

パーソナル・スタジオ設計の音響学 その23 特別編「音響設計実践道場」1/1の世界で音響設計！ ～第四回 ロビングエラー～

360から4πへ

(中原雅考)

いよいよ今回から二人隊長による新時代の幕開けです。

新隊長が下積みに励んでいた間に
スタジオ業界もイマーシブの時代に入っています。

●
音響再生には「音質」と「音場」の二つの側面があります。

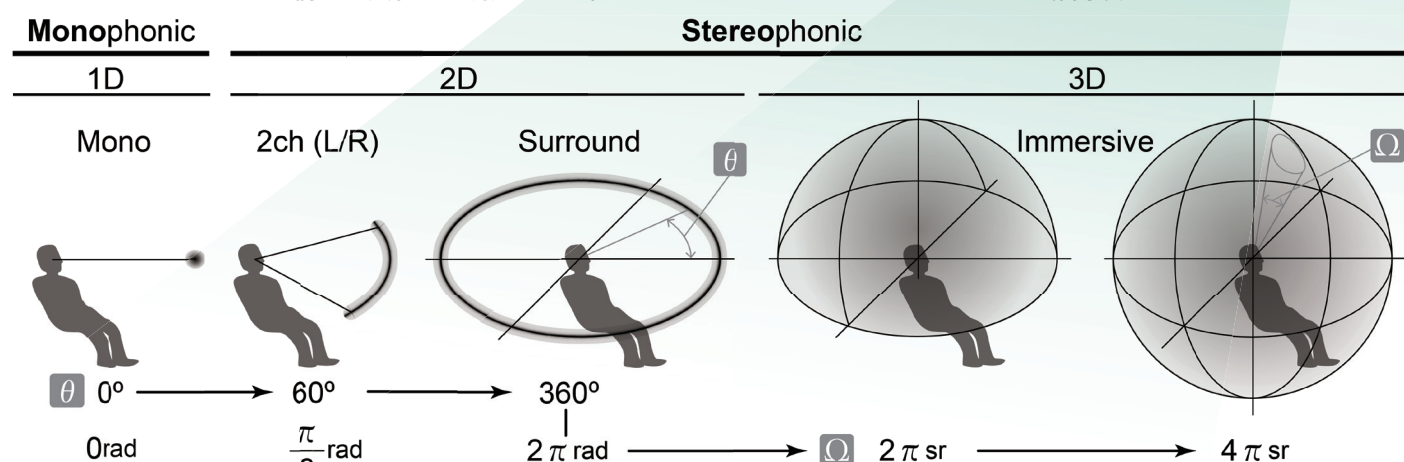
どちらも究極の音響再生を目指して日進月歩ですが
音質に関しては、ハイサンプリング、ハイビット、アナログ特性改善など
いわばゴールの無い永遠の道のりといえるでしょう。

一方、音場に関しては
モノから2チャンネルステレオ、そしてサラウンドで360°まで拡張された2D時代を経て
いよいよ3Dのイマーシブ時代の到来です。

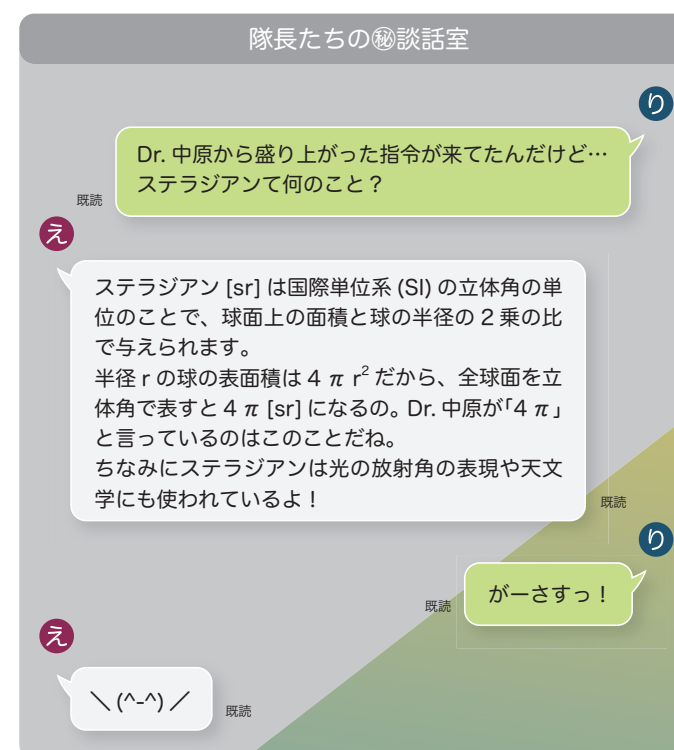
●
360°を超えた3Dの世界、 2π srの音場が現在は汎用フォーマットとして利用できます。
今のところ主流は 2π ですが、音場という点においては 4π がゴールです。

4π が目前に見えている時代の音響設計とは？
二人の新隊長には、 4π 時代のスタジオ設計の世界を先導して頂きましょう。

●
さて、 4π 時代の隊員の皆さんには
いろいろありまして…
前々回実施した測定のやり直しからスタートということになります（合掌）。



【図1】オーディオ再生の変遷と再現音場領域



前回のロビエラ対決から早一年。いよいよ実際のスタジオにインストールすべく設計を進めるぞ！と意気込んだ矢先、なんと**新型モデルが登場**！候補は Focal の3機種です（【図2】）。隊員たちにはこれまでの測定経験を活かし、あたらしいスピーカーに立ち向かってもらうことにしましょう。今回も引き続き、実物（1/1）スケールの世界をお送りします。長引くテレワークの影響で、隊のメンバーはチャットを活用するようになったようです。

ひょんなことから昇進しちゃったりつこ隊長（以下「り」）：すごく個性豊かなスピーカーたちだね。ところでこのスピーカーがインストールされるのってどんなスタジオだったっけ？吹抜けのある空間だったよね。

ミカミ隊長ロスが抜けないえりっこ隊長（以下「え」）：イケ麺隊員とイーデ隊員初登場の会で、みんなでアクリル模型を作ったね。（詳しくは2019号P109を参照ね！）工事着工に向けてスタジオの設計図を描いてみたよ（【図3】）。

り：おおー。本格的！ここに**4π再生環境を構築**するわけだね。3D再生フォーマット（Dolby Atmos、360 Reality Audio、22.2ch、Ambisonics など）の条件を考慮してスピーカーを配置するなら、こんな感じかなあ（【図4】）。**ロビングエラー回避**のために、できるだけスピーカーの顔をリスニングポイントに向けたいよね。（ロビングエラーについては2020号P78-80で復習しよう！）

平面的にはスピーカーをリスニングポイントに向けられそうだけど、高さ方向はどうだろう。

え：うーん・・・建築的にはスピーカーはなるべく垂直に、柱型に納めたいかな。その方が部屋を広く活用できるしすっきりするから。

り：とすると音響軸がリスニングポイントを向かなくなるけど・・・

どこまで傾けるのが許容範囲なんだろう。

え：2020号のDr. 中原の講義を参考にして**軸外特性のポーラーパターン**を予測してみようか。

3-way in-wall speaker



1000 IW LCR UTOPIA

3-way in-wall speaker



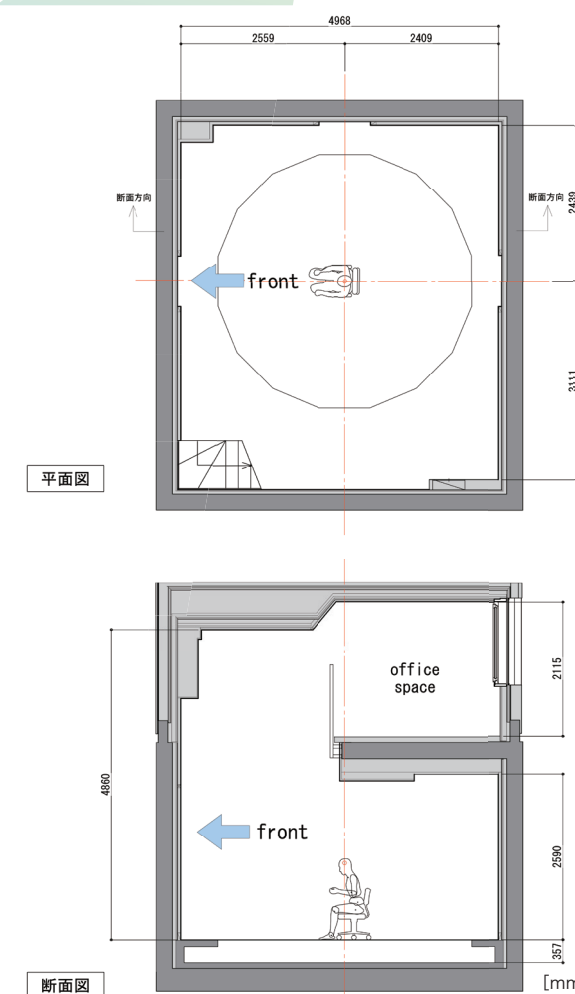
1000 IW LCR6

2-way in-wall speaker

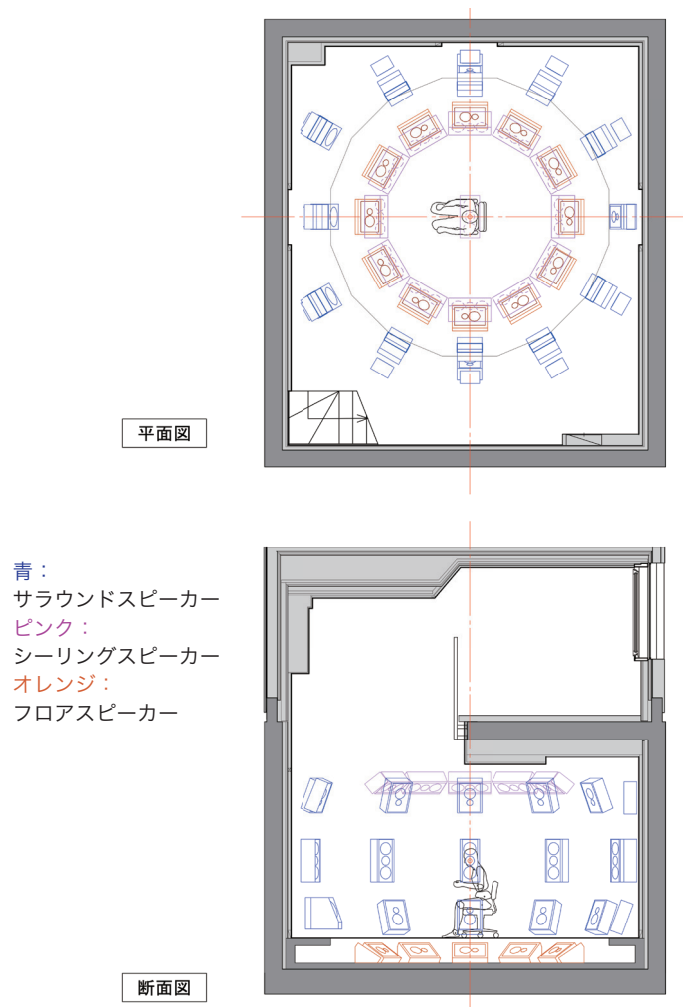


1000 IW 6

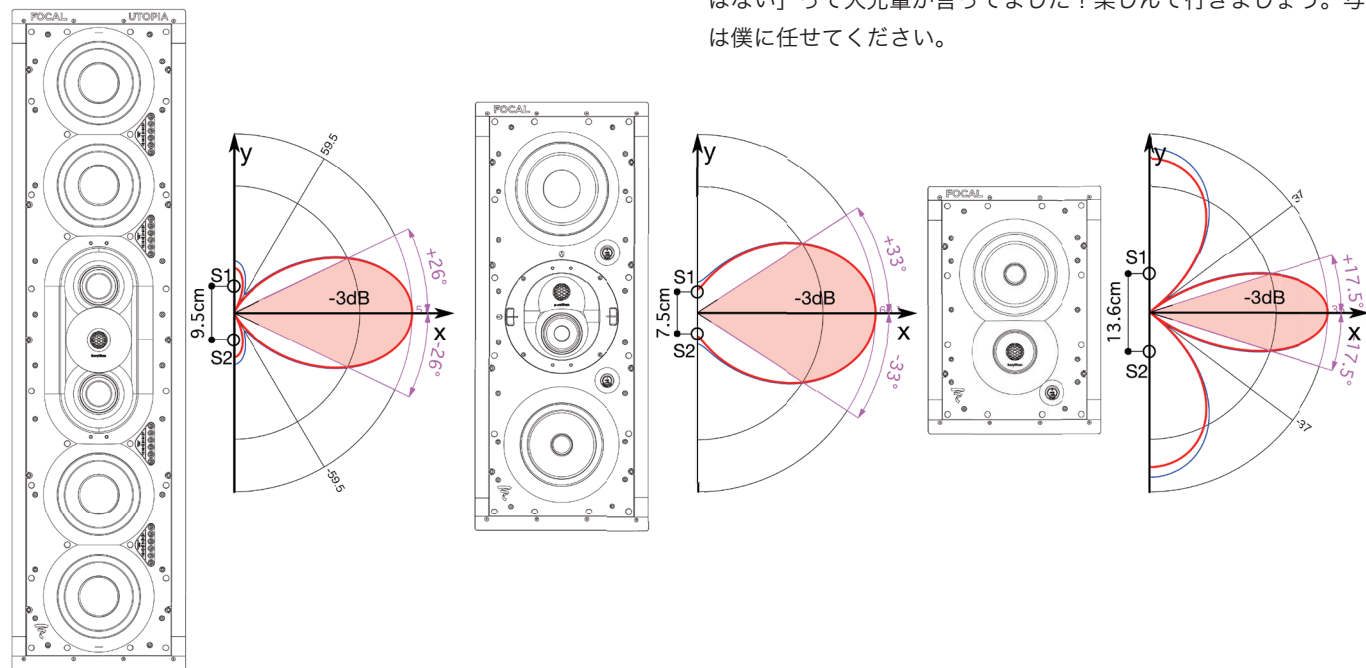
【図2】FOCALのインウォールスピーカー新型モデル3機種
個性的な3モデルが出揃いました！一番左の1000 IW LCR UTOPIAは
高さが1m以上もあってインパクト大！



【図3】「吹抜けのある空間」の平面と断面図



【図4】4 π スピーカレイアウト案
2Dの再生環境から3Dへ。この吹抜けのある空間では2 π にとどまらず床にもスピーカーを埋め込んだ4 π 空間を実現しようとしているのです。



【図5】ポラパターンの予測結果
各スピーカーのクロスオーバー周波数（2.1kHz）における振幅値ポラパターン（左からUTOPIA、LCR6、IW6）。
UTOPIAはS1-S2間の距離d=9.5cmで、許容できる軸外の角度は±26°、
LCR6はS1-S2間の距離d=7.5cmで、許容できる軸外の角度は±33°、
IW6はS1-S2間の距離d=13.6cmで最も遠く、許容できる軸外の角度は±17.5°と最も狭くなっています。
Dr.中原の講義通りですね！

り：OK。まずは「音源間の距離=d」を測ろう。1000 IW LCR UTOPIAと1000 IW LCR6は3wayスピーカーだから、ツイーターの中心とスコーカーの中心との距離、1000 IW6は2wayスピーカーだからツイーターの中心とウーファーの中心との距離を測るね。

え：そういえば「音源間の距離=d」が近いほどカバーエリアが広くなるってDr.中原が言ってたよね。

り：今回はクロスオーバー周波数でのポラパターンを予測するよ。3モデルともクロスオーバー周波数は2.1k [Hz]で同じだね。音響軸上での振幅値0dBに対して、ひとまず-3dB以内の特性を許容した場合・・・

え：角度はそれぞれUTOPIA（±26°）、LCR6（±33°）、IW6（±17.5°）だから、例えばLCR6ならリスニングポイントが音響軸から30°程度外れててもイケるってことかな（【図5】）？

り：スピーカーの顔が30°そっぽ向いてるって、ちょっと不安じゃない？予測結果を手がかりに設計をしてもいいけど、せっかく実機が手元にあることだし。

え：そうだね！さっそく若手精鋭隊員たちに検証してもらおう！

り：我々隊長は指令を出すだけか・・・感慨深いね。

え・り：（合掌）

おなじみまつん先輩隊員（以下「ま」）：アネさんたち、無茶振り加減がミカミ旧隊長に似てきたでげす。ポチっとすればパソコンが全部やってくれる予測計算と実際の測定はワケが違うんでげす！
イーデーデ IDE 隊員（以下「イーデ」）：信頼の証やデえ！そろそろ特技がデモ機の手配になりそうやデえ！

ま：1°刻みの地道な測定、しかも3台分！気合い入れていくでげすよ・・・！

イーデ：3種類のスピーカーでロピエラ対決2ndやデえ！

イケイケ・イケウチ製麺隊員（以下「イケ麺」）：「終わらない現場はない」って大先輩が言ってました！楽しんで行きましょう。写真は僕に任せてください。

1. 準備編

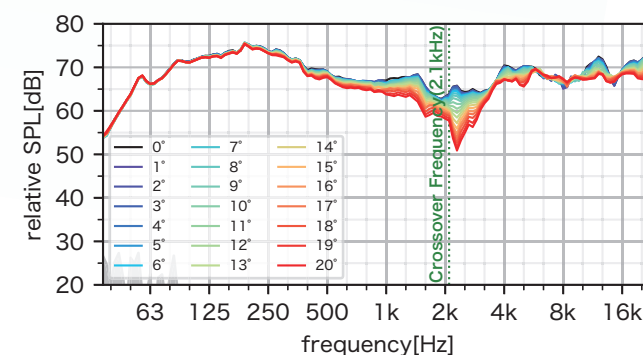
さて、今回も前々回に引き続きロピエラ対決のレポートです。アネさんたちが計算で正面から-90°～90°の範囲で滑らかなポラパターンの曲線を描いていましたが、我々は一点一点測定した結果を線で結んでグラフにするのでこの勝負、かなり分が悪いと言えるでしょう。1°刻みで±90°を測定するのはなかなか骨が折れるので、ひとまず**±20°の範囲を測定**して様子を見てみることにします。スピーカーレイアウト検討のためには実用的な範囲ではないでしょうか。この範囲で1°ずつ測定するとスピーカー**1台あたり測定点が41点**。スピーカーが3台あるので測定点は**全部で123点**です。気合入れていきましょう。まずは、今回登場するスピーカーのおさらいから。

S1	ツイーター
S2	スコーカー
S2	スコーカー

種類	1000 IW LCR UTOPIA	1000 IW LCR 6	1000 IW 6
測定での呼び名	UTOPIA	LCR6	IW6
クロスオーバー周波数	2.1kHz	2.1kHz	2.1kHz
S1,S2の距離	9.5cm	7.5cm	13.6cm

【図6】測定スピーカー情報
（実験の都合上IW6はツイーターが上になるようにひっくり返してます。）

前回のロピエラ対決を振り返ると、クロスオーバー周波数近辺の帯域では2つのユニットから同じ音が再生される「音響ダブルット」状態になるので、それぞれの音が時間差でリスニングポイントに到達する様な位置関係では位相干渉が生じてディップができてしまうという事でした。
今回のスピーカーではLCR6がユニット間の距離が一番短いのでロビングエラーの影響を最も受けにくく、リスニングエリアが広く確保できることが予想されます。
早速測定を始めてみましょう。

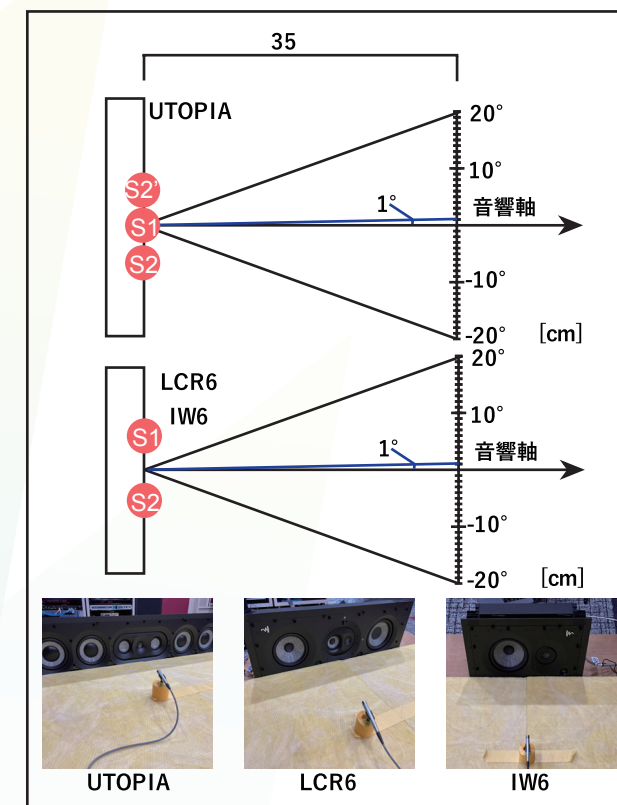


【図8】UTOPIAの測定結果（左：S2側の軸外特性、右：S2'側の軸外特性）

2. 苦難の測定編

2-1. 測定内容

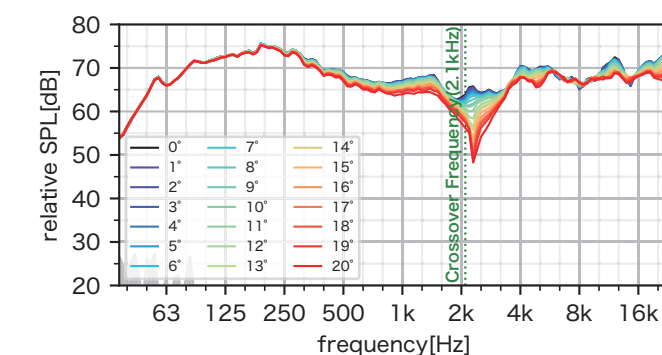
まずはスピーカーから35cmの距離でスピーカーに平行な線を引き、**±20°の範囲で1°刻みの位置**に印を打ってマイクを移動させていきます。【図7】や表紙の写真みたいなイメージですね。また、床反射の影響を軽減するため、グラスウールを敷いています。マイクはスピーカーの中心を向く様にセットしてインパルス応答を測定しました。早速結果をみてみましょう。

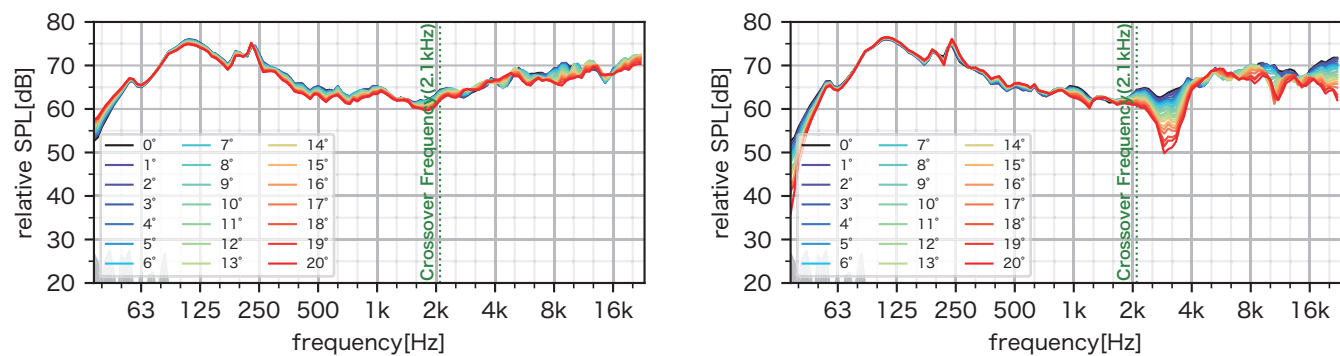


【図7】測定位置

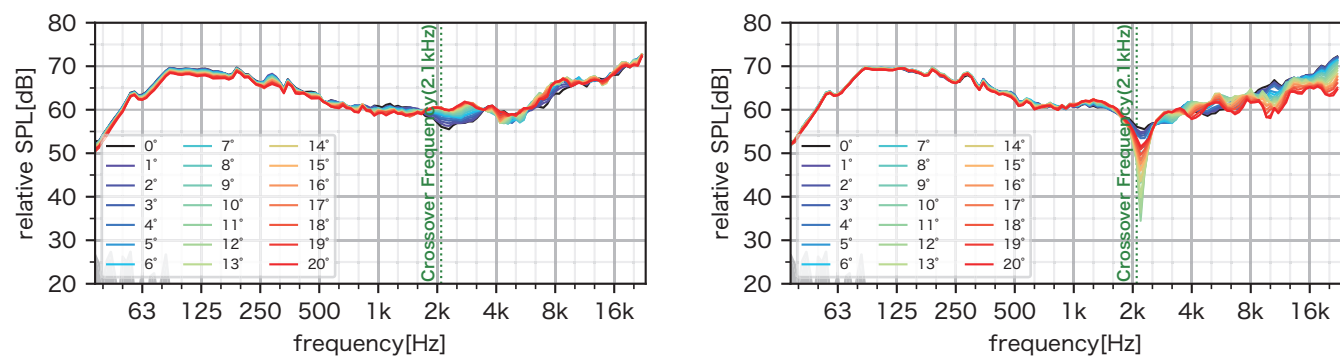
2-2. 衝撃の測定結果

【図8】がUTOPIAの測定結果です。左側のグラフがスピーカー正面からS2側にマイクを動かした場合、右側のグラフがスピーカー正面からS2'側にマイクを動かした場合を表していて、**青→緑→赤と色が変化するほど軸から外れた位置での特性**になります。スピーカーが対称的な形なのでどちらも左右でどちらも同じ様なグラフになっていますが、いずれもクロスオーバー周波数の2.1kHz近辺（少しずれていますが...）でディップが生じています。





【図 9】LCR6 の測定結果（左：S1 側の軸外特性、右：S2 側の軸外特性）

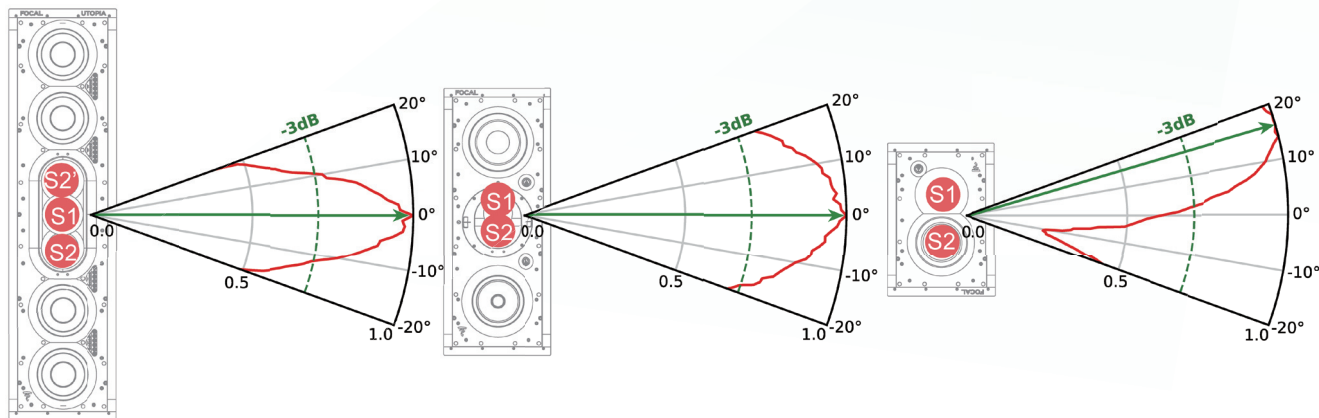


【図 10】IW6 の測定結果（左：S1 側の軸外特性、右：S2 側の軸外特性）

続けて、【図 9】と【図 10】は **LCR6** と **IW6** の測定結果です。どの測定結果も 2kHz 近辺（より少し上？）で特性が変化しているようですが、**LCR6** は S1 側にマイクを動かしてもクロスオーバー周波数でのディップは生じませんでした。なので、このスピーカーをリスニングポイントに向けられない場合でも、S1 = ツイーター側がリスニングポイントに向く方向であれば影響が少なく済みそうですね。
IW6 は S1 側にマイクを動かすとクロスオーバー周波数の帯域が盛り上がって来てしまいました。（合掌）

2-3. ポーラーパターンへの挑戦

最後に、先ほどの測定結果を元にしてアネさん達みたいにポーラーパターンを描いてみました。【図 11】が最大値を 1 として測定値をプロットした、クロスオーバー周波数 2.1kHz におけるポーラーパターンです。



【図 11】各スピーカーの 2.1kHz における振幅値ポーラーパターン（左から UTOPIA、LCR6、IW6）

今回測定した範囲が -20° ~ 20° でしたが、更に軸外まで測定したらどうなるのか、ものすごく気になります。きっとアネさん達が描いたポーラーパターンみたいに凹凸が繰り返すパターンが見えてくるのでしょう。
この限られた範囲のポーラーパターンですが、**UTOPIA** と **LCR6** で比較をした時に **UTOPIA** の方がパターンが鋭く、**LCR6** の方が緩やかに見えます。これは最初に予想していた通り、**LCR6** の方が S1 と S2 の距離が短くロビングエラーの影響を受けにくいので、リスニングエリアを広く確保できるという事でしょう。

こうした測定結果が手元にあると、スピーカーをリスニングポイントに向けられない場合や、大人数で聴取する場合に、どの範囲であればスピーカー本来の特性を損なわずに済むか把握することができそうです。測定バンザイ!!

ま：なんとか終わったでげす！腰が痛いでげす〜。

イーデ：はあ〜達成感あるデェ・・・。

え：まあまあ。まだ若いんだから。なかなか見応えのある結果になったんじゃない？

り：うわあ。**IW6** のポーラーパターンの形、エグくない？どうなってるんだらう。

イケ麺：おそらく音響軸がプラスの角度側に偏って出てしまったんだと思います。今回はツイータードライバーの中心からスコーカーもしくはウーファードライバーの中心までの距離の中点を音響軸と仮定して測定しましたが、**実際はもう少し複雑なのかもしれません。**

イーデ：見方を変えれば、ちょっとずれていたお陰でポーラーパターンの折り返し地点、すなわち**メインローブとサイドローブの境目に発生する「音がなくなるキャンセルポイント」**が観測できたってことや！これぞ Dr. 中原が言っていた「ロビングエラー」やデェ！

え・り：・・・。（若手諸君、なかなかやりおる。）

え：それにしても、予測結果と比べると**実際はもう少し許容できる角度が狭くなりそう**。スピーカーの顔がリスニングポイントから 30° もそっぽ向いたレイアウトは難しそうだね。

ま：軸外特性のグラフを見ると、**クロスオーバー周波数以外の帯域でも特性が変化している**でげす。他の帯域まで考慮して -3dB の範囲を調べれば、**実際はもっと許容できる角度が狭い**かもしれないでやんす。実験の意味があったでげすね！

イーデ：**理論で予測するだけでなく、実測もして確かめる**。この堅実な姿勢がこの隊の魅力やデェ。まさに「石橋を叩いて渡る」や！
ま：イーデ隊員、なかなか分かってきたでげすね。

え：そうねえ。アネさん感動だわ。さておき、今回の測定結果によるとカバーエリアが広そうなモデルは **LCR6**、次いで **UTOPIA**、少し癖がありそうなのが **IW6** ってことでいいのかしら。

イケ麺：そうですね。レポートにもあるように **LCR6** はもうひとつ特徴があって、S1 側、つまりツイーター側にマイクを動かしても音響ダブレットの影響によるディップが生じにくかったんです。
イーデ：ツイーターがリスニングポイントに向くようにスピーカーの上下を工夫して設置すれば良さそうやデェ。

り：なるほど。今回のように上下左右に複数のスピーカーを並べる場合は使いやすいかもしれないね。

え：**IW6** も **UTOPIA** もそれぞれ個性がありそうだけど・・・うーん。残りのページも少ないことだし、次回までの宿題ってことで！

全員：それではみなさま、また次号でお会いしましょう！

隊員日報

麺

みんなお疲れ様！今回は、アネさんたちが出張続きで大変でしたね。

既読

イ

大変やったわ... でもポーラーパターンを味方につけた僕たちにはロビエラなんてへでもないデェ！

既読

ま

既読

そうですね！ここで私たちの成長が見せられたげすね！

イ

ロビエラ倒してレベルアップやデェ。

既読

麺

若手隊員達はレベルが1上がった。

既読

ま

既読

そんな！1レベルはないでげす〜

イ

ほんまやで！せめて10レベルにしてほしいわ〜

既読

麺

（笑）。では今回の勝利を祝福してカンパーイ！

既読

ま

既読

げす？でげす！ボラバタにカンパーイ！

イ

イーディーデェ！ロビエラにカンパーイ！

既読

ま

既読



<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、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。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。

まっつん隊員

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、自宅でピアノを弾き始めました。最近は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ます。

イケイケ・イケウチ製麺隊員

株式会社ソナ 設計技術部

うどん県（香川県）出身。コロナにより里帰り出来ずうどん不足です。ピアノや趣味はとりあえず中断... 一般建築士の資格勉強にすべての時間を費やします！来年も同じ文章であれば察してください...（笑）

イーディーデ IDE 隊員

株式会社ソナ 設計技術部

大阪府出身。ボケ担当。空気中を伝播する音（ボケ）に対して反射（ツツコミ）、拡散（ノリツツコミ）、吸音（スルー）を駆使し、均整のとれた音空間を実現する術には定評があるスタジオ設計パダワンも3年目。

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」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。音響設計に関しては、音響知識や経験からのイメージではなく、音響理論を図面上の線に直結させて形を生み出す作業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。今月の名言：何かをしたい者は手段を見つけ、何もしたくない者は言い訳を見つける（野村克也）。

りっつ隊長

株式会社ソナ 設計技術部 課長

長野県出身。趣味は散歩と読書と美術館巡り。帰省でずいぶん一年半。山菜と冷酒が恋しい今日この頃。「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。