

パーソナル・スタジオ設計の音響学 その30
 特別編「音響設計実践道場」1/1の世界で音響設計！
 ～第十一回 模型を吸音してみよう～

吸音と低域特性

(中原 雅考)

部屋を吸音することによって低域の周波数特性は変化します。

前回のおさらいになりますが、下図は部屋の吸音率を変化させた場合の周波数特性の変化の例です。

このように、低域の吸音は

モードのピークの抑え込み（ダンピング）といった効果だけではなく、ディップを持ち上げる効果もあります。

(たまに深くなるディップもありますが…)

吸音すると、ピークが抑えられるだけでなく、持ち上がる周波数も出てくるということになります。

低域においては、「吸音＝音を吸い取る」といった単純な役割ではなさそうです。



前回、隊員の皆様には「12dB ブースト」や「ピークダンピング」などの技を駆使して頂き
 模型実験のデータと比較できるように MIL での実測データを綺麗にマスタリングして頂きました。

しかしながら上記のとおり吸音が周波数特性に与える影響はなかなか複雑で
 計算処理によるマスタリング作業では模型と MIL の吸音の違いの壁は完全には払拭できなかったようです。



ということで「実験」です。

今回、隊員の皆様には、実物の MIL と同じ響きになるように模型の MIL を吸音して頂きます。

実物の MIL の残響時間と模型の MIL の残響時間は既に分かっています。

それらのデータから模型の MIL の何 Hz をどの程度吸音しないといけなは計算で導くことができます。

そうすると、その吸音特性に合致する材料を見つければよいということになります。

隊員の皆さんに、1/10 の世界の吸音に良い材料を見つけていただきましょう。

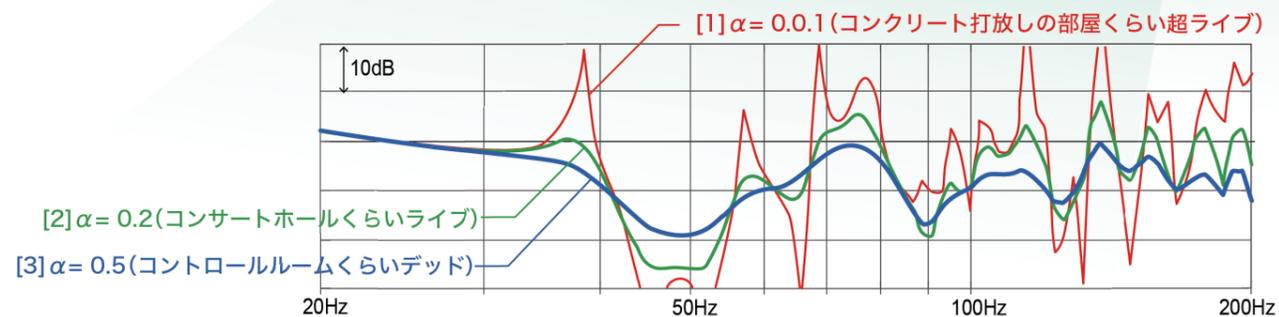
例えばスタジオでよく使われる吸音材のグラスウール。1/10 模型で模倣する場合には厚さを 1/10 にすれば良いでしょうか？

建築模型ではそれでも良いかも知れませんが、音響模型では吸音特性が 10 倍の周波数にシフトしないと NG です。

1/10 の世界ではグラスウールの繊維は 10 倍の太さに見えてしまいます。どうやら、厚さが 1/10 でも音響的には別物のようです。

音響の模型実験では、例えばガラスの代わりにアルミ板が使用されることがしばしばあります。

音響模型では、見た目では無く音響特性が 1/10 になる材料を見つけることが重要です。



～前回までの復習～

MIL (実物) の音響設計に 1/10 模型で測定した結果を役立たせるため、さまざまな方法を試してきました。読者のみなさま、長々とお付き合いありがとうございます……！
 そして、ついに我々は以下の 3 つの手順を踏むことで 1/10 模型の低域特性を操り、MIL 実測値に近づけられるかも！？
 というところまで辿り着くことができたのです。

STEP ① クロスオーバー EQ (Mid と Low の特性を合成)

STEP ② ローブースト EQ (模型スピーカの低域を補強)

STEP ③ モードダンピング EQ (MIL の吸音特性を模擬)

これらの EQ をかけることで MIL 実測値に少しずつ近づいてきたものの、前回の全チャンネル解析の結果、惜しいポイントがいくつか残っていることがわかりました。

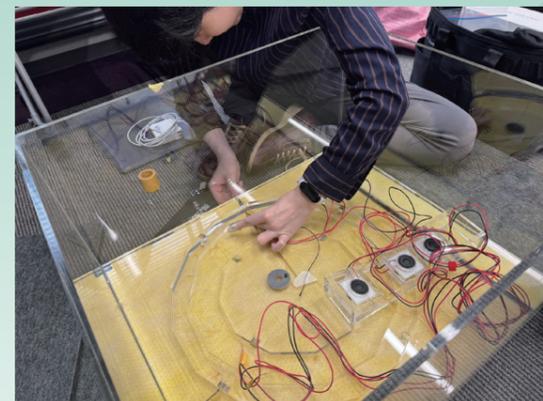
ピーク・ディップの位置がすこしだけズレたら合いそうなもの、全体の特性は似ているのに 1/10 模型だけ特定の周波数にディップが出てしまっているもの……。

もっと MIL (実物) に近づけるには、どうしたらよいでしょうか。我々は「モードダンピング EQ を使う代わりに、実際に 1/10 模型を吸音したり、家具を設置する必要があるのでは？」という仮説を立てました。そこで今回は吸音材探しからスタートです。

(3 つの EQ について詳しく復習するなら
 Proceed Magazine 2023 No.28 と 2023-
 2024 No.29 p.122-123 を参照よ！)



最適な吸音材を探せ！



【図 1】 模型復活

まっつん隊員 (以下、ま)：ひさびさの模型実験！気合いが入るでげす。マイクのケーブルはこの穴を通して……と。

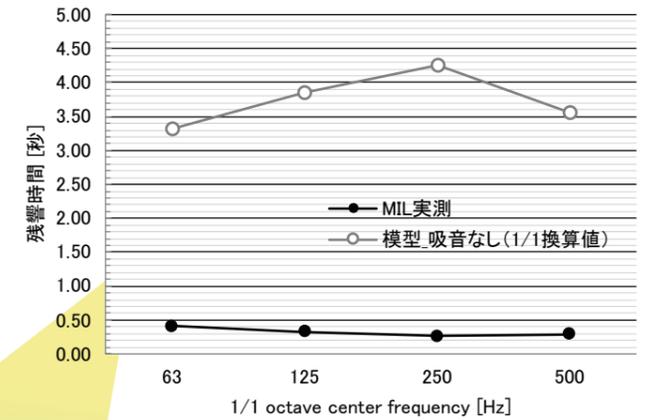
えりっご隊長 (以下、え)：大体組み上がったわね。パーツは足りたかな……。

イケイケ・イケウチ製麺隊員 (以下、イケ麺)：模型用の薄型スピーカーを発見しました！音も問題なく出そうです。

りっこ隊長 (以下、り)：久しぶりに見るとでっかいわね。今回はこれを吸音して測定よ！とりあえずグラスウールでも貼ってみる？

ま：ちょっと待つでげす。Dr. 中原が「音響特性が 1/10 になる材料を見つけるべし」と言っていたでげす。

イケ麺：そうでした。MIL (実物) の平均吸音率に合わせてちゃんと設計しましょう。ここが音響的センスの見せどころです。



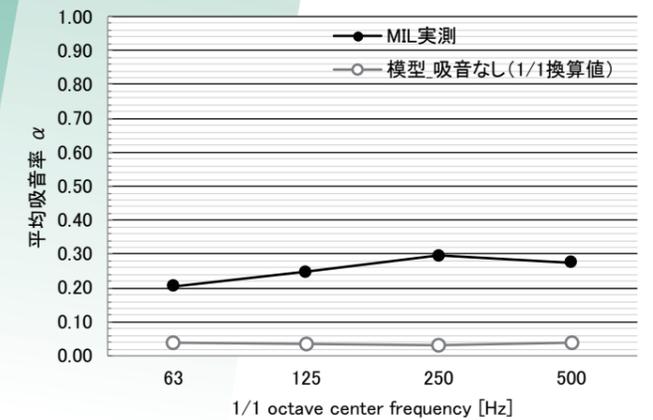
	残響時間 [秒]			
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
MIL 実測	0.41	0.33	0.27	0.29
1/10 模型 (1/1 換算値) 吸音なし	3.33	3.85	4.25	3.55

【図 2】 MIL (実物) と 1/10 模型の残響時間

吸音率 α の算出方法は覚えていますか？
 吸音率は部屋の残響時間 T[s] と部屋の容積 V[m³] と総評面積 S[m²] から算出できます。詳しくは「Proceed Magazine 2011 Nov. No.5 高域の世界」を参照ください。

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

	V [m ³]	S [m ²]
1/10 模型 (1/1 換算値)	136.0	161.7
MIL (実物)	104.1	179.3



	平均吸音率 α			
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
MIL 実測	0.20	0.25	0.29	0.28
1/10 模型 (1/1 換算値) 吸音なし	0.04	0.03	0.03	0.04

【図 3】 MIL (実物) と 1/10 模型の平均吸音率

え：じゃあ改めて MIL (実物) の残響時間と平均吸音率を整理してみましようか。

り：実物と模型はスケールが違っているから、模型の測定値は 1/1 スケールに換算する必要があるのよね。

ま：例えば 1/10 模型の残響時間 0.35 秒 @5kHz (測定値) を 1/1 換算すると、3.5 秒 @500Hz ってことになるでげす。残響時間 3.5 秒って一般的なコンサートホールより長いでげすよ。

え：こうしてみると模型がツルピカで響きまくっていることがよくわかるわね。吸音が全然足りないわ。MIL の平均吸音率は 0.2 ~ 0.3 あたりだから、Dr. 中原のグラフによればコンサートホールとコン

トロールルームの間を目指す感じかしら。

り：そうね。ツルピカ模型をMIL（実物）の響きに近づけるにはどんな吸音材を選ぶべきかな？・・・そうだわ！こんな時こそ私たちのパイプルの番よ！

え：建築音響設計者の必読書、『建築環境音響学（前川 純一・森本 政之・阪上 公博 著／共立出版）』ね！ソナ独自のデータベースもあることだし、この中から探してみましょ。

イケ麺：膨大なデータベースから使えそうな材料をピックアップしてみましたよ【表1】。でも高い周波数を吸音し過ぎていたり、低い周波数の吸音が足りなかったり、ちょうど良いのがなかなか・・・。

ま：この「パイルカーペット」（赤枠）の数値が使えそうぞ。1/1スケールで $\alpha = 0.25@1\text{kHz}$ ということは1/10模型の世界では $\alpha = 0.25@100\text{Hz}$ ぞげすね。

え：もう少し比べやすくするためにドンピシャな周波数の値がほしいわね。吸音率の表を補間して1/10スケールに変換できない？

ま：500Hzや1kHzみたいな元からある値の間をそれっぽく補間してみたぞ【図4】。いかがぞげしよ。

【表1】 建築材料（1/1スケール）の吸音率一覧表から抜粋

部材詳細	周波数 [Hz]								
	32	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
カーペット	0.04	0.03	0.02	0.03	0.05	0.08	0.12	0.15	0.15
ニードルパンチカーペット	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06	0.10	0.20	0.35	0.43
パイルカーペット	0.11	0.10	0.09	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.45
パイルカーペット + フェルト 3T	0.11	0.11	0.11	0.14	0.37	0.43	0.27	0.25	0.24
ボンシクタフテッドカーペット	0.10	0.09	0.08	0.09	0.23	0.38	0.65	0.78	0.85

32		63		125		250		500		1000		2000		4000		8000	
0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.13	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.33	0.40	0.42	0.45			



【図4】 吸音率を補間するグラフ（赤丸は元々一覧表にあった値）

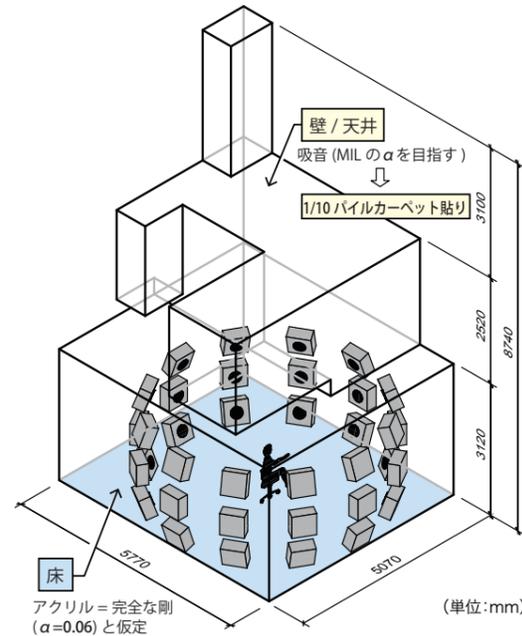
り：それっぽいわ！じゃ、この値を使って吸音後の予測値を計算してみてくれる？

イケ麺：はい！床を反射面（アクリル $\alpha = 0.06$ ）、壁・天井を吸音面（1/10パイルカーペット）と想定して、模型を吸音した場合の吸音率（予測値）を計算してみました【図5】【図6】。

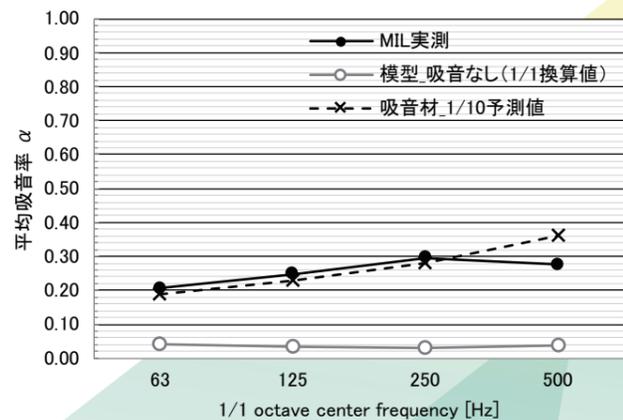
え：おお～！やるじゃん！微妙～に足りてない周波数もあるけど良い感じなんじゃない？

り：でも「パイルカーペット」って一言でいっても、実際厚さとか色々あるし、カットパイルとループパイルでも質感がだいぶ違うのよね。（表面の毛足がループ状になっているのがループパイル、ループをカットしてモフモフになっているのがカットパイルよ。）

え：う～ん。何か良い材料はないかしら。簡単に手に入って、切りやすくてお手頃でそれっぽく吸音しそうなものは・・・。



【図5】 1/10 模型の模式図
アクリルの床は音響的に剛な面として壁と天井を吸音します。床の平均吸音率 ($\alpha = 0.06$) は模型（吸音なし）の測定値から算出しました。壁・天井を「1/10パイルカーペット」で吸音するとどうなるでしょうか？

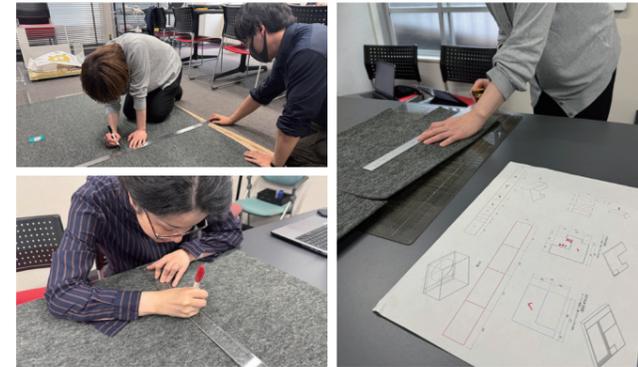


		平均吸音率 α			
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
MIL 実測	1/10 模型 吸音なし	0.20	0.25	0.29	0.28
MIL 実測	床反射 / 吸音予測値	0.19	0.23	0.28	0.36

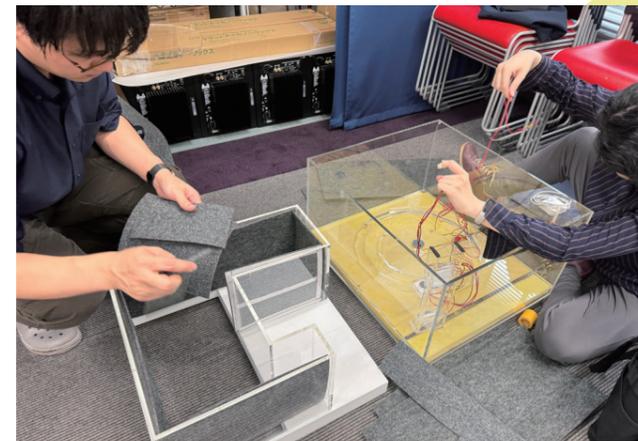
【図6】 平均吸音率（壁・天井に「パイルカーペット」を貼った場合）
250Hz以下の吸音率がうっすら足りていませんね。でもここまで近づけられれば上出来でしょう！

【表2】 選ばれた実際の建築材料

	①ニードルパンチカーペット	②ロールカーペット（ループパイル）
材料	OC9002-182[TOLI]	FYR-1024[sangetsu]
寸法	W1820 x L2000 x t4	W910 x L2730 x t7



【図7】 工作風景 型紙作り→墨出し→カットに至るまで、建築科出身のえりっ隊長とまっくん隊員にお任せあれ！



【図8】イケ麺工務店の吸音工事(左)とまっくんシステムのワイヤリング作業(右)

ま：悩んでいても始まらない！会社の資材置き場から、端材をいろいろ集めて来るぞげす～♪

え・り：（相変わらず行動が速い！）

イケ麺：端材活用は工務店の特権ですよ。集めた材料の中で使えそうなのは【表2】の2種類でしょうか。

ま：①ニードルパンチカーペット（以下、ニードルパンチ）は繊維が絡まったようなフェルト状の材質で表面が比較的フラット。②ロールカーペット（以下、ロール）は毛足がループパイルになっている長尺のカーペットぞげす。

え：よ～し！さっそく工作開始よ！割付図を準備しておいたわ。

ま：大学で模型をいっっぱい作ったので材料カットはお手のものぞげす。カッターは黒刃しか勝たん！

り：（わ～速すぎて手を切りそう・・・。）じゃあ私は墨出しをしようかな。流れ作業で描いて切って貼り付けていくわよ！

イケ麺：どちらもくっつきにくい材質ですが、きのう現場でもらってきたこの「超くっつく両面テープ」があれば完璧ぞす。さくっと終わらせましょ！

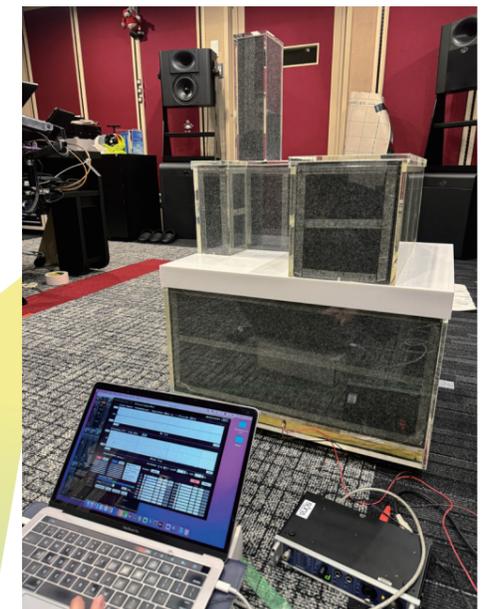
~~~~~しばし工作中~~~~~

イケ麺：やっと完成しました～！4人掛かりでカットに半日・・・【図9】。

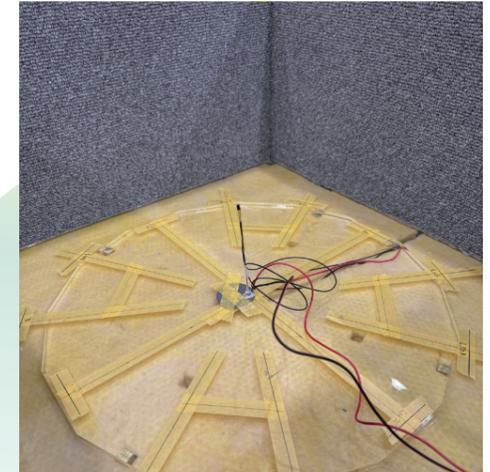
り：は～腰痛い。手がプルプルするわ・・・。

ま：さ～てさておまぢかね！つぎは模型の壁・天井を吸音して測定してみぞげす！（わくわく♪）

え・り・イケ麺：（う、嘘でしょ・・・元気すぎる・・・。）



【図9】 完成！そして測定（ニードルパンチカーペットで吸音した様子）



【図10】 ロールカーペット貼りの室内  
床の魔法陣みたいな線はスピーカーの墨出しテープぞす。12カ所の位置出しにも～苦勞！

## 結果はいかに...?

ま：は～～楽しかった～～！

イケ麺：測定が久しぶりすぎて熱中しちゃいましたね。

ま：流れを掴めばこっちのもんぞげす。

え・り：（っっっ！ひ、ひざと腰がっ・・・）

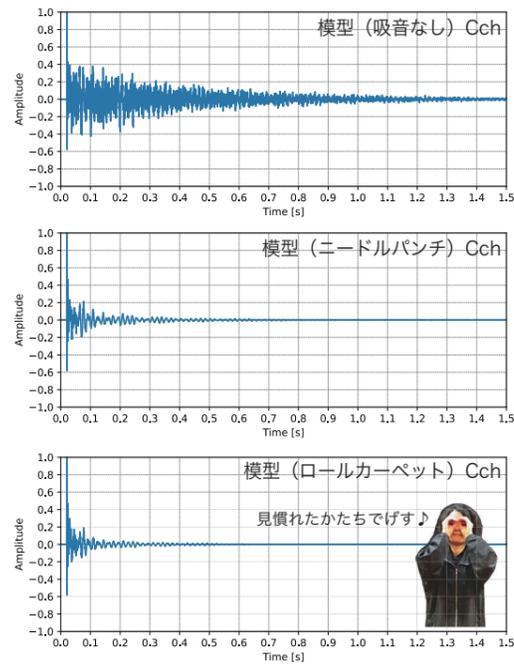
え：ふ～・・・（深呼吸）。よし。結果をみていきましょうか。

ま：さ～じゃんじゃんいくぞげすよ。まずは比較のために測定したインパルス応答を並べてみたぞげす【図11】。

イケ麺：すごい！全然違う。吸音の効果が一目瞭然ぞすね！

り：そっかさっか。イケ麺隊員は模型を吸音するの初めてだもんね。えりっ隊長とわたしは散々グラスウールまみれになったものよ・・・（遠い目）。

え：たまねぎ吸音棒も良い思い出だわ・・・。さておき、1/10 模型（吸音なし）のインパルス応答は建築音響の教科書に載っているような杉の木形状ね。



【図11】インパルス応答の測定結果  
吸音なしと吸音ありの違いは明白！

①ニードルパンチと②ロールカーペットは同じような波形に見えますが・・・  
きも〜ちロールカーペットの方が反射の密度が少ないかも？

ま：①ニードルパンチと②ロールは私たちがよく見るスタジオのインパルス応答っぽいでげす。それでもちょっと長めかな？

え：測定結果を1/1に換算して整理しましょう。時間を10倍に引き伸ばして吸音率を算出してね。このひと手間を忘れるとまったく違う結果になってしまうので要注意よ！

り：どお？吸音材選びはうまくいっているかな？

イケ麺：あれ・・・？予測値と比較すると全体的に吸音率が低いんですか？【図12】②ロールの方は結構吸音していますけど・・・

ま：②ロールの方が成績は良いけど、MILの平均吸音率を目指すという視点でみると125Hzと63Hzの吸音がぜんぜん足りていないでげす。

り：つまりMIL(実物)と同じだけ吸音することはできなかったということね。原因はなんだろう？

イケ麺：う〜ん・・・。なぜだ・・・あ！ちょっと待ってください。パイプルの表を見直してみたんですけど、「パイルカーペット厚10mm」って書いてありましたよ。

え：え〜っ！！なんたるポカミス！今回使ったロールカーペットは厚さ7mmだったわよね。1/1換算するとその差は3cm。それなりの差になりそうだけど、それにしただってこんなに違うものかしら。

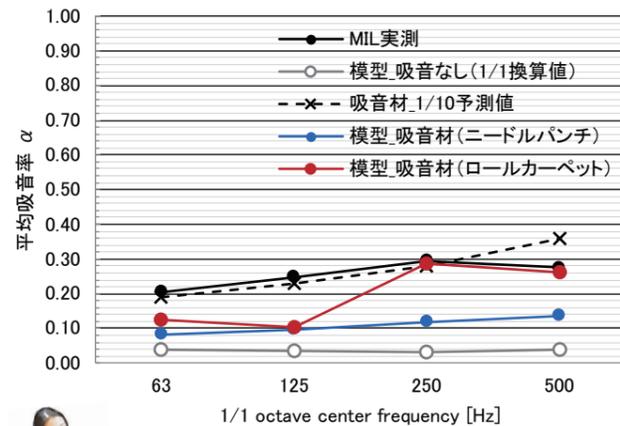
り：パイプルの載っていた「パイルカーペット」は厚くてモフモフな毛足の長いゴージャスカーペットなのかもしれないわね。

イケ麺：裏地の材質もモノによって違いますし、もう少し色々なカーペットを集めた方がよさそうですね。

ま：吸音材料当てクイズは惨敗でげす・・・。Dr. 中原に「まだまだですな〜」っていわれるでげすっ！ぐ、ぐやじい〜。

り：まあまあ落ち着いて。たしかに私たちの音響的センスはまだまだかもしれないけど、のびしろがあるって考えましょ。

え：それにせっかくながらばって測定したんだし、周波数特性のグラ



予測通りにいかないものね。  
125Hz(実物換算1.25kHz)以下を  
もっと吸音するには・・・？

|                      |                | 平均吸音率 α |       |       |       |
|----------------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
|                      |                | 63Hz    | 125Hz | 250Hz | 500Hz |
| MIL 実測               |                | 0.20    | 0.25  | 0.29  | 0.28  |
| 1/10 模型<br>(1/1 換算値) | 吸音なし           | 0.04    | 0.03  | 0.03  | 0.04  |
|                      | 床反射 / 吸音予測値    | 0.19    | 0.23  | 0.28  | 0.36  |
|                      | 床反射 / ニードルパンチ  | 0.08    | 0.10  | 0.12  | 0.14  |
|                      | 床反射 / ロールカーペット | 0.12    | 0.10  | 0.29  | 0.26  |

【図12】平均吸音率(1/1換算値)

①ニードルパンチカーペットと②ロールカーペットの吸音率には  
だいぶ差があるようです。予測値と比べると・・・

フも眺めてみない？

イケ麺：そうですね。前回までに検証してきた「モードダンブEQ」が実際に吸音した測定結果と似ているかも比べてみたいでげす。

### ■モードダンブEQと吸音の効果を比べてみよう

え：前は全チャンネル測定をしたあと、似たもの同士でグルーピングしたのよね。

ま：げすげす。4つのグループ+その他に分けたでげす。

イケ麺：MIL(実物)と比較して、

- 50Hz付近のディップが目立つグループ
- ディップやピークが左にズレたら似るグループ
- 100Hzのディップが目立つグループ
- 50Hzのディップが右にズレたら似るグループ(ひとつだけ)でしたよ。

り：その通り！よく覚えてるね。その中の●と●から1チャンネルだけみてみましょう。【図13】は●のグループからCチャンネルを抜粋したわ。緑の線が今回の吸音(②ロール)の結果、グレーがモードダンブEQの結果、黒がMILの実測値よ。ちなみにモードダンブEQをかける前の結果はグレーの破線にしておいたわ。

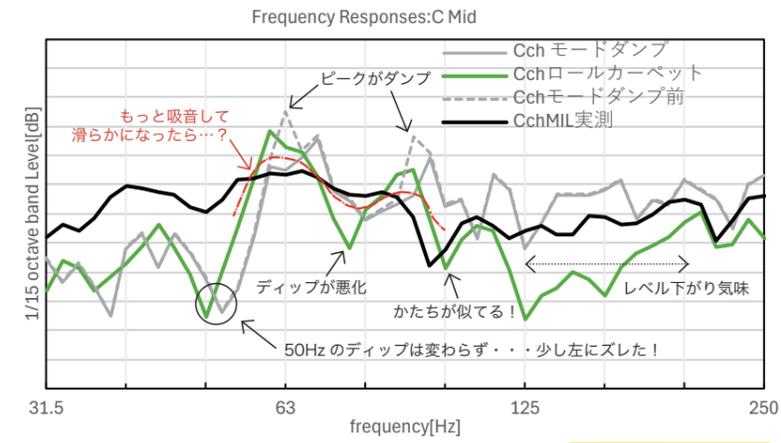
イケ麺：50Hzのディップはあいかわらずですが、全体的にトゲトゲが減っているように見えます！

え：63Hzあたりの山がダンブされる様子はピークダンブEQでも再現できていると言ってもよさそう。ディップが悪化しているところもあるけど・・・。

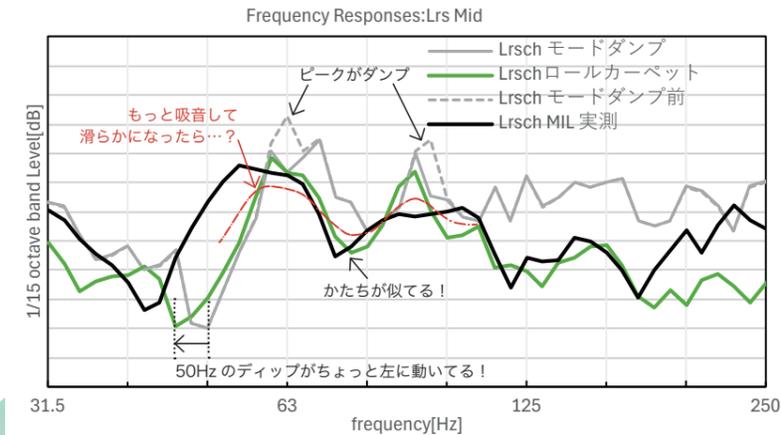
ま：50Hzの目立ったディップは吸音以外の影響かもしれないでげすね。模型で再現できていない部屋のかたちとか、家具とか。

り：右半分、125~200Hzあたりで急激にレベルが下がっているのが気になるけど・・・。とりあえず次、【図14】にいきましょう。●のグループからLrsチャンネルの結果よ。

イケ麺：50Hzのディップが左にちょっと動きましたね！MIL(実



【図13】Cチャンネル(Mid)の周波数特性のグラフ【50Hzのディップが目立つグループ】



【図14】Lrsチャンネル(Mid)の周波数特性のグラフ【ディップが左にズレたら似るグループ】

物)に近づいているのでは？Cチャンネルと同じく63Hzの山のダンブはピークダンブEQでかなり再現できてますね。

ま：80HzあたりのディップがMIL(実測)に似てきてるでげす。薄目〜で見るとだいぶシルエットが近づいている気がしませんか？

え：たしかに！モードダンブEQのグラフより実測に似ているわ。Cチャンネルの50Hzのディップの謎は残るけど、大きな山のダンブはピークダンブEQで再現できる可能性が高いことはひとつの結論になりそうね。それに、今回の測定は125Hz以下の吸音が不足しているわけだから・・・

イケ麺：もっと吸音されたら図中の赤線みたいになめらか〜に変身してMIL(実物)に近づくのかもしれないね！

り：そう考えると夢があるわね。となると、やっぱり続・吸音材探しの旅に出るしかないか。今回はここまでかしら。では、またね！



【おまけ】模型を光らせるひとたち(真剣)  
TOP写真はいつも試行錯誤を重ねて撮影しています。遊んでいるように見えるでしょう？いやいや、これ、めっちゃ真剣なんです！模型を光らせ、人形たちにポーズを取らせて今回も頑張りました。  
右のきれいな置き物は、本編でお預けになっている1/10模型用の家具(スピーカースタンド(ダミー))です。次号もどうぞお楽しみに！！

隊員日報

既読

え

久しぶりの模型実験だったけど、みんなどうだった？

既読

り

前は4号前だったから、約2年ぶり?! 時間が経つのは早いわね・・・

既読

ま

マイクのケーブル、どこから出すかすぐ思い出せなかったでげす。

既読

り

でもやり始めたらさすがに体が覚えて、場面転換もサクサクとできてたよ。

既読

麺

吸音材切り出し作業、みんなでやって良かったでげす。ひとりだったら徹夜になってたかも。

既読

え

いや、ちゃんと日を分けてやろう。学生時代の体力はもう無いわ。

既読

ま

測定計画、ちゃんと立てていくでげす！

既読

株式会社ソナ (SONA Corporation) <http://www.sona.co.jp>

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。

|                                                                                                                                                            |                                                                                                                                        |                                                                                                                                                |                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>えりっこ隊長<br/>株式会社ソナ 設計技術部 課長<br/>千葉県出身。趣味はCAD新機探しと音楽ライブ鑑賞とビール。まだまだマイブームは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。</p> | <p>りっつ隊長<br/>株式会社ソナ 設計技術部 課長<br/>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。</p> | <p>まっつん隊長<br/>株式会社ソナ 設計技術部<br/>茨城県出身。某国家試験の2次試験のため勉強漬けの毎日です。先日ストレス発散のため音響関連の本を値段を見ずに購入したところ5万円以上散財しました。部屋が本で埋まりそうなので、売れない古本をデータ化しようとしています。</p> | <p>イケイケ・イケウチ製麺隊員<br/>株式会社ソナ 設計技術部<br/>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・ミキシングにハマり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。</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

中原雅考  
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 / 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任ずる」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、知識や経験からの勝手な妄想ではなく、音響理論を図面上の線に直して生み出される「かたち」が本来の設計(デザイン)だと考えているが、その領域にはほど遠い。名言コーナー: Do or do not. There is no try. (Yoda) やるか、やらないかだ。やってみるなどない。(ヨダ)