



パーソナル・スタジオ設計の音響学 その16
第二幕「音響実験劇場」

～第十二回 秋の実験三者三様（模型箱に復帰、新隊員も見参）～ PERSONAL Studio Design

今回のお題

（なぜかしゃしゃり出てきたミカミ隊長）

全国一千万人のドクター中原ファンの皆様、こんばんは！そしてごめんなさい。
今回はドクターに代わりまして、私ミカミがお題で託宣の大役を仰せつかりました。よろしくー。

●
アクリル模型の部屋を出てから早一年、2回にわたって現実世界でビンの性格を詳しく調べて来ました。
そして今、時はまさに収穫の秋。

また小さくなるのはいやだけど、再び1/10に小さくなって、いよいよその成果を
隊員の我が家“アクリル模型室”に持ち帰る時が来ました。

今回、隊員の皆さんには、再び1/10 模型室の音響改善へカムバック・チャレンジしてもらいます。
そして待望の新隊員、まっつん隊員も登場。“三者三様”か“文殊の知恵”か、かしまし娘かキャンディーズか、
楽しくまじめな実験劇場をお届けします。

～ 今回のあらすじ～
新隊員をご紹介します！

（えりっこ隊員とりっこ隊員、そしてまっつん新隊員）

ミカミ隊長のご託宣で、再び小さくなってしまった私たち。
なんと今回は、「実験終わったら、レポートにまとめて出しといてね～」
と言い残して隊長がいなくなってしまったのです！（ガッテム！）

えりっこ隊員（以下「え」）：隊長どこ行っちゃったんだろう。新隊員の紹介もしてないのに信じられない！
りっこ隊員（以下「り」）：隊長はあとで絞め上げるとして。せっかくだから私たちの新しい仲間にご紹介してもらわない？
え：そうだね。まっつん隊員～！
まっつん隊員（※今回初登場！ 以下「ま」）：まっつんです。プログラミングならお任せあれ！この間から拡散体の設計にハマって～楽しくてやめられないんですよ～。ふふふ。
え、り：……。 (さっすが我が隊員。変わってる～)
り：そ、そっかあ。ところでまっつん隊員、実験レポートとか得意？隊長が真っ白なページを3ページも (!) 残してドロンしちゃったから、実験計画から考えなきゃいけないんだ。
ま：任せてください！大学の研究室でいつもやってたのでばっちりです。

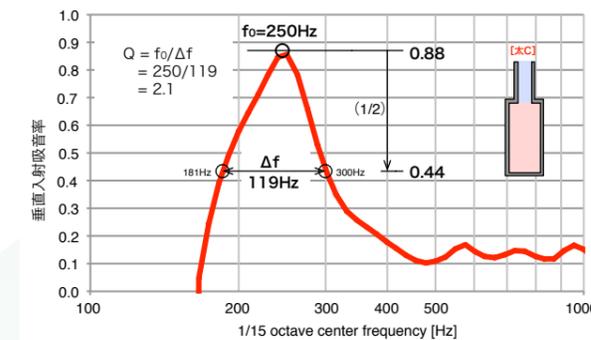
え：まっつん隊員は大学の研究室の後輩なのよね
り：頼りになるね！
ま：ふふふ。実験計画を立てるには、まず目的をはっきりさせましょう。
え：これまで調べて来たビンの性格を活かした吸音計画をして、狙い通りの特性を得ることが大きな目標だよ。
り：狙い通りの特性…つまり、このアクリル模型室をどういう特性にしたいのかを考えれば良いのね。
え：ビンの効果を再確認する意味でも、ずっと着目して来た25Hzのピークをなんとかしてみない？ビール瓶 (No.14 [2016 Summer号]) との比較もできるしね。
ま：では、今回の実験の目的は1/10 模型室の中で「ビンを使って25Hzのピークを抑えること」ですね。ふふふ。
り：そうと決まれば、ビンをいっぱい用意しなくちゃ！前回25Hz用の特製ビンも設計したしね♪大量投入してみよう♪
え：吸音率が大きくてQも緩い【太C】タイプを採用しましょう。(No.16 [2017 Spring号] P97【図8】を参照してね！)
り、ま：了解！

1. 目的

ビン (音圧吸収型吸音材) の特徴を知るため、3シーズン (No.14 [2016 Summer]～No.16 [2017 Spring]) に渡って実験をしてきた私たち。今回は久しぶりにアクリル模型室に戻って1/10の世界からお届けします。

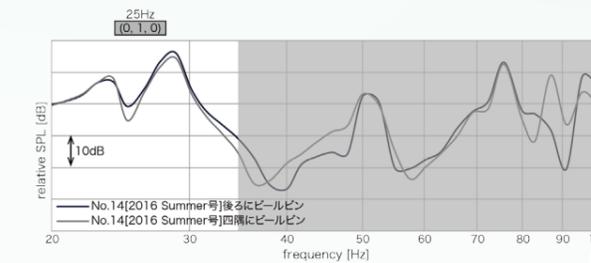
今回はこれまで着目してきた『25Hzのピーク (アクリル模型室の(0,1,0) モード) を抑える』ことを目標に、ビンを使った実験を進めていきたいと思います。

使用するビンについておさらいです。前回 (No.16 [2017 Spring]) は様々なプロポーションの特製吸音ビン (1/1 現実世界での $f_0=250$ [Hz]、1/10 模型室の中だと $f_0=25$ [Hz]) を測定し、ビンの吸音特性を考えました。その中で一番扱いやすそうだった【太首C】のタイプを覚えていませんか？そう、“吸音帯域が広く”、“吸音率も高い”、素性の良いアイツです (【図1】参照)。今回はこの【太首C】のビンを使って実験を行うことにしました。(ミカミ隊長も前号で“(この中だったら)魅力的”と言っています！)

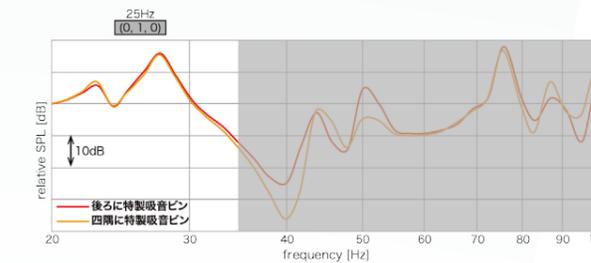


【図1】思い出そう！特製吸音ビンの設計

まずはその実験の前に、模型室の中で特製吸音ビンがビールビンの時と似た効果が得られるのか比較してみます。



【図2】ビールビン (2016 Summer号に登場) の効果



【図3】今回作った特製吸音ビンの効果

スピーカーやマイクの位置、気温や湿度など、前回の実験の条件を完全に再現することはできないため測定誤差がありますが、今回の目的である (0,1,0) モード = 25Hz 付近の特性を見ると、概ね似た結果になりました。これで安心して実験を進められそうです。

2. 実験① ～いっぱい置いてみよう～

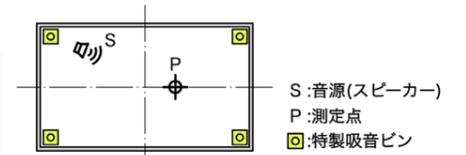
吸音材の数を増やせば吸音能力が高まるはず！と、隊員3人の意見が一致したので、早速特製吸音ビンを大量生産しました【図4】！
その数16本！贅沢ですね。



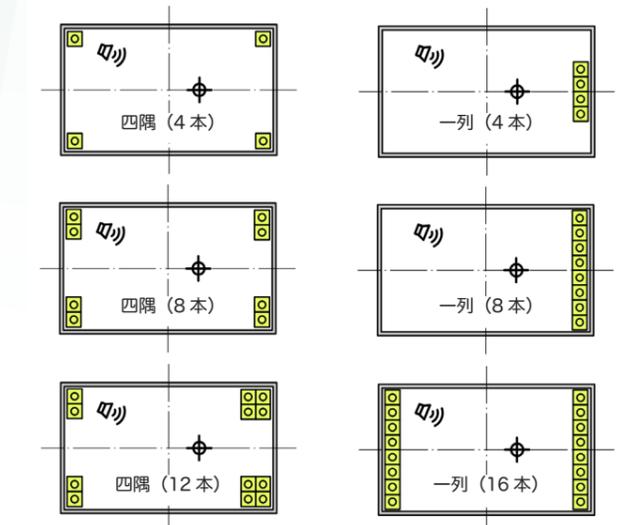
【図4】16本の特製吸音ビン

やみくもに大量投入しても仕方ないので、音圧吸収型のビンが得意な場所に置いて実験していきます。一番効果的なのは“モードの腹”でしたね。ここではビールビンの実験同様、“部屋の四隅”と“部屋の端に1列”の2パターンで比較していくことにします。

【図5】を眺めて見ると、最大本数のパターンが「12本」になっています。これは物理的な都合 (スピーカーの後ろにスペースが無い!) により、わざと12本にしています。間違いではありませんよ。「本数が違ったら正確に結果の比較が出来ないじゃないか！」という意見も出るかと思いますが、“吸音材の数を増やす”という目的からは外れていないので、大目に見てください。



【図4】ビンの置き方

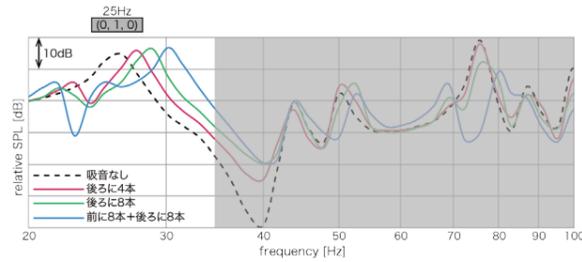


【図5】四隅バージョン

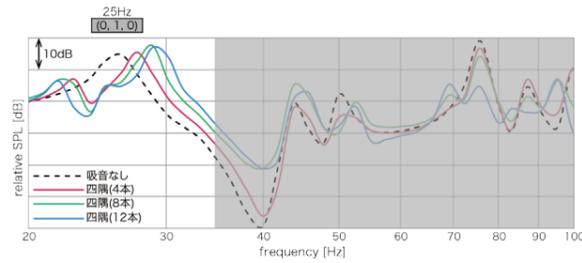


【図6】一列バージョン

2-1. 測定結果



【図7】 一列に特製吸音ピン (4本/8本/16本)



【図8】 四隅に特製吸音ピン (4本/8本/12本)

置き方によって誤差はありますが、本数を増やすと谷が深くなっていく=たくさん吸音されているように読み取れます (【図7】 【図8】)。狙い通り！？

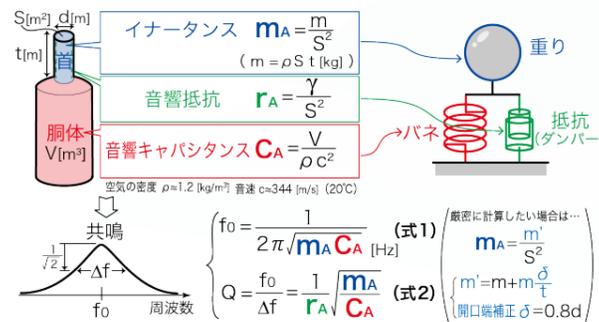
しかし、その谷の周波数が (0,1,0) モードより低くなっているではありませんか！共振周波数 (f₀) が 25Hz になるように設計したのに、なぜでしょうか・・・しかもピンの本数が増えるとなぜか最初の山の周波数がどんどん高い周波数へシフトしています。

2-2. 考察

ビールピンの時 (No.14 [2016 Summer] 号) も実証されましたが、音圧吸収型吸音体はとても鋭い吸音特性をもっていることが再確認できました。そしてなぜか吸音される周波数が低くなり、山がシフトされるという嬉しい新発見。

このアクリル模型室に対して特製吸音ピンの割合が大きいのので、モードの谷と山に何かしらの影響を与えているのでは？とも考えましたが、私たちにうまく分かりませんでした・・・

しかしここは実用本意のミカミ隊！いかに狙った周波数を吸音させるか、について掘り下げていくことにしました。実際にシフトしてしまった山を参考に、ピンを調律してみることにします！ (原因説明は隊長に丸投げしましょう！)



【図9】 ピンの共鳴計算 (復習)

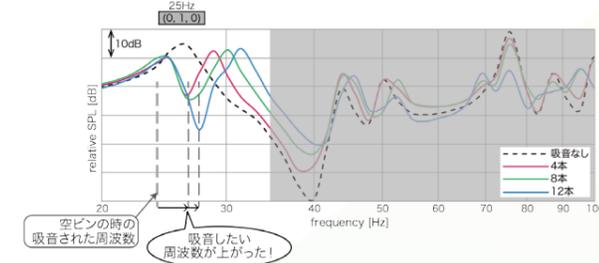
3. 実験② ～ピンを調律して再チャレンジ！～

ピンの共振周波数 (f₀) を変えるためには【図9】を見て分かる通り、“胴体の容積 (V[m³]) を小さく”するか“首の断面積 (S[m²]) を大きく”すれば共振周波数が高くなります。そこで私たちは“胴体の容積 (V[m³]) を小さく”するべく、ビールピンを調律したとき (No.14 [2016 Summer] 号) のように水を入れて調律することにしました。ここからは四隅バージョンの測定を続けていきます。



【図10】 調律した特製吸音ピン

3-1. 測定結果



【図11】 四隅に調律した特製吸音ピン (4本/8本/12本)

結果は一目瞭然！【図11】狙い通り、吸音したい周波数が上がりました。しかし (0,1,0) モードが吸音されたことに喜んでばかりはいられません。吸音された周波数の両サイドに山ができています。この音圧吸収型吸音体は周りの周波数にも何かしらの影響を与えているのかもしれない。

3-2. 考察

狙った周波数の周りの周波数への影響については、隊員3人で考えても分かりませんでした。ビールピンで実験をした時 (No.14 [2016 Summer] 号) にも同じように切り込んだ場所の近くに反動(?) が発生していました。この反動が一体何者なのかを突き止めることは困難ですが、この“反動の山”を抑えることは出来ないのでしょうか。

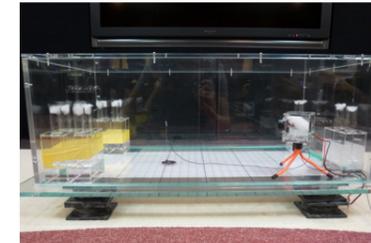
今回は特製吸音ピンの中でも一番吸音帯域が広がった [太首C] タイプのピンを使っていますが、この吸音の鋭さをもっと緩めることができれば、周りに発生した“反動の山”を落ち着かせることができる、と仮定して次の実験に進みます！

4. 実験③ ～Qを調整してみよう！～

ピン特有の鋭い吸音特性を緩くするにはどうすればよいでしょうか。【図9】に戻ってみると、一番下の式にあるようにQを小さくすれば吸音する帯域 (Δf) を広げることができそうです。

そこで、(No. 15 [2016-2017 号]) で検証したように、音響抵抗 (r_A) を大きくしてみることにしました。

今回は特製吸音ピンの首に、いつも使ってる吸音材を「ふんわり」詰めて音響抵抗を与えています。この「ふんわり」加減が重要で、詰めすぎるとピンの効果がなくなってしまうので注意が必要です。

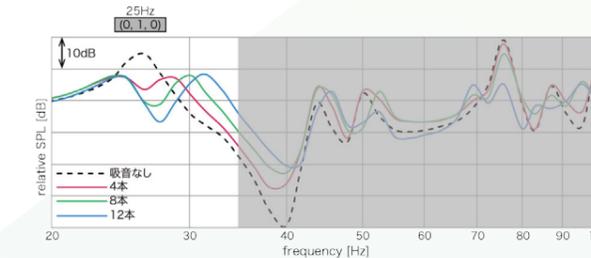


【図12】 四隅に調律した特製吸音ピン



【図13】 首に吸音材

4-1. 測定結果



【図14】 四隅に調律した特製吸音ピン (4本/8本/12本)

狙い通りの結果になっていますよ♪【図14】をご覧くださいと、急峻な谷 (ミカミ隊長曰く「トガった」性格) が滑らかになっていることがわかります。Qを小さく、吸音特性を緩やかにしたことで、反動の山 (30Hz 付近) を抑えることができました。

また、ピンの数と吸音の効果が比例することも確認できます。このような吸音特性であれば、実施に応用しやすそうですね。

4-2. 考察

調律された特製吸音ピンの首に抵抗を与え、吸音特性のQを緩めることで、幅広い帯域に吸音の効果を得ることができました。また、ピンの数を調節することで吸音力を調整できることも分かりました。

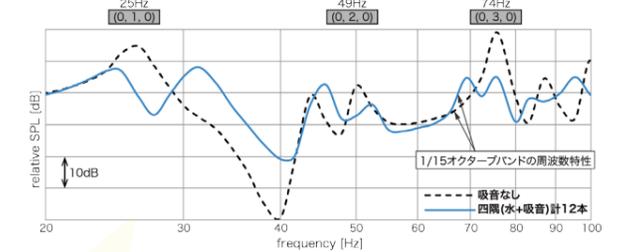
ここでミカミ隊長の助言 (No.12 [2015 summer] 号) P.18の囲み記事) に従って、今回のベスト記録 (四隅 12本バージョン) を人間の聴感と対応の良い 1/3 オクターブバンドレベルで見たい (【図16】)。(0,1,0) モードの山が6dBほど抑えられていることが確認できます。また、ピンを入れた影響(?)で40Hz付近の深い谷も緩やかになっていて、全体的にはなかなか狙い通りの特性に近づいているように見えます。

過去の実験 (No.12 [2015 summer] 号) から、40Hz以上の帯域はグラスウール (厚み 12cm) でも効果があることが分かっているので、組み合わせることでさらに自在な音響設計ができそうです。

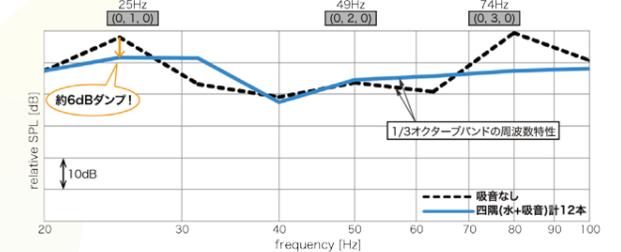
5. まとめ

今回の実験では次の事が明らかになりました。

- ピンの数を増やすと、吸音能力が高まる。(実験①)
- ピンの数を増やすと、山がシフトする。(実験①)



【図15】 今回のベスト記録 (1/15 オクターブバンド)



【図16】 1/3 オクターブバンドで見ると

- 幅広い帯域に効かせるためには、首に抵抗を与える必要がある。(実験③)
- 実施物件に生かすには、ピンの共振周波数を調律できる仕組みが必要。
- ピンの調律や吸音特性の調整がしやすい場所は、ピンの底と口。(本実験の場合に限る?)

「音圧吸収型」と「粒子速度吸収型」を組み合わせれば、次こそは理想の特性を得られるかもしれません！我々もついに卒業でしょうか！? 以上、かしまし娘の実験レポートでした♪



【図17】 実験の様子

～ 解説 ～ 部屋のモードEQ (中原雅考)

f_0 を最適化し Q の調整で部屋のモードのピーク特性が所望の形になるように EQ する。… 隊員たちも立派に成長したものです。ここでは、隊員たちが行ったことを少しばかり理論的にまとめておきたいと思います。

まず、隊員たちが標的にしていたモードのピークですが、式としては以下の【式1】のように表すことができます。

部屋の低域共鳴現象であるモードを表しているので、部屋の寸法 (L_x, L_y, L_z) とモード番号 (n_x, n_y, n_z) は当然含まれた式となりますが、それ以外に部屋の平均吸音率「 $\bar{\alpha}$ 」がモードのピーク形状に関係していることが分かります。隊員たちは、この「 $\bar{\alpha}$ 」を「ピン」で与えて、モードのピークの形状を変化させていたということになります。

$$\text{モードのピーク } p_{n_x, n_y, n_z} = \frac{1}{f^2 - f_{n_x, n_y, n_z}^2 - jA\bar{\alpha}f}$$

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

(モード番号 $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$)

部屋の平均吸音率 $\bar{\alpha}$

$$A = \frac{cS}{4\pi V}$$

$$S = 2 \times (L_x \cdot L_y + L_y \cdot L_z + L_z \cdot L_x) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$V = L_x \cdot L_y \cdot L_z \text{ [m}^3\text{]}$$

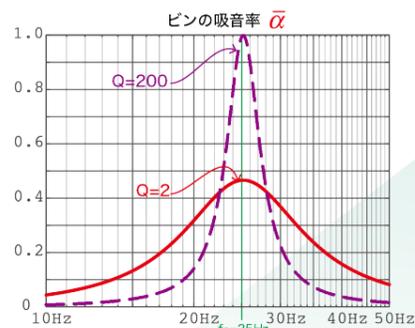
部屋の寸法 L_x [m], L_y [m], L_z [m]
音速 c [m/s]
虚数単位 $j = \sqrt{-1}$

【式1】モードのピークを表す式

「 $\bar{\alpha}$ 」をピン型吸音材で与えるので、その吸音特性は共鳴周波数 (f_0) を中心としたピーキーな特性になることは前述の【図9】からもお分かりだと思います。

では、そのピーキー加減、すなわち Q を変化させた場合にモードのピークがどのように変化するかを検証してみましょう。

【図18】は、【図1】の【太C】のピンの吸音特性 $\bar{\alpha}$ を理論的に計算したものです。ここでは、音響抵抗 r_A を変化させて Q=200 ($r_A=22$) と Q=2 ($r_A=2.238$) の2種類の吸音特性 $\bar{\alpha}$ を得ています。隊員たちによるピンの首に吸音材を入れていた調整は、この r_A を増やすことによる Q の減少をやっていたとうこととなりますね。



【図18】同じピンで Q=200 と Q=2 の2種類の $\bar{\alpha}$ を実現

これらの2種類の $\bar{\alpha}$ を【式1】に入れて、アクリル部屋の (0, 1, 0) モードのピークの特性を計算した結果が【図18】となります。

吸音無し (ピン無し) の場合のピーキーな特性が、狙いを定めたピン吸音により、フラットな特性に EQ されてゆくことが分かります。計算結果からは、Q=200 程度のピン吸音ではまだまだダメで、Q=2 程度まで緩い吸音特性にすると (0, 1, 0) モードのピークが、ほぼフラットに EQ 調整できることとなります。

【図19】からは、Q を小さくするほどピンの吸音率も小さくなってしまおうのですが、モードのピーク対策としては、吸音率を犠牲にしても Q

の小さい吸音特性の方が適しているということになります。

また、【式1】の $\bar{\alpha}$ は部屋の平均吸音率を表していますので、式からは、対処するモードと吸音ピンの位置関係に関して制限はないということになります。このことから、例えば、部屋の奥行き方向のモードを対処するのに、定在波とは関係ない天井面などに吸音ピンを設置しても効果はあるということになりますね。

以上のように、理論的に隊員たちの実験を復習してみましたが、現実と理論では少し違いが出ているようです。

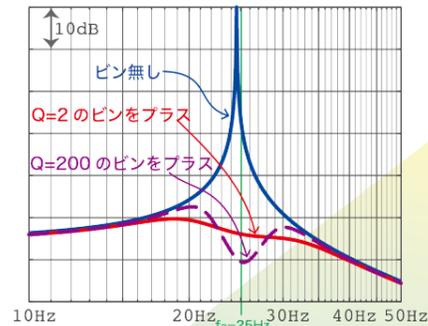
(1) 実際に使用したピンの吸音特性は Q=2 なのに (【図1】)、実験結果 (【図15】) からは、モードのピークが【図19】の計算結果のように完全にはフラットにならず、どちらかというと Q=200 の特性の方に近い。

(2) 実際にピンで吸音すると、モードのピークがへこむだけでなくその先の周波数特性も変化してしまう (【図15】)。

(3) 【式1】と違い、実際には、ピンの置き場所 (置き方) によって、モード EQ の効果に多少の違いが生じる (【図7】【図8】)。

今回の理論検証では、ピンの吸音特性「 $\bar{\alpha}$ 」に関しては位相を考慮していませんでしたが、位相も含めて検証すると (2) あたりは原因が分かるかも知れませぬ。この辺は、また機会があれば… ということで。

(0, 1, 0) モードの音圧レベル



【図19】Q=200 と Q=2 のピン吸音によるモードピークの変化

最後に、良い機会なので、部屋のモードと低域特性の関係に関して整理しておきましょう。

ある部屋の中のある場所に音源があり、その音はその部屋のある場所で聴いたときの「低域特性」は、その部屋のモードの重なり合いで構築されています (【図20】①)。つまり、部屋で聴いているスピーカの低域特性は、スピーカそのものの特性と言うよりは、部屋の低域の響きの集合体といえるでしょう。

では、その低域共鳴、すなわちモードを取り除いたらどうなるでしょう？ しばしば、吸音材の宣伝文句として「低域にも効果抜群」「部屋のモードもこれで撃退」といった感じのフレーズを目にすることがあります。低域に効果抜群かどうかは、吸音特性 (α) を確認するとして、部屋のモードを撃退すると、定在波が発生しなくなり、部屋の低域共鳴が無くなり、… ということで、結果として良い特性が得られるのでしょうか？

繰り返しますが、「部屋の低域特性は、モードの重なり合いで構築されています。」従って、モードを無くすということは、【図20】②のように、その近辺の周波数帯域の再生音を弱めてしまう、端的に言えば無くしてしまうこととなります。

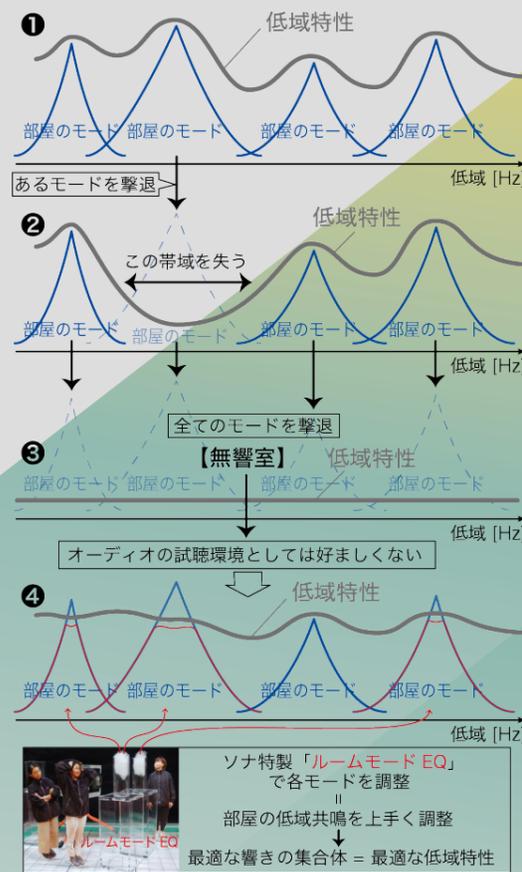
そのモードがどうしてもない悪者でしたら無くすほかありませんが、無くす場合は、全てのモードを無くしてしまい、いわゆる「無響室」のような全く響きの無い状態まで追い込まないと、低域特性はフラットにはなりません (【図20】③)。しかし、無響室のような全く響きの無い空間が、オーディオの再生空間としては不適切であることは、経験的にも、過去の研究からも明らかです。

そこで、部屋のモードは生かしたまま、各モードをうまく EQ して最適

な低域特性を得よう (【図20】④)、というのが、我々「チーム SONA」の低域に対するモチベーションなのです。

そのための EQ、すなわち「ルームモード用 EQ」に変身できる可能性を秘めているのが「ピン」ということですね。

ということで、このところ隊員のみなさんがやっていることは、実は「ピン型ルームモード EQ の開発」ということとなります。そして、目指すは、所望の低域特性を最適な響きの集合体として設計できるようになること。「モードをなんとか無くそう」とか「最適な固有周波数分布 (室寸法) を得よう」とかだけに注目しているだけでは、なかなか最適な低域特性を設計することには結びつかないと我々は感じているのです。



【図20】モード対策と低域特性の関係

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でいます。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 Governor, 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 (第六版)」、「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 マネージャー
千葉県柏市出身。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。

えりっこ隊員 千葉県出身。趣味は音楽鑑賞と BBQ。最近は施工図以外のプランニングにも少しはまっています。まっつん新隊員 (じつは大学の後輩!) に負けないう、気合いを入れ直し中。	りっこ隊員 長野県出身。趣味は散歩と美術館巡り、甘味屋をはしごすること。座右の銘は晴耕雨読。「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。	まっつん隊員 茨城県出身。趣味は料理。現在寿司を握ることがマイブーム。初めての業務であたふたしている、毎日精一杯生きている新人。ふふふふ。
---	--	--

御質問等は、Pro@miroc.co.jp まで!