

モードEQ

(中原雅考)

復習になりますが...

部屋で低域を再生すると

部屋の共鳴現象(モード・定在波)がつくり出すPEQがかかります。

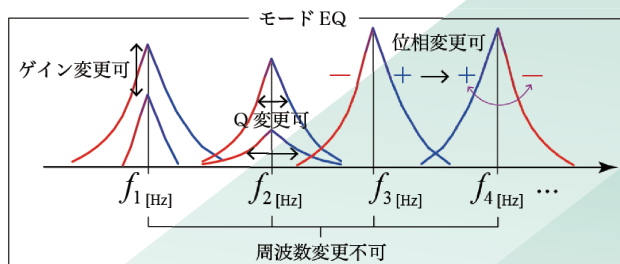
このPEQのことを「モードEQ」と呼ぶことにしましょう。

おおざっぱな言い方になりますが

部屋で低域を聴く＝モードEQの合成音を聴いている
ということになるでしょう。

モードEQは以下の様な性質をもっています。

1. 部屋の寸法を変えない限りEQの周波数は変更できません。
2. 音源位置と受信位置を変更することでEQのゲイン変更は可能です。
3. 部屋を吸音することでEQのQ値の変更も可能です。
4. モードEQは、音源位置と受信点位置で変化する特殊な位相特性を持っています



前回、隊員の皆さんには、模型と実物の両方で測定した周波数特性の比較を行って頂きました。

その際、測定結果を正しく比較するために

スピーカーのローエンドの補正など色々工夫を凝らして頂きました。

そして、模型のトゲトゲした周波数特性をどうしようかといったところで時間切れとなりました。

周波数特性がトゲトゲしいか滑らかかの違いは

モードEQのQ値が大きく影響しています。

そのモードEQのQ値には部屋の吸音が関係しています(上記3.)。

「部屋の吸音」と「モードEQのQ値」と「周波数特性のトゲトゲ具合」

この関係を使って

ライブな模型で測定した周波数特性をデッドな実物での測定値に近づけることができるのでしょうか？

(今回の難易度はなかなか高いです…)

固有周波数→モードEQ→低域特性

(中 原 雅 考)

例えば、綺麗な並びの「**① 固有周波数分布** (【図 1】)」を得ようとして試聴室の最適寸法比なるものが様々と提案されるなど、リスニングルームやコントロールルームのモードのお話は、「**① 固有周波数**」や「**② 音圧分布**」で終わってしまうことも多いのですが、重要なのは、その先、すなわち固有周波数が最終的に受音点においてどのような周波数特性になるかだと思います。「**① 固有周波数**」や「**② 音圧分布**」が同一となる同じ寸法の部屋でも、音源位置・受音位置・吸音処理の違いで、得られる周波数特性は大きく異なります。正確な解説は 1981 年の Philip M. Morse の名書「Vibration and Sound」の Chapter III あたりにお任せしたいと思いますが、部屋の低域特性は、【図 1】の **①** から **⑤** の過程を経てできあがってきます。

① 固有周波数

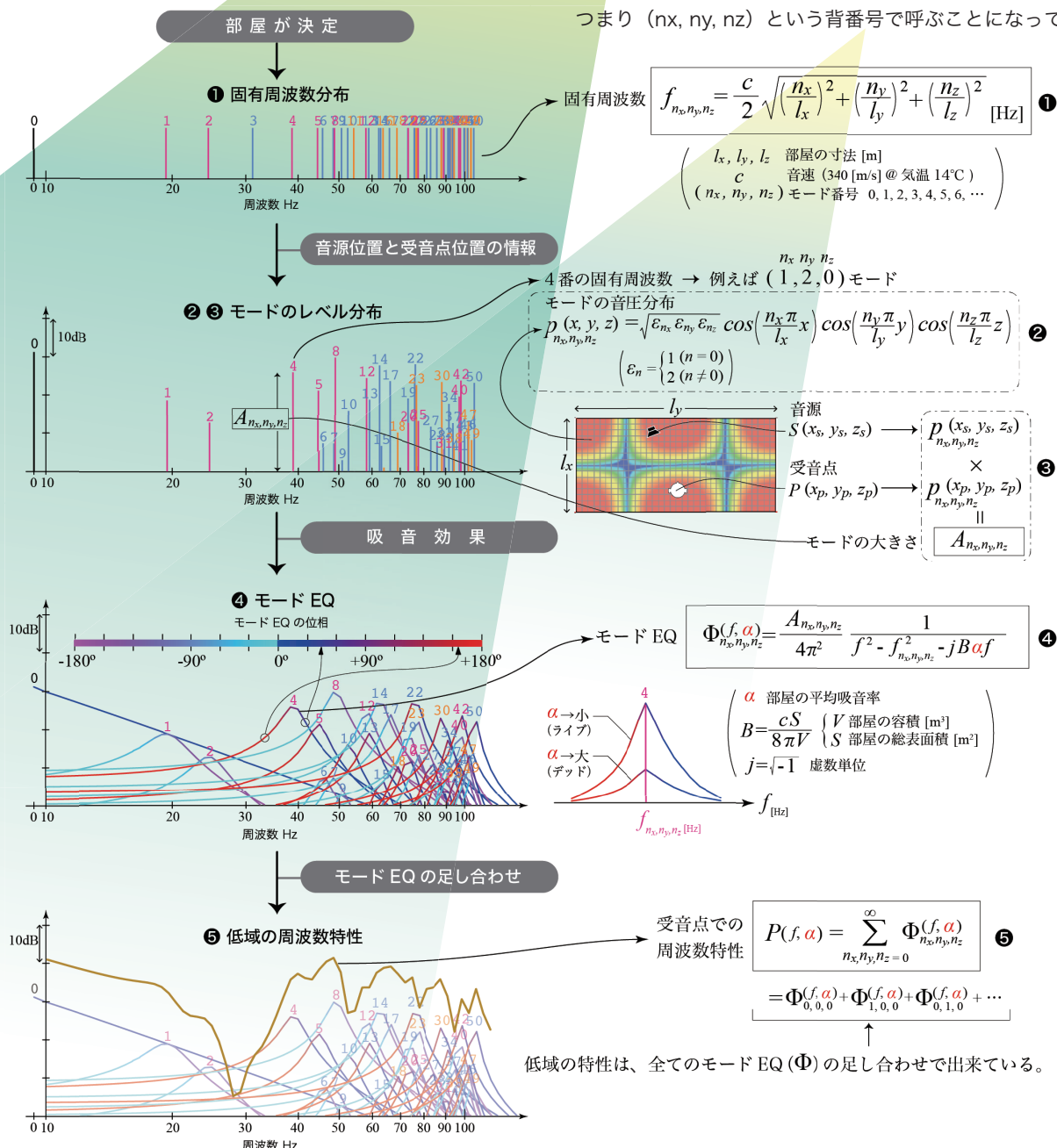
低域の世界では、部屋の形状が決まると、その部屋で生き残ることができる周波数が決定してしまいます。この周波数のことを固有周波数と呼びます。固有周波数は、部屋の寸法を変更しない限り変更することはできません。

② モード

固有周波数は、部屋の中に大きく聞こえる場所や聞こえない場所をつくり出す定在波を生み出します。この定在波によって励起される部屋の共鳴状態のことをモードと呼びます。

いわば、固有周波数 f_{n_x, n_y, n_z} は、部屋に (n_x, n_y, n_z) モードを発生させることで共鳴して生き残っている、というイメージでしょう。

ちなみにモードは、 $(1,0,0)$ モード、 $(1,1,0)$ モード、 $(1,2,1)$ モードといった感じで、 x, y, z 方向に対する共鳴番号の組み合わせ、つまり (n_x, n_y, n_z) という背番号で呼ぶことになっています。



【図 1】 ① 固有周波数 → ④ モードEQ → ⑤ 低域特性

③ モードの大きさ

部屋の中で、モードのピーク（腹）にいととその固有周波数は大きく聞こえ、モードのディップ（節）にいとほとんどその固有周波数は聞こえません。このように、自分がどこにいて固有周波数の聞こえる大きさは大きく変化します。

我々が部屋で聴くことになる固有周波数の音量は、「再生する場所（音源位置）でのモードの大きさ」と「聴く場所（受音位置）での大きさ」を掛け合わせた「 A_{n_x, n_y, n_z} 」となります。

④ モード EQ

部屋で低域を再生すると、 (n_x, n_y, n_z) モードという低域での共鳴現象によって、いくつものモード EQ が生成されます。モード EQ の中心周波数は「 f_{n_x, n_y, n_z} 」で、ゲインは「 A_{n_x, n_y, n_z} 」です。次に、モード EQ のシャープさ、すなわち Q 値に着目してみましょう。④式（ Φ_{n_x, n_y, n_z} ）がモード EQ の数式表現になりますが、分母に部屋の吸音具合を表す吸音率 α （0 ~ 1: 値が大きいほどデッドな部屋）が入っていることが分かります。

試しに、 $\alpha = 0$ （吸音無し）とすると、再生周波数 f = 固有周波数 f_{n_x, n_y, n_z} では Φ_{n_x, n_y, n_z} の分母が 0 になり、 Φ_{n_x, n_y, n_z} が ∞ に発散してしまうことが分かります。すなわち、固有周波数 f_{n_x, n_y, n_z} のみ突出して聞こえている状態です。このような吸音ゼロの状態の再生特性を表現しているのが、「① 固有周波数分布」になるといえるでしょう。

ところで、実際の世界には吸音がゼロといった部屋はありません。換言すれば、吸音のおかげで、固有周波数 f_{n_x, n_y, n_z} 以外の低域も部屋で聴くことができているということになります。

④式からは、吸音率 α を大きくするほど（デッドにするほど）、Q 値の小さな緩やかな EQ 特性となり、レベルも下がることが分かります。このような特性の変化をモード EQ（ Φ_{n_x, n_y, n_z} ）が「ダンプ」されると表現します。

まとめると、モード EQ のダンプ加減は、部屋の吸音具合（吸音率 α ）が担っているということになります。

⑤ モード EQ の足し合わせ = 部屋の低域特性

部屋で低域を再生すると、全てのモード EQ（ Φ_{n_x, n_y, n_z} ）がエフェクトされます。換言すれば、モード EQ の足し合わせ特性（⑤式）が、部屋で低域を再生したときの周波数特性になるということになります。

例えば、吸音の少ない（ α の小さい）ピーキーなモード EQ からピーキーな低域特性が、吸音の多い（ α の大きい）緩やかなモード EQ から緩やかな低域特性が得られます。

ちなみに、モード EQ は複雑な位相特性を持っていますので（④式）、その合成特性は単純な足し算のような結果にはなりません。条件によっては、モード EQ 同士が干渉合って大きなディップが生じてしまうこともあります。

吸音補正係数 R

（中原 雅 考）

もしも測定した部屋がもっとデッドだったら？ モード EQ の理屈からは、周波数特性がもっと滑らかになるはずですが。

では、計算で求めた $\alpha = 0.03$ のライブな部屋の特性を上下にぎゅっと圧縮して平坦（滑らか）にすることで、 $\alpha = 0.3$ のデッドな部屋の特性に近づけることができるか試してみましょう。

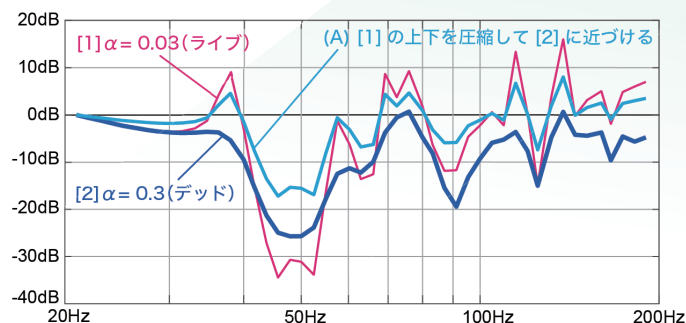
【図 2】がその結果です。

[1] がライブ（ $\alpha = 0.03$ ） な時の周波数特性で、**[2] がデッド（ $\alpha = 0.3$ ）** な時の周波数特性です。そして、**(A) が [1] の上下をぎゅっと圧縮して [2] に近づけてみた結果**です。

なるほど、平坦化はできているようですが… ピークの抑え込みはまだまだ不足している一方で、ディップはすでに持ちあげすぎてしまっているようです。

残念ながら、単純に周波数特性の上下を圧縮する手法では、吸音率の変化を周波数特性に反映することは難しいようです。

*** 上下をぎゅっと圧縮とは…** 周波数レベル（dB）を振幅値に戻してからルート（ $\sqrt{\quad}$ ）をとって、再度周波数レベルに戻しています。レベル（dB）の割り算処理ですね。



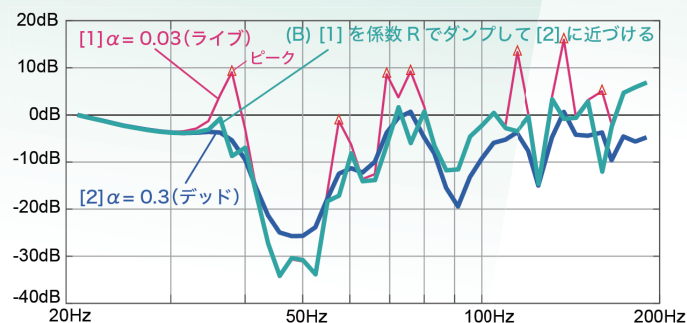
【図 2】 $\alpha = 0.03$ の特性 [1] のレベルを圧縮して模倣した $\alpha = 0.3$ の特性 (A)

やはり、低域特性の吸音補正は、モードの理論に立ち戻って考える必要がありそうです。

モード EQ の Q 値、すなわち周波数特性のピーキーさは部屋の吸音率 α で変化します（【図 1】④式）。ここで、部屋の寸法も音源位置も受音位置も同じ、つまり A_{n_x, n_y, n_z} も f_{n_x, n_y, n_z} も同じ値で、吸音率だけが α_1 と α_2 のように異なる場合を想定します。その場合、吸音率が α_1 の場合と α_2 の場合のモード EQ の大きさの比は、【図 3】の⑧式（ R_{n_x, n_y, n_z} ）で計算できることになります。

ここで、大胆に「低域特性のピークを与えている周波数が固有周波数（ f_{n_x, n_y, n_z} ）なんだ」ということにしてしましましょう（【図 3】「簡略化その 3」）。そうすると… 以下の（1）～（3）の手順で、低域特性のピーク値を⑧式で 1 つ 1 つ補正してゆけば、吸音率の変更を低域特性に反映することができることになります（【図 3】⑩式）。

- （1）元の周波数特性からピーク周波数（ f_n ）を検出する。
- （2）ピーク周波数ごとに R_n を算出する（【図 3】⑩式）。
- （3）もとの周波数特性（振幅値）に R_1 から R_N までの係数をかけて、吸音率が変更された特性を算出する。



【図 4】 $\alpha = 0.03$ の特性 [1] を係数 R で補正して模倣した $\alpha = 0.3$ の特性 (B)

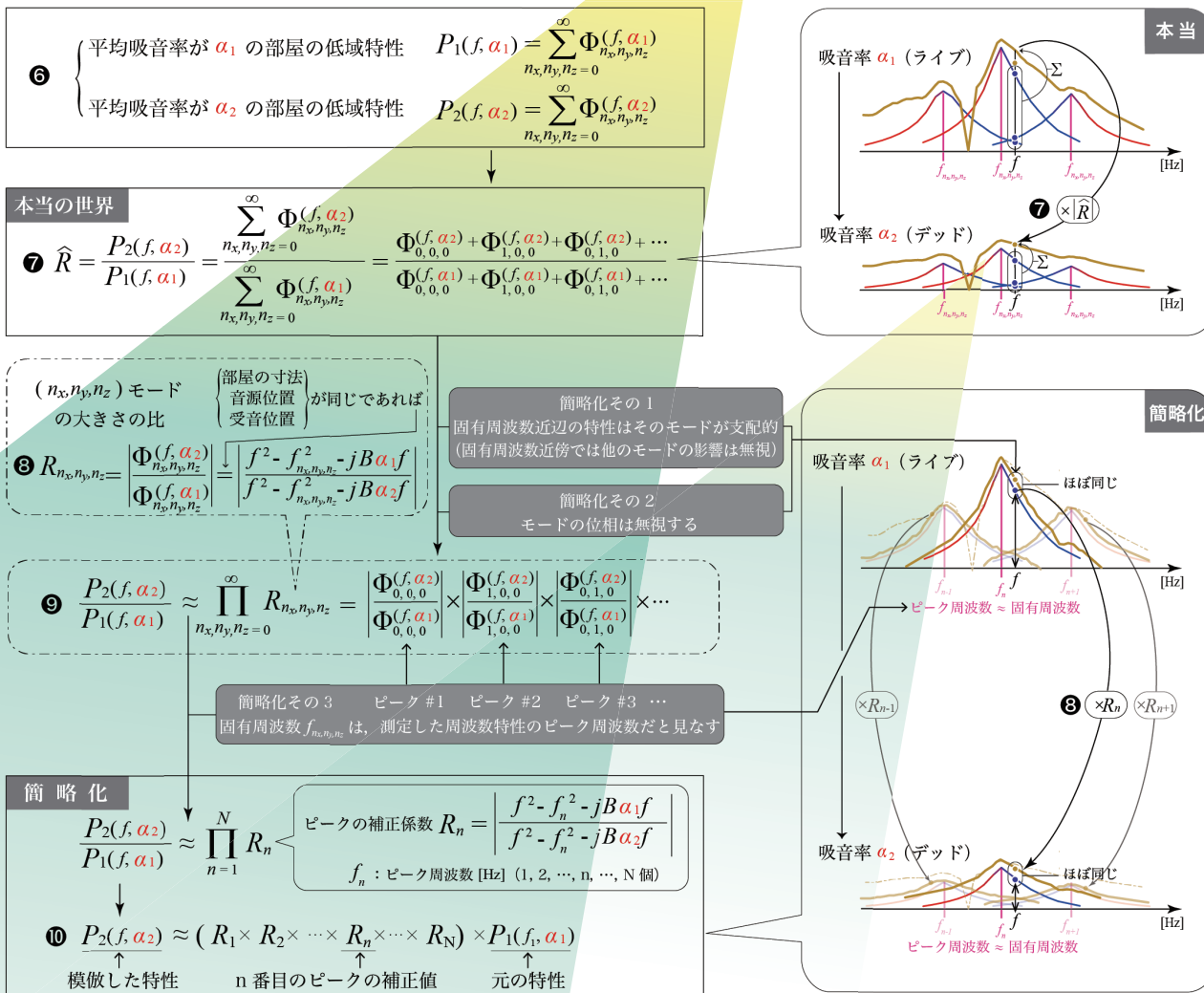
【図4】が、補正值 R_n を用いた計算結果となります。

【1】がライブ ($\alpha = 0.03$) な時の周波数特性で、【2】がデッド ($\alpha = 0.3$) な時の周波数特性です。そして、(B) が補正值 R_n を使用して【1】を【2】に近づけてみた結果です。

この手法では、いくつかの大胆な簡略化を行っているため**、ディップの補正ができていなかったり細かな特性が模倣できていないなどの限界はありますが、ピークに関しては、目的の特性に近いレベルまで補正できているといえそうです。

ちなみに、この補正計算に必要な情報は、「ピーク周波数 f_n 」「補正元の平均吸音率 α_1 」「補正先の平均吸音率 α_2 」「部屋の総表面積 S 」「部屋の体積 V 」といったシンプルな値です。

** ピークの補正係数 R_n の掛け算で周波数特性の吸音率を補正するといった本手法、一見モード理論に基づいた処理のように思いますが、「簡略化その3：ピーク値を与える周波数を固有周波数と見なす」といった他にも「簡略化その1」や「簡略化その2」などの大胆な近似を行っています（【図3】）。
本来の補正係数は【図3】⑦式が正解なのですが、測定値（インパルス応答・周波数特性）からはこの計算に必要なパラメータを得ることが出来ません。ということで、実践的には、結構な簡略を必要としています。



1/10 模型の低域を操って MIL 実測の低域特性に近づけられるか！？

りっこ隊長 (以下、り) : 低域を完全に理解するのはなかなか骨が折れそうね... みんな Dr. 中原の説明は理解できたかな！？

まっつん隊員 (以下、ま) : 低域は部屋の形状によって生き残れる周波数が決まり、そのピークを軸にした前後の位相 (+、-) の相性によって、軸の前後がディップになったりするんでげすね。位相は音源位置と受音点位置によって変化するでげす。

イケイケ・イケウチ製麺隊員 (以下、イケ麺) : それから、部屋の吸音具合に依存して周波数特性がトゲトゲになったり、滑らかになったりするということですね。ここまでは今までの復習なので大丈夫です。

り : そうね。今回実践するモード EQ のダンブの部分はどうかしら？

ま : 吸音するとピークがダンブされるので、低域のピークを検出し、そのピークに対して部屋の吸音率、表面積、体積から求めた補正係数を利用してダンブするでげすね。補正係数「 R_n 」が今回のキモになりそうでげす。

イケ麺 : ただ、この補正の仕方だと顕著なピークしか検出できないし、ディップには適応できない。かなり簡略化されたものなのですね。なんとなく理解できたような気がする。

えりっこ隊長 (以下、え) : 低域の世界は難しいわね。でも今まで何回も取り上げてきたから、私たちならきっと乗り越えられるわ。そういえば No.11 [2015 Summer 号] で、直方体の模型で吸音あり・なしの比較をしたわよね。

2010



2016

り:あ、待って。今から思い出話をすると長旅から帰って来れなくなるから、前回の宿題から片付けましょう。まずは 1/10 模型 Middle の中層と下層の元データを一つに合成するわよ。Cch でやってみよう。

ま:了解です。早速クロスオーバー EQ (【図 6】) を作ったので、元データ (【図 5】) にかけてあげます。(【図 7】)

え:いつも通り仕事が早いわね。クロスオーバー EQ は 80Hz で -6dB となるような 24dB/oct の傾きにしているのね。それで、下層には LPF、中層には HPF をかけるといい感じになるというわけね。

ま:そうですね。次は前回同様のローブースト EQ (【図 8】) をかけると【図 9】になって、宿題 1 つ目の完成です。

り:いつもあっさり仕事をこなすから私たち置いてけぼりにされそう。早速結果をみていたんだけど 1/10 模型のロールオフを補正するためにローブーストした部分は、思ったよりも改善できていないような気がするわ。別の影響を受けている可能性があるわね。

え:そうね。気になるけど、後で考えるとして。次の宿題のモード EQ のダンピングをかけてみましょうか。とりあえず実際の MIL Studio と 1/10 模型の表面積、体積、残響時間を計算しておいたわ。(【図 10】)

ま:意外と 1/10 模型と MIL とでは残響時間はもちろんのこと、体積も表面積も異なるんでね。

え:そうなのよ。MIL の方は仕上壁が複雑な形状で吸音層もあるから、表面積が大きく、体積が小さくなるのよ。

イケ麺:ピークの補正係数を求めるための材料がそろったので、Dr. 中原が解説していた内容を含めてモード EQ ダンプの手順をまとめてみました。(【図 11】)

り:難しそうに見えるけど、順を追って計算すれば大丈夫そうね。ピークはどんな感じに検出したのかしら。

イケ麺:ピークの鋭さや対象とするピークレベルを設定して【図 12】 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 を検出してみました。

り:たしか吸音率 α から補正係数 R_n を算出できるはずで... 吸音率 α は表面積、体積、残響時間から求められるから、もうできるじゃない! 意外と簡単ね。

ま:そうですね。ピークに補正係数 R_n をかけるとダンピングできるでね。

	表面積	体積	残響時間
1/10 模型(1/1換算値)	161.7m ²	136.0m ³	2.03s
MIL	179.3m ²	104.1m ³	0.33s

【図 10】モード EQ ダンプの計算諸条件

吸音率補正後の 1/10 模型での測定値 \approx MIL での実測値 1/10 模型での測定値

$$P_2(f, \alpha_2) \approx (R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \times \dots \times R_N) \times P_1(f, \alpha_1)$$

$$\text{ピークの補正係数 } R_n = \frac{f^2 - f_n^2 - jB\alpha_1 f}{f^2 - f_n^2 - jB\alpha_2 f}$$

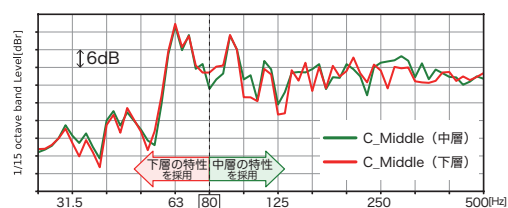
f_n : ピーク周波数 [Hz] (1, 2, ..., n, ..., N 個)

$$\begin{cases} \alpha & \text{部屋の平均吸音率} \\ B = \frac{cS}{8\pi V} & \left\{ \begin{array}{l} V \text{ 部屋の容積 [m}^3\text{]} \\ S \text{ 部屋の総表面積 [m}^2\text{]} \end{array} \right. \\ j = \sqrt{-1} & \text{虚数単位} \end{cases}$$

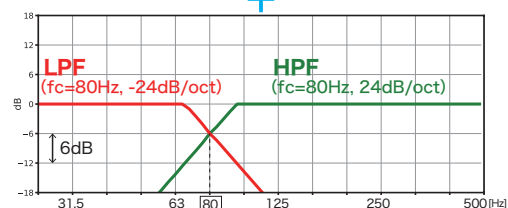
Cch の場合、25Hz~500Hz の間に 5 つのピーク、すなわち f_n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$ 個) を抽出できた。

$$f_1 = 63.0\text{Hz} \quad f_2 = 69.2\text{Hz} \quad f_3 = 91.2\text{Hz} \quad f_4 = 114.8\text{Hz} \quad f_5 = 288.4\text{Hz} \quad (\text{A})$$

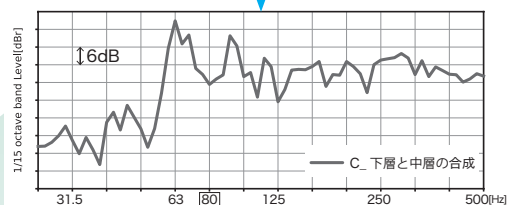
あとは、1/10 模型の吸音率 α_1 と実物の MIL の吸音率 α_2 を算出すれば、ピークの補正係数 R_n を求めることができる。



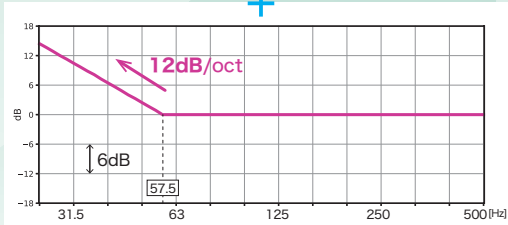
【図 5】Cch 1/10 模型 Middle の測定した元データ比較
80Hz 以下は赤のグラフ、80Hz 以上は緑のグラフとして
1 つの合成特性をつくります。



【図 6】1/10 模型 Middle クロスオーバー EQ

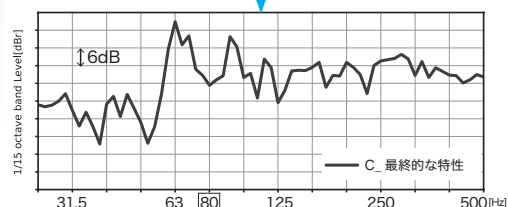


【図 7】Cch 1/10 模型 Middle 元データにクロスオーバー EQ をかけたもの



【図 8】1/10 模型 Middle ローブースト EQ

スピーカー自体のロールオフを改善するための逆フィルター
(詳細は前号の No.27 「2023 Spring 号」 参照)



【図 9】Cch 1/10 模型 Middle 合成特性にローブースト EQ をかけたもの

吸音率は、部屋の残響時間 T [s] と部屋の容積 V [m³] と総表面積 S [m²] から算出できる。

(パーソナル・スタジオ設計の音響学 その4「高域の世界」【図8】を参照)

$$\alpha = 1 - e^{\frac{-0.161 V}{S \times T}} \quad (e = 2.71828 \dots) \quad (B)$$

⑧の式変形で、1/10 模型の部屋の寸法と実物の MIL 部屋の寸法は同じとすることにして A_{n_x, n_y, n_z} を相殺しているが、式 (B) だと、同じ残響時間 (T) でも部屋の容積 (V) や総表面積 (S) がちょっと違うだけで吸音率 α は大きく変わってきそう...

吸音率 α の計算では、1/10 模型の部屋の V と S と実物の MIL 部屋の V と S は、それぞれ厳密な値を使うことにしよう。

1/10 模型 (1/1 換算値) : $V_1=136.0\text{m}^3$ 、 $S_1=161.7\text{m}^2$ 、 $T_1=2.03\text{s}$
MIL (実物) : $V_2=104.1\text{m}^3$ 、 $S_2=179.3\text{m}^2$ 、 $T_2=0.33\text{s}$

(C) を式 (B) に代入すると

1/10 模型 (1/1 換算値) : $\alpha_1 = 0.06$ MIL (実物) : $\alpha_2 = 0.25$ (D)

【図11】モードEQダンピング方法の説明

イケ麺：はい、なんとかモードEQダンピングの完成です。(【図13】)

え：ピークをダンピングさせると隠れてた山が出てきたみたいだけど、わりとうまくダンピング出来ているようにも見えるわね。

イケ麺：隠れてた山もダンピングさせたかったけど、上手く検出できなくて...もう少し特性を似せることが出来なくて残念です。

り：今回は簡略化された方法だし、模型の特性が実物の特性と全く一緒にはならないものなのよ。

え：なるほど。結果にどこまで影響しているか分からないけど、実際の MIL Studio の表面積と体積を算出するのが難しかったわ。反射物となりそうな棚があったり、スピーカーの数も多いからどういう風に見積もっているのか...

イケ麺：試してみましょう。表面積や体積を先ほどよりも大きい値でデータを比較してみたのですが、そんなに変わらないですね！

え：ならこれでいいのかしら。他のチャンネルをダンピングする時も念のため試しておいてね！

イケ麺：は、はい・・・！

ま：改めて特性を見てみるとやはり 40Hz、50Hz 付近のディップが気になるでげす。どうしてこうなったか他のチャンネルの特性も見比べて絶対に突き止めるでげす。

り：じゃあ次回は全チャンネルのデータをダンピングして、まとめて比較して特性の検証をしていきましょうか！

イケ麺：了解！データ整理が完成したら共有します。

え：みんな首を長くして待っているからよろしくね！

(A) (B) (C) を⑩に代入すれば、1/10 模型の周波数特性を
実物の MIL の周波数特性に近づけるための係数 R_n が求まる。

補正係数の周波数特性のデータ

$R_1 = \dots$
 $R_2 = \dots$
 $R_3 = \dots$
 $R_4 = \dots$
 $R_5 = \dots$

(E)

補正係数の周波数特性のデータ [dB]

$L_{R1} = 20 \log R_1 = \dots$
 $L_{R2} = 20 \log R_2 = \dots$
 $L_{R3} = 20 \log R_3 = \dots$
 $L_{R4} = 20 \log R_4 = \dots$
 $L_{R5} = 20 \log R_5 = \dots$
+) $L_{Rall} = \dots$

(F)

1/10 模型の周波数特性のデータ [dB]

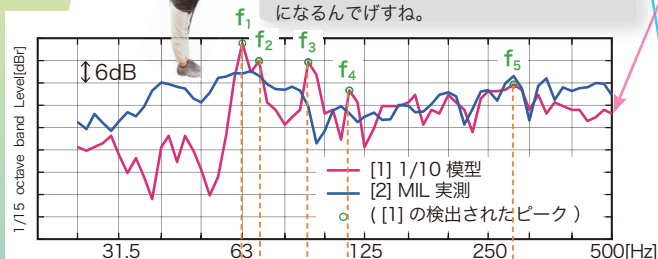
$L_{P1} = 20 \log P_1 = \dots$

実物の MIL の吸音特性を模倣した
周波数特性のデータ [dB]

$L_{P2} = 20 \log P_2 = \dots$

式⑩によると、
(E) を 1/10 模型の周波数特性に掛ければよいということになるが、今回は周波数特性は dB で算出しているので R_n を dB に変換した L_{Rn} を 1/10 模型の周波数特性に足せば良いということになる。

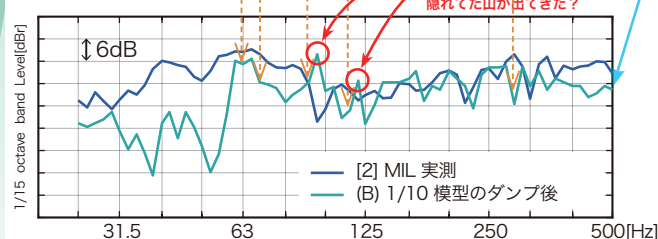
【図12】 [1] ダンプ前のピークに補正係数 R_n をかけると【図13】 (B) ダンプ後のデータになるんでげすね。



【図12】 Cch 1/10 模型 Middle ピーク検出 (ダンピング前)

図中「○」の付いている山が検出されたピークです。

目立つ山を叩いたら、
隠れてた山が出てきた？



【図13】 Cch 1/10 模型 Middle ダンプ後と MIL 実測との比較

「○」の付いていたピークがダンピングされました！

えりっこ・りつこの隊長日記

このところ内容が右往左往して読者の皆さんを振り回していないか心配です。
『1/10 模型を活用して、MIL の音響設計を行いたい！』目指すところは変わらないので、気長にお付き合いください。さて、今回の補正結果、皆さんは想像通りでしたか？正直、私はもう少し実測値に近づけるのではと期待しすぎていました…。引き続き全チャンネルの考察大会をしていきますので、是非結果を想像しながらお待ち頂き、次回答え合わせ！といきましょう～♪

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

株式会社ソナ (SONA Corporation)

音響計算から現場施工、そしてシステム設計やモニタ調整まで、スタジオづくりの入口から出口までを自社でまかなっている小さな工務店。防音建具、防振ゴム、音響パネル、特注スピーカー、そして音響シミュレーションや測定システムなど、スタジオをより高性能に設計施工するために重要なものは自社開発するフロンティア精神が伝統。1975 年より、レコード会社、映画会社、放送局、ポストプロダクションなどの大手スタジオや、アーティスト、クリエイターなどのパーソナル・スタジオなど、ほとんどの種類のスタジオをユーザーからの直接依頼にてつくり続けている音響工務店、ソナ。

えりっこ隊長

株式会社ソナ 設計技術部 課長

千葉県出身。初秋の虫の音が好きです。虫の声を聴きながらビールを呑んで堪能する秋の野外ライブは格別です。引き続き cad の新機能探しにハマってます。若者たちに負けたくないよう目指せ作図効率 up。

りつこ隊長

株式会社ソナ 設計技術部 課長

長野県出身。実家は山小屋専門店。大工さんに囲まれて育ちました。冬には身の丈ほどの氷柱で遊び薪ストーブで暖をとるのが恒例です。「理由のあるかたち」をモットーに機能を備えたデザインを探索しています。

中原雅考

株式会社ソナ 専務取締役 / オフチャー株式会社 代表取締役 / 博士 (芸術工学)

山口県出身。下関で高校時代を、小倉で浪人時代を過ごし、福岡で音響を学んだ後、1995 年に上京。「人事を尽くして天命に聴す」が座右の銘。結果よりもプロセスに価値があると思っている。音響設計においては、知識や経験からのイマジネーションではなく、音響理論を図面上の線に直結させて生み出すかたちが本来の設計だと考えているが、まだまだその領域には遠い。名言コーナー：常識とは 18 歳までに身につけた偏見のコレクションのことをいう。(アインシュタイン)

まつん隊長

株式会社ソナ 設計技術部

茨城県出身。小さい頃から何故かクラシック音楽が好きで、大人になった今も毎日のように聴いています。長く愛される建築音響・理論・デザインはどういったものなのか、200 年前の音楽を聴きながら考えてきましたが、よくわかりませんでした。まだまだ勉強が足りない様です。

イケイケ・イケウチ製麺隊長

株式会社ソナ 設計技術部

香川県出身。土木を学び橋梁メーカーで設計をしている中、レコーディング・ミキシングにハマリ上京して再び学生に戻り音響を学ぶ。現在は建築・音響設計に励んでいます。注) 好奇心旺盛、なんでも知りたい欲あり。