その数は時間に比例して増えてゆきます。一般に残響と呼ばれるのは、50～80msec 以降の後期反射音のことになり、この「尻尾」の部分がいわゆる部屋の響き加減を表す箇所となります。

一方、50msec 未満の反射音は初期反射音と呼ばれ、前号で解説したように音色変化や空間印象に関わる「首」の部分となります。

【図1】は、部屋で音が発生した後に、床・壁・天井からの反射音(虚像)の数がどの程度増えてゆくかを計算した結果です。反射音の数は、小さな部屋ほど急激に増えてゆくことになります(【図1】、6畳>12畳>20畳)。

例えば、6畳の部屋では音が発生してから0.55秒後、12畳では0.75秒後、20畳では0.95秒には、100万以上の反射音が部屋の中で発生していることになります。あっという間に数百万という単位になるのが、部屋の反射音数です。

残響を扱うためには、このような膨大な反射音の束を取り扱う必要があります。

そこで登場するのが、「統計音響学」という理論です。

この理論は、こまかなことは気にせず、部屋全体を一つのエネルギーの塊として考える理論です。

こまかなことを無視するからアバウトな理論なのかというと、そうでもありません。

こまかなことを無視すると、ものごとの本質が見えてくることがあります。

このような技をつかって残響、すなわち部屋の響きを解き明かす技が統計音響学です。

統計音響学では、部屋の中での細かな違いは無視してしまい、部屋全体を均一な音場、すなわち「拡散音場」として扱います。

部屋の中で音が発生しているという状態は、部屋の中で音のエネルギーの断片が動き回っている現象と考えられます。

拡散音場とは、

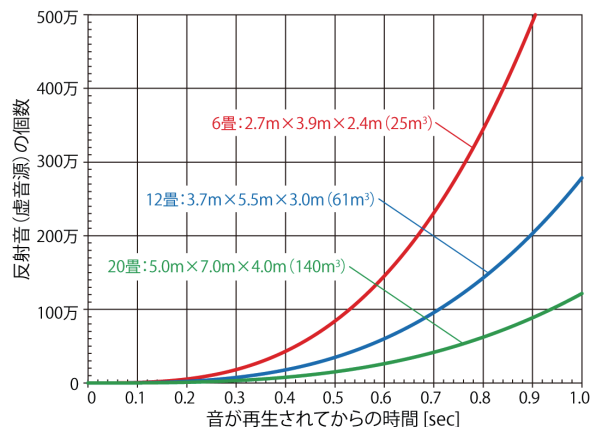
1. 音響エネルギー密度が部屋の場合によらず一様
2. 任意の場所における音響エネルギーの到来方向の確率が一様

という条件を満足する部屋ということになります(【図2】)。

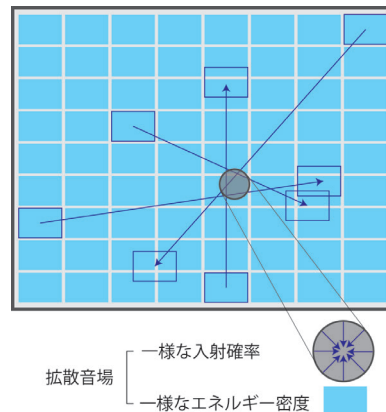
すなわち、スピーカーをどの位置で再生しても、音量の偏りも定位も無い部屋ということになります。

このような部屋は、実験や測定で使用される「残響室」という特殊な部屋になってしまいますが、日常空間でもコンサートホールのような響きの多い大空間や、中小空間であっても高域においては拡散音場に近い状態になっていると言われてています。

今回の「高域編」では、部屋をこの「拡散音場」と仮定し、「統計音響学」を使用して「部屋の響き」に関して検証してゆきます。



【図1】 時間経過と反射音の数



【図2】 拡散音場

統計音響学の原則

たったひとつのシンプルな原則から様々なことが明らかに

統計音響学は、たった一つのシンプルな原則から成り立っている音響学です。それは、

大きなエネルギーほど多く(早く)減少する

というものです。これは、風呂に湯を溜めたり抜いたりする現象と似ています。

風呂の湯を抜く際、湯が多いときは勢いよく多くの湯が抜けてゆきますが、湯が少なくなるにつれ抜ける勢いも弱くなります（【図 3】）。

ここで、風呂に溜まっている湯の量が「部屋の中の音のエネルギー＝部屋の響き」で、湯の抜ける量が「壁などの吸音」ということになります。

部屋の中でスピーカーから音を再生するという行為は、この風呂に「湯を入れる」行為に相当します。ここで、部屋の吸音＝0場合は、風呂桶からお湯は抜けませんので、スピーカーから音を再生し続けることにより部屋の中の音響エネルギーはどんどん増加することになります。このことは、吸音＝0の部屋で音を再生すると、時間が経つにつれ音がどんどん大きくなってゆくことを意味しています。

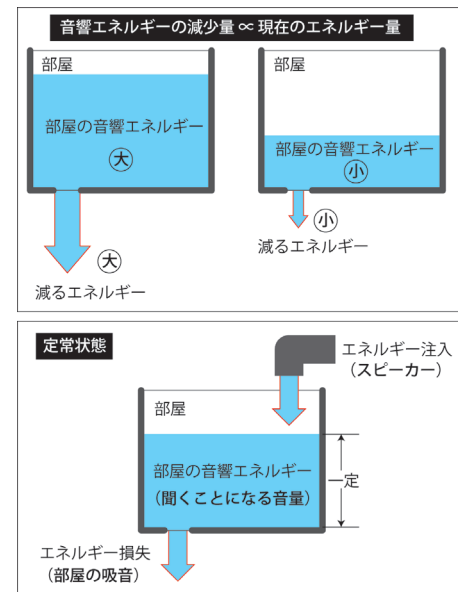
日常、我々がアンプのボリュームを一定にした状態で一定の音量で再生音を聞くことができるのは、部屋に注入している音のエネルギーと抜けてゆくエネルギーがバランスしている状態にあるからです。

部屋の吸音があるからこそ、ボリューム一定で音量一定となるのです。

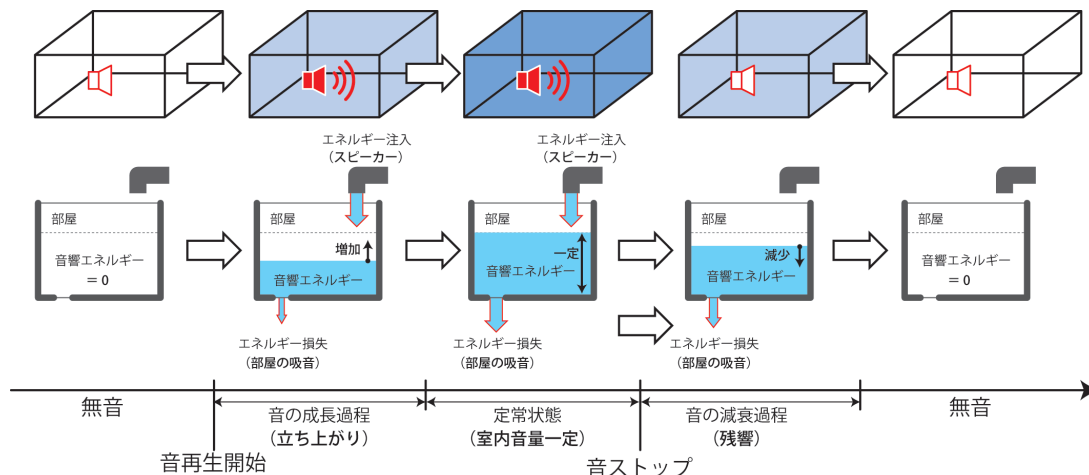
この入出力のバランスがとれた状態のことを「定常状態」といいます（【図 3】）。

以上から、部屋の音のエネルギーには以下の3つの状態が考えられるということになります（【図 4】）。

1. 音の成長過程（立ち上がり）：風呂に湯が溜まってゆく過程
2. 定常状態（音量一定）：供給量と抜けてゆく量のバランスがとれた状態
3. 音の減衰過程（残響）：風呂の湯が抜けてゆく過程



【図 3】統計音響学の原則



【図 4】部屋の音響エネルギーの推移

部屋の立ち上がりと立ち下がり

部屋は直ぐには暖まらない

部屋で「スピーカーを再生→停止」した場合、部屋の音響エネルギーは「成長→定常→減衰」の過程を経ることが、上記より分かりました。

これを「大きなエネルギーほど多く(早く)減少する」という統計音響学の大前提のもとに数式で解くと【図 5】のような結果を得ることができます。

部屋には「立ち上がり」や「残響(立ち下がり)」といったプロセスが有り、どんなにスピーカーの立ち上がりや立ち下がり特性が良くても、部屋の方では必ずにぶってしまうことになります。

つまり、スピーカーから音を再生されたとしても部屋は直ぐには音で満たされませんし、音を停止しても直ぐには音は消えることはできません。

直ぐには暖まらないし、直ぐにも冷えないのが部屋という空間です。

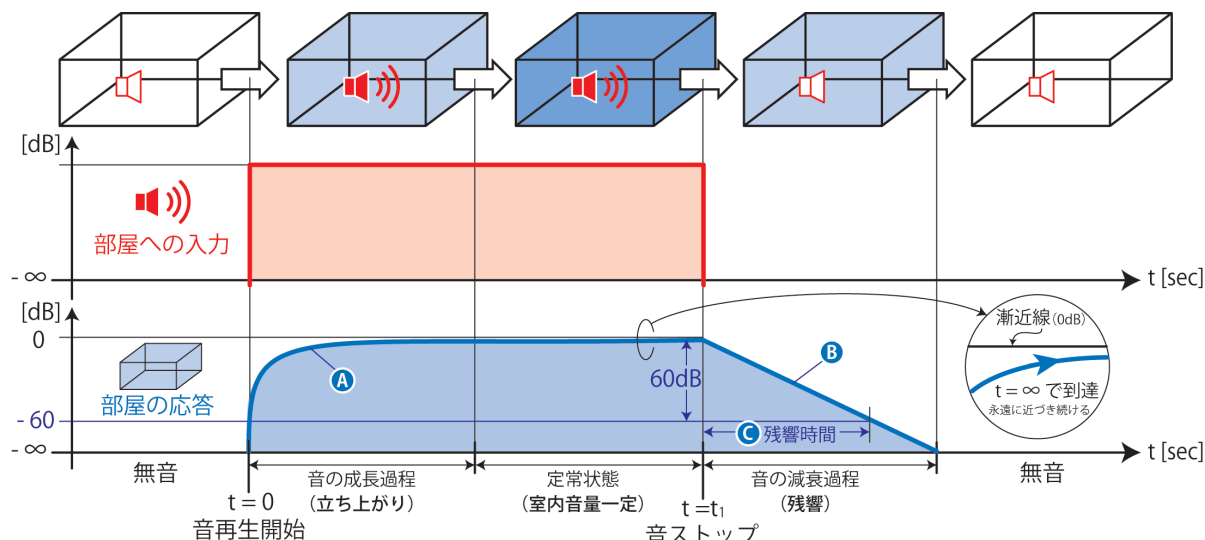
この冷えにくいという部屋の特性が、部屋の響きという現象を形成していることになります。

この立ち下がり特性に着目して、

「音を停止してから部屋の音響エネルギー(密度)が 60dB 減衰するまでの時間」

＝「残響時間 (RT : Reverberation Time)」

と定義したのが、統計音響学の祖である W. C. Sabine (セイビン) です。



$$\begin{aligned} \text{A} \quad & \log_{10} \left(1 - 2.7^{-\frac{t}{\tau}} \right) \text{ [sec]} \\ \text{B} \quad & \log_{10} 2.7^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \text{ [sec]} \\ \text{C} \quad & RT = 13.8 \times \tau \end{aligned}$$

【図5】スピーカーからの出力と部屋の応答

「残響時間」や「立ち上がり特性」「立ち下がり特性」などは全て τ というパラメータで決定されます。

Sabine は、この τ が、部屋の容積 (V [m³])、部屋の総表面積 (S [m²])、部屋の平均吸音率 ($\bar{\alpha}$) という3つのパラメータだけで、しかも大変シンプルな式で表されることを導き出しました (【図6】)。

音の立ち下がり：残響

Sabine によると、部屋の残響時間(RT)は、

- ・部屋の容積 V に比例 大きい部屋ほど残響時間が長い
- ・部屋の総表面積 S に反比例 複雑な形状の部屋ほど残響時間が短い
- ・部屋の吸音率 $\bar{\alpha}$ に反比例 吸音が多い部屋ほど残響時間が短い

というシンプルな現象ということになります (【図6】、(1))。

この原理は、Sabine が残響理論を構築して以来現在まで変わることの無い残響の大原則です (電気分野におけるオームの法則のようなものでしょうか)。

しかし、Sabine の残響公式 (【図6】、(1)) には少したけ欠点がありました。それは、 $\bar{\alpha} = 1$ すなわち完全吸音状態で残響時間(RT)が0とならない点です。そのため、Sabine の残響公式はライブな部屋では良く値が一致しますが、デッドな部屋では値が大きめに計算されてしまいます。

そこで、この欠点を「平均自由行路」という概念を導入して修正したものが、Eyring (アイリン) の残響公式です (【図6】、(2))。

平均自由行路とは「音が反射してから次の反射までの平均の距離」を表す値ですが、Eyring はエネルギー理論だけでは無く、音の反射のプロセスを Sabine の残響公式に盛り込むことで残響公式を再度導き出しました。

これにより、 $\bar{\alpha} = 1$ すなわち完全吸音状態で残響時間(RT)が0となる、デッドな部屋でも使用できる残響公式が誕生しました。

ちなみに、【図7】が20量の部屋における平均吸音率と残響時間の関係を Sabine の残響公式と Eyring の残響公式とで比較した結果です。

ライブな状況 ($\bar{\alpha} \rightarrow$ 小) では、双方の差は少ないですが、デッドな状況 ($\bar{\alpha} \rightarrow$ 大) では差が大きくなっていることが分かります。

本連載は、スタジオの音響をターゲットとしていますので、デッドな環境にも強い Eyring の残響公式を用いることにします。

この残響公式を用いると「部屋の平均吸音率 ($\bar{\alpha}$) から残響時間 (RT)」、そしてその逆「残響時間 (RT) から部屋の平均吸音率 ($\bar{\alpha}$)」の双方の変換が可能となります (【図8】)。

尚、Sabine の残響公式は、定量的にはデッドな状況下で誤差が生じますが、定性的には間違っていないので、数値の算出ではなく残響の現象を検討する

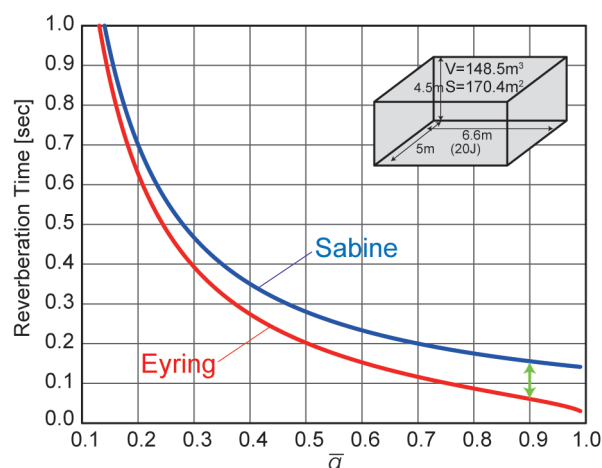
$$\text{Sabine} \quad \tau = 0.0116 \times \frac{V}{S \bar{\alpha}} \longrightarrow RT = 0.161 \times \frac{V}{S \bar{\alpha}} \text{ [sec]} \quad (1)$$

$$\Downarrow \quad \text{平均自由行路 } L_m = \frac{4V}{S} \text{ [m]} \quad \Downarrow$$

$$\text{Eyring} \quad \tau = 0.0116 \times \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \longrightarrow RT = 0.161 \times \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \text{ [sec]} \quad (2)$$

(V : 部屋の容積 [m³] S : 部屋の総表面積 [m²] $\bar{\alpha}$: 部屋の平均吸音率)
(\ln : 自然対数 log。 L_m : 平均自由行路=音が反射して次に反射するまでの平均距離 [m])

【図6】2種類の τ と残響公式



【図7】Sabine と Eyring の残響公式の差

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} \Rightarrow RT \quad & RT = 0.161 \times \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \text{ [sec]} \\ RT \Rightarrow \bar{\alpha} \quad & \bar{\alpha} = 1 - 2.7^{-\frac{0.161 V}{S \times RT}} \end{aligned}$$

(V : 部屋の容積 [m³] S : 部屋の総表面積 [m²])
($\bar{\alpha}$: 部屋の平均吸音率 \ln : 自然対数 log。)

【図8】残響時間 \Leftrightarrow 平均吸音率

際には Eyring の式よりもシンプルな Sabine の残響公式を用いる方が便利です。それに、なんと言っても Sabine は、この残響理論を考え出した統計音響学の祖ですから…

【図 8】の式からも分かるように、残響時間は部屋をデッドにするほど短くなり ($\alpha = 1$ で $RT=0[\text{sec}]$)、ライブにするほど長くなります ($\alpha = 0$ で $RT=\infty[\text{sec}]$)。その一方で、残響時間は、吸音率 (α) だけではなく部屋の容積 (V) によっても影響されるため、いくらライブにするとっても小さな部屋で表現できる残響時間の長さには限界があります。

【図 9】は 6 畳の部屋における平均吸音率 ($\bar{\alpha}$) と残響時間 (RT) の関係を計算した結果です。

6 畳の部屋でも、平均吸音率を 0.02 (2% 吸音) となるように床・壁・天井を硬くピカピカに磨けば、3 秒以上の残響時間をえることも不可能ではありませんが、そのような内装は実験室をつくるような特殊な工事を行わない限りは、現実的ではありません。やはり、一般的な部屋では、10% 程度の吸音 (平均吸音率 $\alpha = 0.1$) は生じてしまうでしょうから、**6 畳の部屋での残響時間は、長くてもせいぜい 0.73 秒**というところ です。

この観点から、部屋の容積 (大きさ) と残響時間の関係を計算した結果が、【図 10】です。平均吸音率 $\bar{\alpha}$ の下限 (部屋のライブさ) が 0.1 だとすると、6 畳や 20 畳クラスの部屋では、コンサートホールのような 2 秒といった残響時間を得ることは非現実的だということがわかります。

また、実施経験的には、**スタジオ (コントロールルーム) の平均吸音率はおおよそ 0.3 ~ 0.6 程度**ですので、6 畳から 20 畳程度のスタジオでは、残響時間は 0.1 ~ 0.4 秒程度と非常に短い値となることが分かります。

スタジオのように残響時間が非常に短い部屋では、残響時間 (RT) ではなく、どの程度部屋を吸音させるかといった**平均吸音率 ($\bar{\alpha}$)**を設計の指針とすると良いでしょう。

尚、スタジオの目標残響時間に関しては、ITU-R BS. 1116-1 など様々な機関から公表されている推奨残響時間を参照する方法もありますが、ここでは**臨界距離 (CD) から平均吸音率の目標値を設定**する方法をご案内します (後述)。

音の立ち上がり

部屋で音が再生されると、ある一定の音量に到達しようとしします。この音量に到達した状態を「**定常状態**」といいます (【図 5】)。

定常状態になるまでが、いわゆる「**音の立ち上がり**」ということになりますが、実は音はいつまでたっても完全には定常状態に到達することはできません。いつまでも近づき続ける目標、いわゆる永遠の目標 (漸近線) が定常状態です。部屋の中で音が再生されている限り、音はこの目標に近づくため永遠に成長し続けます。

この立ち上がりの鈍さ / 鋭さは、減衰過程の鈍さ / 鋭さに対応します。すなわち、残響時間が長い部屋ほど音の立ち上がりは鈍く、残響時間が短い部屋ほど立ち上がりが鋭くなります。

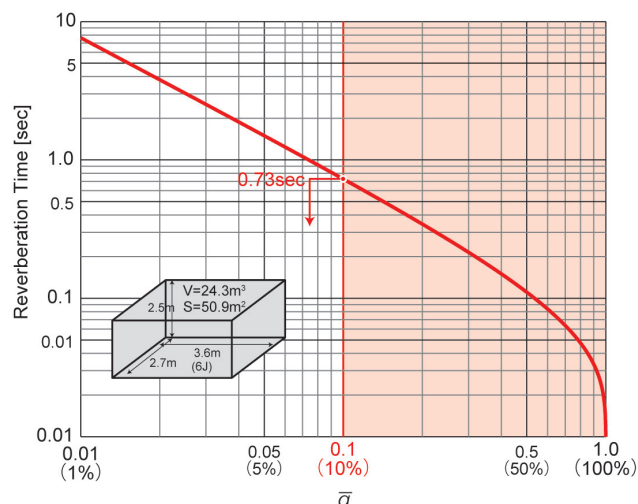
従って、吸音の少ないライブな部屋では、短い音は部屋の中で十分に成長しきれず、長い音よりピークの音圧が下がってしまうことになります。

→ 単純に解釈すれば、短い音は原音より小さく、長い音はより大きく聞こえる。

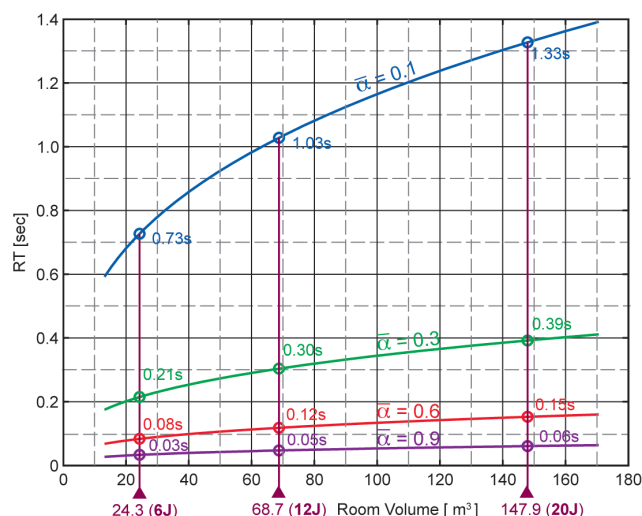
【図 11】は、残響時間の何倍 (k 倍) の長さの音を再生すれば、定常状態まであと何 dB (ΔE [dB]) というところまで到達できるか、ということ を計算した結果です。

この結果から、**残響時間の半分 ($k=0.5$)**では、定常状態まで **0.0043[dB]** まで近づくことができ、**残響時間の 1/10 ($k=0.1$)**では **1.26[dB]** まで近づくことができます。したがって、 $k=0.5$ と $k=0.1$ では、同じ音量で音を再生しても最終的には約 **1.26dB の音量の差**が部屋の響きとして生じることになります。このことは、例えば残響時間 2 秒の部屋では、1 秒のロングトーンと 0.2 秒のショートノートでは、部屋の響きとして約 1.26[dB] の音量差が生じることを意味しています。

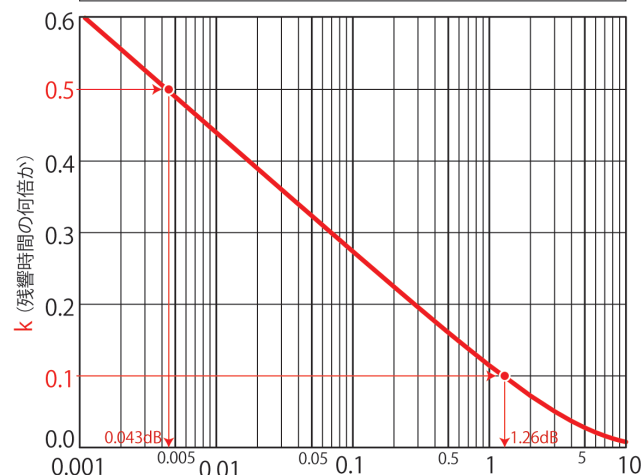
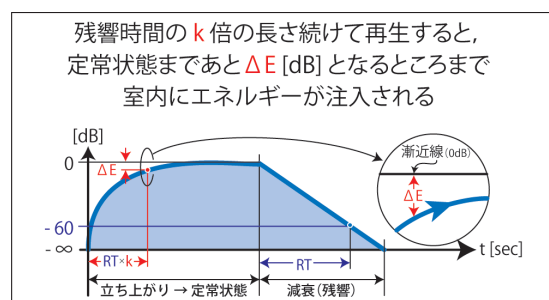
再生する音の長さによって変化する**部屋の響きの量の差を少なく**したい場合は、残響時間を短く、すなわち**部屋を吸音しなければならない**ということになります。このように、吸音は、単なる部屋のデッドやライブさだけではなく、音の立ち上がり特性にも影響を与えます。



【図 9】吸音率と残響時間



【図 10】部屋の大きさと残響時間



ΔE [dB] (定常状態まであと何dB不足しているか)

【図 11】音の再生時間とエネルギー注入率

直接音と残響音

日常聞いている音のほとんどは、部屋の響き成分

前節で検討した「部屋の響き」にスピーカーからの「直接音」を加えた状態を検討することにしましよう。

日常我々が部屋で音を聞いているのは、このような「直接音」+「部屋の響き」の状態です。この「直接音」と「部屋の響き」といった二種類の音がミックスされた状態を我々は日頃体感していることになります。

【図 12】は統計音響学の理論より導き出された「直接音 (E_d)」「部屋の響き (E_r)」と「それらのミックス ($E = E_d + E_r$)」です。

直接音 (E_d) に関しては、「音源からの距離 r 」と「指向係数 Q 」といった 2 つのパラメータがその大きさを決定していることになります。

従って、直接音に関しては、

1. 音源からの距離によって変化する。
2. スピーカーの設置方法 (指向係数 Q) によって変化する。

ということが分かります。

つまり、直接音を多く聞くためには、1. 音源に近づく、2. スピーカーをバッフルに埋めたり ($Q=2$)、部屋のコーナーに置いたり ($Q=8$)、すれば良いということになります。

尚、音の距離減衰は、音源の種類によって変わります (【図 13】)。

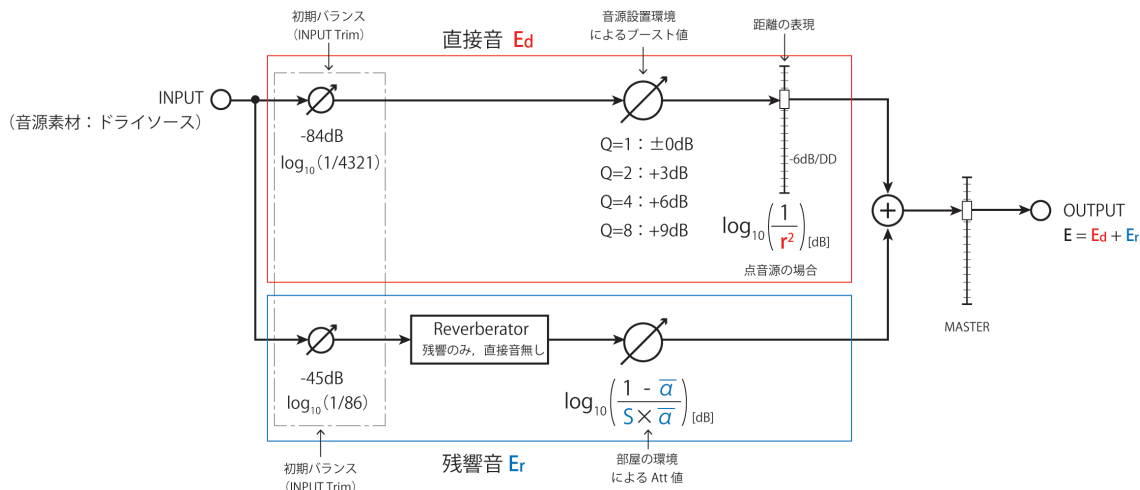
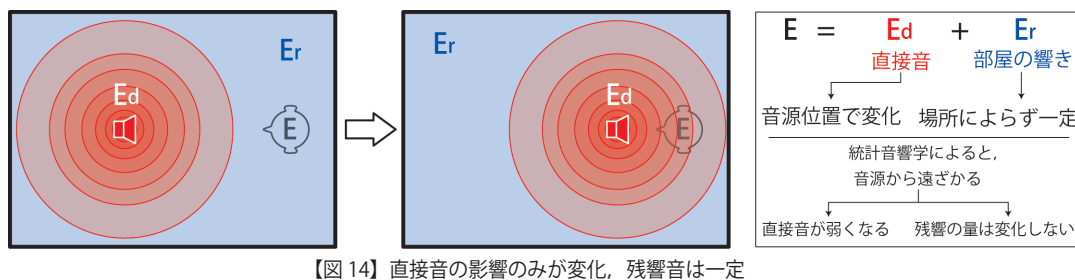
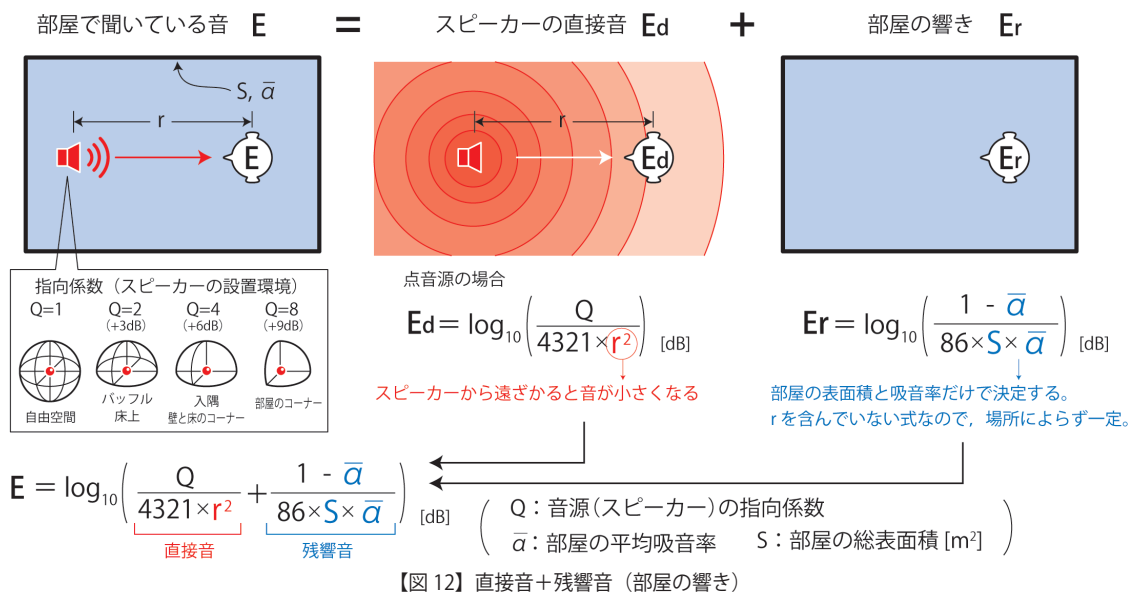
【図 12】の計算では、距離が倍になるごとに 6dB ずつ音量が減少する、すなわち -6dB/DD ($\text{DD} = \text{Double Distance}$) の性質をもつ「点音源」を音源として仮定しています。

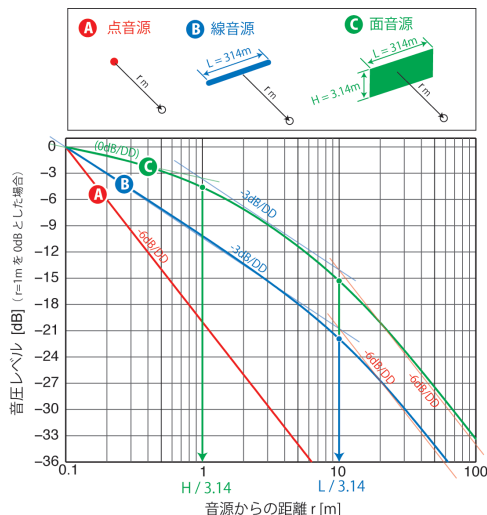
一方、部屋の響き (E_r : 残響音) に関しては、「部屋の表面積 S 」と「平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 」によって決定されます。

このことは、

部屋の響きは、場所によらず一定

ということを表しています。





【図 13】直接音の距離減衰

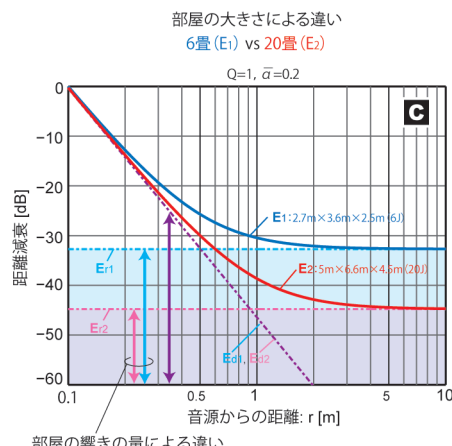
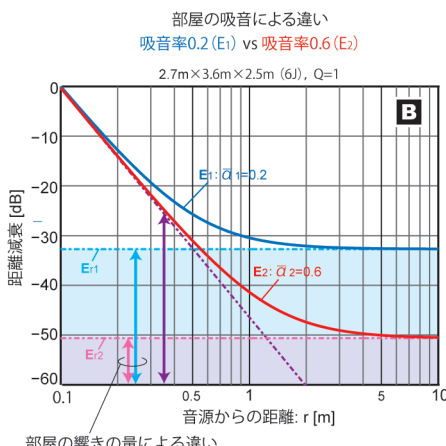
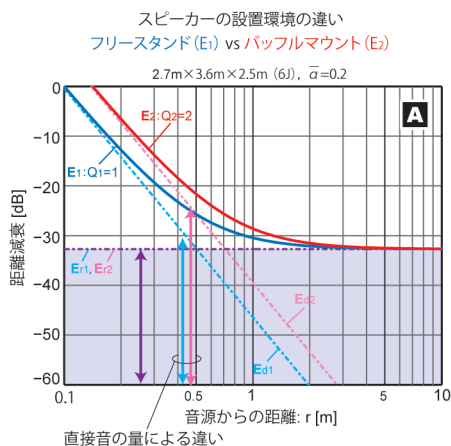
以上より、部屋の中で音を聞いている状態とは、一様な残響音で満たされた部屋の中で、距離や指向係数によって違いが生じる音源からの直接音を重ねて聞いている状態といえます（【図 14】）。つまり、統計音響学によれば、音源が遠いからといって残響が増えたり減ったりするわけではなく、変化するのは直接音の大きさのみ、残響音はいつも一定ということになります。残響音の大きさを变化させることができるのは、部屋の総表面積 S と平均吸音率 α だけです。これらの結果からリバーブのミックス、すなわち統計音響学的リバーブミックスを考えると、音源の距離感とは音源素材のレベルだけで表現し、リバーブはいつも同じ量をミックスすることになります（【図 15】）。

【図 16】は、【図 12】の結果を用いて「音源からの距離 vs 音圧レベル変化」を計算した結果です。いずれも音源近くでは、直接音が支配的であるため -6dB/DD で距離減衰をしています、ある距離で、残響音のレベルに落ち着いていることがわかります。

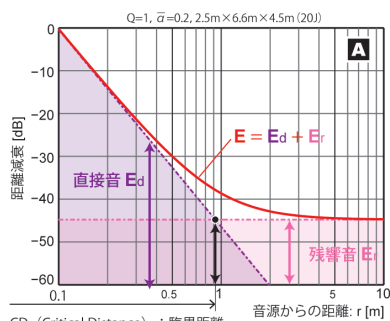
A スピーカー設置環境による違い

残響音のレベルは変わりませんが、 $Q=2$ (赤)の方が $Q=1$ (青)より直接音のレベルが大きくなるため、音源から遠くまで距離減衰を描いています。

すなわち、指向係数を上げるほど、音源から離れても直接音を多く聞き取れるようになります。

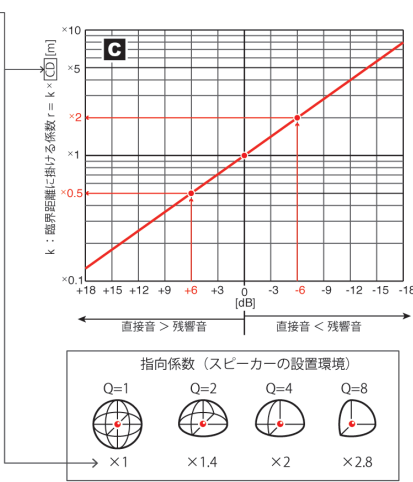
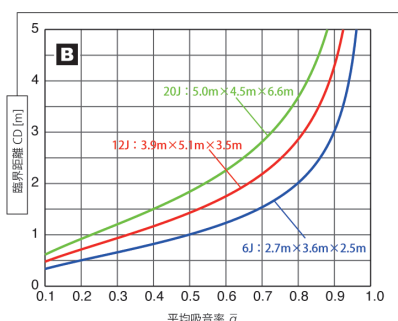


【図 16】直接音 + 残響音

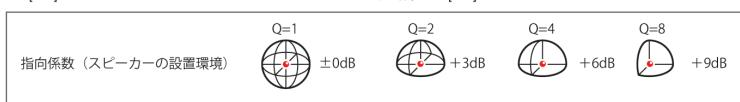
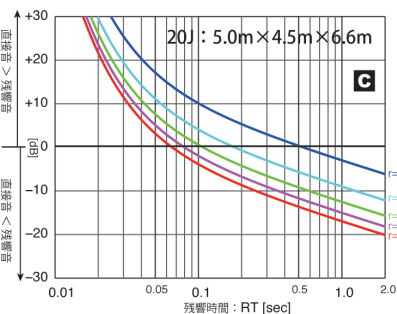
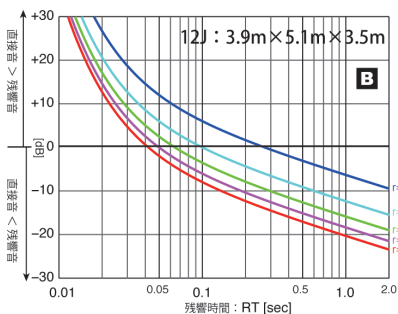
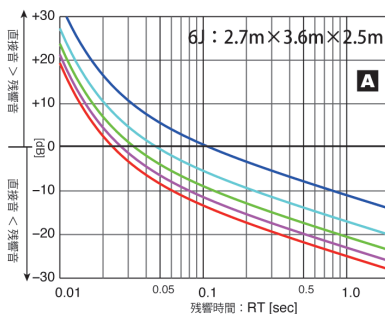


$$Q = \frac{S}{4321 \times \bar{\alpha} \times r^2} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{Q}{4321 \times r^2} \Rightarrow CD = 0.14 \sqrt{\frac{Q \times S}{1 - \bar{\alpha}}}$$

(Q : 音源(スピーカー)の指向係数
 $\bar{\alpha}$: 部屋の平均吸音率 S : 部屋の総表面積 [m^2])



【図 17】臨界距離



【図 18】残響時間と直接音の比率

B 部屋の吸音による違い

直接音のレベルは変わりませんが、 $\alpha = 0.6$ (赤)の方が $\alpha = 0.2$ (青)よりも残響音のレベルが小さくなるため、音源から遠くまで距離減衰を描いています。
すなわち、部屋を吸音するほど、音源から離れても直接音を多く聞き取れるようになります。

C 部屋の大きさによる違い

直接音のレベルは変わりませんが、20 畳 (赤)の方が6 畳 (青)よりも残響音のレベルが小さくなるため、音源から遠くまで距離減衰を描いています。
すなわち、大きな部屋ほど、音源から離れても直接音を多く聞き取れるようになります。

以上は、直接音を残響音より多く聞くという観点から検証しましたが、逆に「リスニングエリアを広くとる」ということが「聞く場所によってレベルの差を少なくする」ということなのであれば、そのためには、直接音を少なくして残響音を多くするということが分かります。

このように、リスニングポイントにおける直接音と残響音の比率をどのように考えるかということは、スタジオの音響設計にとっては重要な要素となります。
そのような際の指標として「臨界距離 (CD: Critical Distance)」があります。

臨界距離は「直接音のレベル=残響音のレベル」となる音源からの距離であり、【図 17】の A のように計算することができます。

同じく B は、6 畳、12 畳、20 畳の部屋における平均吸音率 $\bar{\alpha}$ と臨界距離 CD との関係性を計算した結果です。

例えば 20 畳 (【図 17】、B、緑線) の部屋で「臨界距離 CD = 2m をリスニングポイントとしたい」、すなわち「スピーカーから 2m の位置をリスニングポイントとして、その場所で直接音と部屋の残響音の比率を 1 : 1 に抑えたい」という場合は、部屋の平均吸音率 $\bar{\alpha} \approx 0.55$ (55% 吸音) を目指せば良いことになります。

尚、B の計算は、音源の指向係数を $Q=1$ としていますので、スピーカーがパツフルに埋まっているような状態ですと $Q=2$ となり、臨界距離 CD は 1.4 倍長くなります。

また、直接音と残響音の割合を 1 : 1 ではなく、直接音を残響音より 6dB 大きくしたいという場合は、臨界距離 CD は 0.5 倍、すなわち半分になります (【図 17】、C)。

スタジオのモニター距離ですが、実施経験的には、ラージモニターのモニター距離は、ほぼ臨界距離となっていることが多いようです ($Q=2$ の条件下)。すなわち、ラージモニターで、直接音と部屋の残響音がバランスされた環境でのモニタリングを行い、直接音を多く聞きたい場合はスモールモニターを使用するといった環境が多いということになります。

モニタリングに関して、この直接音と残響音の比率に関する決まりや推奨値は、今のところありません。臨界距離を基準に ± 0 dB という基準を自分で見つけて、【図 17】から目標とするスタジオの吸音率が算出と良いでしょう。

直接音と残響音の比率に関して検討がつかないという方は、部屋の残響時間を測定して現在の環境を確かめてみるのも良いでしょう。

【図 18】は、6 畳、12 畳、20 畳の部屋において、「残響時間 RT [sec] vs 直接音・残響音比率 [dB]」を計算した結果です。グラフ中「赤線→青線」は「モニター距離 (音源からリスニングポイントまでの距離) = 1m → 5m」を意味しています。

例えば、20 畳の部屋で、残響時間 RT=0.1 秒、モニター距離 $r=3m$ の場合、【図 18】の C より、ちょうど臨界距離 (直接音 / 残響音比率 = 0dB) でモニタリングを行っていると言うことになります。

【図 18】は音源の指向係数 $Q=1$ を仮定して作成しています。従って、 $Q=2$ 、4、8 の場合は、それぞれ得られた結果に +3dB、+4dB、+9dB を加えて下さい。

臨界距離の算出は、モニター環境の検討だけでなく、録音作業などにも役立ちます。

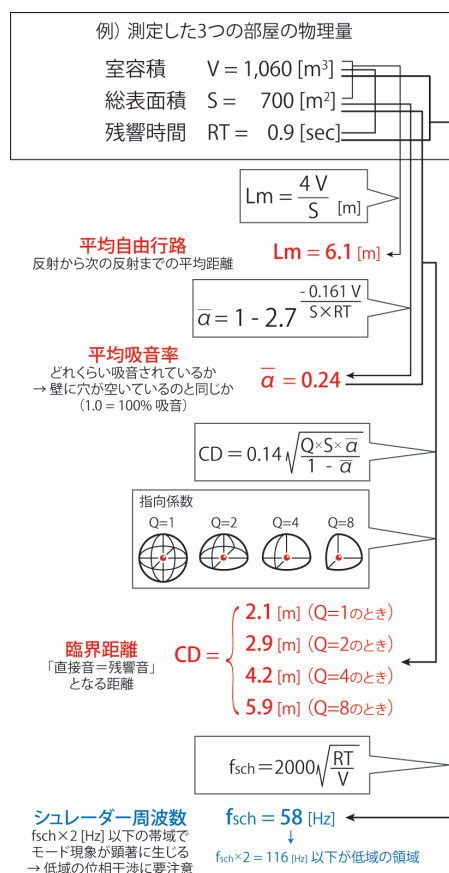
【図 19】は小編成の生楽器を主に録音することの多いスタジオの例です。
まず、部屋の形状 (容積、総表面積) から、このスタジオの「平均自由行路」がわかります。このスタジオでは、音が 6.1m 進むごとに 1 回程度反射していることが分かります。
つぎに、容積、表面積、残響時間から、スタジオの「平均吸音率」が分かります。

このようなライブなスタジオでは、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ が 0.24 (全体の 24% を吸音) であることが分かります。

最後に、上記で算出した平均吸音率 $\bar{\alpha}$ と総表面積から「臨界距離」、すなわち直接音と残響音の比率が 1 : 1 になる音源からの距離が分かります。
臨界距離は、音源の設置状況、すなわち指向係数 Q によっても変わりますので、このスタジオでは、 $Q=1$ から $Q=8$ にかけて臨界距離が 2.1m ~ 5.9m まで変わることになります。

経験的には、日常空間では $Q=2$ が当てはまるケースが多いと思いますので、このスタジオでの臨界距離の目安としては 2.9m だと考えることができるでしょう。この結果を使うと、このスタジオで録音する際のマイクは、音源から 2.9m 前後で直接音と残響音のバランスが変化、つまり ON マイクか OFF マイクかの境目が 2.9m 近辺だということが分かります。

さらに、連載第 1 回目で解説したよう、残響時間と室容積からは、シュレーダー周波数も計算できます。その結果、このスタジオでは $f_{sch}=58\text{Hz}$ となります。モード現象が顕著に表れる低域周波数の上限は、シュレーダー周波数 f_{sch} の 2 倍で表されますので、このスタジオでは、 $f_{sch} \times 2 = 116\text{Hz}$ 以下の帯域では部屋のモードなどによる位相干渉等に注意ということが分かります。



【図 19】部屋の寸法と残響時間から分かること

臨界距離や平均自由行路は、【図 19】のように計算によって求めることができますが、一般的には、部屋の一辺よりも小さな値で、部屋が大きくなるほど大きな値になるということを感じ覚的に覚えておくと、便利です。

【図 20】は、部屋の大きさによる平均自由行路および臨界距離の変化を計算した結果です。

グレーが部屋の寸法 (L, W, H)、赤が平均自由行路、青が $\bar{\alpha} = 0.6$ のデッドな状態での臨界距離 ($Q=1 \sim 2$)、緑が $\bar{\alpha} = 0.3$ で (コントロールルームとしては) 比較的ライブな状態での臨界距離 ($Q=1 \sim 2$) を表しています。

部屋の形状は千差万別なので、いつも【図 19】のような結果になるとは限りませんが、ひとつの目安として、

- ・部屋の寸法 (W, L, H) のうち一番短い寸法を 100% とすると、
- ・平均自由行路は、約 75%
- ・デッドなコントロールルーム ($\bar{\alpha} = 0.6$) での臨界距離は、約 60%
- ・比較的ライブなコントロールルーム ($\bar{\alpha} = 0.3$) での臨界距離は、約 30%

といった感じの寸法となることが分かります。

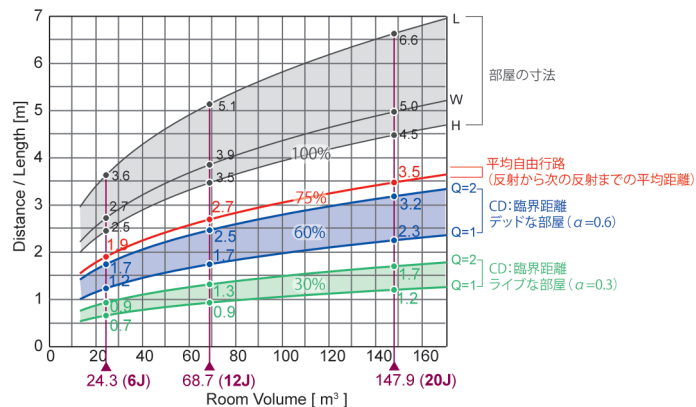
従って、たとえば W=3m くらいのスタジオの場合、

30% 吸音 ($\bar{\alpha} = 0.3$) では、臨界距離 $\approx 0.9\text{m}$ ($= 3 \times 0.3$)

60% 吸音 ($\bar{\alpha} = 0.6$) では、臨界距離 $\approx 1.8\text{m}$ ($= 3 \times 0.6$)

という目安を得ることができます。

統計音響学といえば、残響時間や吸音率が有名で、コンサートホールなどに応用される理論のようなイメージがありますが、残響が音の立ち上がりに影響することや、距離減衰、臨界距離、直接音と残響音の比率など、スタジオの音響にも色々と応用できるところがおわかり頂けたのではないのでしょうか。



【図 20】臨界距離の目安

第2部 実践編

指向性の変化で臨界距離は変わる？

(ミカミタカシ)

さて、果たして本当のところはどうか。今回も、私ミカミタカシが実践編を担当致します。

いや、今回の実験はなかなか難しかった・・・。

この連載、読者の皆様に室内音響の楽しさ、面白さを分かりやすくお伝えしようと毎回張り切っているのですが、まだまだ甘ちゃんの私にとっても、こうして原稿を書く事が大変勉強になっているのです。いやいや、今回は特に勉強になりました。

何が難しかったのかの披露も含め、早速実践編（お手軽実験）と一緒に見て参りましょう。実験は、【音源の指向性 (Q) を変化させることで、本当に臨界距離は変化するか】です。

■ 確かめてみようと思っているコト

理論編によれば、ある室の臨界距離は以下の2つの方法によって変化させることができます。

- 1) 部屋の吸音を増やすと、室定数が大きくなり、臨界距離が大きくなる。
- 2) 音源の指向性を強めると、臨界距離が大きくなる。

今回は2について、本当にそうなるのかを実験で試してみます。実験に入る前に、やろうとしていることが何なのかを、確認しておきましょう。

【fig01】を見て下さい。臨界距離というのは、[直接音の成分] と [部屋の響き成分] とが同じレベルになる音源からの距離のことでしたよね。臨界距離を伸ばすには、部屋の響き成分を下げるか、直接音成分を上げるかのいずれか（又は両方）をすれば良い訳ですが、今回トライする2の方法は、“響きの成分はそのままに、直接音成分を上げる”ということにあたります。

まずは直接音成分。Q=1 とか、Q=2 とかというのは、音源の指向性のことでしたね【fig02】。Q=1 というのは、無指向性。例えるならピンポン球がぶかぶかと音を放射しているような、与えられたエネルギーが球面の全方向に放射されるイメージです。Q=2 は、エネルギーが球の半分だけに放射されるイメージです。床や壁に音源が密着していたり、ハードバッフルマウントのような状況がこれにあたります。同じエネルギーで駆動した場合、エネルギーが半分の空間だけに寄せ集められるわけですから、Q=2 の場合、Q=1 の2倍のエネルギーが半球面に放射されているということになります。2倍ですから、音圧レベルで言うと3dBの上昇です。

一方、部屋の中にたまる“部屋の響き成分”の方は、音源のエネルギーが同じであれば、室内に注入されるエネルギーは同じですから、指向性が変化してもかわらないはずですよ。

ここがミソです。

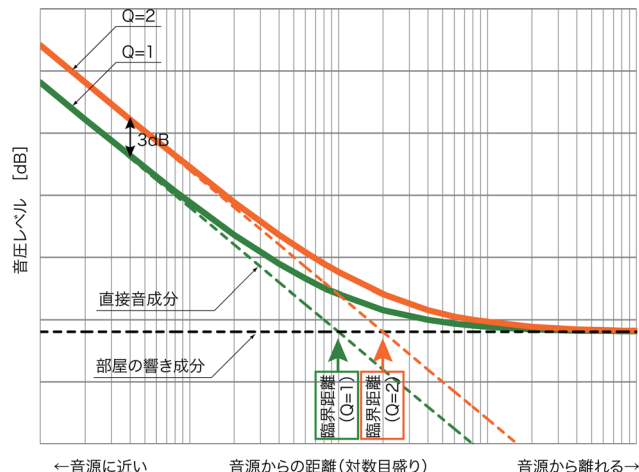
部屋の響きが多いと感じるとき、直接音を増やそうと思ってアンプのボリューム

を上げても、直接音と一緒に部屋の響きもくっついてきて増えてしまいますから、状況は変わりません。部屋の状況をそのままに（室の吸音をふやさないで）直接音成分を増やそう（臨界距離を伸ばそう）と思えば、室内に注ぐエネルギーの量は変えずに、直接音だけを増やさなくてはなりません。それを実現するのが、Q（指向性）を変えるという方法です。

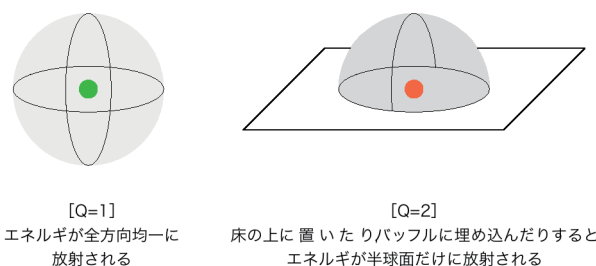
【fig01】の緑の線は Q=1 の場合、オレンジの線は Q=2 の場合を表しています。音源近くでは直接音成分が卓越しており、距離が離れるに従って音圧レベルが低下して行きますが、やがて部屋の響きによって下げ止まり、距離に拘らず一定のレベルに落ち着きます。

Q は違っても、音源のパワーが同じであれば、室内に注がれるエネルギーは同じですから、部屋の響きのレベル（黒い点線）は同じです。直接音の成分については、減衰の様子 (-6dB/DD) は同じですが、指向性の効果で Q=2 の方が 3dB 大きくなっていますので、その分臨界距離が伸びるはずですよ。

本当にこうなるのか？を確かめるのがこの実験という訳です。



【fig01】確かめてみようと思っているコト



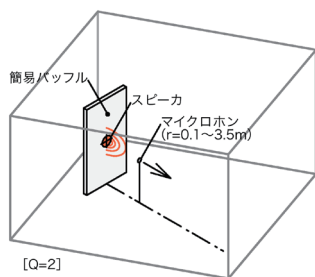
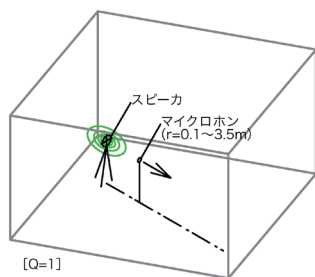
【fig02】指向性 (Q) を復習しておきましょう

■ 実験の概要

実験はいつもの通り、ソナが誇る試聴室で行ないました。スピーカからノイズを再生し、音源から遠ざかりながらマイクロホンで音圧を測定するという、極めてシンプルなものです。

Q=1 の場合は、スピーカを三脚に固定しただけ（写真上）。Q=2 の場合には、t12mm の合板（いわゆる“コンパネ”ってやつですね）910×1820mm の中心に開口を開けてそこからスピーカの顔が覗くようにして、を簡易バツフルに見立てました（写真下）。

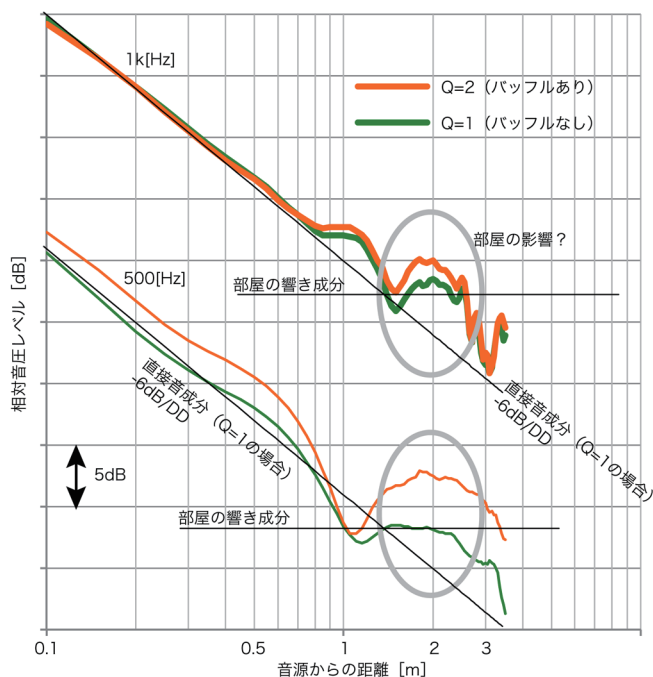
マイクロホンはスピーカと同じ高さに設置して、スピーカの表面 0.1m の点から、3.5m まで徐々に移動させて、音圧レベルの変化を観察します。



【fig03】実験のようす

■ 実験結果です（第一弾）

では、結果をみてみましょう（【fig04】）。



【fig04】実験結果（第一弾）

どうでしょう。事前に確認しておいた“調べたい状態”と比べると・・・、微妙ですね。

上は 1k[Hz] の結果です。まず、バツフルの効果が出ていませんね。バツフルを使えば半球面だけへの放射（Q=2）となって、バツフルなしに比べると、直接音が卓越している範囲では 3dB 上昇するはずなのですが、2本の線はほとんど重なっていて、そんな効果は見られません。下は 500[Hz] の結果です。こちらは理論上の +3dB とまではいかないまでも、バツフルの効果が見られているようです。

それから、“臨界距離を超えると、指向性とは関係なく部屋の響きで一定となる”という部分も納得し難い結果ですね。確かに音源近くでは、事前の予想通り距離減衰通りに減衰してはいますが、“臨界距離を超えると一定となる”という現象は見られません。この部屋の臨界距離は 1.5～2.0m 程度ですので（予め計算してあります）無理矢理いいように解釈すると、臨界距離を超えたあたりから直接音よりも部屋の響きが支配的になって、音圧レベルがぐちゃぐちゃになっている・・・、とは言えるかもしれませんが・・・。

要するに、実験があまりうまくいってないように見えますね。

何故うまくいかないのか。ここで立ち止まって、この実験がうまくいくための条件について考えてみましょう。

・音場が拡散音場であること。

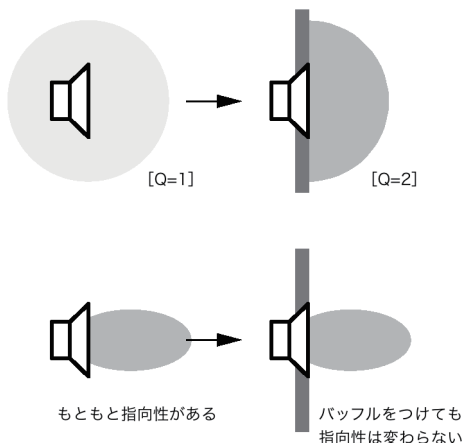
理論編で見てきた通り、このような現象は室内の音場が拡散音場であることが前提です。実験をしているソナの試聴室は、拡散音場を前提にした実験に適した空間なのでしょうか。試聴室の物理的、音響的な特徴をざっと見てみましょう【fig05】。

拡散音場を作りやすい条件を大雑把に考えてみると、部屋が大きい（モードの影響を受けづらい）、吸音が少ない（吸音が多いと自由音場のな性格が出やすく、音圧が一定になるエリアが小さくなってしまふ）などが考えられます。

こうした観点から見てみると、（大雑把な見方ですが）実験を行なっている試聴室は、平均吸音率は高めで、大きさもあまり大きいとは言えません。シュレーダー周波数から考えると、500Hz くらいであれば室モード的な影響はあまりないと考えても良いと思われます（詳しくは 2010 年 summer 号で復習してみてください）。実際には大きなうねりの様な物が出てしまっています。はっきりとした事は言えませんが、部屋の端で大きな山谷ができるのは、壁や周囲のモノからの反射の影響を受けていることも考えられます（こちらは 2010-2011 No.4 号で復習）。さらには、指向性だけを変えたいというバツフルが部屋のサイズに対して小さくなく、指向性以外に音場そのものも変えてしまっているなども考えられますね。

室寸法	[m]	L5.0×W5.0×H2.6
室容積	[m ³]	65
残響時間	[sec]	約0.15
平均吸音率		0.4～0.5程度
シュレーダー周波数	[Hz]	90～100Hz程度
臨界距離(Q=1)	[m]	1.4m程度
臨界距離(Q=2)	[m]	2.0m程度

【fig05】ソナ試聴室の物理的、音響的特徴



【fig06】もともと指向性があると、思ったようなバツフルの効果は出ない

・(バッフルなしの時) 音源が無指向性であること

バッフルをつけると $Q=2$ となって、バッフルなしの時比べると直接音成分が 3dB 増加するというのは、バッフルなしの時に音源が無指向性であるということが前提になっています。しかし、無指向性の音源を実現するのは、実際には難しい事です。一般には、ある同じ大きさの振動板からの放射を考えると、低域ほど指向性は薄れ、高域になればなるほど指向性は強まってしまいます。もともと指向性があれば、バッフルをつけても思うような効果は出ません【fig06】。【fig04】で、1k[Hz]においてはほとんどバッフルの効果が出ていないことが分かりましたが、これはバッフルがなくても、もともと前方への指向性がかかなりあるからなのではないかということが考えられます。

今回は、部屋の事情を考えれば、低域では音場が拡散音場的ではありませんので、中高域以上で実験を行ないたいのですが、そうすると音源の指向性が強まり、バッフルで指向性を変化させることがしづらくなるというジレンマがあります。

という訳で、うまくいかない理由は何となくアタリがついたのですが、これでおしまいという訳にもいかず・・・。

■ もう一度実験 (第二弾)

では、どうしましょうか。要するに最初に見たような結果を得るためには、

室内に注入するエネルギーはそのままに、直接音の強さだけを変える

ことができれば良いわけです。

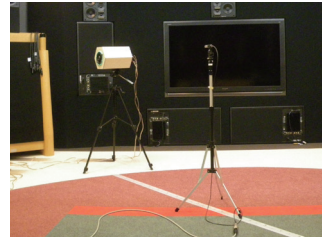
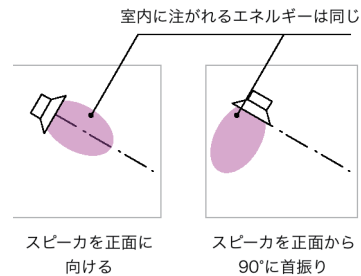
バッフルに拘らずに、そのような実験をするにはどうしたら良いか。ということで、安直な方法ではありますが、スピーカの首を振ってみる事にしました【fig07】。

バッフルを付けずとも、もともとの状態で指向性があるとすれば、スピーカ正面軸上ではない方向で同じ測定をすれば、直接音は弱まるはず。しかしその時もアンプのボリュームをいじってはいないので、室内に入るエネルギーはそのままですから、“部屋の響きのレベル”はスピーカの向きに拘らず、同じようなレベルで観測できるのではないかと・・・。果たして結果や如何に。

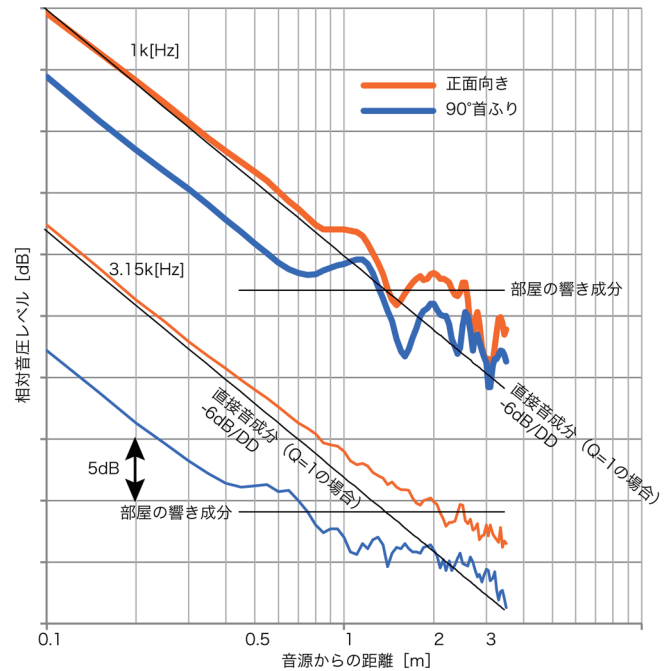
【fig08】が測定結果です。如何でしょうか。第二弾もスッキリとは行きませんが、何となくそれらしく片鱗は感じられませんか(笑)？

上は 1k[Hz]、下は 3.15k[Hz] の結果です。どちらも音源近くでは、正面向きと 90° 首ふりで音圧レベルに差がありながら、-6dB/DD という点音源なりの減衰を示しますが、1m を超えて距離が離れて行くと、やがて“部屋の響き成分”が支配的になって、徐々にレベルが下げ止まる様子が何となく分かりませんか？

スピーカーの指向性により直接音成分には大きな差がありますが、スピーカーの顔の向きが違っただけなので、室内に注がれているエネルギーはどちらも同じで、部屋の響き成分は同じくらいになるという訳です。



【fig07】測定第二弾 90°首をそむけて測定



【fig08】実験結果 (第二弾)

■ というわけで

うーん、いつも以上の灰色決着？いささか、心残りはありますが、【音源の指向性 (Q) を変化させることで、臨界距離は変化しそудだ!】ということがどうにかお分かりいただけましたでしょうか。

【SONA PERSONAL STUDIO DESIGN Vol. 5 予告？】

読者の皆様の寛容さと忍耐に支えられて、本連載も最終回を迎えることができました。

4回の連載で、スタジオ設計にかかわる「室内音響学」を一通り駆け足で紹介させて頂きました。その内容は、現場のコツなどといったTipsではなく、設計の基礎となる理論の紹介という、なかなか歯ごたえのある内容だったのでは無いかと思います。

寂しいながらも、これで当分原稿の締切とはサヨナラ！と思ってましたが、カーテンコールとミカミタカシの「いささか心残り」に後押しされて、次回特別編を掲載させて頂きます。内容はまだ詳しくは申し上げられませんが、これまでの理論を若人と体を張って実現してゆく体育会系の内容です。現場からのレポートはミカミタカシが担当させていただく予定です。

御質問等は、Pro@miroc.co.jp まで！

SONA：(株) ソナ

1975年より、メジャーレコード会社（ソニー、ビクター、エイベックス、ユニバーサルミュージック等）や放送局（NHK、NTV、TBS、YTV、ABC等）そしてポストプロダクション（オムニバスジャパン、イマジカ、Sony PCL等）など幅広い分野のスタジオの音響設計を手がけ、多くの制作環境を高品質に導いています。

その一方で、トップ・アーティストやクリエイターなどのパーソナル・スタジオの実績に関しても抜きん出ています。

また、サラウンド対応スタジオはDVDの普及前から取り組み、この分野での先駆的な役割を果たしています。

新たな技術を柔軟な思考で取り入れ、様々な手法でスタジオデザインにアプローチし、建築はもちろんのこと、モニターシステムの構築や最終的な再生音の調整（THX

からライセンスを受けた技術者が在籍）に関しても積極的に携わっています。

<http://www.sona.co.jp>

中原雅考

株式会社ソナ 取締役 / オンフューチャー株式会社 代表取締役 / Audio Engineering Society 日本支部 理事 / 博士(芸術工学)。

スタジオ設計という分野において、理論と現場に向きあってきたその音響設計手法は、数多くのクライアントからの信頼を得ており、業界に対しても大きな影響を与えている。特に、サラウンド・スタジオの音響設計に関しては、業界の第一人者として数多くの実績があり、室内音響・モニターシステム・音響測定・調整を総合した設計方法を先行して築いてきた。最近では、ソナにおけるスタジオ設計業務だけでなく、音響ソフトウェアの開発などのR&D業務もオンフューチャーにて行っている。専門学校や大学などでの講義をはじめ、講演多数。主な著書に、「サラウンド入門（東京藝大出版会）」、「Multichannel Monitoring Tutorial Booklet（ソナ、ヤマハ）」、「サラウンド制作ハンドブック（兼六館）」、「サウンドレコーディング技術概論（日本音楽スタジオ協会）」等。

ミカミタカシ

株式会社ソナ 設計・技術グループ サブ・マネージャー。

九州芸術工科大学在籍時代（中原の後輩として）サークルのライブ活動や音響学の勉強に全力で取り組み、優秀な成績で卒業。将来を有望視されながら大手企業へと入社するも年々音響から遠ざかってしまうことに寂しさを覚え、人生半ばでエリートコースをドロップアウトしてソナの門をたたく。学生時代の優秀な成績が幸いしてか、音響に関してはソナ入社時からベテラン並みの手腕を発揮する。バランスを重んじる設計ポリシーと独特なデザインセンスを優秀な音響知識の上に掲げ、現在急成長中のアコースティック・デザイナー。主な読書に「週刊ベースボール」等。