



パーソナル・スタジオ設計の音響学 その2 1 特別編「音響設計実践道場」 1/1 と 1/10 の世界を往来！ ～第三回 音響ダブレット～

ロビングエラー

（ 中 原 雅 考 ）

前々回（その19）から実践編に突入している隊員の皆さん。

今回は、変形部屋の低域特性を予測するために 1/10 模型実験を実施しました。

そのために必要なものは作る。

ということで、薄型の小型スピーカードライバーを探しだし、エンクロージャーを設計し、
模型実験用のスピーカを作りました。



このスピーカー、薄さはバッチリです。

そして、特性に関しても OK でした。

しかし、実際の（1/1 の）部屋にインストールしようとしている「現物」とは大きく異なる点があります。
模型実験用のスピーカーはドライバーが一つだけのフルレンジですが、「現物」は 3 ウェイなのです。

2 ウェイや 3 ウェイなどのマルチウェイスピーカーとフルレンジスピーカーでは大きく異なる点があります。
それは「ロビングエラー」（lobbing error）です。

ロビングエラーは、EQ などでは補正することができないマルチウェイスピーカーの宿命的な性格です。

スピーカーはリスニングポイントに向けて設置するようと言われていますが、
それは、ロビングエラー回避のためにとても重要なことなのです。

では、今回部屋にインストールしようとしているマルチウェイスピーカーは、
どのようなロビングエラーの性質を持っているのでしょうか？

ロビングエラーを把握しておくことは、
モニター環境の音響設計の基本です。

ロビングエラーの把握には、
二重音源、すなわち「音響ダブレット」の理解が役立ちます。

ということで、

今回は、音響ダブレットのお話から始めましょう。

～ 事前準備の時間 ～

音響ダブレット

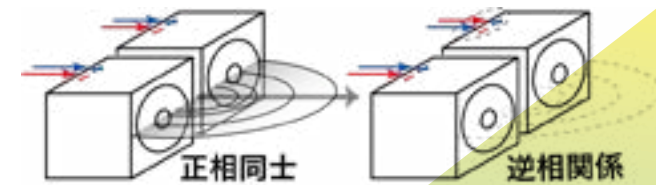
（ 中 原 雅 考 ）

同じスピーカーを 2 台並べて同じ音を再生すると、1 台で再生するときよりも大きな音量で音は聞こえます。

ここで、片方のスピーカーを逆相に接続してみましょう。

すると 2 台のスピーカーは、お互いに音を打ち消し合ってしまう、音は消えてしまいます。

と、いった感じで、「正相」「逆相」といった音の位相に関する説明を受けたことのある人もいるでしょう。

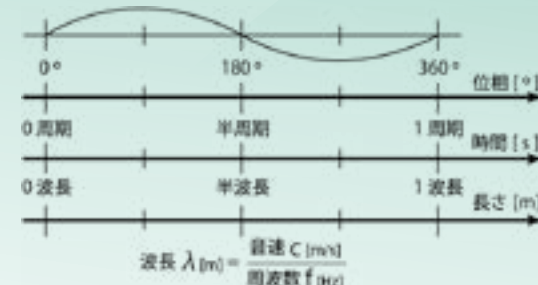


【図1】同相再生と逆相再生

ところが、この現象が厳密に成立するのは、2 つのスピーカーが完全に同じ場所に設置された場合、すなわち 2 台が完全に重なっている場合という非現実世界でのお話です。

実際にやってみたことのある人であればお分かりかと思いますが、逆相の場合であっても完全に音は無くなりません。また同相の場合でも、聞く場所によっては、1 台の時よりも音量が小さくなってしまったりします。このように、異なる 2 ヶ所から同じ音が再生されるような状況では、音源の周囲に複雑な音の放射パターンが形成されます。この二重音源、すなわち「音響ダブレット」の現象に関して詳しく見てゆくことにしましょう。

2 つの同じ音が互いに時間差をもって合成されるとき、その合成音は 2 音の位相干渉の影響を受けることになります。ご存じのように、音の位相、周期、波長は【図2】のような関係です。従って、2 音の時間差が 0 の時に同相（0°）で合成音量は最大、半周期に近づくにつれて音は小さくなり、半周期では逆相関係（180°）になり無音、そこから 1 周期に近づくにつれて合成音は再度大きくなり…を繰り返します。



【図2】位相・周期・波長

それでは、【図3】のような 2 つの音源 S1 と S2 が異なる場所に置かれている状況を考えてみましょう。

ここで、S1 と S2 から同じ音を同時に再生すると、それぞれから到達する音の時間差が 0 となる場所、すなわち、S1 と S2 の 2 等分線上で 2 音は同相関係となり合成音は最大となります。

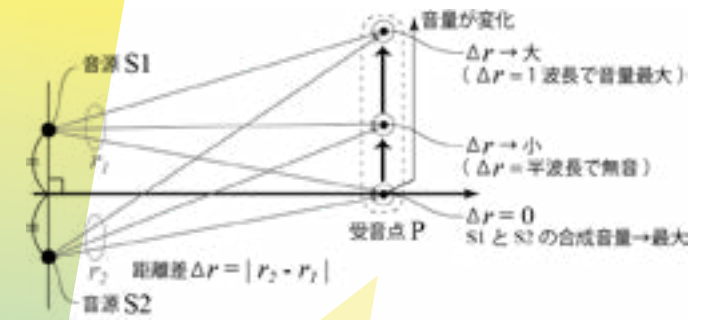
では、2 等分線から少しずつ離れてゆきましょう。すると徐々に 2 音の時間差が大きくなってゆきます。そして、2 音の時間差が半周期、すなわち S1 からの距離と S2 からの距離の差（ $\Delta r = |r_2 - r_1|$ ）が半波長となる場所で、2 音は逆相関係となり、音が消えてしまいます。

例えば、音源から 1kHz の音が再生されている場合、 $\Delta r = \text{半波長} = 17\text{cm}$ の場所で音が無くなるということになります。

さらに、どんどん移動しましょう。そうすると、また音量が復活して、S1 と S2 からの距離差が 1 波長、1kHz なら 34cm となる場所で、再度音量は最大になります。

そしてまたそこから移動すると音は小さくなってゆき…といった感じで、音源周囲には、音が大きくなったり小さくなったりする場所が出現します。

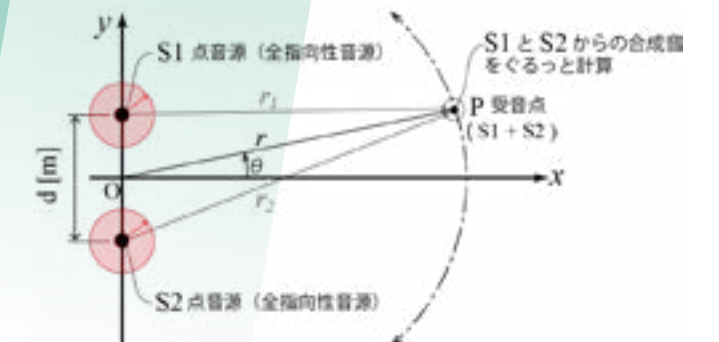
このように、音響ダブレットでは、新たな指向性パターンを持つ合成音源が誕生することになります。



【図3】2 音の位相干渉

この 2 重音源、すなわち「音響ダブレット」が作り出す指向性パターンがどのようなものなのかを見てみましょう。

そのために、点音源、すなわち、全周波数帯域において全指向性である 2 つの音源 S1 と S2 が、距離 d[m] 離れて設置してある環境を想定します（【図4】）。S1 と S2 は点音源なので、どちらか 1 つを再生した場合は、すべての周波数において周囲にまんべんなく音を供給し、音源周囲において急に音が大きくなったり小さくなったりするような場所を発生させたりはしません。



【図4】音響ダブレットの計算モデル

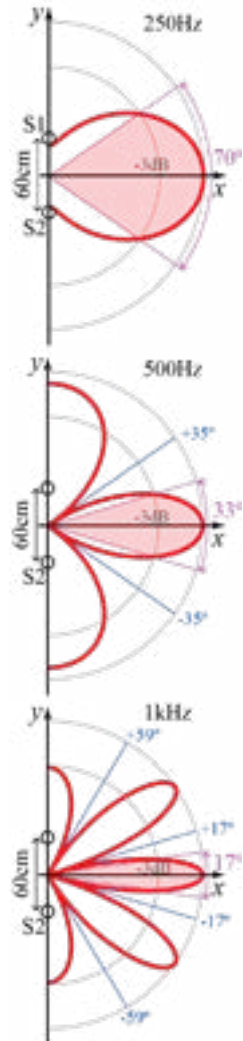
それでは、2 つの音源 S1 と S2 から同時に音を再生した場合に、その合成音がどのような指向性をもつことになるかを計算してみましょう。

【図5】は、S1 と S2 の間隔を d=60cm として、f=250Hz、500Hz、1kHz の 3 種類の周波数に関して求めた合成音の指向特性です。

結果を眺めると分かるように、S1 と S2 の 2 等分線となる x 軸上ではどの周波数でも最大音量が得られていますが、x 軸を外れるほど音量が小さくなり、あるところで最小（無音）になっています。例えば、x 軸から 17°ほど移動すると 1kHz が聞こえなくなり、さらに 35°まで移動すると 500Hz が聞こえなくなります。

ここで、x 軸上のピークから 3dB 落ちまでの範囲をカバーエリアということにすると、250Hz、500Hz、1kHz のカバーエリアは 70°、33°、17°となり、周波数が高くなるほど極端に狭帯域になってゆくことが分かります。

S1 や S2 は、それぞれ単体ではどの周波数でも 360°のカバーエリアを持つ全指向性音源なのですが、2 つが音響ダブレットを構成することで、超指向性音源に変化することになります。

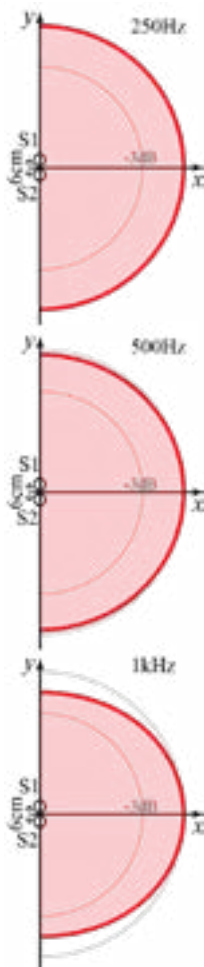


【図5】d=60cmの場合の音響ダブレットの指向性
(250Hz、500Hz、1kHz)

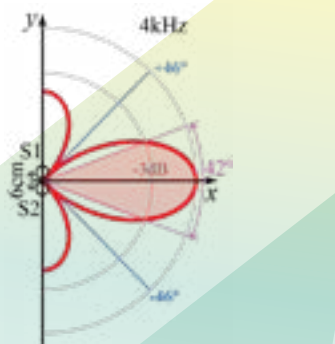
次に、S1とS2の距離をd=6cmまで近づけてみましょう（【図6】）。すると、カバーエリアは大幅に改善されて、すべての周波数で360°のカバーエリアが得られています。2つの音源が近づけば、それらが一体となって元々の音源の指向性に近づくわけですね。とはいっても、完全にS1とS2が重なっているわけではありませんので、高域ではやはり位相干渉が生じてしまいます。【図7】のように、例えばf=4kHzになると、d=6cmの近接設置といっても42°にカバーエリアが制約されることになります。

このような音響ダブレット現象は、日常生活の色々なところに出現しています。その中でもマルチウェイスピーカーは代表的な例です。スピーカードライバーが1つで構成されるフルレンジスピーカーの場合、その指向特性はドライバーそのものの指向特性となります。つまり、高域になるに従って指向性が鋭く（カバーエリアが狭く）なるため、再生音はドライバーの中心軸から外れるほど高域が落ちた特性となります。ただし、このようなハイ下がりな音は、EQで持ち上げることで割と簡単に補正が可能です。

一方、2ウェイスピーカーでは、クロスオーバー周波数近辺において、ウーファーとツイーターといった異なる2ヶ所から同じ音を再生している「音響ダブレット」状態となります。つまり、マルチウェイスピーカーは、クロスオーバー周波数近辺で急に指向性が変化する（極端に狭い指向性となる）性質を持っているスピーカーということになります。従って、マルチウェイスピーカーの設置角度を誤ってしまうと、クロスオーバー周波数付近の音がごっそり抜け落ちた音を聞く可能性が生じてしまいます。このようなモニタリング障害を「ロビングエラー（Lobbing-Error）」といいます。ロビングエラーは、どんな優秀なEQを用いても改善することができない致命的なモニター障害です。



【図6】d=6cmの場合の音響ダブレットの指向性
(250Hz、500Hz、1kHz)



【図7】d=6cmの場合の音響ダブレットの指向性
(4kHz)

「スピーカーをリスニングポイントに向けて設置しましょう」といったモニター設置の基本は、このロビングエラー回避のためであるともいえます。では、どこを音響中心と考えて、どの程度リスニングポイントに向ければOKなのでしょう。今回は「現物」を相手に隊員の皆さんにそれを探って頂くことにしましょう。尚、「現物」には理論モデルとは異なる点がいくつかありますので、適宜柔軟な発想で…

（参考）

今回の計算は、受音点が遠方（ $r \gg d$ ）という近似を利用しています。その場合、ロビングエラーの発生する角度 θ_{\min} や音響軸上から3dB落ちのカバーエリア $2\theta_{-3dB}$ は、以下のように求めることができます。

$$\theta_{\min} = \sin^{-1} \frac{(2n+1)c}{2df} \quad \cdots (1)$$

$$2\theta_{-3dB} = \sin^{-1} \frac{c}{2df} \quad \cdots (2)$$

（音源間隔d[m]、周波数f[Hz]、音速c[m/s]、 $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ）

モニターレイアウト設計の基本、「ロビングエラー」を実物世界、実物スピーカーで調べてみよう

（COVID-19 拡大防止のため、人数を絞ってお届けします。）

「STAY HOME」

今は在宅勤務でバラバラの隊員諸君。皆さんもちゃんと動かずじっとしていますか？今回は各隊員がそれぞれの自宅で作成して合体させます。テレワークでもチームワークを見せられるか！？以下は感染拡大前の隊員の活動記録です。舞台は模型世界（1/10）を抜け出し、久々の実物（1/1）スケール世界です。

■「モニターレイアウトの基本」は選ばれし二人に託された

いつの間に後輩も増えてきた、まっくん先輩隊員（以下「ま」）：さっきお客さんからメール来てたけど見た？使うスピーカーの候補が決まったみたい。でも、どっちにするか迷ってるみたいでげす。

早いもので入社丸一年、イーデーデ IDE 後輩隊員（以下「イーデ」）：もちろん見ましたデ、見ましたデえ、FOCAL やで！最近色んなところで良く見かけますでえ。

300IWLCR6

ELECTRA IW1003 BE



【図8】今回こちらのスピーカー二種類でクロスオーバー付近の指向性、ロビングエラーの性質を調べます。左が【FOCAL 300IWLCR6】、右が【FOCAL ELECTRA IW1003 BE（“BE”はベリリウム（Beryllium）製ドームツイーターを装備していることを表しています）】、どちらもIn-Wallタイプの3-Wayスピーカーです。

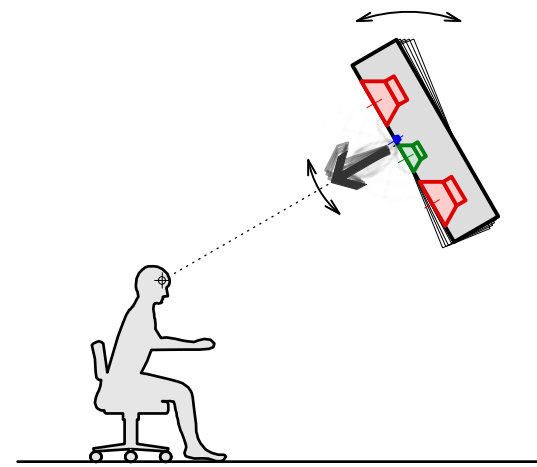
ま：In-Wall型3ウェイの二機種みたいでげすね。

ま：このスピーカーを例のあの「吹き抜けのあるスタジオ」にたくさん並べるんでげすな。「～事前準備の時間～」には、“どこを音響中心と考えて、どの程度リスニングポイントに向ければOKなのでげしようかあ???”なんて無責任な事書いてあったけど、どんな感じでレイアウトすればいいんでげしょ。こう言う時は、ミカミ隊長よりアネさん達の方が頼りになるでげでげ。えりっこ姉さん、りつこ姉さんー！

振り向けば、呼ばれてないのにミカミ隊長（以下「ミ」）：ふぁー、ふぁっふぁーっ。今回は若手精鋭隊員だけに人数絞ってるから、アネさん達いないのよ。ハイ、残念でした。スピーカーの顔をどっちにどう向けるかは、スピーカーレイアウトの基本だからね。今回は二人に調べてもらいましょう！ってことになってるの。お客さんが迷っている間に、両方のロビングエラーについて調べちゃおう。どうせスピーカーレイアウトの設計に必要な情報になるし。模型世界の手作りスピーカーじゃなくて、リアルな世界の高級スピーカーで測定できるなんて、幸せじゃん。あ、借り物だからね、壊さないでね。

イーデ：イーデ、イーデえ、面白そうやデえ！やりましょうデえ！壊さないデえ！二種類のスピーカーのロビエ対決やデえ！

ミ：よろしく。頼んだデえ～！（ふーゆのおー、ロビ～いエラあ♪ おとこってやつはあ♪）

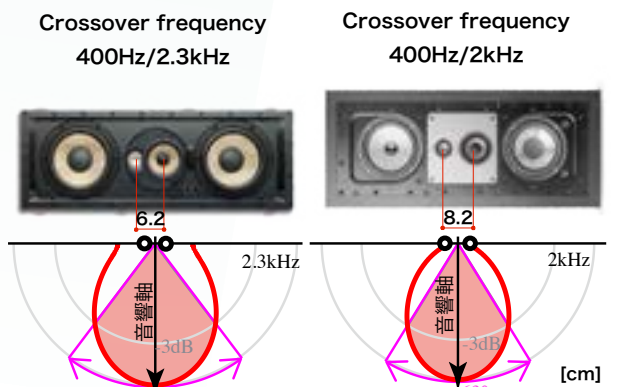


【図9】ロビングエラー回避のためには「スピーカーをリスニングポイントに向けて設置しましょう」というのが基本ではありません。どのくらいの「向け具合」ならOKなのでしょう？

～若手精鋭隊員の実験レポート～

1. 目的

これまで1/10の模型で部屋の影響を調べてきましたが、今回は現実世界に戻って久しぶりに1/1のスケールでスピーカーと向き合ってみます。やっぱり1/1スケールは良いですね。さて、今回の実験ではロビングエラーに着目して、お題が上がっていた2本のスピーカーの軸外の特性を調べます。まずはスピーカーのご紹介から。



【図10】左）FOCAL 300IWLCR6 右）ELECTRA IW1003BE

これより先ではそれぞれのスピーカーを愛情を持ってLCR6、BEと呼ぶ事にしましょう。

ところで、【図5】と【図6】の比較では、2つの音源が近い方がカバーエリアが広がる事が分かりました。

スコーカーとツイーターの中心の距離はLCR6が6.2cmでBEは8.2cmなので、単純な理屈だけで言うとLCR6の方がカバーエリアが広くロビングエラーの影響が小さくなると予測できそうです（【図10】）。

また、クロスオーバー周波数はLCR6が400Hzと2.3kHz、BEは400Hzと2kHzなので、このあたりの周波数帯域がスコーカーとツイーターの両方から再生されてロビングエラーの影響を受ける、そんな気がしてきました。早速、実験を始めようと思ったのですが、LCR6は背面開放型で箱（エンクロージャー）に取り付けられないと実験できないので、ないものは作るという姉さんたちの教えから、エンクロージャーの製作から実験準備を始めました。

2. 実験準備 ～測定前に四苦八苦～

エンクロージャー製作でまず気になる事と言えば箱の容積をどうするかです。メーカーが推奨のキャビネット容積を公表している事も多いですが、今回のスピーカーはもともと壁に埋め込んで使うタイプなのでそういう情報はなさそうです。なので、勝手な予測で約 50 リットルの箱を作る事にしてスピーカー取り付け用の開口と、配線用の小さい開口を設けて様子を見てみましょう（【図 1 1】）。エンクロージャー容積が不足気味だと低域の伸びが悪くなり、黒線の様な特性になりがちだけど、測定結果を見ると大丈夫そうですね（【図 1 2】）。手作り感は満載ですが、木製で内側には防振シートを貼ってあるので、箱自体が共鳴して実験に影響が出ない様にちゃんと工夫しています。

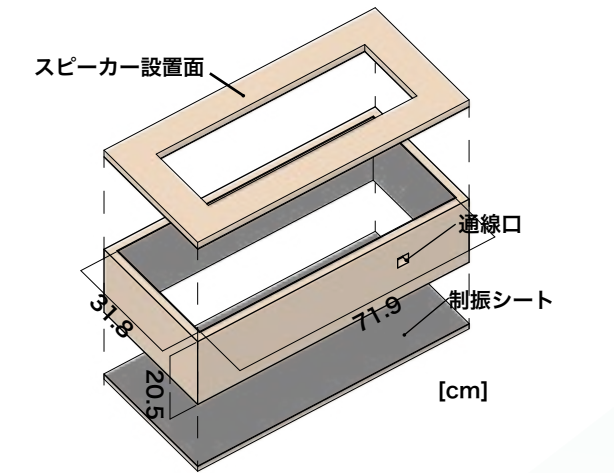
あとは無響室の様な反射がない環境で測定できればバッチリ、なので、なるべく反射の影響を軽減できる方法を考えてみました。スピーカーや測定用マイクは床に置いて実験をしようと思うので、一番大きな反射を生み出しそうな床の反射対策をしてみます。

今回の実験環境では床反射の影響が出るのは 2.4kHz 周辺で、この周波数帯域を吸音するには厚さ 15mm 以上の吸音材が必要です。そこで厚さ 15mm のグラスウールを用意しましたが、もう少し厚くしてもユニットに被ることはなさそうだったので、グラスウールを何枚か重ねて床反射対策を徹底してみました。LCR6 用に敷いたグラスウールは 75mm、BE は 50mm の申し分ない贅沢な吸音ベッドです。

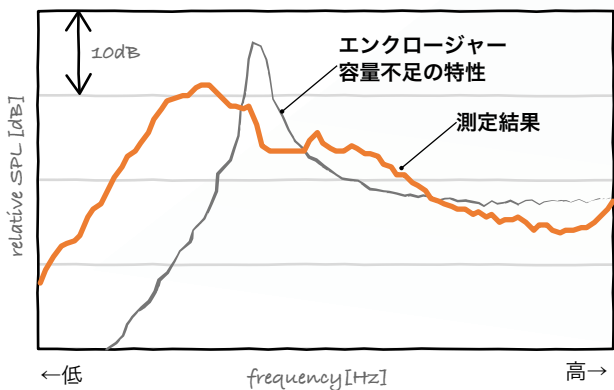
そしてこの上にマイクを置くのですが、丁度良い高さのスタンドがないのでオリジナルマイクスタンドを作りました。見た目は大変不恰好ですが大目にみてください（【図 1 3】）。

最後に測定する方法ですが、不要な反射音があれば測定後に除去したいので、インパルス応答を測定する事にしました。

さあ、これで準備完了です。若手精鋭隊員がんばります！



【図 1 1】エンクロージャー



【図 1 2】エンクロージャーの容積が不足している場合の周波数特性（ラフですみません）



【図 1 3】準備完了です

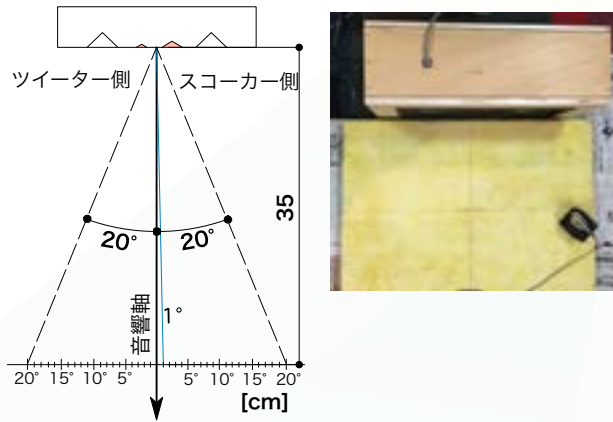
2-1. 測定開始

何はともあれ準備ができたので、測定を始めます。測定点はスコーカーとツイーターそれぞれの中心を結ぶ線の垂直二等分線をスピーカーの音響軸として、そこから両側に 1° 刻みで 20° ずつ、合計で 40 点としました（【図 1 4】）。

同心円状に 1° 刻みで正確に測定点をマーキングするのは案外大変（しかも円の中心が音響中心かどうかは分からない）なので、音響軸に垂直な一直線状に測定点を並べる事にして、1° 刻みで配置すると測定点同士が何 mm 離れるか計算してマーキングを行いました。

音響中心からの距離は測定点毎に異なってしまいますが、その差による減衰量の違いは後で補正できそうです。

スピーカー 2 本を測定するので測定点は合計 80 点、おまけにサービスマイクの向きは常に音響中心に向く様に、慎重に向きを調整して測定しました。（マイクが明日日の方向を向いては測定になりませんもんね！）



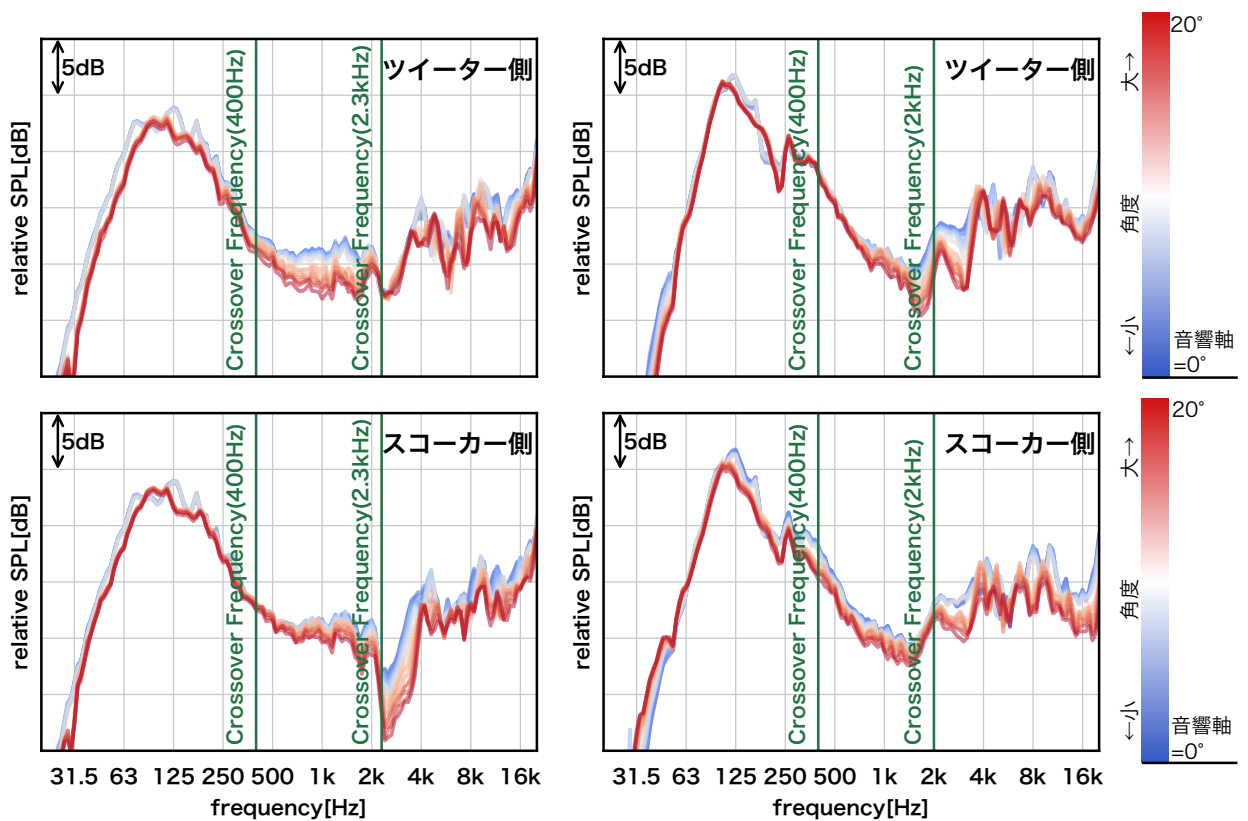
【図 1 4】測定点

2-2. 測定結果

測定結果にスピーカーのクロスオーバー周波数の情報を重ねて見てみましょう（【図 1 5】）。やはり、角度が変わると周波数特性が複雑に変化していています。低域のクロスオーバー周波数付近ではロビングエラーと思われる影響はみられませんでした、高域のクロスオーバー周波数付近ではロビングエラーの影響が出ています。

2-3. 考察

測定結果をみていると「1. 目的」で予想していた、クロスオーバー周波数のロビングエラーを確認することができました。ツイーターとスコーカーの中間？がどの角度を狙っているかを知ることが、ロビングエラーの回避、つまりスピーカーの設置角度を決める上で重要になりそうです。カバーエリアに関しては、もう少しデータを読み込む必要がありますが、残念ながらページ数が少なくなりましたので今回はここで、まとめに入らせていただきます。



【図 15】測定結果 左) FOCAL 300IWLCR6 右) ELECTRA IW1003BE

3. まとめ

今回の実験では次の事が明らかになりました。

- ・音響軸から角度を変化させると、周波数特性も変化する。
- ・高域のクロスオーバー周波数付近ではロビングエラーの影響が見られた。
- ・スコーカーとツイーターの中間？がどこを狙っているのがスピーカーの設置角度の設計には重要。

以上、若手精鋭隊員の実験レポートでした。

ミカミタカシの隊長日記

まっつん隊員とイーデ隊員、ミカミ隊が誇る二人の若手精鋭による「ロビングエラーレポート（第一弾）」如何だったでしょうか。フルレンジ一発の "1-Way" で聴かれている方はかなり少ないでしょうから、実は音響ダブルットが起こすこのロビングエラーという現象はかなり身近な現象です。平らな大きい面が起こす反射なんかもその一種ですよ（え：2010-2011 号を参照よ！）。今回は現象を眺めたところまでですが（それでも十分貴重な調査資料です）、次回精鋭隊員が第二弾報告で「ロビエラ♪」の全貌を明らかにしてくれるでしょう。乞う、ご期待！私は在宅！

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 D V D 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 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

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

株式会社ソナ 設計三課 課長
千葉県出身。趣味は音楽鑑賞と BBQ。分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

株式会社ソナ 設計二課
長野県出身。趣味は散歩と美術館巡り。馬頭琴を弾いてみたい今日この頃。試奏できるお店情報募集中です。「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。

まっつん隊員

株式会社ソナ 設計三課
茨城県出身。料理を始め 3 年。カレーが作れるようになりました。スパイスから調合し、自分好みの味を探しています。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

株式会社ソナ 設計一課
うどん県（香川県）出身。在宅勤務でピアノと友達契約しました。目指せピアニスト！仕事では営業、建築、音響、現場管理ができるように勉強中。

イーディーデ IDE 隊員

株式会社ソナ 設計二課
大阪府出身。ノリソッコミ担当。頭の中のロックンロールが鳴りやみません。最近はおっぱいポケットシネマカメラに夢中なスタジオ設計バダワン（見習い）。

御質問等は、Pro@mirc.co.jp まで！