



## パーソナル・スタジオ設計の音響学 その2 0

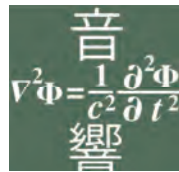
## 特別編「音響設計実践道場」 1/1と1/10の世界を往来！

## ～第二回 続 吹抜けのある空間～

sona  
PERSONAL Studio Design

## 実験です

(中原雅考)



ソナには「音響倶楽部」というサークルがあります。

現業業務以外の時間を使ってでも専門的な音響のことをやりたい

という有志で構成されたサークルです。

部員は、現業との関連性や、所属部署、バックグラウンドなどは関係なしに集まった社員です。

本稿は、音響倶楽部の部員によって作成されています。

さて、隊員の皆さんには、今回は思いっきり実験をして頂きます。

隊員の皆さんは、これまで実験に関しては、お手伝いという立場でしたが、今回は違います。

誰かが用意してくれた何かを使って実験をするのではなく、

実験には何が必要かを自分たちで考え、必要なものは自分達で用意する

というところから始めて頂きます。

昨今は、コンピュータシミュレーションで多くの実験の代わりができるようになりました。

しかしシミュレーションは、相応の理論的知識やプログラミングの能力をもつ人に作業が一元化されます。

一方、実験は、

音響理論が分かる人、プログラミングが出来る人、機材が扱える人、半田付けが出来る人、図面が描ける人、体を動かす人

上記の様々な能力を束ねて指揮をとる人

など、様々な能力が必要とされます。

様々な能力を持つ人が自分の能力を生かす場所を見つけることができるのが実験です。

実験の成功には、それらの能力がうまく調和するかが重要となってきます。

さて、今回は音響倶楽部で綺麗なハーモニーを奏でて頂きましょう。

## 新・模型用スピーカー製作

ミカミ隊長、えりっこ、りっこ上級隊員、まっつん、イケ麺、IDE 隊員

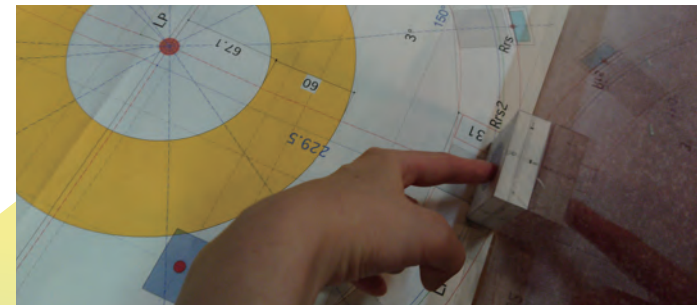
## ■ スピーカー製作に奮闘！

すでに廃レベル、ミカミ隊長（以下「ミ」）：Dr. 中原からご託宣いただきました。  
ということで、実際のスピーカーレイアウト通りに模型室（吹き抜けのある「異  
形空間」）で測定してみよう。

すでにベテラン、えりっこ上級隊員（以下「え」）：今回の目的は、各スピーカー  
の周波数特性をリスニングポイントで測定してみることだね。

ベテランの世界によこそ、りっこ上級隊員（以下「り」）：なるほど。ミカ  
ミ隊長早速やりましょう、ってもういい？！

一番名前の長い、イケイケ・イケウチ製麺隊員（以下「イケ麺」）：「アレしといて」  
と言って図面を渡されました。随分複雑なレイアウトですね（【図1】）。壁面  
に縦並びに3台マウントするようです。

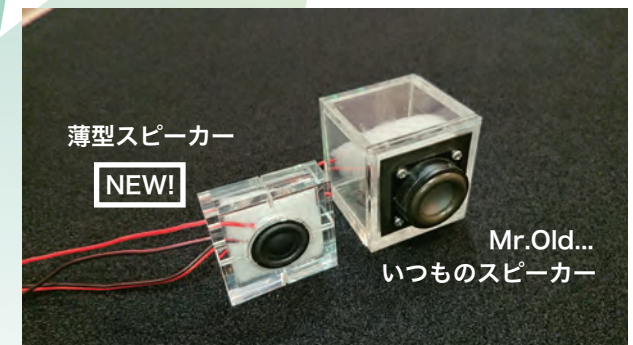


【図2】 慎重なまっつん隊員（こんなタイプだったっけ？）。ちゃんと入るかど  
うかを紙のスピーカーキャビネットを確認してから製作します。実際に置いて見  
るとイメージしやすい。

イーデ：でも、“薄さ命”で選びましたんで、ちょっと心配なんですわ。いつ  
も使ってるスピーカーのドライバーは共振周波数（ $f_0$ ）が220 [Hz] やっ  
たらいいんですけど、このアメリカンは  $f_0$  が350 [Hz] くらいなんです（1/10  
模型内だとそれぞれ、22 [Hz] と35 [Hz] に相当しますよ）。キャビネッ  
トもボタンコやし、ちゃんと低域が出るかどうか。

ま：んー、そうですけど、まずは部屋に入るのが大事でです。せっかく図面  
もあることなので、“本ちゃん”のスピーカーを作る前に、紙でスピーカーの  
模型を作って大きさを確認しましょうよ（【図2】）。

え：これだったら製作しても問題なさそうだ。どうせなら3台作りましょう。  
その方が測定楽でしょ？！



【図3】 新模型用スピーカーが完成！いつも使っているスピーカーに比べると薄  
いのがよくわかりますね。こんなに薄くて音出るの？！

イーデ：できました（【図3】の左側）。実際のレイアウトを再現するとい  
うことなので、スピーカーが3台マウントできるスタンド（【図6】）も製作しました。

え、り、ま、イケ麺：すごい。

り：このスピーカーすごく可愛いので、名前をつけましょう。えーと「No.1」  
「No.2」「No.3」がいいな。

ミ：で、合理的な名前ですな（情が移らなくていいかも）。さてスピーカーを  
3台作ったのはいいけど、周波数特性は3つとも同じなのかな。都合よく全  
く同じにはならないんじゃない？あと、低域がどこまで出るのかも気になるね。

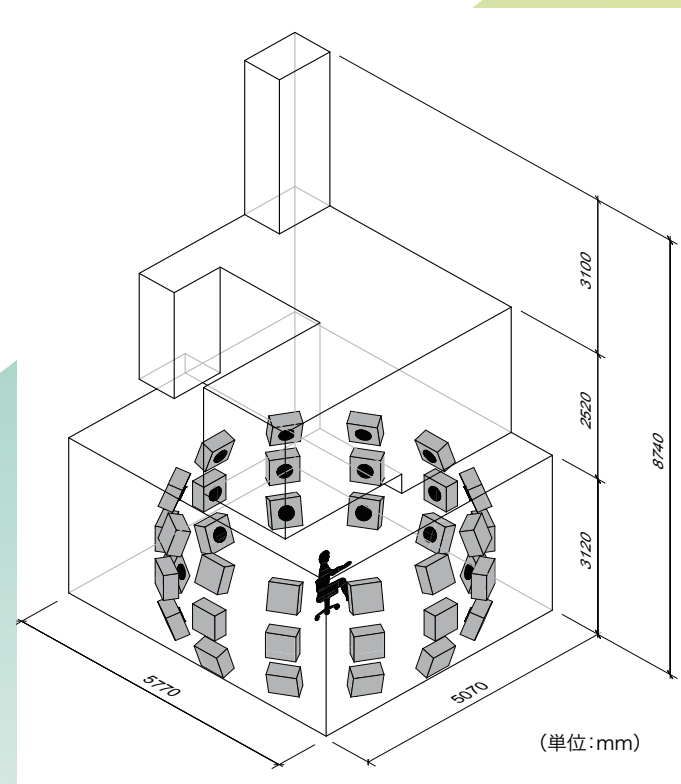
え、り、ま、イケ麺、イーデ：あ、ミカミ隊長！居たんじゃん。

イケ麺：なるほど3台製作して測定した場合、スピーカーの場所による違い  
だけじゃなくて、スピーカーの個体差が含まれてしまうということですね。模  
型室に持ち込む前に、スピーカーそれぞれの元々の特性を調べておかないと。

え、り、ま、イーデ：あの一言でわかるとは、がーさず。イケ麺。

え：我が隊に無響室はないけど、以前やってみたように、反射音とか部屋  
の特性を含まないように工夫して、3台のスピーカーの特性を測定してみればい  
いんじゃない（【図4】）？「2012 Summer号」を見ればわかるね。

り：スピーカーの個体差を補正するフィルターも作ってしまえば、測定が簡単  
だね！



【図1】 こうなる予定。いや、それはお施主様次第ですが、やるうと思えばこ  
までやれるという設計になってます。地球儀の真ん中に座って音を聴く感じ  
です。いわゆる“イマーシブ・オーディオ”というやつですね。自分を囲む球面上  
に均等にスピーカーが配置されます。今回はこのスピーカー（36台！）からの  
再生特性をリスニングポイントでやみくもに（いや、がむしゃらに？）測定し  
ようと・・・。図中に部屋の主な寸法（1/10模型の寸法ではなく、実物換算）も  
記入してあります。

たこ焼きには厳しい、イーデーデ IDE 隊員（以下「イーデ」）：イーデ、イー  
デえ！そうとなれば早速測定しましょう。

もはや中堅？、まっつん隊員（以下「ま」）：んー、でもいつものスピーカー  
だと大きすぎて、模型の中に納まりそうにありませんでげす。

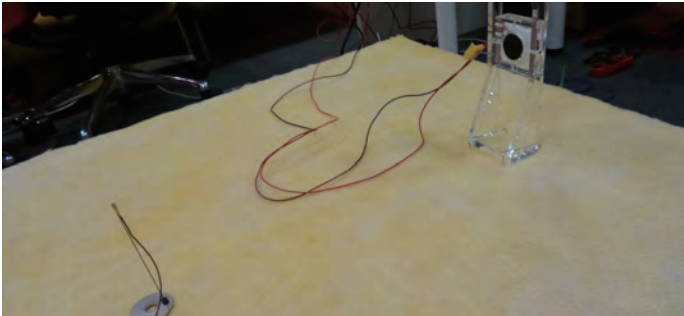
イケ麺：実際の空間をそのまま1/10にして模型を作っているんだから、どう  
にかなるはず。模型で入らなきゃ、本番でも入りません。薄いスピーカーを  
作ればワンチャンありますよ。

り：そんなに薄いものが作れるかどうかかわからないけど。検討してみましょう。  
スピーカーを作るのならドライバーとエンクロージャーが必要だね。

イーデ：やりましょう！スピーカーの図面描いて来ました。ドライバーは、必  
死のパッチで薄型のを探しに探してアメリカから買ってきました。

え、り、ま、イケ麺：あ、アメリカ！？





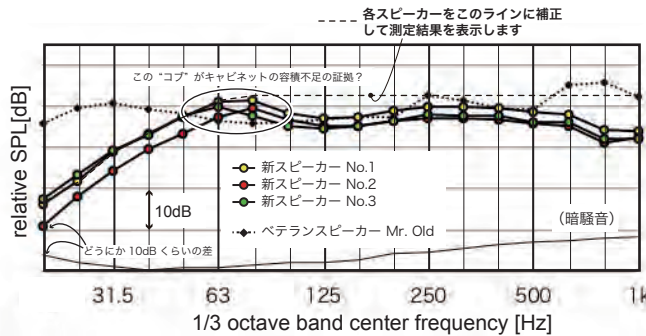
【図4】新作スピーカーを模型室に持ち込む前の地道な測定。まずグラスウールの平原の上で、3台のスピーカーの素性を明らかにします。新入りを迎えるために必要な儀式です。

ま：結果（【図5】）を見てみると、スピーカー間のバラツキはそこそこですね。それより、**やっぱり低域の再生能力がいまいち**です。いや、“いま3”くらい**再生出来る帯域は25[Hz]くらい**から上って感じかな。

え：50[Hz]あたりからは急に低下してしまうね。いつものスピーカーは20[Hz]でもしっかり再生できてたけど。

ミ：そうね。まあ、薄型ドライバーの仕様通りって感じかな。63 [Hz]あたりがちょっと“コブ”状に盛り上がっているのは、キャビネット容積が足りてない証拠かも。低域の下がり方が急になっちゃってるのも薄いキャビネットのせいかな。もうちょっと低域まで伸びてて欲しかったけど、薄さ最優先でやったからしょうがないか。ギリギリS/Nとれそうだ（20 [Hz]で「No.2」が暗騒音とどうにか10 [dB] くらいの差がとれてる→測定値を1の位（整数）まで信頼できる）し、どうにかこれでやってみよう。

イーデ：イーデ、イーデえ！（注：「やっと出来るでえ」の意）



【図5】グラスウールの平原の上で測定した3台の新型スピーカーの周波数特性です。無響室ではありませんが、反射音の影響を取り除いてありますので、これが彼らの“素性”です。模型室内での測定ではこの3台の差を無くすように補正するフィルタを用います。それにしても“Mr. Old”の優秀さが際立ちますねえ…。

【図1】でご覧いただきました通り、この部屋には36台のスピーカーが聴く人を取り囲むように球面状に配置できるように設計されています。その36台のスピーカーがリスニングポイントでどのような周波数特性になりそうなのか、36台分を模型室内で測定しようという、いつも通り隊員の働き頼みの「働き方改革」に逆行する今回の企画です。

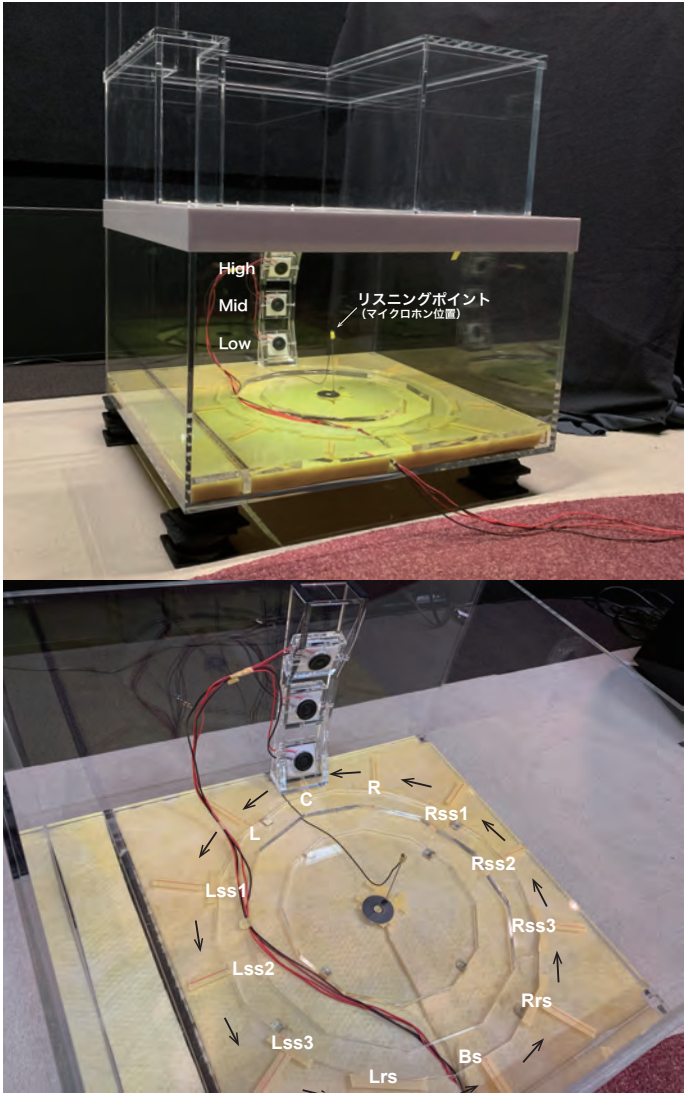
High/Mid/Lowの3層分を一度に済ませようということで、若手隊員諸君が新しいスピーカー3台とスピーカースタンドを作ってくれたところまでは良かったんですが、隊長の私を含めてスピーカー製作についてはまだまだでした・・・、反省。薄さ最優先で製作したので仕方ないと言えば仕方ないのですが、測定してみたらやはり肝心の低域再生特性が「いま3（さん）」です（【図5】）。まあ、本番（実物大）じゃなくて1/10模型の段階で良かった！ということで、図々しくポジティブに考えましょう（笑）。作り直しも頭をよぎりましたが、なんとか測定にはなりそうですので、新スピーカー3台を模型室に投入することにします。

## ■ 模型室での測定。その様子をイマーシブにお伝えします！

ミ：おーし、隊員諸君よくやってくれた。でも君たちはまだ何も成し遂げてはいない。今までは予選リーグ、ここからが決勝トーナメントだ。“ONE TEAM”でミカミ隊の新しい歴史を作ろう！

イーデ：隊長感化されやすいデえ！

ミ：さて、どんな風に測定するかな？



【図6】測定の様子。新型スピーカー3台を縦にならべて、地道に30°ずつ順繰りに移動させては測定を繰り返します。

イケ麺：作った**新型スピーカー3台をタワーに装着**しましょう。移動は人力で。僕が**30°ずつ動か**していきますよ。

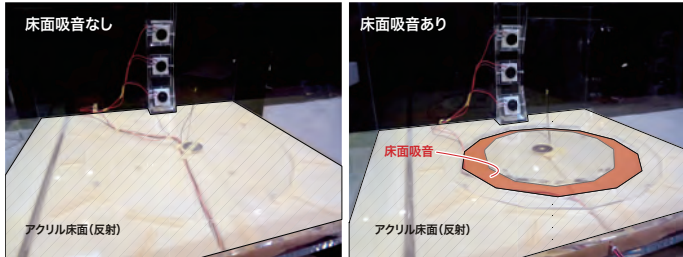
ま：私、実はやりたいことがあって。**床の反射が気になる**んでげす。床の反射って、直接音と干渉して周波数特性を乱すでしょ。コムフィルター現象。**部分的に床を吸音にして測定してみ**て、**吸音が無いときと比べてみたい**でげす。

イケ麺：でも、床を吸音するって言うてもどうやって？床に吸音パネル置くんですか？その上歩けるの？

イーデ：せっかく模型なんやし、やってみればイーデえ！幸い床下にスペース作ってあるし、そこに吸音材入れて、吸音したいところの床外したらええんと違います（【図7】）？

さあ、やっと今回のメインディッシュのスタートです。量は多いですが、やる事はかなりシンプル。**全36ポジションから再生したときの周波数特性をリスニングポイントで観察**します。スピーカーを縦に3台装着できるスピーカースタンドを作りましたので、それを30°づつ計12箇所に移動させて測定します。その際、スピーカーごとの特性の差（【図5】）が含まれないようなフィルタを入れて、スピーカーの場所ごとの違いだけを観察できるように測定します。

まっつん隊員の提案により、部屋の状態は**床面全体が反射性**のとき（“床面吸音なし”）と、**床面の一部が吸音性**のとき（“床面吸音あり”）の2種類で測定します。人間は通常床の上にはいますよね。突然、当たり前のことを言っていましたけど、スカイダイビングしてるときや、スキージャンプ、バンジージャンプみたいなかなり思い切ったことでもしない限り、普通人間は何かしらの床の上にはいます。ということは、スタジオでスピーカーから音を聴くときやリビングでテレビを見る（テレビの音を聴く）ときはもちろん、会話をするときや歌を歌うとき、楽器を演奏するときにも常に床からの反射音も一緒に聴いているはずで、スカイダイビングをしなが

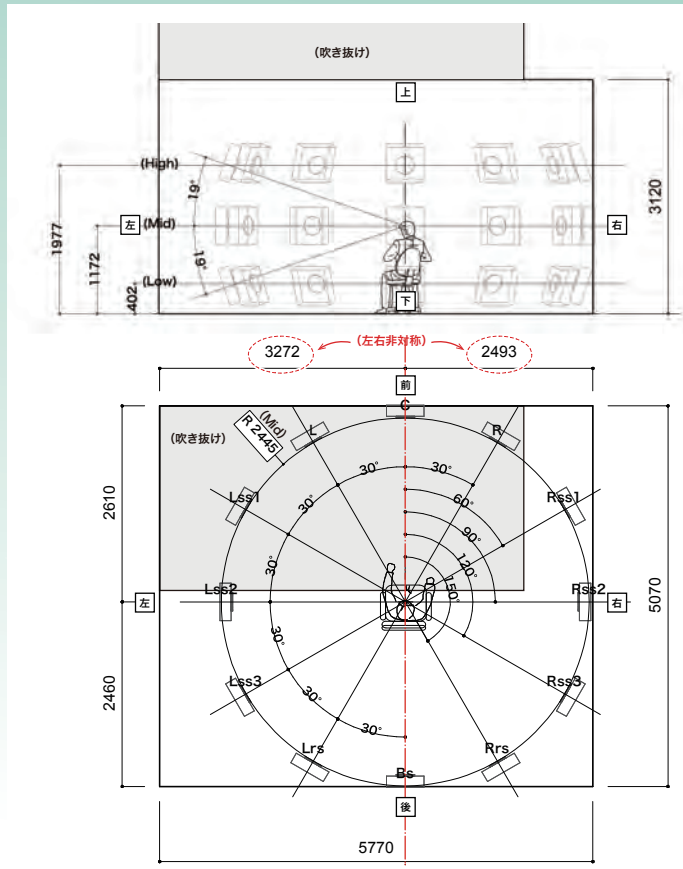


【図7】まっつん隊員の提案により、2つの条件で測定することにしました。床面全面がアクリルの反射面になっている“床面吸音なし（左）”と、ドーナツ状にアクリル床面の一部を取り除いて床下のグラスウールを出す“床面吸音あり（右）”です。

ら歌うでもしない限り（風切り音がすごそうですけど）、床の反射音から逃れることはできません。まっつん隊員が気にしているのは、その事でスピーカーの再生周波数特性が乱されるのではないかとこのところなんです。この記事の読者でしたら“コムフィルター現象”という言葉聞いたことのある方もおられると思いますが、スピーカーからの直接音と床からの反射音が干渉することによって、周波数特性が“櫛の歯状”に乱れる事があります。リスニングポイントからスピーカーまでの距離と、スピーカーの高さによるのですが、100Hz前後の帯域で床反射に起因するディップを経験されているスタジオは結構多いと思います（え：詳しくは【vol03 Proceed2010-2011】を参照ね。ソナのウェブサイトからも入手可能 <http://www.sona.co.jp/sitemap.html#downlord>）。イケ麺隊員の言う通り床は人が歩く部分ですし、掃除の事なんかも考えますと、実際に床を吸音するという手段を取ることはあまりできませんが、**ここは模型、何をやっても大丈夫**です。まっつん隊員の提案の通り、“床面吸音あり”の測定もやってみましょう。

ミ：どんな感じの結果になりそうだと思う？測定を始める前に、ちょっと予想してみよう。

え：コントロールルームって、**左右対称に図面描く事が多い**んだけど、それって**左右の再生特性を揃えるため**だと思うの。でも、この部屋は**左右が対称**になってない（【図8】）。スピーカー配置も部屋に対して**左右対称じゃない**し、



【図8】室内のスピーカーレイアウトです。リスニングポイントを中心とした球面に、High/Mid/Low 3層のスピーカーが均等に配置されます。ポイントは左右が非対称になっているところ、それから部分的に吹き抜けがあり、場所によって天井の高さが異なることです。これでは各スピーカーの特性がバラバラになってしまうのも止むを得ないか？！

吹き抜けも“左の前の方”だけであって、対称じゃない。だから、**左右でかなりバラバラな特性**になるんじゃないかな。吹き抜けてるところは、他とは天井の高さが全然違うから、**特性も全く変わったもの**になるんじゃないかと思う。

り：高さによっても違いが出そうよね。High、Mid、Lowでは、タテ方向の室モードに対する位置が違出し。吹き抜け部分は他の場所とモードそのものが違いそうだしね。

ま：High、Mid、Lowで、**床反射によって影響を受ける帯域も違って**きそうでげすよ。

イーデ：全部バラバラになりそうやデえ！

## ■ 結果は如何に。さらにイマーシブにお伝えします！

ミ：諸君、測定お疲れ様。ノーサイドだ！それでは結果を見て見よう。ジャーン（【図9】）！これから何がわかるかな。

え、り、イーデ：・・・。

イケ麺：250[Hz]以上の帯域はスピーカー毎のバラつきは小さいですね。125[Hz]以下の帯域だとかなりバラつきが激しいという印象です。

ま：インパルス応答も測定してあるので、残響時間も分かるでげすよ。スピーカーの位置で多少ばらつきはありますが、**“床面吸音なし”の時**で大体3.5～4.0 [秒（実物換算）] くらい（長い！）でげす。ってことは、この部屋のシュレーダー周波数は大体330 [Hz] くらいになっているはずでげす。

え：シュレーダー周波数については、Proceed Magazine 創刊号（！）を参照ね。ソナのウェブサイトからも入手可能よ。

り：「シュレーダー周波数の2倍くらいを低域と考える」っていう見方でみると、600 [Hz] より下が“低域”という感じだけど、暴れの大きな帯域はそれよりもうちょっと下のほうで済んでるみたいに見えるね。

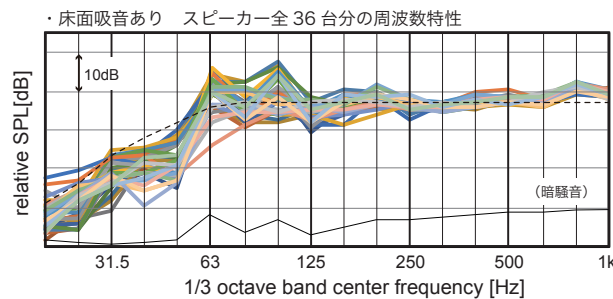
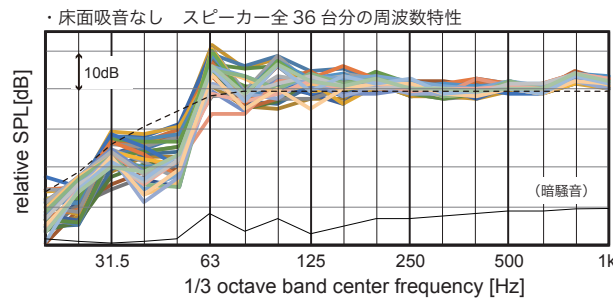
ミ：あとはどうかな、何か気づくことは？

え、り、ま、イケ麺、イーデ：ぐ・・・、ぐちゃぐちゃ？

ミ：そうよ正解！、ぐっちゃぐちゃよ、ぐっちゃぐちゃ。

え、り、ま、イケ麺、イーデ：・・・（ガッデム）。

ミ：まあ、全部まとめて見てても、みんなの予想の通りで、ばらばら、ぐちゃぐちゃにしか見えないわな。少し細かく見ていこうか。一本一本見ていけばもちろんそれぞれ特徴があるんだろうけど、細かく見ていく前にもう少し大雑把に全体を見てみよう。**36本の特性を眺めながら、似た者同士のグループに分けてみる**っていうのはどうだろう。何か傾向が見えてくるかもしれない。

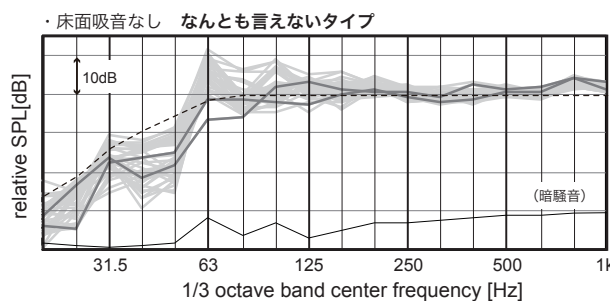
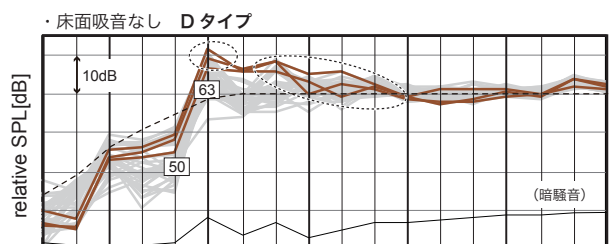
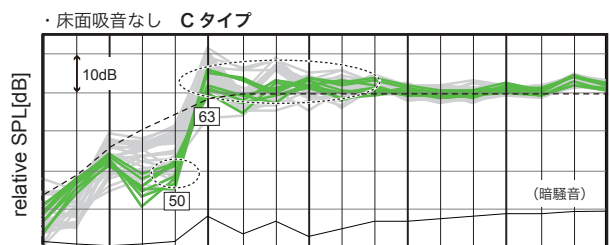
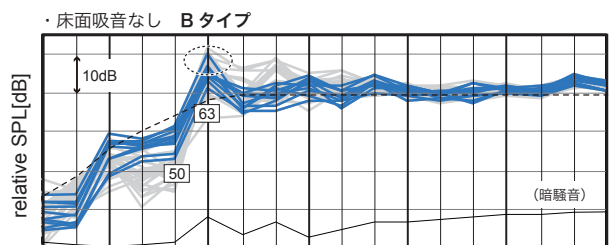
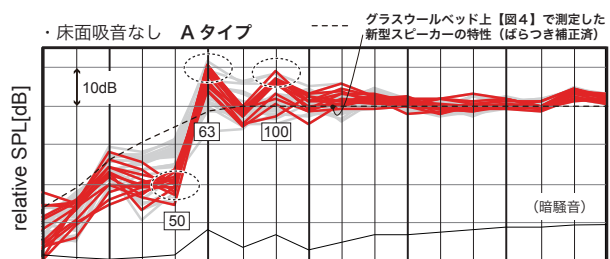
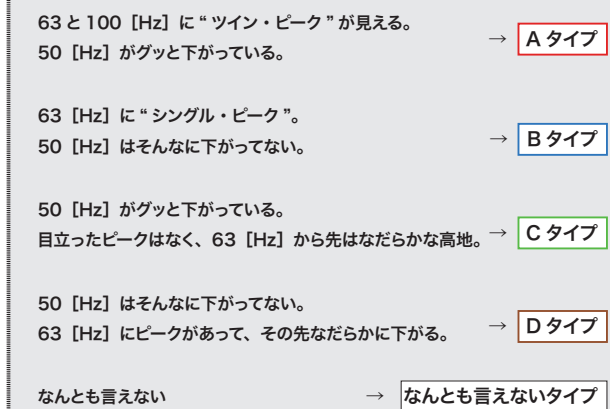


【図9】全測定結果一気書き（36台 x 室内2条件 = 特性72本）。上が“床面吸音なし”36本、下が“床面吸音あり”36本です。これから何かが読み取れますか・・・？

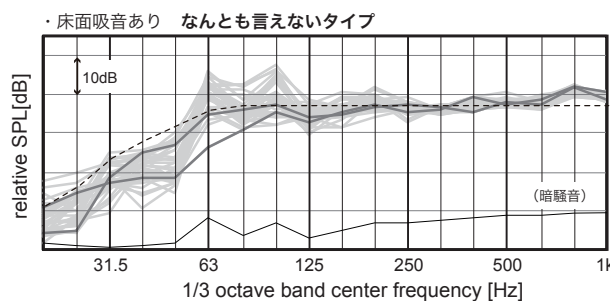
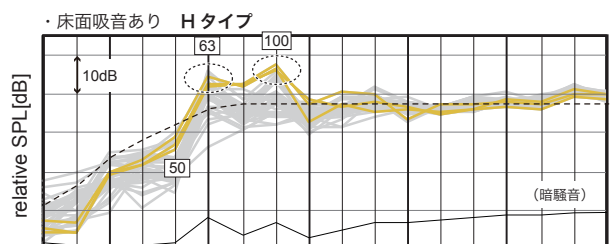
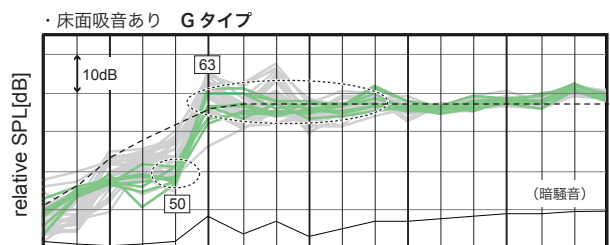
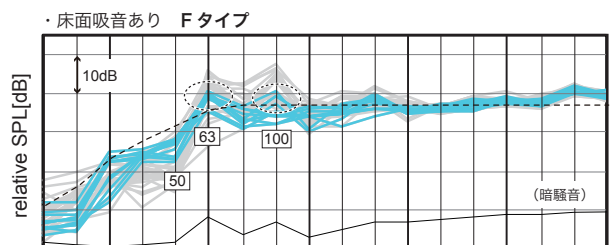
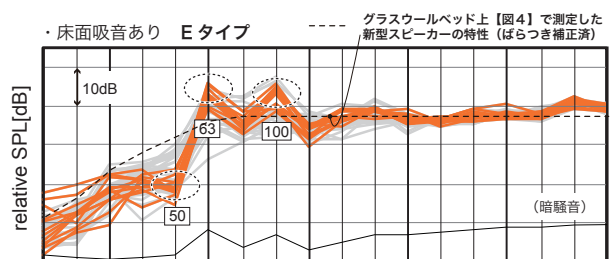
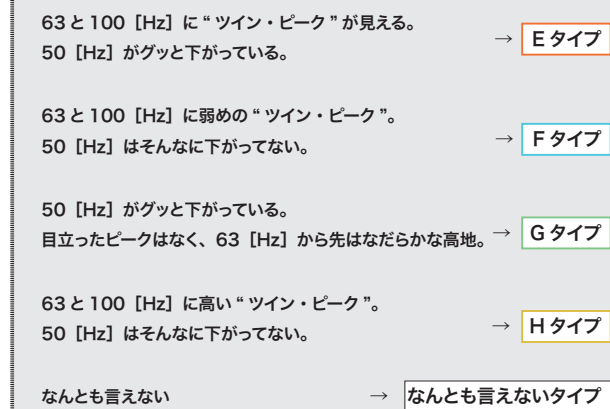


イーデ：分かりました、イマーシブにグループ分けしてみますデス！まずは“床面吸音なし”。なんとなくですけど、こんな感じで分けられそうですデス。

イケ麺：じゃあ“床面吸音あり”の方は僕がグループに分けます。こんな感じでどうでしょう。



【図10】“床面吸音なし”の結果を見ただ目でグループ分けしてみました。4つとそのほか（なんとも言えないタイプ）になんとなく分けられそうです。

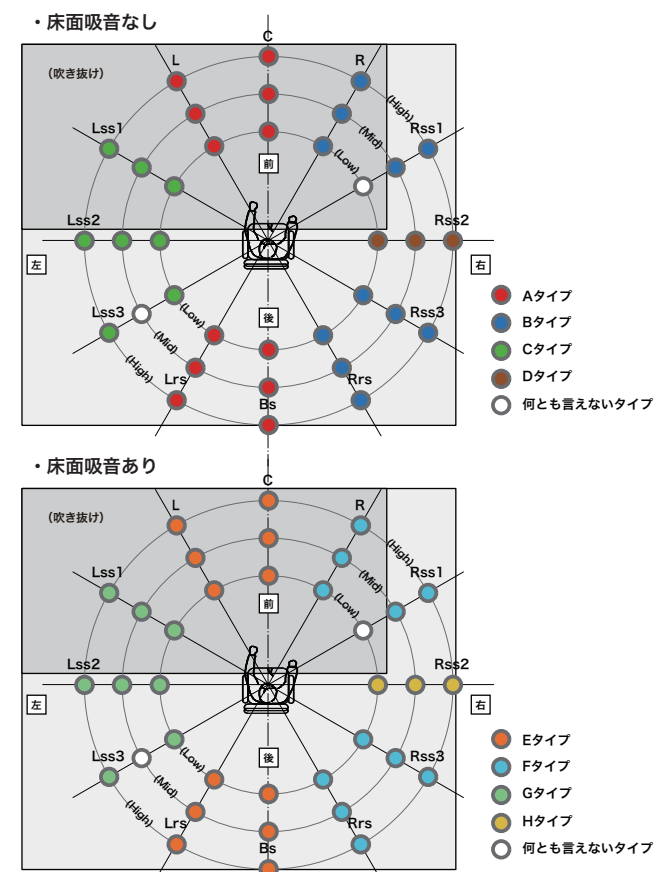


【図11】“床面吸音あり”のグループ分け。“床面吸音なし”と同じように、4つとそのほか（なんとも言えないタイプ）に分けられそうです。

ミ：ほうー、あんなにぐちゃぐちゃだったのに、**結構きれいに分けられた**ねえ。がーさす。これ、どの線がどの場所のスピーカーの特性なんだろう。対応が分かると面白いかも。

ま：なるほど。じゃあ、タイプごとにスピーカーを塗り分けてみましょう。私がやってみるでげす。

えーっと、余りに出来過ぎの分かりやすい結果（【図12】）で隊長もビックリです。これ、台本無しなんです。ホントですよ、信じて下さい。スピーカーの位置を知らずに、ただただ周波数特性だけを眺めて無理やりグループ分けしてみたのですが、この結果！床面吸音ありも無しも、キレイにスピーカーの設置場所に対応してしまいました。どう見ますか、この結果？隊員たちの事前の予想を色々と裏切ってます



【図12】タイプごとにスピーカーを塗り分けてみると・・・

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、モニタース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（登場回数：20 回）

株式会社ソナ 専務取締役 / 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・モニタースystem・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（登場回数：19 回）

株式会社ソナ 設計技術部 部長

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（登場回数：15 回）

株式会社ソナ 設計二課 課長

千葉県出身。趣味は音楽鑑賞と BBQ。分かりやすく現場がスムーズに進行できるような設計を模索しながら日々奮闘中。

りっこ隊員（登場回数：16 回）

株式会社ソナ 設計一課

長野県出身。趣味は散歩と美術館巡り。最近あたらしい楽器を始めてみようと思論中。第一候補は二胡。「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（登場回数：5 回）

株式会社ソナ 設計二課

茨城県出身。イタリア料理を作りすぎて少し飽きている。最近和食にはまっているが、あまりの奥深さに頭を抱えている。正確で素早い音響設計と、見やすい図面が書けるよう日々研究中。

イケイケ・イケウチ製麺隊員（登場回数：2 回）

株式会社ソナ 設計一課

うどん県（香川県）出身。最近ボレダリングとピアノを始めました。時間に余裕がある時は自宅録音と DTM でミキシングをしています。仕事では営業、建築、音響、施工が出来るように勉強中。

イーデーデー IDE 隊員（登場回数：2 回）

株式会社ソナ 設計一課

大阪府出身。ツッコミ担当。頭の中のロックンロールが鳴りやみません。新社会人ならではのドキドキを大切にしながら、意欲的にスタジオ設計のいろはを習得中。

御質問等は、Pro@miroc.co.jp まで！

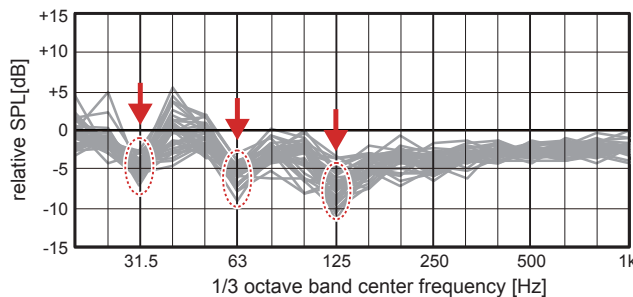
よね。色々な事が言えそうですが、まずは部屋の“前後”方向できれいに対称に塗り分けられたこと。吹き抜けの影響は相対的には大きくないですね。それから、私としてはこれがかなり意外でしたが、床反射の事も含めて、高さ（High/Mid/Low）の違いは塗り分けが変わるほどの違いはもたらさないということです。細かく見ていけばもちろん違いはあるはずですが、36 台のおおまかなグループ分けと言うレベルだと、どうやら高さよりも平面的な位置の方が支配的なようです。

L と R のスピーカー 2 本くらいならばともかく、近年導入が進む“イマーシブ”のように多数のスピーカーを使うシステムでは、全てのスピーカーに個別に建築的な対処をするということはまず無理です。それを考えると、まことにラフではありますが 36 本のスピーカーをせいぜい 4 つ程度のタイプにグループ分けできたと言うことは、少ない種類の対処の方法で全体をカバーできるという可能性を感じさせる、とても意味のある結果・・・、だと私は思っていますが、皆さんどうですか？

ま：床面吸音有り無しの違いはどうだったんだろう。狙い通りだったかな。

イケ麺：これもまずは細かく観察する前に“大雑把作戦”で全体の傾向を見て見ましょう。[床面吸音あり]と[床面吸音なし]の差分を36ペア分としてグラフにしてみました（【図13】）。

イーデ：これもちょっと意外ですねあ。床反射の影響が出る周波数帯域はスピーカーの高さによって違うはずだから、吸音の影響が出る帯域もスピーカーの高さ次第かと思ったけど、**全部のスピーカーに対して31.5、63、125[Hz]って同じ帯域で押し下げる似たような傾向**になってますデス。（多分、次号につづく。多分。）



【図13】“床面吸音あり”と“床面吸音なし”の差。36本の線がうようよしています。

ミカミタカシの隊長日記

測定しっぱなしですみません！今回は“測定大会”ということでどうぞご容赦。「なぜそうなるのか」「どうすればどうなるのか」については、次回への宿題ということにさせて下さい。次は“分析大会”？ではまた、乞うご期待。