



パーソナル・スタジオ設計の音響学 その27 特別編「音響設計実践道場」1/1の世界で音響設計！ ～第八回 データ整理編 その1～

スピーカーのローエンド

(中原雅考)

MILスタジオのさらなるグレードアップを目指してスタジオの低域特性の解明に取り組もうとしている隊員たち。

難解な部屋の低域特性を相手にするための良き相棒が「1/10 模型」。

まずは模型での測定値と実際の MIL での測定値との比較から

ということで、前回は全力で模型と実測との比較を試みましたが…

拙速すぎたのか、前回の特性データはどうにも分かりにくい！

データが分かりにくいと技術的判断を誤ってしまう可能性が大きくなってしまいます。

今ならまだ引き返すことができる。

ということで、実測の再測定とデータ整理が今回の隊員の課題となります。

前回の測定データが分かりにくかった理由は二つあります。

一つは、MIL での実測データが、多少ですがモニター調整用の EQ が含まれていたものだったことです。No EQ でのモニター測定はスタジオ測定の基本です。隊員には、再度 No EQ の状態で MIL のモニター特性を測定して頂くことにします（ご苦労様です…）。

二つ目は、低域の特性を比較しようとしてるのに、「模型用のスピーカー」「MIL の Middle Layer のスピーカー」「MIL の High Layer のスピーカー」で低域性能が、バラバラなことです。

「MIL の Middle layer」は、Media Integration & SONA で開発したサブウーファーを使って 4 ウェイに拡張されているので、ローエンドまで綺麗に特性が伸びていますが、「模型」と「MIL の High Layer」は、スピーカー自体の性能で約 60Hz 以下からロールオフした特性となっています。

このようなスピーカーの低域のロールオフは、ウーファードライバーの設計仕様、すなわちドライバーの機械的な性質によって決まってしまう。

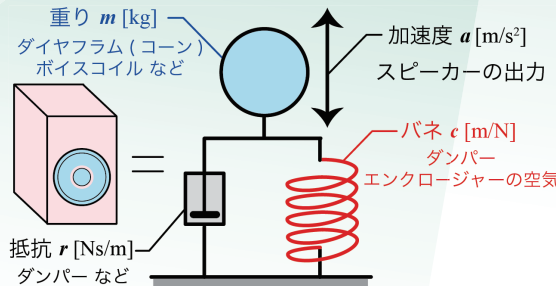
スピーカーのドライバーは、【図 1】のような「重り」と「バネ」と「抵抗」から構成された共振系（一自由度振動系）です。

一般的なスピーカー（直接放射形スピーカー）は、あたかも「重り」が支配的であるようにこの共振系が設計されていて、共振周波数 f_0 以上でのフラットな特性を実現しています。逆に、共振周波数 f_0 以下では減衰特性となり、これがいわゆるスピーカーのローエンド特性となっています。このローエンド特性を決定している共振周波数 f_0 や共振の鋭さ Q は、ウーファードライバーを構成する重り m 、バネ c 、抵抗 r の成分で決まります（式 1）。

「重り」となっているのは、ダイヤフラム（コーン）やボイスコイルの質量 m [kg]、「バネ」となっているのは主にボイスコイルの根元を支えているダンパーのコンプライアンス c [m/N]、「抵抗」はダンパーの抵抗成分 r [Ns/m] などとなります。

さて、今回の測定で低域のロールオフの違いが気になっているスピーカーは全て密閉型のエンクロージャーになりますので、最終的には、ウーファードライバーの「バネ」の成分にエンクロージャーの空気が加算される程度の違いで、動作原理としてはウーファードライバーと同じ一自由度振動系となります。

ということで… この一自由度振動系のローエンドの仕組みを把握できれば、異なるローエンドのスピーカー特性を比較するためのヒントが得られそうですね…



【図 1】密閉型スピーカーは「重り」「バネ」「抵抗」の一自由度振動系

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc}} \text{ [Hz]} \quad Q = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{m}{c}} \quad (\text{式 1})$$

質量制御・加速度制御

(中原雅考)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{c}x = F \quad (\text{式 2})$$

【図 1】の重り（ドライバーのダイヤフラム）が、今 F [N] の力で縦に揺さぶられていて、静止状態から x [m] 動いているとすると、この共振系は（式 2）のような方程式で記述することができます。ここで、 F [N] はボイスコイルに流れる電流とマグネットによって発生する力 $F = Bli$ [N] ということになります。

この共振系がある周波数 f [Hz] で振動しているとすると、変位 x は $x = e^{j\omega t}$ [m] ($\omega = 2\pi f$ [rad/s]) と表現できますので、これを（式 2）に放り込むと、変位 x の周波数特性が（式 3）のように得られます。ちなみに、記号 j は $j = \sqrt{-1}$ で、虚数単位を表しています（大きさだけでなく位相を扱う分野では複素数は必須ですね…）。

$$x = \frac{F}{\frac{1}{c} - m\omega^2 + j\omega r} \text{ [m]} \quad (\text{式 3})$$

さて、直接放射形スピーカーは「重り」が支配的な共振系だといいましたが、これを「質量制御」と呼んでいます。「質量制御」では、最終的な出力、ここではスピーカーの再生音圧になりますが、それが加速度に比例しますので、「加速度制御」とも呼ばれます。ということで、（式 3）で導いた変位 x [m] はまだゴールでは無く、スピーカーの特性を知るためには、その先の加速度 a [m/s²] を求める必要があります。

ところで加速度は、変位 $x = e^{j\omega t}$ [m] を時間 t で 2 回微分したも

のですから、 $a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$ [m/s²] に（式 3）を放り込めば得られます。

ここで、力 F を安定動作時の (f_0 以上でのフラット帯域での) 加速度 a_0 を用いて $F = m a_0$ [N] と表して、

$$mc = \frac{1}{\omega_0^2} \quad \frac{r}{m} = \frac{\omega_0}{Q} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad \omega = 2\pi f$$

などの関係式を利用すると【図 1】の重りの加速度、すなわち密閉型スピーカーの周波数特性は（式 4）のように得られます。

$$a = \frac{a_0}{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - j\frac{1}{Q}\left(\frac{f_0}{f}\right)} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (\text{式 4})$$

それではこの a [m/s²] が、ローエンド近辺、すなわち共振周波数 f_0 [Hz] の前後でどのような特性になるか観察してみましょう。そのために、（式 4）を数学的な近似のテクニックを利用して頂いて簡略化しまして…

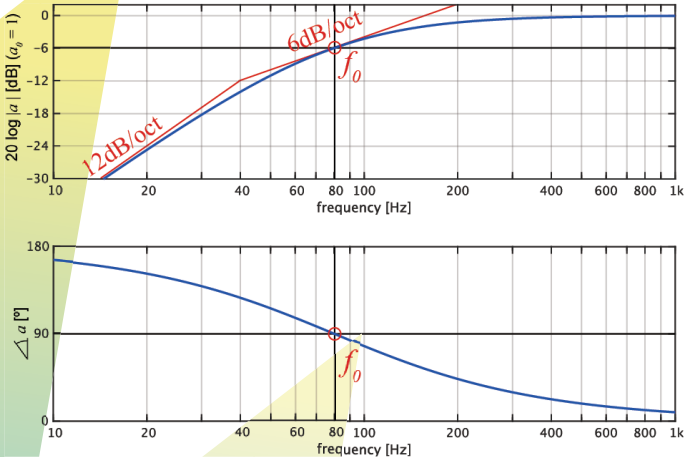
周波数 [Hz]	近似テクニック	加速度（再生特性）
高域 $f \gg f_0$ [Hz]	$\frac{f_0}{f} \approx 0$	$a = a_0$ [m/s²]
カットオフ近傍 $f \approx f_0$ [Hz]	$\left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \approx 1$	$a = ja_0Q \frac{f}{f_0}$ [m/s²]
（カットオフ $f = f_0$ [Hz]	$\frac{f_0}{f} = 1$	$a = ja_0Q$ [m/s²]
低域 $f \ll f_0$ [Hz]	$\frac{f}{f_0} \approx 1$	$a = -a_0 \frac{f^2}{f_0^2}$ [m/s²]

【表 1】加速度制御振動系（密閉型スピーカー）の周波数特性 その 1

【表 1】から、密閉型スピーカの周波数特性は、機械的に以下の様に決まってしまうことが分かります。

f_0 より十分高域	一定値 → フラット
f_0 近傍	大きさ：周波数の一乗に比例 → 6dB/oct 位 相： $j \rightarrow 90^\circ$
f_0 より十分低域	大きさ：周波数の二乗に比例 → 12dB/oct 位 相：マイナス → 180°

【表 2】加速度制御振動系（密閉型スピーカー）の周波数特性 その 2
これを図にすると、こうなります ($a_0=1$ として dB でプロット)。



【図 2】密閉型スピーカのローエンド特性

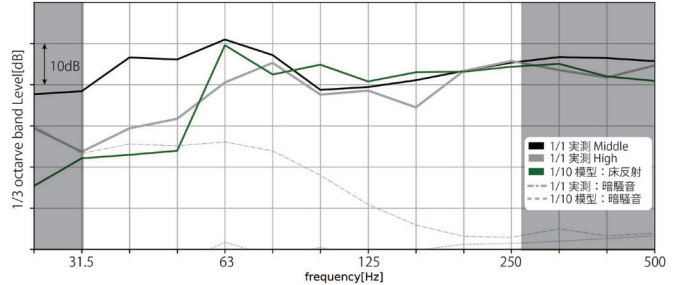
一見様々な個性をもっているように思える密閉型スピーカーの低域特性も、基本性格はみな一緒ということなんですね。ということは、測定に使った密閉型スピーカーの f_0 と Q が把握できれば、【図 2】の青の逆カーブ（（式 4）の逆数）で測定値の低域をフラットな特性に補正できるということに。いやいやそこまでやらなくても、使用したスピーカーの f_0 がなんとなく分かれば、【図 2】の赤（6dB/oct or 12dB/oct）の逆カーブでざっくりと補正できそうです。

MIL 実測（再）結果はいかに！

イーディーデ IDE 隊員（以下、イーデ）：みんな、お待ちどうさま！全チャンネル測定（2 回目）してきたデェ！

まっつん隊員（以下、ま）：前はこっそりピークを叩く EQ をかけちゃってたから、今度は EQ なしの結果が見れるでげすな！

えりっこ隊長（以下、え）：よし、手始めに Cch の結果を見てみましょう！



【図 3】模型と実測 (noEQ) を見比べよう！（Cch）

ここでちょっとだけ MIL のスピーカーについておさらいです。Middle レイヤーは L・C・R には Focal 1000 IWLCR UTOPIA + 特注サブウーファの 4way 仕様、その他のチャンネルは Focal 1000 IWLCR6 + 特注サブウーファの 4way 仕様。High レイヤーは Focal 1000 IW6。1/10 模型のスピーカーはアメリカ製ドライバーを使ったお手製スピーカーを使っています。（え：詳しくは Proceed Magazine 2019-2020 No.21 p.117 参照よ。）

ま：MILのシュレーダー周波数は129Hz^{※1}だったから、2倍の260Hzくらいまでの特性を低域として観察してみるでげす。

イケイケ・イケウチ製麺隊員（以下、イケ麺）：1/3octだとちょっとアレなんで、もっと詳しく見てみましょうよ。

りっこ隊長（以下、り）：それじゃあイーデ隊員、ちゃちゃっと1/15octのグラフに変換よ！・・・あれ？いない？

ま：みんな大変でげす！こんな置き手紙が・・・！！

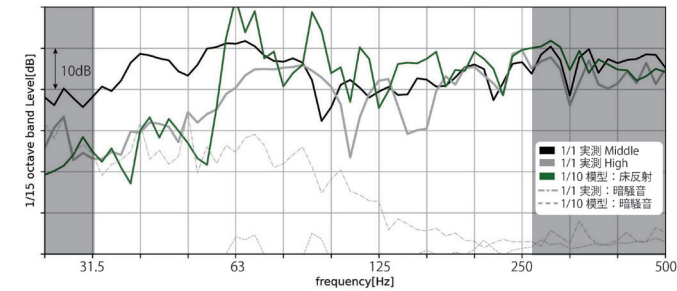
イーデ：《Dear all, I have left SONA and am on my way to the UK. I will train myself as a Padawan again.》

全員：えーっ！？

り：さっきまでいたのに！急すぎて頭が追いつかないわ！

ま：ひとまず代わりに1/15octのグラフにしておいたでげす。

え・り・イケ麺：（す、すごい冷静・・・！）



【図4】Cch比較グラフ ～【図3】の1/15octバージョン～
1/3octでは見えなかった山谷があらわになりました。

イケ麺：前回のEQありの結果もそうだったけど、やっぱり低域の特性がディップなのか、スピーカー自体のロールオフなのか分かりづらい見比べにくいですね。何かしら補正しないとダメっぽいかも。

ま：今回はイーデ隊員が先走ってピークを叩くEQかけちゃってたけど、今度はちゃんとした補正をしたいでげす！

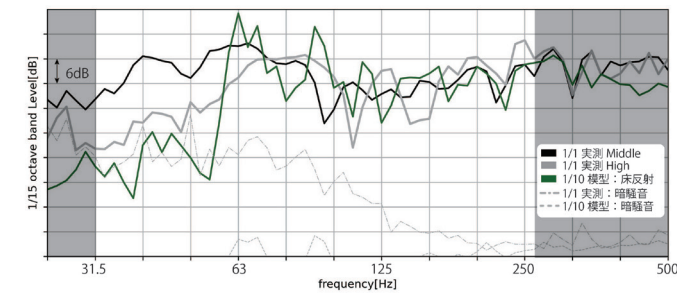
イケ麺：右に同じく！

り：Dr. 中原が言ってたように、ローエンド近辺 (f_0 [Hz]) に逆フィルタ=EQをかけてみましょうよ。

え：ロールオフしてところが6dB/octか12dB/oct. どちらかのカーブが合うみたいだから、近い方を探っていこうか。あ、でもその前に縦の目盛、10dBだとちょっと分かりづらくない・・・？

ま：そう思って目盛はもう6dBにしたでげす！

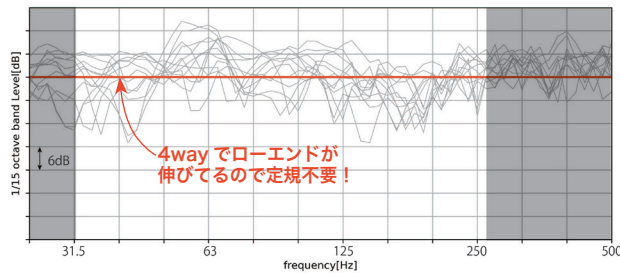
イケ麺：定規ももうあります！我々・低域特性 補正し隊 - にお任せください！



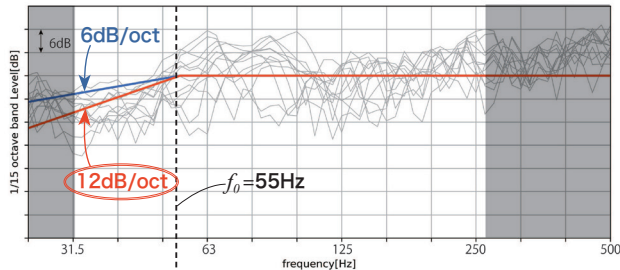
【図5】Cch比較グラフ ～【図4】の6dB目盛バージョン～



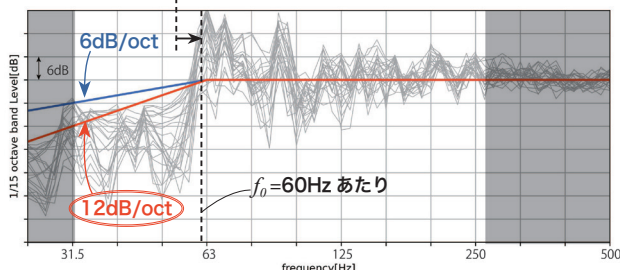
【図6】まつん隊員&イケ麺隊員 改め 低域特性 補正し隊♪



【図7】1/1 実物 Middle レイヤーの全チャンネル測定結果



【図8】1/1 実物 High レイヤーの全チャンネル測定結果



【図9】1/10 模型実験の全チャンネル測定結果

り：実物 Middle レイヤー（【図7】）は4wayのおかげでロールオフしてないから定規はいらないわね。

イケ麺：実物 High レイヤー（【図8】）と1/10 模型実験（【図9】）は、それぞれ f_0 [Hz] に定規を当ててみましたが、両方ともどちらかというと12dB/octカーブの方が近そうですね。

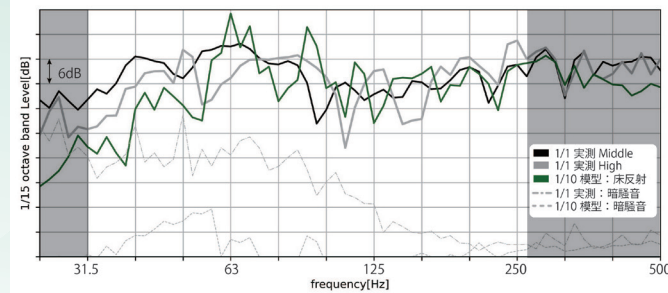
ま：同感！逆カーブから補正用のEQ作ってみたいでげす！

え：早いわね！じゃあ早速【図5】のグラフにそのEQをかけてみましょう。今度こそイーデ隊員、出番よ！・・・ってあれ、まだいないわ。

り：もしかして本当に修行に行っちゃったのかしら・・・。

ま：もうグラフは補正完了してるでげす！！

え・り・イケ麺：（あ、あいかわらず冷静・・・！）



【図10】Cch比較グラフ ～【図5】のEQ補正バージョン～

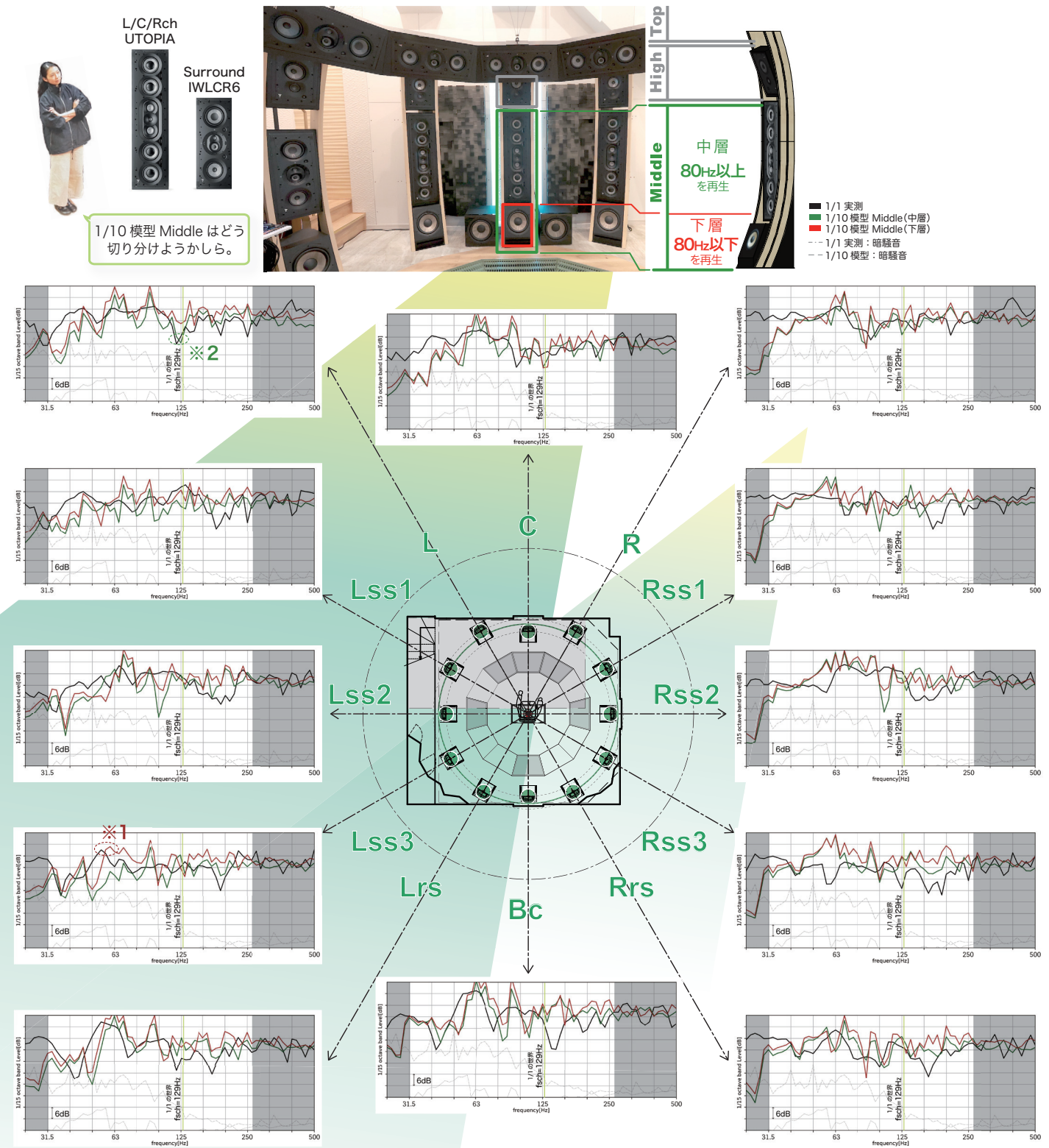
ま：じゃーん！低域が見やすくなったでげす！

え：いい感じじゃない♪この調子で全部の結果を補正して比較してみましょう！

イケ麺：実物は Middle と High でスピーカーが違うからレイヤー別で比較するのが良さそうですね。

り：1/10 模型は床吸音・反射の2パターンで測定したけど、大きな違いがなかったから今回は床反射で整理してみましょう。

レイヤー別 1/1 実測と 1/10 模型のデータ比較



【図11】Middleレイヤー全チャンネル比較

り：実測と模型、山谷の傾向が似てるのもあれば、そうじゃないのも結構あるわね。

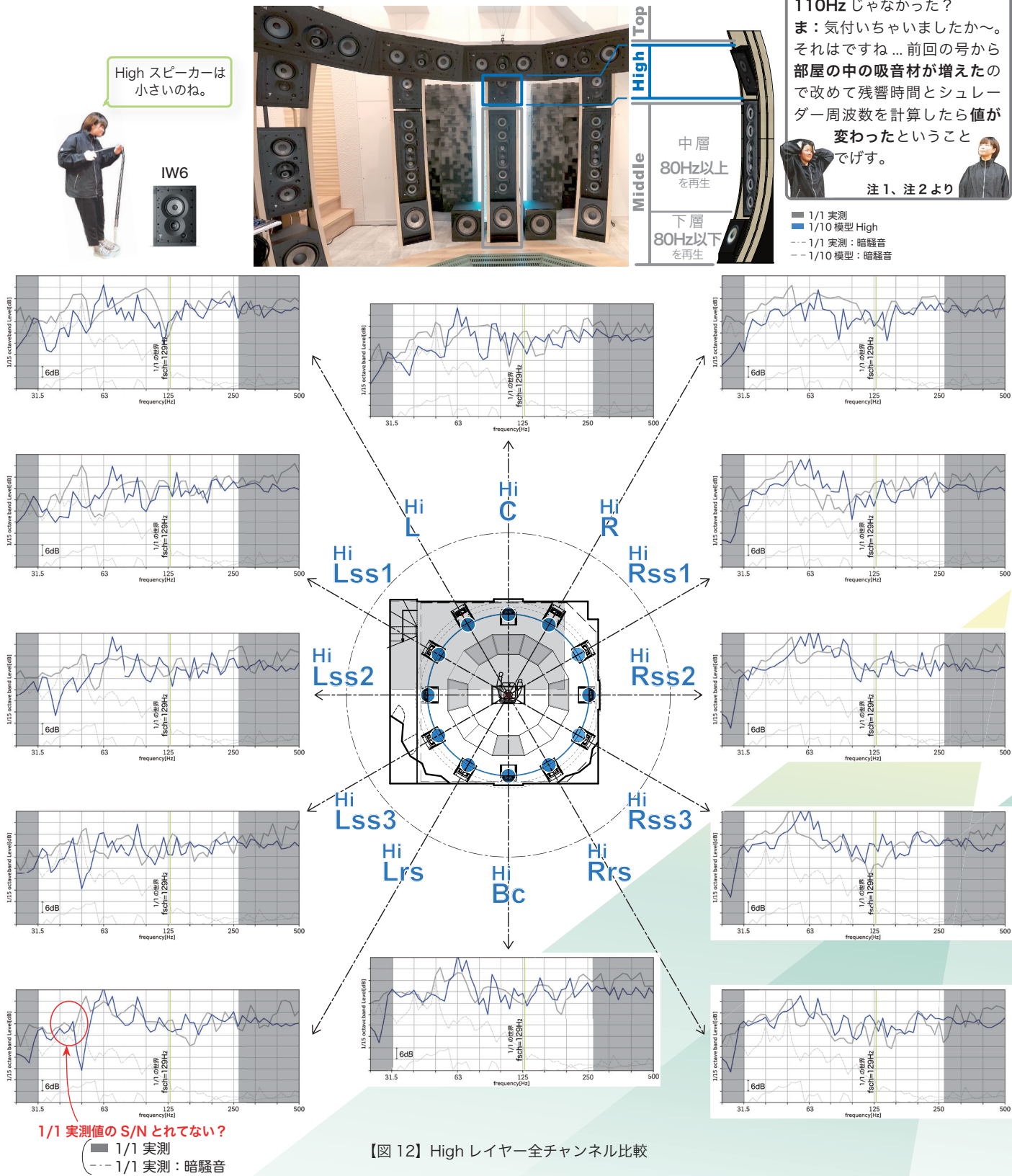
え：模型は緑（中層）と赤（下層）2種類データがあるけど、実測と比較するのはどっちで見比べるのが良さそうかしら？

イケ麺：うーん、チャンネルによってまちまちですね。例えば Lss3 は赤（下層）の63Hzあたりの山[※1]が少し低域にシフトすると実測の山と良い感じに重なりそうだから赤（下層）を採用するのもアリっ

ぽく見えません？

ま：確かにそうも見えるけど、Lだと125Hzあたりの谷[※2]はどう見ても緑（中層）がドンビシャ！って感じでげす。赤か緑、どっちかに絞るのは難しいかもでげす・・・。

り：そうね。チャンネルにもよるけど、MILの4wayスピーカーのクロスオーバーと合わせて模型のデータは80Hz以下は赤（下層）、80Hz以上は緑（中層）を採用してみるってのはどうかしら。



【図 12】 High レイヤー全チャンネル比較

イケ麺：1/1 実測 High レイヤーの方は、どのチャンネルを見ても 50Hz くらいからは暗騒音と測定信号の **S/N** が悪いですね。50Hz 以下は測定できてないってことですかね。

り：MIL の High レイヤーに入ってる **Focal 1000 IW6** って物理的なサイズは小さいけど、低域はどこまで出るのかしら。

ま：カタログには **Bandwidth (+/-3dB) 55Hz - 40kHz** > って書いてあったから、55Hz 以上が再生帯域の目安とするのはどうですか？

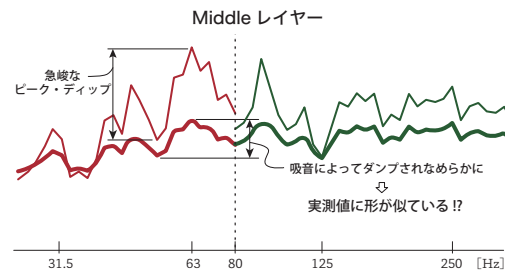
え：いいんじゃない？じゃあ再生帯域以上のグラフだけ比較してみようか。・・・うーん、傾向的には似てるっちゃ似てる気もするけど、

やっぱり 1/10 模型の方はだいぶトゲトゲしいわね。High だけでなく Middle もね。

り：ライブな部屋はピーク・ディップが激しくなって、逆にデッドだと滑らかになるってよく言うじゃない？無響室だと滑らかというかフラットになるっていうアレよ。残響時間って何秒だったっけ？

ま：MIL は約 **0.2 秒³²**、1/10 模型は約 3.5 ~ 4.0 秒 [実物換算] げす！
イケ麺：じゃあまさに 1/10 模型はライブさが影響しちゃってるってことで間違いなさそうですね。

え：それなら 1/10 模型の方を吸音すると【図 13】みたいなイメージでピーク・ディップがダンプされて滑らかになるとしたら、実測デー



【図 13】 吸音すると急峻なピーク・ディップがなめらかになる？ (イメージ)

タと結構良い感じに合ってくるんじゃない？

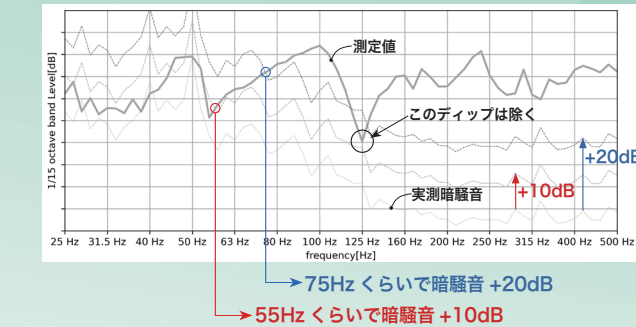
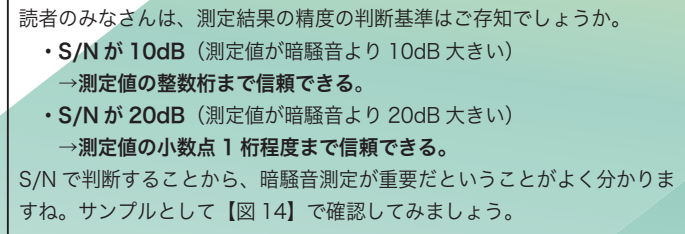
り：なかなか良い方向にまとまってきたんじゃない〜♪

え：あ、ちょっと待って！今気が付いたんだけど、実測は暗騒音もどのチャンネルの測定結果も 50Hz にピークがやたら目立つけど、これは一体何だと思う？

イケ麺：本当だ、確かにありますね。どのチャンネルにもあるということは、z 方向のモードか何かでしょうかね・・・。

ま：もしそうだとすると 1/10 模型の方にも同じピークが出てきそうだけど、そんなこと無いからモードじゃなさそうでげす。

り：それ、電源のハムノイズが乗っかっちゃってるんじゃない？関東は 50Hz だからドンピシャだわ。S/N が悪いのもそれが原因だったようね。他の帯域は S/N とれてるかしら？

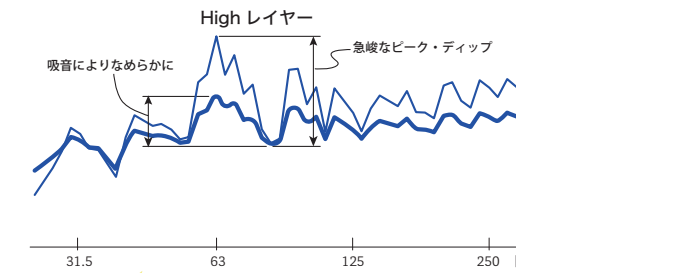


【図 14】 S/N を確認してみましょう (参考：1/1 実測 High Lch)
55Hz 以上で整数桁、75Hz 以上で小数点 1 桁の精度があると読み取れますね。(ただし 100Hz 近辺のディップは除く)

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、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。約 4 年ぶりの声出し解禁フェス & ライブが最高すぎて震えました。
いやぁ "音楽" って本当にいいもんですね〜。
最近 cad の新機能力サーチにハマってます。若者たちに負けないう 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。



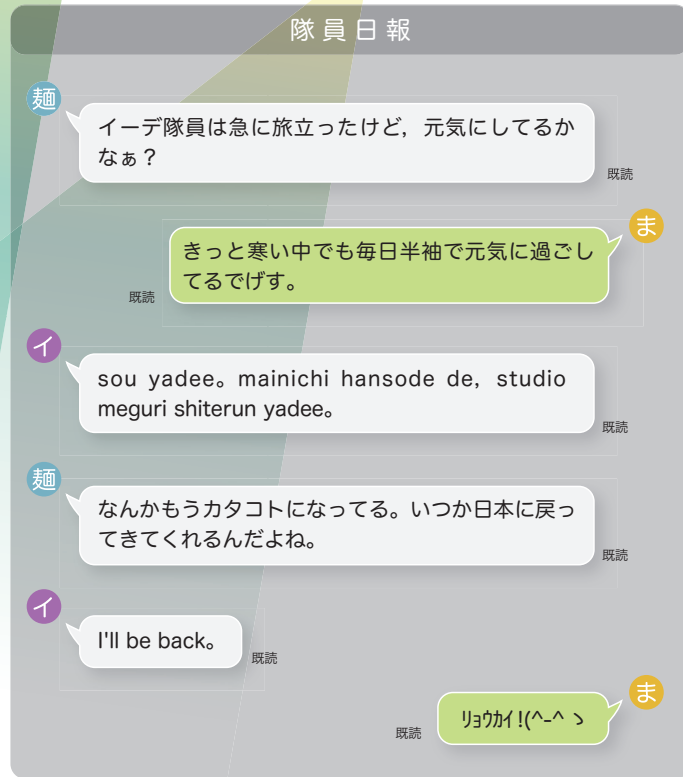
ま：【図 14】は High レイヤーの Lch だけど、他のチャンネルも確認した方が良いのではないでげすか？

え：そうね。でも今回は残りのスペースも少ないから次回への宿題にしましょう。

イケ麺：Middle レイヤーの 1/10 模型データは、80Hz 以下は下層・80Hz 以上は中層を採用して 1 つのグラフにまとめておきます！

り：1/10 模型に吸音材入れて測定してみて、本当にピーク・ディップがダンプされるのかも検証してみたくない？

ま・イケ麺：手でスピーカーを移動した日々が懐かしい・・・
データ整理編 〜その 2〜 に続く。



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メー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：強く辛辣な言葉は、根拠が弱いことを示している。(ヴィクトル・ユーゴー)

まつつん隊長
株式会社ソナ 設計技術部
茨城県出身。旅行ができないので、自宅ピアノを弾いているが、ピアノから伝わる固体伝搬音が気に入る、防振対策をしようとしている。音響理論を建築に落とし込み、実現させるにはどうすれば良いか日々頭を悩ませている。

イケイケ・イケウチ製麺隊長
株式会社ソナ 設計技術部
うどん県 (香川県) 出身。ピアノやゲームはとりあえず中断... 一級建築士の資格勉強にすべての時間を費やします！次回も同じ文章であれば察してください...