



さて、前回から始まりました「パーソナル・スタジオの音響学」。今回からは、「理論編」と「実践編」の2部構成でお届けします。まずは理論編。しっかりとした理論を身につけて頂くために、前回に引き続き中原雅考 博士（株式会社ソナ）が、本格的な音響理論を豊富なスタジオ設計経験をもとに実践的な観点からやさしく解説します。そして、理論を習得したら次は実践編。実践編では、Dr. 中原が所属するソナで将来を有望されているミカミタカシが、自身の経験をもとに中原理論の使い方を現場目線で皆様に解説します。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。

パーソナル・スタジオ設計の音響学 その2 「低域の世界」 ～部屋の共鳴がスピーカーの再生特性に化ける～

SONA
PERSONAL Studio Design

◆部屋もスピーカーの部品の一つ！ 迷信に惑わされず低域としっかり向き合おう！

音の世界が「低域、中域、高域」という3種類の民族で構成されていることは、前回の第一回目で解説した通りですが、この3種類の中で最も読めない行動をする民族が「低域」です。低域の世界の人々の行動をよく観察すると、彼らの行動は「波動音響」という物理の法則に則っており、その意味では実は大変規律正しい振る舞いをしているのですが、この「波動音響」という法則が人の感覚には少々理解しがたいのです。とはいえものの、低域を理解しないことには、パーソナル・スタジオのイロハが始まりません。

パーソナル・スタジオのような小さな空間にとって、モニタースピーカーの低域特性は部屋の特性そのものです。スピーカーから低域を再生している様子を音響の眼鏡を通して眺めると、部屋もスピーカの部品のように見えてしまいます。パーソナルスタジオにおける低域モニタリングは、スピーカーではなく、実際には部屋の鳴りを聴いているようなものなのです。

第2回目の今回は、いきなり最上級編である「部屋の低域の振る舞いとモニター特性の関係」について解説を行います。

低域の振る舞いは、部屋のサイズや形状、スピーカーやリスニングポイントの位置、そして吸音の具合など様々な要因が複雑に影響し合っています。そして、色々な迷信も存在します。

- ・スピーカーは、部屋のサイズに対して○：△の場所に置けば、大体良い低域特性が得られる。
- ・低域がたまっているところに吸音材を置けば、音のこもりがとれる。
- ・低域を鳴らすためには、吸音を減らして部屋をライブにした方が良い。
- ・定在波を除去すれば、安定した低域特性が得られる。 などなど…

これらは、全て迷信です。もちろん、このような裏ワザが効果を発揮することもあるかもしれませんが、どちらかというと「当たるも八卦、当たらぬも八卦」の世界です。

低域を制するものはパーソナル・スタジオを制する、です。ここでは、皆さんと「部屋の鳴りがどのようにスピーカーの再生特性に化けてゆくのか」を腰を据えて学んでゆきます。そうすれば、様々な迷信が通用しない場合でも、どのように問題を解決してゆけばよいか、その手がかりを自分自身で考え出せるようになるでしょう。

第1部 理論編

部屋の鳴りは、どのようにしてスピーカーの低域特性に成り代わってしまうのか

(中原 雅 考)

部屋は、それぞれ定められた低域の性格を持って生まれてきます。そして、一旦持って生まれたこの基本的な性格を後から変更することは、ほとんど不可能です。まずは、この先天的な性格を理解することから始めましょう。

ここでは、モデルケースとして、6～8畳程度の(A1)(A2)という部屋と、20畳程度の(B)という3種類の部屋を検討することにします(【図1】)。(A1)を基準に考えると、他の2部屋の特徴は以下ということになります。

・部屋(A2)

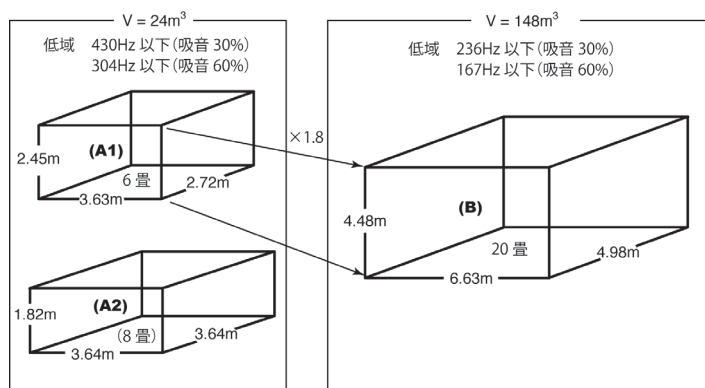
(A1)と同じ大きさ(容積)の部屋ですが、壁の寸法比が異なります。

(A1)とは異なり、縦：横：高さ = 1：1：1/2という単純な寸法比です。

・部屋(B)

(A1)と同じ壁の寸法比(1.11：1.48：1)で構成されていますが、大きさが約1.8倍(容積約6倍)の部屋です。

これから、これらの低域特性を検証してゆくことになりますが、まずはこれらの部屋の「低域」と呼ばれる周波数が何Hzのことなのかを把握しておきましょう。



【図1】(A1)(A2)(B)という3種類の形状の部屋

前回の復習となりますが、【図2】をご覧ください。

2種類の曲線が、それぞれライブな部屋(吸音率0.3)とデッドな部屋(吸音率0.6)における低域の境界線を表しています。

これによると、それぞれの部屋に対しての低域とは、以下のような周波数帯域を意味することになります。これが、今回の検討対象となる帯域です。

以下、このような帯域でのお話しとして進めることにします。

・部屋(A1)(A2)

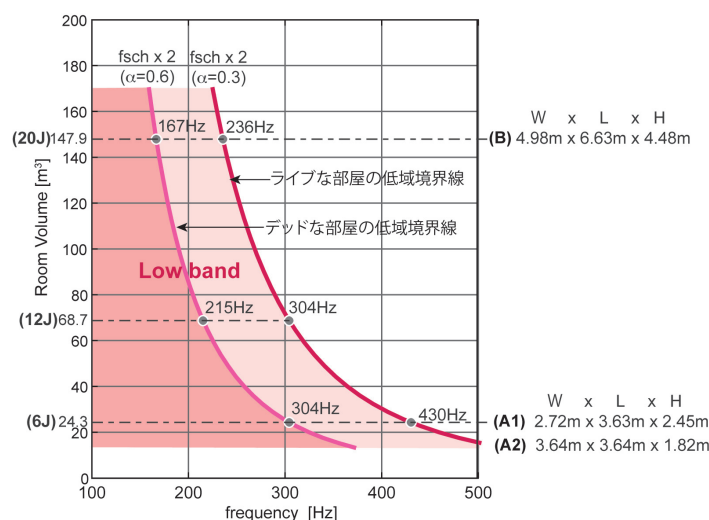
ライブな場合 430Hz以下

デッドな場合 304Hz以下

・部屋(B)

ライブな場合 236Hz以下

デッドな場合 167Hz以下



【図2】ここで話題にする低域とは何Hz以下のことであるか？

部屋は楽器と同じ！

小さな部屋では低域が出ないし、同じ大きさの部屋でも形が変われば音色が変わる

部屋は、楽器のようなものです。

【図1】の(A1)(A2)(B)の部屋をそれぞれ鉄琴の音板のような金属の固まりと考えてください。そして、それらをマレットのようなバチで叩いた時の音を想像してみましょう。

最も低い音がするのはどれでしょうか？

答えは、やはり一番大きい(B)ということになります。一方、(A1)と(A2)は同じくらいの大きさなので、音のピッチとしてはそれぞれ同じような音程となるでしょう。

では、(A1)と(A2)の違いは何でしょうか？

それは、音色ということになります。(A1)と(A2)は、大きさは同じですが、縦・横・高さの寸法比といったプロポーションが異なります。そのような形状の違いは、音程ではなく音色の違いとなって表れるのです。

一方、(A1)と(B)は、大きさは異なりますが、縦・横・高さの寸法比、すなわちプロポーションは同じです。従って、音程は違いますが、音色は同じ(似ている)ということになります。

まとめると、部屋の低域の性質に関しては、

・部屋の大きさ = 音程

大きい部屋は低い音が出る。

・部屋の形状(縦・横・高さの比率) = 音色

というのが、原則ということになります。

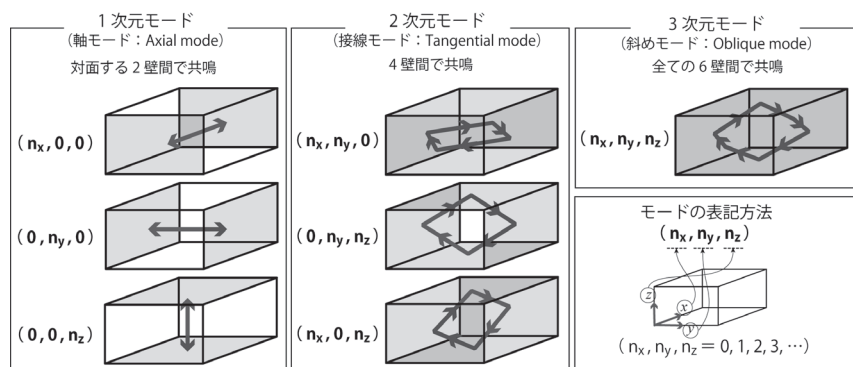
部屋も楽器と同様に、大きさや形で音程や音色が決まるのです。普段そのように意識することが少ないのは、部屋は楽器に比べてはるかに大きいため、低域の特性に限定してそのような性格が表れており聴感上気づきにくいというだけのことなのです。

このような部屋の生まれ持った音の性質を構成している、いわば低域のDNAのようなものが、部屋の倍音構造です。

部屋の倍音構造は、部屋の3種類の共鳴現象によって作り出されています。

部屋の共鳴現象のことを「モード」と呼びます。例えば、部屋が共鳴しているような状態を「モードが生じている」などと表現します。

【図3】が3種類の共鳴、すなわち「1次元モード」「2次元モード」「3次元モード」を表した図です。



【図3】3種類のモード(部屋の共鳴)形式

・1次元モード（軸モード：Axial Mode）

一対の向かい合う壁面同士、すなわち2つの壁面間で生じる共鳴。

・2次元モード（接線モード：Tangential Mode）

4つの壁面間で生じる共鳴。

・3次元モード（斜めモード：Oblique Mode）

6面全ての壁面間で生じる共鳴。

これらの共鳴、すなわちモードの生じる周波数を「固有周波数」と呼び、この固有周波数の分布が、部屋の倍音構造となります。

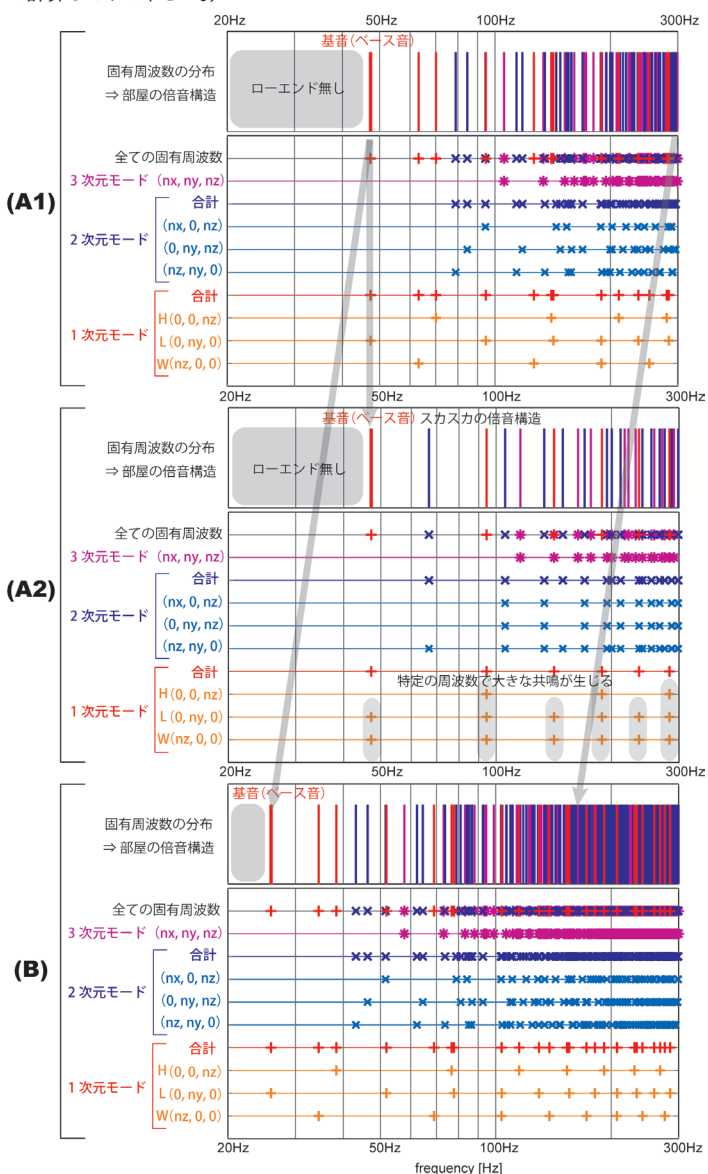
大まかに言うと、固有周波数は、

$$1 \text{ 次元モード} < 2 \text{ 次元モード} < 3 \text{ 次元モード}$$

の順番で高くなりますので、部屋の低域特性に最も影響を与えているのは「1次元モード」だということになります。

【図4】が、(A1) (A2) (B) の3種類の部屋の固有周波数、すなわち3種類の部屋の倍音構造を算出した結果です。

(ガッツのある方は、【式1】で固有周波数を計算できますので、エクセルなどで計算してみてください。)



【図4】3種類の部屋の固有周波数分布（倍音構造）

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

$$\begin{pmatrix} f_{n_x, n_y, n_z} & \text{固有周波数 [Hz]} \\ L_x, L_y, L_z & \text{部屋の寸法(幅, 奥行, 高さ) [m]} \\ n_x, n_y, n_z & 0, 1, 2, 3, \dots \\ c & \text{音速 344 [m/s]} \end{pmatrix}$$

【式1】固有周波数（部屋の倍音）の計算式：全てのモード

【図4】によると、3種類の部屋の音程と音色に関して予想した内容が実証されていることが分かります。

・音程に関して

固有周波数のうち、一番低い周波数がいわば楽器の基音のようなもので、部屋の音程を形成しています。この基音は、最も距離の長い2壁間で生じる1次元モードにより決定されます。

従って、部屋の大きさがほぼ等しい(A1)と(A2)の基音は、ほぼ同じ周波数となり、それらに比べて大きな(B)では周波数が低くなります。

従って、部屋の音程に関しては、予想通り以下となります。

$$(B) < (A1) \approx (A2)$$

・音色に関して

音色は固有周波数の配列で決まります。

(A1)と(B)は部屋の形状が相似形のため、固有周波数の配列、すなわち倍音構造が同じです。つまり、(A1)の倍音構造をそのまま低い周波数にスライドしたものが(B)となります。従って(B)は(A1)の音をそのままピッチシフトしたような音色となります。

一方、(A2)は(A1)と基音はほぼ同じですが、固有周波数の配列（倍音構造）が違います。そのため、音程は似たような感じとなりますが、音色は異なってきます。

従って、部屋の音色に関しては、予想通り以下となります。

$$(B) \approx (A1) \neq (A2)$$

ここで重要なのは、原則として、

『固有周波数以外の音は部屋の中では存在できない』

ということです。

現実の世界では、吸音や音漏れなどのダンピング効果によって他の周波数の音もなんとか存在できるのですが、もし、全ての壁面が頑丈で重く表面もツルツルで、その結果、音漏れが一切無く全ての周波数を完璧に室内に跳ね返してしまうような部屋であった場合、固有周波数以外の周波数の音はほとんど室内で再生することができません。この場合、例えば、スピーカーが低域から高域までなめらかに再生できるような優れたものであっても、ピアノの鍵盤を左端から右端まで1つ1つ弾いていっても、部屋の基音以下の低域は全く聞こえず、また固有周波数がまばらな低域では飛び飛びの音程しか聞こえないと言うことになります。

これが、部屋の音の性質の基本です。現実の空間では、音漏れや吸音の効果によってその性質がなまってしまっているため、部屋の本性を忘れがちになりますが、部屋の音の基本的な性格は、【図4】のように、部屋の形状から決定される固有周波数分布（倍音構造）で決定されることを、まずはしっかりと認識しておく必要があります。

このような観点から、【図4】を眺めると、部屋の本質的な音の性格として、以下のことがわかります。

(1) 小さい部屋ではローエンドが再生できない

がっちり防音されているうえに吸音が少ないような部屋では、音の逃げ場がないため、最低固有周波数（基音）以下の音が再生できなくなります。

【図5】は、部屋の大きさとローエンド周波数の関係を計算した結果です。青線が吸音0の場合、赤破線が吸音25%、赤線が吸音50%の場合です。

例えば、(A1)のような6畳程度の部屋の場合、吸音0だと47Hz、吸音50%だと33Hz以下での再生が困難となることが予想されます。従って、6畳程度の部屋では、吸音無しだとNS10M程度のモニターでの低域再生が限界で、ミッドクラスのモニターを使用するためには吸音は欠かせないことが分かります。一方、(B)のように部屋の大きさが20畳程度の大きさになると、吸音50%でほぼ可聴帯域限界の23Hzまでの低域まで再生可能となることが分かります。

吸音効果の詳細に関しては後述しますが、低域を増強するためには、部屋を響かせるのではなく、吸音することが重要です。特に、小さな部屋では吸音が重要です。

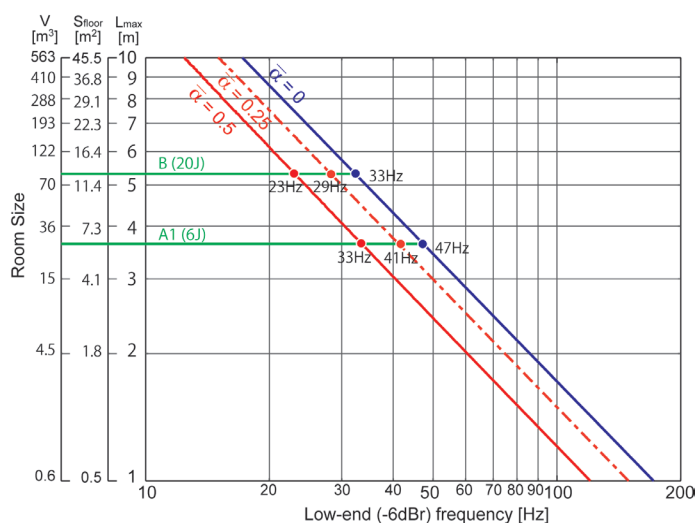
(2) 単純な形状の部屋では、飛び飛びの低域しか再生できない

【図4】を眺めると、(A2)の低域の固有周波数は(A1)に比べてスカスカであることがわかります。これは、部屋の寸法比が単純なため、W方向とL方向の固有周波数（共鳴周波数）が同じ周波数となり、それらがびったり重なってしまうからです。また、H寸法もWやLの半分ときりのよい寸法比となっているため、WとLの固有周波数にびったりと重なってしまっています。

このような固有周波数ごとの間隔が広い倍音構造では、再生不可能な周波帯域が多い部屋の性格となってしまいます。

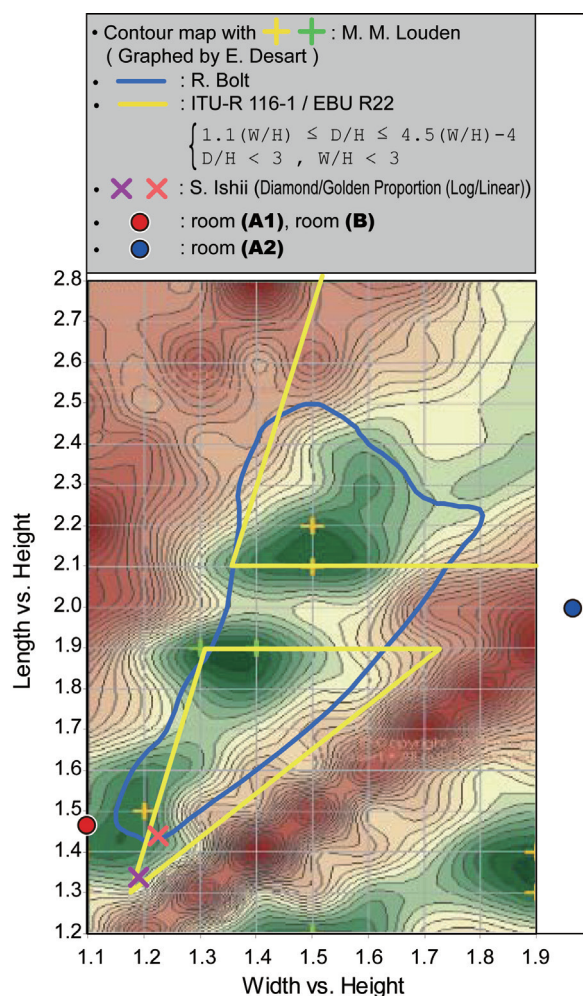
また、「固有周波数＝共鳴周波数」ということから、このような部屋では、特定の周波数でW、L、H方向の全ての共鳴が生じてしまうため、部屋全体に大きな共鳴現象、すなわち「**縮退**」が生じてしまい、音圧のピークやディップの大きいムラのある音場が形成されてしまいます。

逆に、部屋のW、L、Hが互いに割り切れないような複雑な寸法比となっている場合には良好な固有周波数分布が得られます。そのような考えから、これまでに、黄金比（1：1.168）や白銀比（1：1.141）などの古典的な比率をはじめ、その他にも色々な人々により様々な推奨が掲げられています。【図6】は、海外のスタジオ設計会社などがしばしば参照に用いているチャートです。横軸がWとHの比率、縦軸がLとHの比率となっており、(1) Louden（カラー等高線、+印：1971年）、(2) Bolt（青線で囲まれたエリア、1946年）、(3) ITU-R 及び EBUの推奨（黄線で囲まれたエリア、1994、1998）などがプロットされています。例えば、石井伸一郎さんが奨められている寸法比（AES東京、2001）をこのチャートにプロットしてみると（×印）、非常に微妙です。このチャートで最適な室寸法を評価できるかということに関しては、まだまだ議論の余地がありますが、とりあえず、(A1) (A2) (B) の部屋の寸法比をプロットしてみ



【図5】部屋の大きさと低域再生限界（-6dB）

ると、(A1) と (B) の寸法比（●）に比べ (A2) の寸法比（●）が、一般的な推奨からはかなりかけ離れていることが分かります。



【図6】音が良いと言われている部屋の推奨寸法比をまとめたチャート

固有周波数が全ての根源！

固有周波数がモニター特性へと変身して行くまで

前述のように、部屋の形状が決まると、その時点においてすでに部屋の低域の基本的な性質、すなわち固有周波数分布が決まっていることになります。固有周波数分布に着目して、良い響きの部屋寸法を得るための推奨値や考え方が色々と述べられていますが、**スタジオにとって一番重要なのは、固有周波数分布そのものではなく、最終的には、リスニングポイントにおけるスピーカの再生特性**です。いいかえれば、どんなに悪い寸法比の部屋と評価されようが、モニター特性さえちゃんとしていれば、良いスタジオだと言えます。

【図7】は、固有周波数から最終的なモニター特性が得られるまでのプロセスを表した図です。【図7】を見るとわかるように、固有周波数がモニター特性に変化するまでには、以下の3つの要因が影響してきます。

(1) リスニングポイントの位置

リスニングポイントの位置が変わると、固有周波数のスペクトルのレベルと位相が変化します。

(2) スピーカーの位置

スピーカーの位置によっても、固有周波数のスペクトルのレベルと位相が変化します。

(3) 吸音

部屋の吸音効果が、飛び飛びの固有周波数のスペクトルをなめらかに結合します。吸音が多いほど、周波数特性はなめらかになり、本来なら再生不可能な最低固有周波数（基音）以下のローエンドまで再生帯域を拡張することができます。

【図8】は、モード合成法という計算方法を使って (A1) (A2) (B) の3種類の部屋の周波数特性を計算した結果です。

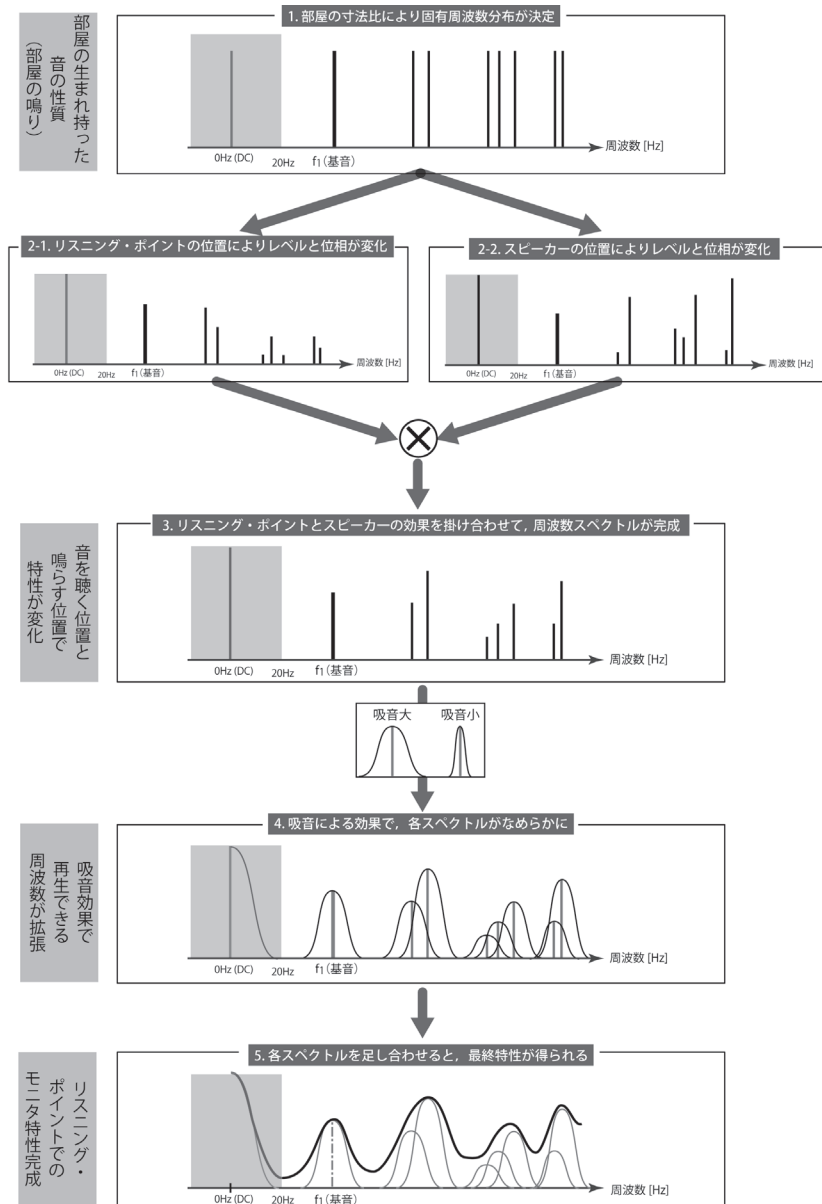
ここでは、部屋の全てのモードの影響を眺めようという意図から、音源（スピー

カー）とリスニングポイントは、それぞれ部屋のコーナーに設置しています（コーナー以外の場所に設置すると、ある特定のモードが消失してしまうことがあります）。

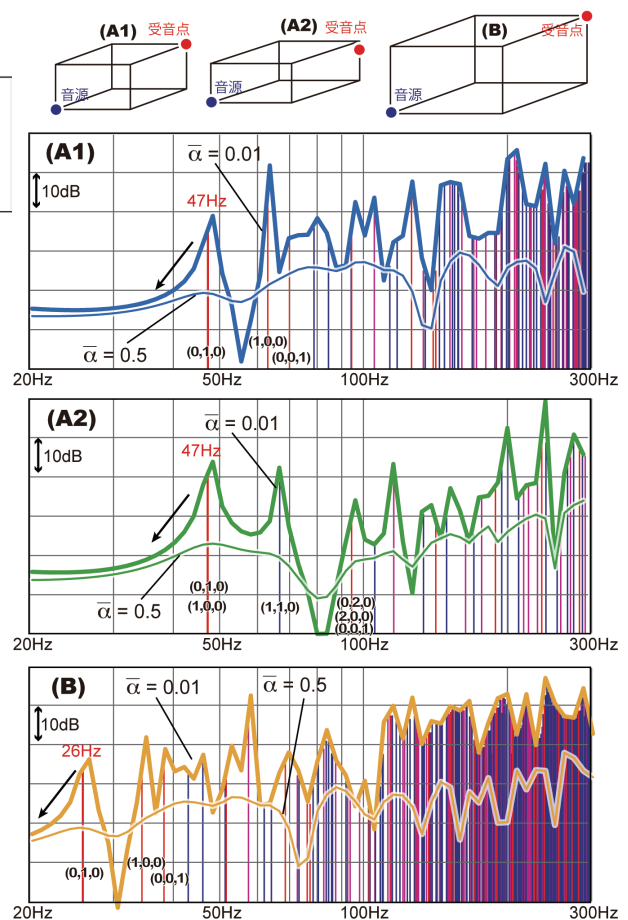
次に、吸音率に関しては、 $\alpha = 0.001$ （吸音1%）というライブな状態と、 $\alpha = 0.5$ （吸音50%）という商業スタジオなみのデッドな状態の二種類を設定しています。

【図8】の計算結果を眺めると、以下のことが分かります。

- (1) 固有周波数が大きなピークの原因となっている。
- (2) 固有周波数のピークを結んだような形で周波数特性ができています。
- (3) 吸音すると周波数特性がなめらかになり、ピークやディップの少ないフラットな特性に近づく。
- (4) 吸音が少ない場合、最低固有周波数以下でレベルが極端に減少してしまう、すなわち、固有周波数でカットオフ周波数が決まってしまうが、**吸音すると、ローエンドまで再生帯域がのびる。**
- (5) 全ての固有周波数が周波数特性のピークとなっているわけではない。特に固有周波数（モード）の多くなる中低域では、ピークと固有周波数の関係が明確ではない。従って、**モードに関しては、1次元モードなどの低い周波数のものに注目すれば良い**と考えられる。
- (6) 隣り合う固有周波数のピーク同士の間大きなディップが生じやすい。また、**ディップの生じ方は、隣り合う固有周波数の位相関係によるため、様々である。**



【図7】部屋の寸法比からその部屋の固有周波数分布（倍音構造）が決まり、それがもとになってスピーカの低域特性がつけられる



【図8】3種類の部屋の固有周波数分布（倍音構造）と最終的に得られるスピーカの低域特性のシミュレーション結果

モードの基本は1次元モード！

定在波と1次元モードの関係を理解して、ベストポジションを探しだそう

固有周波数を与える部屋のモードには、1次元モード（軸モード、axial mode）、2次元モード（接線モード、tangential mode）、3次元モード（斜めモード、oblique mode）の3種類がありますが（【図3】）、**モニター特性とモードの関係**ということでは、1次元モードが最も重要な役割を担っています。1次元モードは、向かい合う2壁間で生じる定在波が原因となって生じる共鳴現象です。従って、1モードには、(1) 部屋のW方向、(2) L方向、(3) H方向の3種類が存在します。

【図9】は、1次元モードの発生の仕組みを、周波数の低い方から3種類（第1次モード、第2次モード、第3次モード）図示したものです。1次元モード、すなわち2壁間の共鳴現象は、以下の2つの条件を満たす音波が壁面間に存在する場合に発生します。また、このような音波のことを『**定在波**』と呼びます。

- (1) 壁際の音圧が、必ず最大となる。
- (2) 壁面間に、1/2波長の整数倍、すなわち、1/2波長、1波長、3/2波長…がぴったりとはまる。

(A1)の部屋のL方向に対して、以上の原則に従って図を描き、低い方から固有周波数を計算すると、47Hz、95Hz、142Hzが得られます（数式では、【式

2】のように簡単に計算できます）。

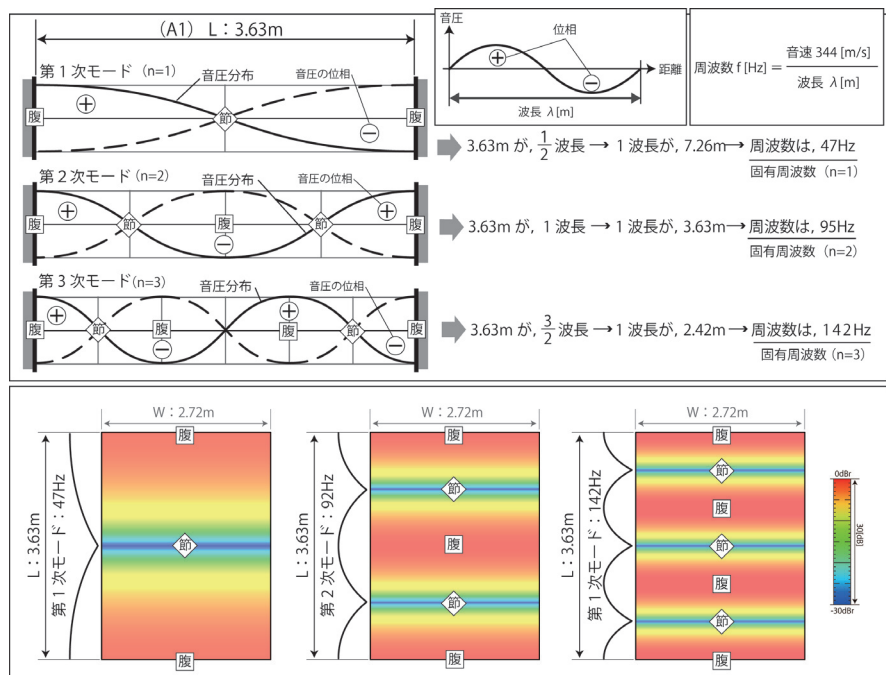
このような定在波が生じた場合、部屋には音圧のレベルの大きいところ（ピーク）と低いところ（聞こえないところ、ディップ）が縞模様のように生じてしまいます。この定在波の**ピークの箇所を定在波の「腹」と呼び、ディップの箇所を定在波の「節」と呼びます**。この定在波の「腹」と「節」は、部屋の低域特性を検討する上で非常に重要な要素となります。

部屋の低域特性に関しては、「固有周波数」と「モード」と「定在波（腹、節）」の関係を以下のように連想できるようになることが、理解への第一歩です。

- (1) 問題となる周波数近辺の**固有周波数が〇〇Hz**。
- (2) 固有周波数〇〇Hzの**モードの種類**（ n_W , n_L , n_H ）を把握。
例) (1,0,0) モード ⇒ W方向の1次元モードの第1次モード
(0,2,0) モード ⇒ L方向の1次元モードの第2次モード
(1,1,0) モード ⇒ W方向+L方向で生じる2次元モード
(1,1,1) モード ⇒ 3次元モード

- (3) (n_W , n_L , n_H) モードでの**定在波の腹と節の位置を把握**。

例えば、6畳程度の大きさの部屋（A1）では、L方向の1次元モードが、



【図 9】1次元モード（軸モード）の発生原理とその周波数の計算方法

$$f_n = \frac{c}{2L} \cdot n \quad \left(\begin{array}{l} f_n \text{ 固有周波数 [Hz]} \\ L \text{ 壁の距離 [m]} \\ n \text{ 0, 1, 2, 3, ...} \\ c \text{ 音速 344 [m/s]} \end{array} \right)$$

【式 2】 固有周波数（部屋の倍音）の計算式：1次元モード

47Hz, 95Hz, 142Hzの固有周波数で生じ、それぞれ【図 9】に示すような定在波の腹や節による音圧レベルのピークやディップが生じることになります。このような音圧分布の中で、スピーカの再生音を聞くと、当然定在波のピークでは大きな音量に聞こえ、ディップでは殆ど音が聞こえないという状況になってしまいます。従って、リスニングポイントを選ぶ際には、モードのピークやディップを避けた位置を選ぶというのが、基本となっています。さらに、その際のポイントとしては、ピークよりも**ディップに注意**するということです。

【図 10】は、部屋（A1）をモデルにした、モードとリスニングポイントに関する初期検討の方法です。ここでは、W方向とL方向に第1次～第3次までの1次元モードの図とそれぞれの節の位置を作図し、リスニングポイントを何処に動かせば、どのようなモードの影響を受けるか検討します。

検討の第一歩としては、なるべく**モードの節を（できれば腹も）避けた位置をリスニングポイントとして選ぶのが良い**、とされています。試みに、【図 10】では、以下のように、AからEの5つのリスニングポイントを選んでみました。

(1) リスニングポイント A

全ての基本となる位置です。

部屋のコーナーは全てのモードの腹となる位置ですので、全てのモードが最大限に呼び起こされます。従って全ての固有周波数でピークとなるような周波数特性が予測されます。

(2) リスニングポイント B

モニター環境の基本は、左右対称性です。従って、モニター環境を構築する場合は、どうしても部屋の中心線上のどこかにリスニングポイントを設置しなければなりません。

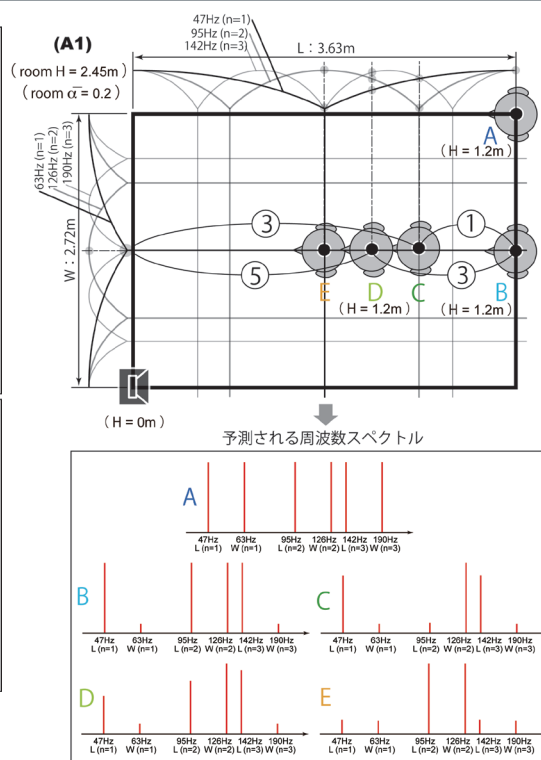
部屋のW方向の中心線上は、W方向の第1次モードと第3次モードの節に相当します。

従って、リスニングポイントをAからBに移動すると、部屋のW方向の第1次モードと第3次モードを与える固有周波数のレベルが極端に小さくなることが予測されます。**左右対称を重んじるモニター環境では、W方向の第1次および第3次モードの欠如は不可避な現象**となります。

(3) リスニングポイント C

W方向の中心線上で、L方向に対して3/4となる位置です。

この位置は、L方向の第2次モードの節の位置となりますので、リスニングポイントBに比べると、L方向の第2次モードの固有周波数のレベルが極端に小さくなることが予測されます。また、L方向の第1次及び



【図 10】リスニングポイントの位置と1次元モードと周波数スペクトルの関係

第3次モードに対しては、節でも腹でもない位置になりますのでそれぞれの固有周波数ではほどよいレベルで再生が行われるだろうと予想されます。

(4) リスニングポイント D

W方向の中心線上で、L方向に対して5/8となる位置です。

この位置は、L方向の第1次～第3次モードに対して、節でも腹でもない位置となりますので、それら全てのモードの固有周波数において、ほどよいレベルでの再生が期待できます。**一般的には、このような場所がリスニングポイントの候補として推奨されています。**

(5) リスニングポイント E

部屋のど真ん中です。

W方向およびL方向の双方に対して、第2次モードを与える固有周波数でピーク、第1次及び第3次モードを与える固有周波数ではディップといったように、ピーク・ディップの激しい周波数特性が予測されます。そのため、**一般的には、このような場所は、リスニングポイントの候補としては最悪だといわれています。**

ここでは、部屋のW方向とL方向に関して、基本的な検討を行いました。実際にはこのような検討を部屋のH方向に関しても行います。

以上の考え方は、リスニングポイントにおける周波数特性というよりも、どちらかという部屋の音圧レベル分布を中心に考えた検討方法です。

しかし、スタジオにとっては、レベル分布も大切ですが、まずは「**リスニングポイントにおける周波数特性がなるべく平坦になること**」が重要です。

【図 11】は、【図 10】のリスニングポイントA～Dにおける周波数特性（モニター特性）を計算した結果です。ここでは、音源（スピーカ）の設置位置による影響を無視するために、音源に関しては部屋のコーナーに設置しています。また、音源（スピーカ）やリスニングポイントの設置高さは床から1.2mとし、部屋の吸音率は0.2（20%吸音）としています。

■リスニングポイント A と B による違い

【1】L方向（0,1,0）（0,2,0）（0,3,0）モードでの特性に関して

予測通り、AとBでは、変化はありません。

【2】W方向：第1次モード（1,0,0）での特性に関して

AからBへ移動することによって、W方向のモードの影響を受けるようになり、第1次モードでの固有周波数レベルが大きく変化しています。また、そのディップは、予測に反してH方向の（0,0,1）モードの帯域にも影響しています（単

純な予測では、AとBではH方向のコンディションは変わっていないため、H方向の固有周波数への影響はないと考えてしまいがちです。以上より、(1,0,0)の固有周波数といったスポット帯域ではなく、60Hz近辺の幅広い帯域においてディップが生じてしまっています。

【3】W方向：第2次モード(2,0,0)での特性に関して

コーナーであるAの位置も中央であるBの位置も、どちらも(2,0,0)モードにとっては腹の位置となるため、双方ともピークとなり、変化はありません。

【4】W方向：第3次モード(3,0,0)での特性に関して

(1,0,0)のモードと同じような変化が予測されますが、予測に反して変化はありません。第3次モードの帯域になると、他の様々なモードが存在するため単純には予測できないということになります。

■リスニングポイントC, D, Eによる違い

【1】W方向の(1,0,0)(2,0,0)(3,0,0)モードでの特性に関して

本来であれば変化は無いはずですが、(1,0,0)モードなどの低い固有周波数では、L方向のモードの変化をうけてレベルが変化しています。これは、H方向の固有周波数(0,0,1)などにおいても同様です。

【2】L方向：第1次モード(0,1,0)での特性に関して

予測通り、「C>D>E」の順番でレベルが低くなっています。特にEに関しては、(0,1,0)の節の位置なので、完全にモードの影響が除去されています。その結果、(0,1,0)の周波数でディップになるかと思われがちですが、ディップにはなっておらず、この場合のように適切な吸音が施されていれば、逆に特性の平坦化に貢献しています。

【3】L方向：第2次モード(0,2,0)での特性に関して

予測通り、Cのみが大きくレベルが低くなっています。その結果、(0,2,0)の固有周波数において大きなディップが生じています。

上記【2】(0,1,0)の場合は、モードの節が周波数特性に対して大きなディップを与えるという結果にはなりませんでした。今回は、大きなディップを与える結果となっています。

このように各固有周波数のスペクトルの位相関係は複雑であり、一般的に言われている「モードの節=周波数特性のディップ」というような、単にレベルの足し算的なものだけでは、実際の周波数特性を予測できないことがあるということがわかります。

【4】L方向：第3次モード(0,3,0)での特性に関して

予測では、Eのみが大きくレベルが低くなるはずですが、計算結果はそうになっていません。やはり、第3次モードの帯域になると、他の様々なモードが存在するため単純には予測できないということになります。

現実的には、AやBなどはリスニングポイントからは除外されますので、実際のスタジオ設計では、リスニングポイントはC, D, Eなどから選ぶことになると思います。

その際に、「部屋の寸法の○：△の位置が推奨！」など、これまで言われてきた

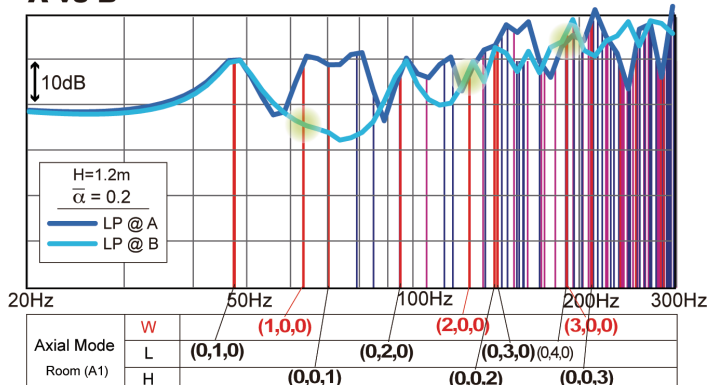
定説に従うと、Dが最も良く、次にC、差絶対避けるべき最悪な場所がEというように解釈されます。しかし、それらはモードの原理に対しては正解であっても、スタジオにとって一番重要なモニター特性に対してどうなのかに関してはなんとなく曖昧にされてきました。

リスニングポイントC, D, Eの周波数特性に関しては、【図11】の様に予測計算されます。はたして、通例のように、Eが最悪な特性で、Dが最高の特性でしょうか？

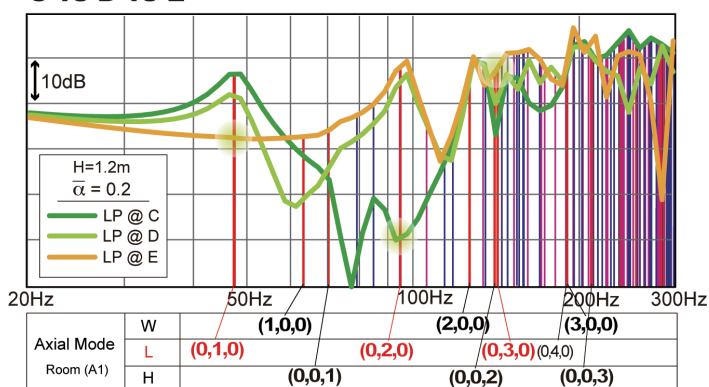
スタジオの音響調整を行ってきた個人的な経験からは、Eが最も良い特性、Dは許容範囲、Cだとかなり困ってしまう特性、というように思われます。

このように、モードとモニター特性の関係はなかなか複雑で、その仕組みを探求すればするほど、お決まりのパターンやコツというものが見つけられないことが分かってきます。

A vs B



C vs D vs E



【図11】【図10】で予測した結果を実際にシミュレーション結果で確認

スピーカの設置方法でモードをコントロール！

スピーカの置き方で部屋の音場はがらっと変わってしまう

リスニングポイントの位置と同様に、「スピーカの設置位置」も固有周波数のスペクトル特性に影響を与えます。

例えば、どうしてもリスニングポイントの位置をずらすことができない、といったような場合でも、スピーカの位置を工夫すればモニター特性の改善に繋がることがあります。

スピーカの設置位置とモード(定在波)の関係は4つのパターンにまとめることができます。このように、スピーカ(音源)をモード(定在波)の腹や節に対してどのよ(【図12】)うな位置に設置するかで、そのモード(定在波)の発生の仕方が変わります。

【図12】の4項目の中で重要なのは、3の「節点駆動」と4の「逆相駆動」です。この二つは、スピーカの設置位置を工夫することで、特定のモードを除去することができます。

モードの除去は、固有周波数の除去ということになるため、その周波数での再生が困難になるというデメリットが測れますが、実際には【図11】で示したように、適切な吸音が施されていれば、モードの除去が周波数特性の平坦化に結びつくこともあります。

■節点駆動

「節点駆動」は、モードの節となる位置にスピーカを設置すれば、そのモード(定在波)が発生しないという理論です。いわば、節での再生は、モード(定

在波)にとっては「のれんに腕押し」状態なのです。

従って、部屋のWの真ん中でスピーカを再生すれば、W方向の奇数次モードは発生しなくなります(それらの固有周波数は消失します)。

■逆相駆動

次に「逆相駆動」ですが、これは、モード(定在波)に音圧分布が互いに逆相となる位置で無理矢理同相でスピーカを再生すると、そのモードは発生しないという理論です。

この逆相駆動を実現するためには2台以上のスピーカが必要となるため、実際にはサラウンド再生のLFEチャンネルやベースマネージメントを使用した環境でのサブウーファァーなどの設置に対して用いることができる手法です。

例えば、部屋のW方向に対して左右対称に2台のスピーカをバラで設置すると、W方向の奇数次モードは発生しないということになります。逆に、W方向に対して真ん中に1台と右隅もしくは左隅に1台、合計2台のスピーカをバラで設置すると、w方向に対して偶数次モードが発生しないということになります。

以上のことを念頭に置き、4種類のスピーカ配置とモード(定在波)の関係に関して、検討した例が【図13】です。

【図 13】では、SP (A) から (D) までの 4 種類のスピーカーの設置方法と、【図 10】で検討した 2 種類のリスニングポイントである LA (A) と (D) での固有周波数スペクトルの関係に関して検討しています。最終的には、スピーカーの位置によるスペクトルとリスニングポイントでのスペクトルのかけ算で最終的な特性が決定されます。【図 12】の 4 つの原則をもとに各スピーカー位置での特徴を予測すると、以下のようになります。

(1) スピーカー位置：SP (A)

全ての基本となる位置です。

部屋のコーナーは全てのモードの腹となる位置ですので、この場所にスピーカーを設置すれば、全てのモードが励起されると考えられます。

(2) スピーカー位置：SP (B)

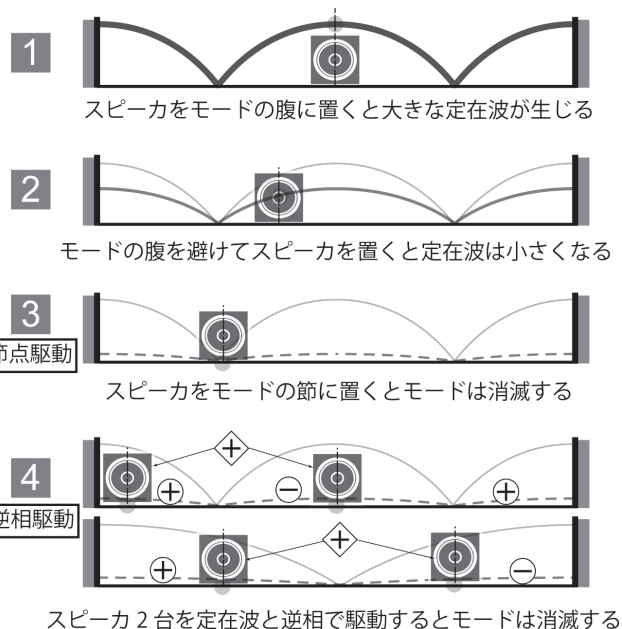
W 方向の真ん中にスピーカーを設置した場合、W 方向の奇数次モードは消失し、偶数次モードのみが励起されると考えられます。

(3) スピーカー位置：SP (C)

W 方向の 1/4 の位置にスピーカーを設置した場合、節点駆動により W 方向の第 2 次モードが消失すると考えられます。

(4) スピーカー位置：SP (D)

SP (C) の位置に加え、W 方向に対称な位置にももう 1 台スピーカーを設置すると、W 方向の第 2 次モードだけでなく、逆相駆動により奇数次モードも消失すると考えられます。



【図 12】スピーカーの位置によってモード（定在波）の強さが変わる

以上のスピーカー配置によるモードの発生の違いの様子を、計算した結果が【図 14】です。計算は、以下の 4 種類の固有周波数を対象に行なっています。

- ・ L 方向：第 1 次モード、第 2 次モード
(0,1,0) 47Hz, (0,2,0) 95Hz
- ・ W 方向：第 1 次モード、第 2 次モード
(1,0,0) 63Hz, (2,0,0) 125Hz

【図 14】を眺めると、以下のことが分かります。

■ L 方向のモード（47Hz、95Hz）

L 方向に対しては、スピーカー配置による差はなく、全ての配置において、予想通り、第 1 次モード（47Hz）や第 2 次モード（95Hz）が生じていることが分かります。

これは、L 方向に対しては、どのスピーカー配置も全てのモードの腹となる端に位置しているため、必ずモードを励起させているからです（【図 12-1】）。

■ W 方向のモード（63Hz：第 1 次モード）

W 方向の第 1 次モードを与える 63Hz に関しては、スピーカーの配置により 2 種類の音場が生成されています。

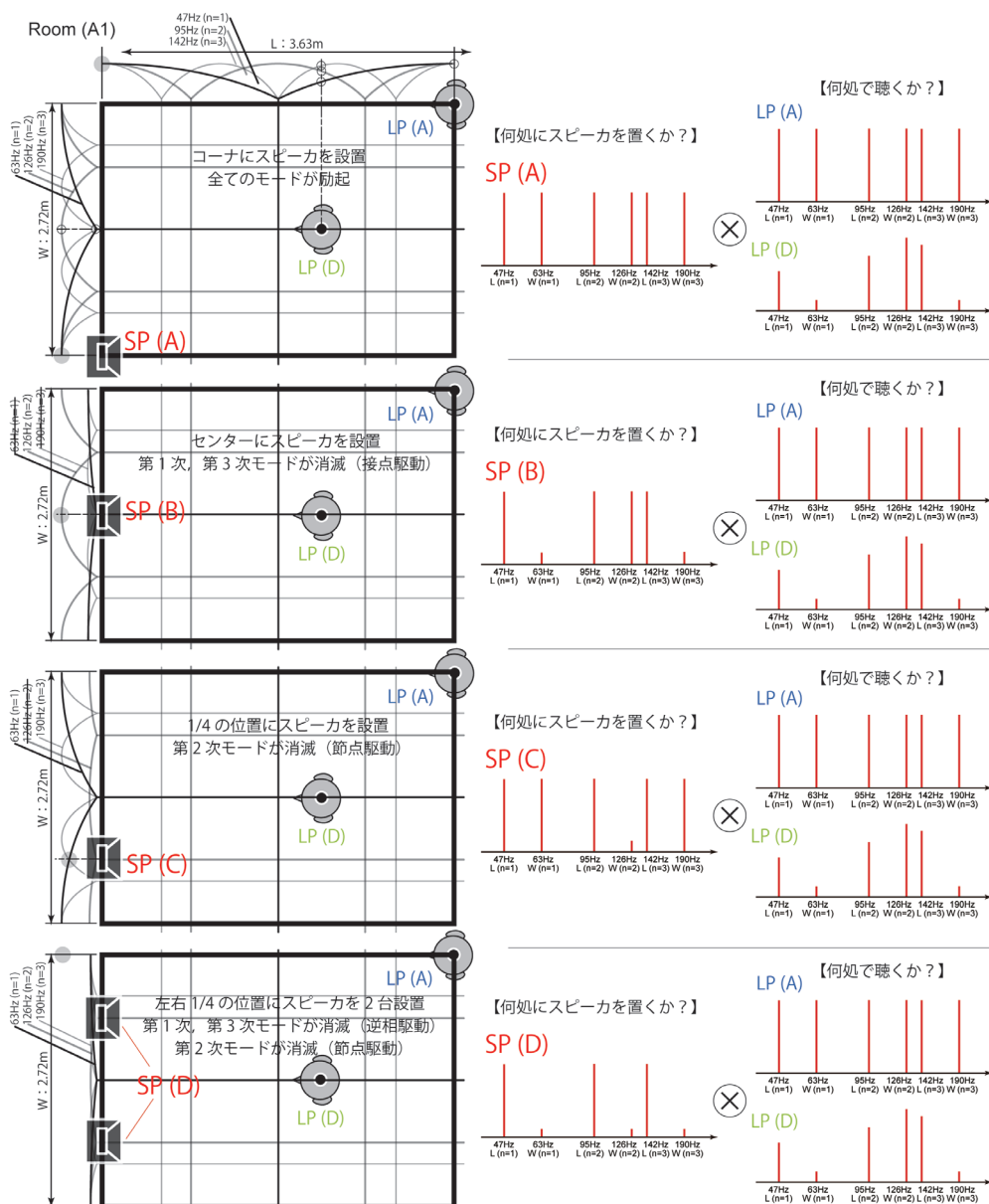
・ SP (A) (C)
W 方向の 1 次モードが励起されており、部屋内に音圧のピークやディップが生じています。
→ SP (A) ではピーク、SP (C) ではディップ。

・ SP (B) (D)
モードが励起されず、消失しています。そのため、部屋内の音圧レベル差に関しては少なく音場は均一ですが、全体的にレベルが小さく音が聞こえづらくなっています。
ここでは、SP (B) は、節点駆動（【図 12-3】）、SP (D) は逆相駆動（【図 12-4】）によりモードを抑制しています。

以上のように、音場としては SP (A, C) と SP (B, D) の 2 種類に分かれますが、部屋の W 方向の中央に位置する LP (D) においては、いずれの場合も音圧レベルが低くなってしまったため、スピーカー配置による大差はないように感じるかもしれません。

■ W 方向のモード（125Hz：第 2 次モード）

W 方向の第 2 次モードを与える 125Hz に関しても 63Hz と同様に、スピーカーの配置により 2 種類の音場が生成されています。但し、以下のように、第 1 次モードを与える 63Hz とはグループが異なっています。



【図 13】スピーカーの位置が変わるとモードの発生状況が変化して周波数スペクトルが変わる。それにリスニングポイントの影響が重なって、最終的なスピーカーの特性が得られる。

・SP (A) (B)

W 方向の 1 次モードが励起されており、部屋に音圧のピークやディップが生じています。但し、LP (A) と (D) の場所だけを考えると、双方ともモードのピークに位置しているので、あまり変わりはありません。

・SP (B) (D)

モードが励起されず、消失しています。そのため、部屋内の音圧レベル差には関しては少なく音場は均一ですが、全体的にレベルが小さく音が聞こえづらくなっています。

ここでは、SP (B) も SP (D) も節点駆動 (【図 12-3】) により、モードを抑制しています。

63Hz の際には、音場の変化によらず LP (D) における音圧レベルの変化はほとんどありませんでしたが、ここでは、モードの生じている SP (A, B) ではピーク、モードの消失している SP (C, D) ではディップというように大きな変化が見られます。

以上のように、【図 12】の基本原則を用いると、スピーカーの設置位置の調整でモードの操作が可能となることが分かりました。

但し、部屋の W 方向の中央にリスニングポイントを位置せざるを得ないスタジオでは、W 方向の奇数次モードへの対策が難しく、「音場を変えることができてリスニングポイントでの周波数特性は変わらず」といったジレンマに陥ってしまいます。

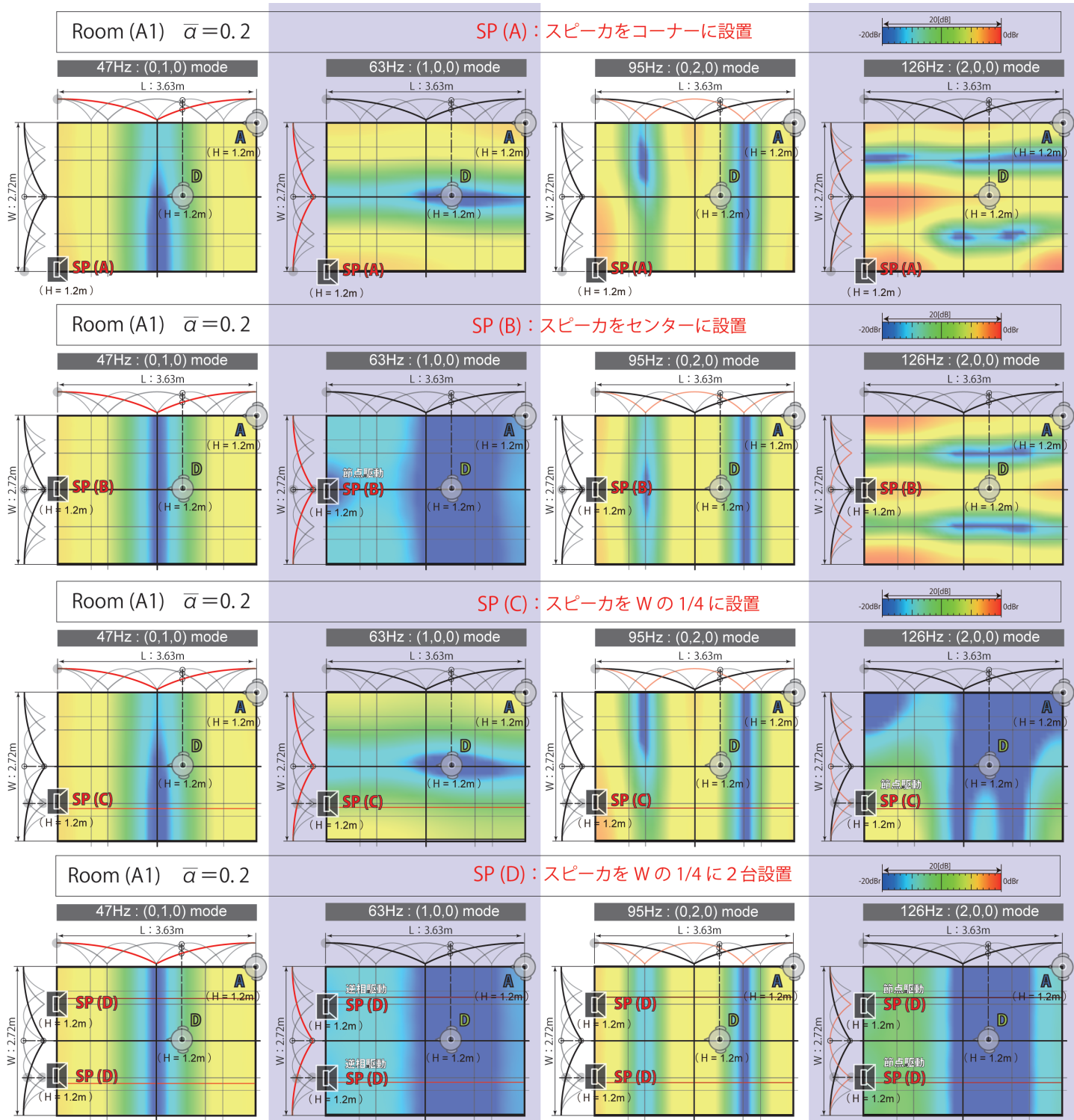
一方、偶数次モードに関しては、モードの操作によりリスニングポイントでの音圧レベルを上げたり下げたりすることが比較的可能です。

以上の計算結果を LP (A) 及び LP (D) でのモニタ特性 (周波数特性) として表したものが【図 15】となり、これから以下のことが分かります。

【1】限られた条件でしか特性は変化しない

W 方向のスピーカー移動では、W 方向のモードに関係する固有周波数でしか、特性の違いは生じません。

従って、改善対象とする周波数が何のモードに起因しているかを把握しておかないと、スピーカーをどの向きに移動して良いかわからないということになります。



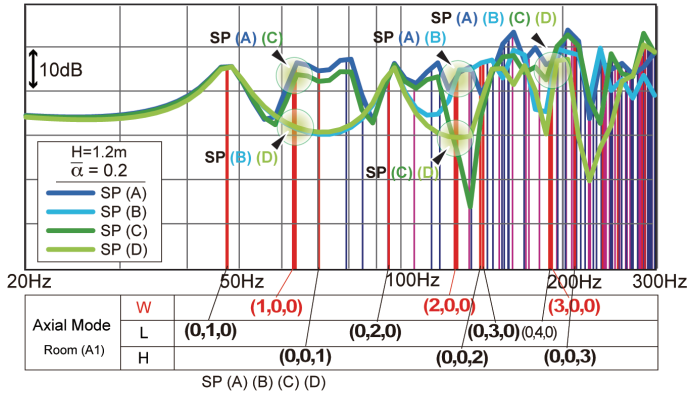
【図 14】【図 13】で予測した結果を実際にシミュレーション結果で確認
その 1：節点駆動や逆相駆動でモードが消滅している様子

【2】W 方向の第 1 次モードの制御は、最大の困難事項

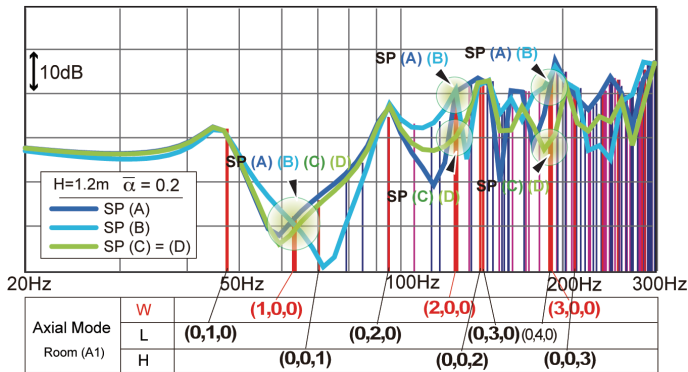
リスニングポイントが W 方向の中央に位置する場合（LP (D)）、リスニングポイントが奇数次モードの節に位置しているため、節点駆動や逆相駆動などでそれらのモードを制御しても、第 1 次モードの周波数における特性変化は望めません（【図 15】の W (1,0,0) の特性に注目）。

奇数次モードでも第 3 次モード（3,0,0 以上の高い周波数になってくると、他のモードとの位相干渉もあり、W 方向のスピーカーの移動が特性に影響を与えています。

LP @ A



LP @ D



【図 15】【図 13】で予測した結果を実際にシミュレーション結果で確認
その 2：固有周波数分布（部屋の倍音構造）と最終的な周波数特性の関係

以上より、『スピーカーの設置で改善できる周波数特性は、主に W 方向の第 2 次モード以上』だということになります。

(1) まずは、リスニングポイントの選定が重要

スピーカーの設置位置の調整では制御が難しい「L 方向の固有周波数における特性」と「W 方向の第 1 次モードの特性」に注意して、部屋の L 方向に対してベストなポジションを模索します。

一般的には、部屋のと真ん中では NG だといわれていますが、部屋のモードは単純な現象ではありませんので、一概には決めつけられません。例えば、【図 16】は、一般的に良いと言われる LP (D) と、NG と言われる LP (E)（部屋の中央【図 10】）における周波数特性を計算した結果です。これを眺めると、一概に LP (E) が LP (D) より劣っているとも言えないと思われます。

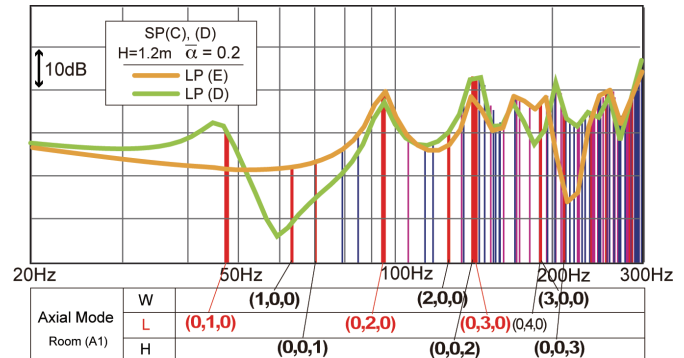
(2) 次に、スピーカー位置の検討で特性を微調整

スピーカー位置の調整は、主に W 方向の第 2 次モード以上の周波数特性の調整を行うことになります。

さらに、リスニングポイントがモードの節に位置している周波数に関しては、スピーカーの位置調整では、改善不可能です。

(3) 最後に、頼るべきは吸音

どうしても改善しきれないピークやディップに関しては、「吸音」で対処するしかありません（次項で解説）。



【図 16】リスニングポイント D と E（真ん中）での周波数特性の違い
（スピーカー設置位置は (C) or (D)）

下手な吸音では低域には効果無し！ 何のエネルギーを吸音しようとしているのかをよく考えよう

低域特性を整えるための最後の切り札は、やはり「吸音」です。

特定のモードを吸音により制御しようというような高度な試みに関しては、まだまだ解明不能なことが多くため割愛させて頂き、ここでは、低域を吸音する際のポイントとその平均的な効果に関して解説したいと思います。

高域ではなく低域を吸音するという作業は、なかなか難しい作業です。実際に、普通に手に入る吸音材の多くは、低域の吸音にはほとんど効果のないものです。

しかし、完璧に吸音できなくても多少でも吸音できれば、その分の効果は得られます。

【図 7】でも解説したように、吸音は、スペクトルをなまらせ、周波数特性フラットに導きます。

【図 17】は、吸音を与える周波数特性への影響を計算した結果ですが、吸音率 0.1（10% 吸音）の部屋では特性が大きく暴れているのに対し、吸音率 0.6（60% 吸音）の部屋では特性がかなりフラットになっていることがわかります。

「吸音⇒音を吸い取る⇒音がなくなる⇒迫力が無くなる」
というのは、モードが支配している低域においては誤解です。

ライブにすればするほど、ピークやディップが激しくなり、ローエンドも薄くなりがちです。

ここでいう吸音とは「壁から音が跳ね返ってこない」と意味します。

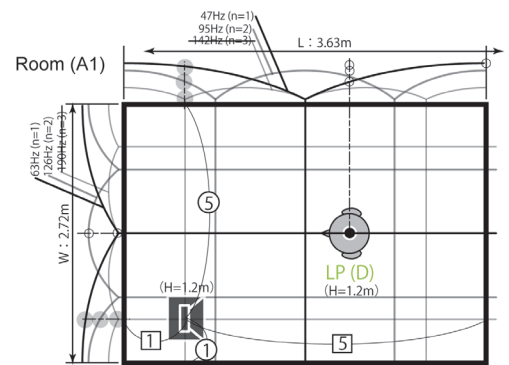
したがって、音が漏れるのも吸音と同じような効果が得られます。

一般的に、壁の遮音性能は低域ほど悪くなり、音が漏れやすくなります。従って通常の部屋では、吸音をしくなくとも、壁からの音漏れによりある程度の低域の吸音効果が得られています。

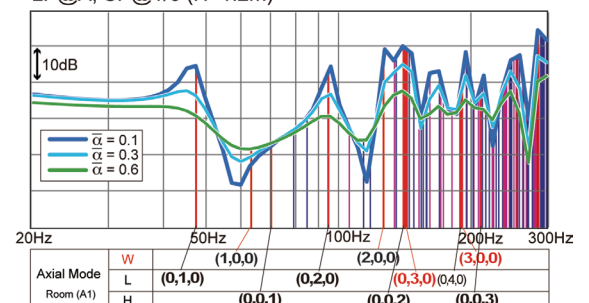
一方、商業スタジオやコンクリート造の部屋など、ガチガチに遮音が施された部屋では、低音の逃げ場がないため、何らかの方法で低域の吸音を検討しておかないと、モニター環境に耐えうる低域特性を得ることは困難です。

遮音・防音を強固にすればするほど、
低域の吸音もあわせて検討する必要があります。

これは、例えば、風邪薬と一緒に胃薬も飲まないと、風邪は治ったが胃潰瘍になってしまったと



LP@A, SP@1/6 (H=1.2m)



【図 17】吸音がスピーカーの再生特性に与える影響

いうようなもので、何事も人工的な処置にはバランスが大切です。

★【図 18】-(1)：音圧と粒子速度 について

音が発生すると、空気中に二種類の変化が同時に生じます。

一つが「音圧」で、もう一つが「粒子速度」です。

「音圧」は、皆さんも良くご存じの音の大きさに相当するもので、目には見えませんが、ここは音が大きい、ここは小さいなど、耳で感じることでできるものです。一方、「粒子速度」は、音圧のように空気の圧力の変化ではなく、空気の粒子の運動です。

我々が「音」と言うときは、一般的には、音の現象の半分である「音圧」しか注目しておらず、残りの「粒子速度」は、目にも見えませんし、耳にも聞こえませんが、たいていの場合無視されています。

しかし、「音圧」と「粒子速度」は双子の兄弟のようなもので、絶えず密接に関係しながら音場を作っています。例えば、ここで問題にしている定在波などの音場の場合、壁際では音圧が最大で粒子速度は最小、壁から 1/4 波長の距離の位置では、音圧が最小で粒子速度は最大となっています。

このように、音圧と粒子速度は、互いに最大と最小が入れ替わりながら、同じ一つの音場を形成しています。

このとき、音圧のエネルギーを「Potential エネルギー」といい、粒子速度のエネルギーを「Kinetic エネルギー」と呼びます。

★【図 18】-(2)：吸音材の種類と使用上の注意 について

音を吸収しようとするとき、「Potential エネルギー」を吸い取るようとしているのか「Kinetic エネルギー」を吸い取るようとしているのかによって、吸音の仕方も吸音材の選び方も変わってきます。

■粒子速度吸収型吸音材

グラスウールなど、繊維の固まりのような吸音材（これを多孔質型吸音材と呼ぶ）をはじめ、一般的な吸音材のほとんどは Kinetic エネルギーを吸収するタイプの吸音材です。このタイプの吸音材は、音の粒子を繊維などの中に取り込んで吸収するため、粒子が激しく動いている箇所、すなわち粒子速度が最大の場所に設置しなければ効果を発揮しません。

上述したように、粒子速度が最大となる場所は、音圧が最小となる場所です！

従って、グラスウールのような吸音材を音の大きな箇所（耳で聞いて音のたまっている箇所）に設置しても、効果が得られない場合がほとんどです。

例えば、壁際だと、吸音対象とする音の波長の 1/4 波長ほど壁から離れているところが粒子速度が最大の場所になります。従って、1kHz だと壁から 8.6cm で OK ですが、100Hz だと壁から 86cm の位置に、もしくは壁からその位置まで吸音材を設置しなければなりません。このように、低域を吸収しようとするほど、壁から離れたところを吸収しなければならないのが、この手の吸音材の使いにくいところです。しかし、いいかえれば、厚くすれば、その分完璧に吸収してくれるといった安心感が、プロの設計現場では好まれているメリットの一つです。

グラスウールのような吸音材を使用する場合は、1/4 波長の厚さを目安に壁に付けましょう。

■音圧吸収型吸音材

粒子速度ではなく音圧、すなわち Potential エネルギーを吸収する吸音材を使用すれば、壁際など音圧最大の箇所で吸音効果を発揮できます。

また、このような吸音材は、音圧の大きな箇所に設置すればよいので、一現場調整に強く、使用上のミスが少ないというメリットがあります。

しかし、世の中には、そのような都合の良い吸音材はなかなか無いのが実情です。実際に使用されている例としては、板振動や膜振動を使用した吸音材や、ヘルムホルツ共鳴型の吸音材などがあります。これらは、音圧を受けて作用し、音圧のエネルギーを消費しますので、音圧吸収型吸音材に分類されています。例えば、スタジオなどでは、合板にグラスウールを貼り付けた「ベーストラップ」と呼ばれる板振動型吸音材が、音圧吸収型吸音材として、低域吸音の目的で壁際や天井に設置されることがあります。

但し、ベーストラップに関しては、使用する合板の厚さ（密度）や種類（剛性）や大きさによって吸音できる周波数や吸音率が変化するうえ、さらにそれらの値が予測しづらいといったデメリットがあります。また、低域を吸収することはしますが、その吸音率は一般的に低いので、「効が悪い⇒費用対効果が低い」という性質があり、予算の限られたプロジェクトではなかなか使いにくかったりします。とはいえ、壁際で低域を処理しようとするれば、グラスウールなどでは刃が立たず、やはりベーストラップなどの音圧吸収型吸音材の出番ということになります。

★【図 18】-(3)：定在波を吸収処理？ について

部屋の低域問題といえば、定在波、モードです。前項でも検討してきたように、モードの中でも低域特性にとって一番対処が難しく頑固なモードが、2 壁面間に生じる第 1 次モードや第 2 次モードです。これらをグラスウールなどの一般的な吸音材を使って吸収処理するためには、どのように考えたら良いでしょうか。

■第 1 次モード

第 1 次モードにおいて粒子速度が最大となるポイントは、部屋の中央のみとなります。従って、グラスウールなどの粒子速度吸収型吸音材で第 1 次モードを吸収しようとする、グラスウールを部屋の中央に設置しなくてはなりません。いいかえれば、グラスウールなどの粒子速度吸収型吸音材では、第 1 次モードは処理できないということになります。

■第 2 次モード

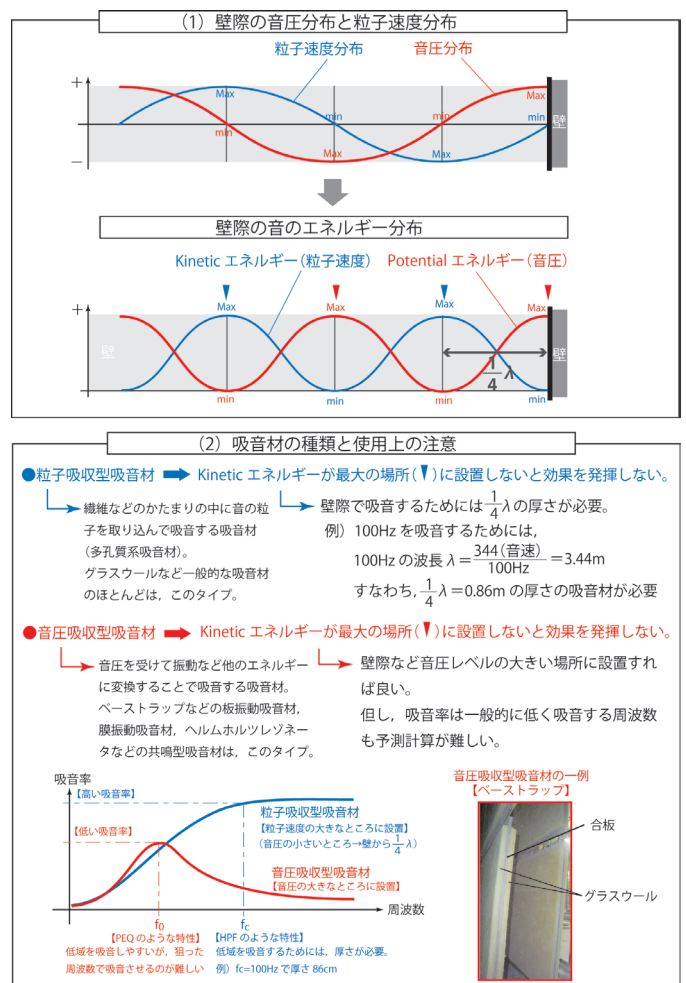
第 2 次モードにおいて粒子速度が最大となるポイントは、部屋の 1/4 の距離の箇所となります。従って、壁から 1/4 の厚さほどグラスウールを貼り付ければ、第 2 次モードの対処が可能です、しかし、その結果、部屋の寸法は半分となってしまいます。

以上のように、第 1 次、第 2 次といった低次のモードに関してはグラスウールなどの手軽な吸音材では処理が困難であることがわかります。

一方、音圧に関してはいつでも壁際が最大ですので、適切な吸音特性を与えられているベーストラップなどにを用いることができれば、壁際吸音にてモード対策が可能です。しかし、それにはかなりの熟練の技が必要になりますので、なかなか思ったようには成功しません。しかし、悲観することはありません。前述のように、多少のグラスウールを貼り付けたようなちよっとした吸音効果でも低域の特性改善には効果があります（【図 17】）。

以上のように、低域に関しては、吸音だけでなんとかしようとか、吸音はせずにスピーカーの位置調整だけで何とかしようとか、などの偏食的な対処ではなかなかうまくいかないことが、お分かり頂けたと思います。

低域対策に関しては、低域の仕組みを良く把握し、「(1) 部屋の形状、(2) リスニングポイントの位置、(3) スピーカーの位置、(4) 適切な吸音処置」といった 4 つのバランスをうまく使うことが重要です。



【図 18】部屋のモードを処理する目的で低域を吸収するためには

第2部 実践編

モードの検討はスタジオ設計の基本！ ほたしてどこまで理論が通用するのやら？

(ミカミタカシ)

皆さんはじめまして。実践編担当のミカミタカシです。

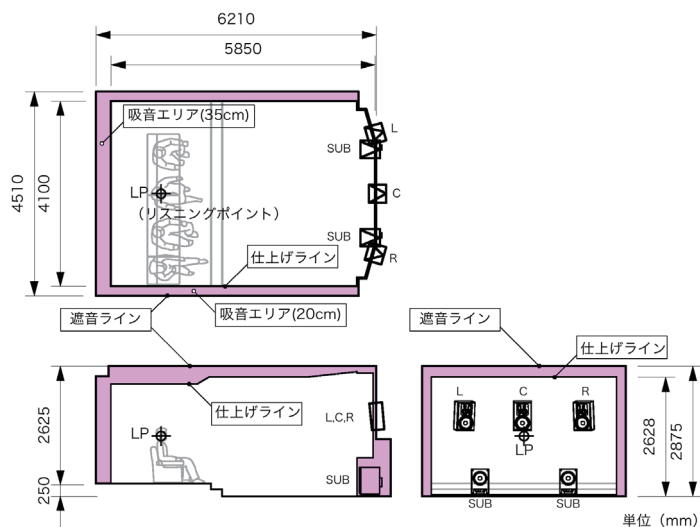
果たして、本当のところはどうなのか。

ここからは、実際の事例で「低域」の振る舞いを私と一緒に見ていきましょう。

ある部屋の施工の過程のなかで、遮音層だけができた時点の状態（即ち、吸音処理などの建築音響的トリートメントを施していない状態）と、完成時との両方において室内音響特性のチェックを行いましたので、それを題材として固有モードの現象を中心に、より具体的に実感していきたいと思います。

■ 部屋の概要

さて、まずはこれから一緒に見てゆく部屋の概要です。【図 19】をご覧ください。



【図 19】実践編で検証する部屋の概要

この部屋は、ミキシングなどの音声制作を行なうスタジオではなく、DVDやBlu-rayなどを再生してチェックするスクリーニングルームのような部屋です。やや大きめのホームシアターのような感じをイメージしていただければ良いのではないかと思います。

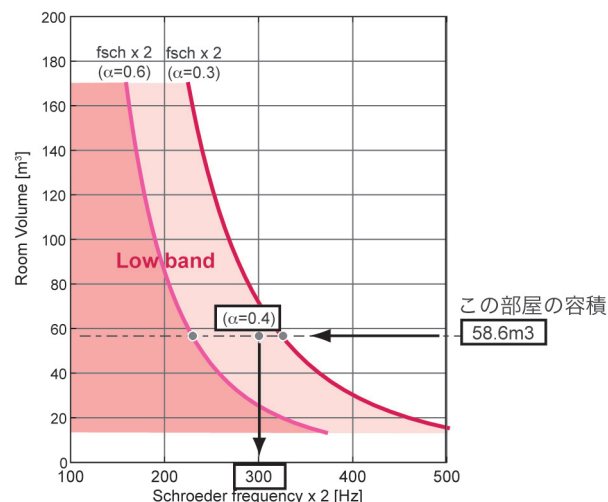
レイアウトは若干特殊で、部屋の使い勝手などの事情から、リスニングポイントはかなり部屋の後ろに寄っています。また、ミキシングスタジオではありませんので、1人のエンジニアがリスニングポイントにピッタリと位置するというのではなく、設定したリスニングポイントを中心とした周辺にもムラなく音を届け、広めにリスニングエリアを提供してあげたいというねらいがあります。

■ 「低域」としてとらえるべき帯域

ここでは、シュレーダー周波数の2倍 ($2f_{sch}$) をこの部屋の「低域」の上限と考える事にしましょう。もちろんシュレーダー周波数は式を使って計算で求める事も可能ですが、ここでは大まかに分かればよいので、チャートを使って簡単に調べてしまいましょう。

【図 20】は第1部の理論編でも登場したシュレーダー周波数を簡単に知るためのチャートです。この部屋の容積は 58.6m^3 ですから、チャート上にそのラインを引いてみます。室の平均吸音率が0.6のときでおよそ230Hzくらい、0.3のときで330Hzくらいということがわかりますね。この部屋では平均吸音率は0.4くらいですので、300Hzくらいまでを低域として考える事にしましょう。

平均吸音率といわれても、実際にどのくらいの値を入れたら良いのなかなか悩むところかもしれませんね。丁寧な検討ができない場合には、感覚的にざっくりと入れてみましょう。スタジオのデッドめな環境ですと、0.3-0.5くらい、一般的な居室、事務所ベースのライブめな部屋ですと0.1前後でしょうか。



【図 20】ここで検証する部屋（【図 19】）にとっての低域

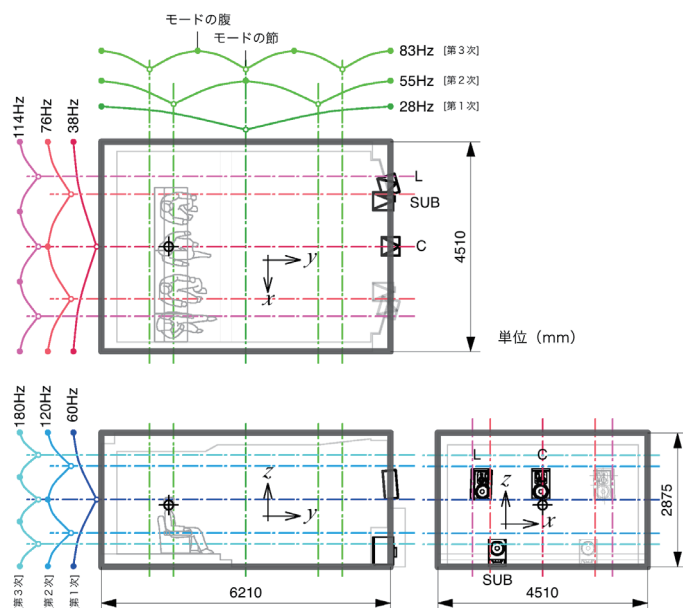
■ 固有モード周波数

第1部の理論編にあったように、固有モードは部屋の縦、横、高さの寸法で決まります。非常にシンプルではありますが、意外に簡単そう簡単でないのは、「部屋の寸法」をどうとらえるのかということところかもしれません。

今考えようとしている固有モードは低域に生じる現象です。従って、部屋の寸法を決める境界は、そのような低域をしっかりと跳ね返せる面ということになります。部屋の中にはいろいろなものがありますが、壁に沿って置いてあるCD棚などはモードを形成する反射面にはなりません。また、スタジオなどでは吸音処理されている壁面を良く見かけるとは思いますが、そういう壁の見た目の表面は吸音面の表面なので、モードを形成する反射面ではありません。

私はこの部屋のモードを、【図 21】のような室形状、室寸法（図中太線）で考えることにしました。

部屋の仕上げ面は、吸音面の表面ですから、ここをモード検討の反射面とは見ません。その奥の遮音壁の表面を室の寸法を決める境界線として見ました。



【図 21】低域検討用の図面

モードについて解説されている教科書の類を見ると、大抵は室の形状がピシッとした直方体になっていますが、多くの部屋はそんな単純な形状ではありません。この部屋もそうで、単純な形状ではありませんが、ここは“エイヤ！”でシンプルにこのように考えました。厳密性より実用性の判断ですが、これが使える検討にになっているのかどうかはここからの例で見ていきましょう。(スタジオなどでよく見られる平行面がない多角形の形状や、円形の部屋などは、このように“エイヤ！”でやっちゃうとダメかもしれません。)

■ 再生特性と音圧分布 (室内音響処理前)

この部屋は、サラウンド再生も行える環境ですが、ここでは主に L, C, SUB の特性にフォーカスして見ていきます。

特性を見て行く前に、スピーカー、リスニングポイントのレイアウトについて、室モードとの関係などについて若干解説しておきましょう。

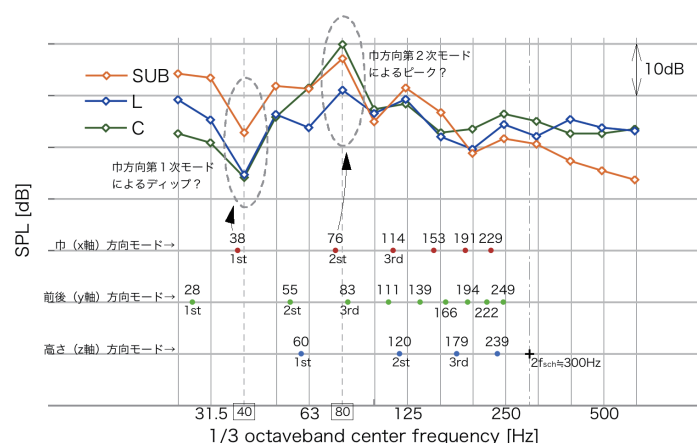
C: “センタースピーカー”ですから、真ん中に置きます。真ん中に置くしかありません。必然的に室巾方向 (x 軸方向) 奇数次モード (第 1 次, 第 3 次) の節の位置, 偶数次モード (第 2 次) の腹の位置になります。

L: 巾方向 (x 軸方向) の第 2 次, 第 3 次モードの励起を抑えるため、それぞれの [節] の位置にくるようにスピーカーを配置しました。

SUB: L と同じような考えで設置位置を決めましたが、設備などとの兼ね合いで L よりも少々内側に設置する事になりました。

LP (リスニングポイント): 巾方向 (x 軸方向) では真ん中に来てしまいますので、第 1 次モードをはじめとした奇数次モードにとっての節に位置する事になります。前後方向 (y 軸方向) においては節でも腹でもない位置を目指しましたが、第 2 次モードの節が気になる場所です。

まずは遮音層が完成した時点 (吸音処理などは何もしておらず、遮音層のボードで囲われた空間の状態) での LP における再生特性 (各スピーカーからピンクノイズを再生) をみてみましょう (【図 22】)。各方向の固有モード周波数もグラフ内に記入してあります。

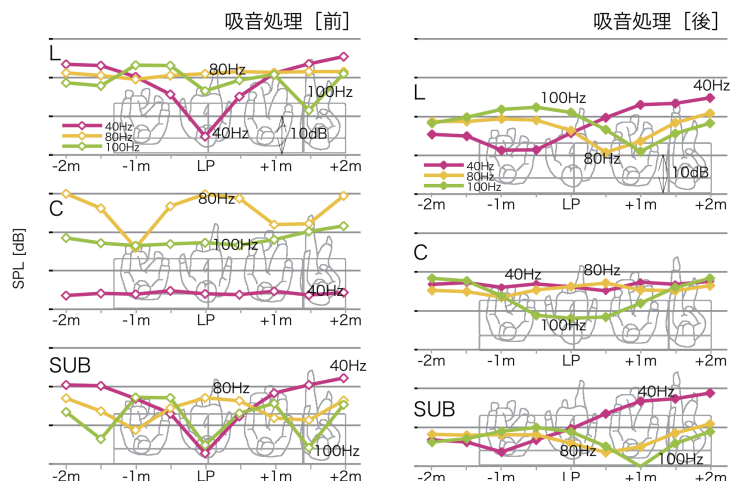


【図 22】部屋を吸音する前の各スピーカーの再生特性 (於: LP)

[40Hz 付近の大きな谷], [80Hz 付近の大きな山] という、各チャンネルとも似たような帯域が暴れた特性を示しています。モード周波数との対応からすると、巾 (x 軸) 方向モードの大きな影響が伺われますね。

本当にそうなのかどうか、もう少し詳しく見てみましょう。

【図 23】は、室の巾 (x 軸) 方向の音圧レベル分布を表すグラフです。左のグラフ (吸音処理 [前]) に注目して下さい。どこかで見たようなパターンです。いや、こんなにきれいに出るものなんですね。私もびっくりしました。



【図 23】部屋の中方向の音圧分布 (左: 吸音処理 [前], 右: 吸音処理 [後])

L では、第 1 次モードあたりの 40Hz (ピンク) でモードの形状がはっきりと現れています。第 2 次のモード (きいろ) は作戦通りでほとんど励起されていませんが、第 3 次モードは若干その片鱗 (?) が見られますね。

C では、逆に 2 次のモードと思われる形状 (80Hz: きいろ) がくっきりと現れています。第 1 次 (40Hz: ピンク), 第 3 次 (100Hz: きみどり) は平坦ですね。LP での周波数特性では、40Hz で大きな落ち込みがありましたよね。第 1 次モードの節の位置にスピーカーを置いているのでその帯域の音が非常にに出にくくなっているものと想像できます。

SUB の特性は、見事な程にモードの教科書通りになっちゃっていますね! 第 1 次から第 3 次までモードの形状が非常によく現れています。スピーカーの設置は第 2 次モードの節の位置からそんなにズレてはいないと思われたのですが、励起を回避することはできていません。

■ 再生特性と音圧分布 (室内音響処理後)

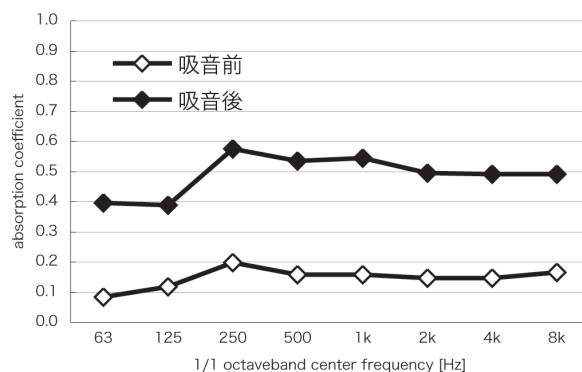
さて、これで室内音響処理をするとどうなるのか。【図 23】のグラフの右側 (吸音処理 [後]) を見て下さい。概ね、固有モード特有の分布は緩んで、平坦な分布になっていることがわかんと思います。

“風呂場” 状の、響いている空間の方が、音がまんべんなく広がっているようなイメージがありませんか?

低域に関しては、このように吸音を施した方が音圧分布としては均等になっていきます。

両側壁と後背壁には、それぞれ 20cm と 35cm の吸音エリアが確保されています (【図 19】参照、吸音処理を行なった事で、室の床面積は約 15% 減少しています)。部屋を吸音する前と後とで平均吸音率を測定 (正確には残響時間を測定して吸音率を算出) してありますので、そのデータもご覧下さい (【図 24】)。

吸音前は当然ながら吸音率 0.1-0.2 くらいの非常にライブな空間、吸音後は概ね 0.5 前後くらいとなっています。この吸音処理によって、モードの鋭さがなまっと考えられます。



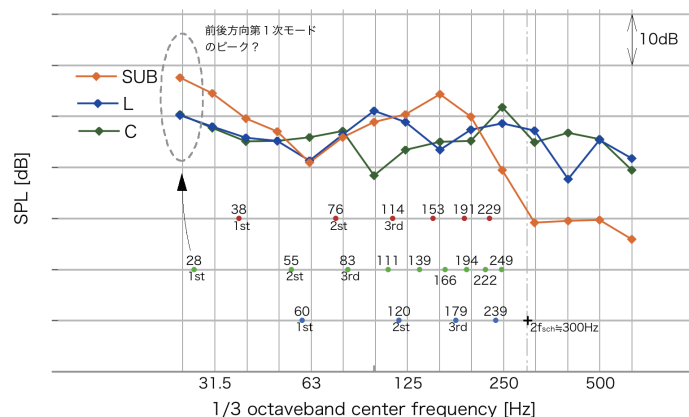
【図 24】吸音 [前] と [後] での部屋の吸音率の違い

そして、【図 25】が吸音処理後の LP での再生特性です。
こちら、音圧の山谷が軽減されて、落ち着いた特性になっている事が見てとれます。

但し、今度は 20 ～ 31.5Hz 周辺の盛り上がりが目立つようになりました。実際の音場は複雑ですので、単にモードのせいだとは言い切れない部分もありますが、他のモードの山谷が小さくなったせいで、残ったモードが目立つようになったと考える事もできます。(28Hz という周波数は 10m 以上もの波長があります。さすがに数十センチのグラスウールでは歯が立たなかったようです。このあたりの周波数を吸音しようと思ったら、少々特殊な作戦を考える必要がでてきます。)

どうでしょう。

理論編のごくごく一端をのぞいたにすぎませんが、実例を通して低域、特に部屋の部屋の固有モードによる振る舞いを見てきました。その現象を実感していただけましたでしょうか。



【図 25】部屋を吸音した後の各スピーカーの再生特性 (於: LP)

【SONA PERSONAL STUDIO DESIGN Vol. 3 予告】

第2回目にて、いきなりフルスロットルとなりました「SONA PERSONAL STUDIO DESIGN」。今回のテーマである「低域」は、中域や高域に比べると最も「音らしい」性格を持っていますが、その分最も気むずかしい帯域です。従って、コツ・ワザ・アンチョコといったようなものは通用しなく、まじめにその仕組みを理解して接し方を覚えるしか、低域と良い関係を築く方法はありません。低域に王道無し、地道な理解が皆さんを成功へと導きます。

今回は、音響理論の中でも一番難解な「低域」を解説させて頂いたため、ここまでたどり着くためには大変な根気が必要だったと思います。お付き合い頂きました皆様に、大変感謝です。

さて、次回は、「中域」の扱いに関して、解説を行う予定です。中域は、高域と低域の間の子として、「反射と位相干渉」という特徴的な性格をもっています。今回の低域よりは内容がライトになる予定ですので、ご期待下さい。

【サラウンド入門】サラウンドの達人である沢口真生、亀川徹の両氏と中原にて「サラウンド入門」という本を東京藝術大学出版会から出版しました。スピーカー設置に関する基本事項などはもちろん、今回の「低域」に関する事項や次回の「中域」に関する事項なども、サブウーファー設置のテクニックとして掲載されています。



(ISBN978-4-904049-14-3, 1,575 円)

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 支部長 / 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 設計グループ アコースティック・デザイナー。

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。