



## パーソナル・スタジオ設計の音響学 その3 「中域の世界」 ～反射と干渉がつくり出す音の変化～

SONA  
PERSONAL Studio Design

連載3回目となります「パーソナル・スタジオの音響学」。今回も前半の理論編は株式会社ソナの Dr. 中原が、後半の実践編はミカミタカシが解説を担当させて頂き、皆様を音響学の世界へご案内致します。

今回のテーマは「中域」です。中域の振る舞いを把握するためには、位相の理解と幾何音響の習得が必要です。低域編の波動音響に比べると、今回の幾何音響は感覚的に分かりやすい理論だといえます。位相と幾何音響の理論は、スタジオ設計のみならず、マイクの位相干渉やスピーカーの再生特性など、レコーディングやミックスの現場でも役に立つ音響学の基本的な理論です。現場でのちょっとした音響障害の解明にはよく使われる理論ですので、知っておくと何かと便利なツールとなります。

それでは、Dr. 中原とミカミタカシのスタジオ音響の科学をお楽しみ下さい。

### ◆壁はスピーカーと同じ！ スタジオは、壁といういくつかのスピーカーに囲まれた空間です。

1つのスピーカーを部屋に置いた瞬間、それが種となり何十個、何百個、何千個ものスピーカーのコピーが出現します。部屋を取り囲む壁は、スピーカーを複製するコピー機なのです。普段我々がスタジオで聞いている音は、オリジナルのスピーカーの音だけではなく壁面によってコピーされたいくつかのスピーカーの音を含んでいます。

音響調整の現場では、壁を補強して壁の鳴りを軽減するといった作業をみかけることがあります。幾何音響的な観点からは、壁を強固にするということは巨大なスピーカーのコピーをその壁面に生成することを意味します。従って、壁補強による音響調整は、不快な鳴りを軽減するとともに、壁面にスピーカーのコピーを出現させる作業にもなります。多くの場合、壁の鳴りよりもコピーされたスピーカーの音量の方が大きいため、音響調整後により一層壁から音が聞こえてくるようになることもあります。

壁からの音を軽減するためには、壁の鳴り止めではなく吸音や拡散といった処置が必要です。従って、強固な壁で高度に遮音されたスタジオにおいては、特に吸音や拡散といった音響処理が重要となります。

壁面によってコピーされたスピーカー（音源）のことを「虚音源」と呼びます。部屋を取り囲む壁によって生成された数多くの虚音源の音の重なり合いが、いわゆる部屋の「響き」をつくり出します。部屋の響きに大きく関わっている虚音源を把握するためには、「幾何音響」というテクニックを理解する必要があります。幾何音響は「スピーカーから飛び出した音の玉が壁に当たって跳ね返し、耳に到達して聞こえる」といった、多くの人に理解して頂きやすい理論です。但し、幾何音響理論は低域には使用できず、中高域といった帯域に限定して使用する必要があります。

スタジオ設計において、幾何音響を駆使して虚音源を操るということは、周波数特性だけではなく響きといった時間特性の設計を行うことを意味します。みなさんは、前回（第2回目）で既に低域の周波数特性を設計することを学びました。その次である今回は、中域に注目して、幾何音響を駆使しながら時間特性の設計も試みましょう。その際に、周波数特性への影響に関しても検証するために「位相」といった波動音響の力を一部借用することになります。

幾何音響と波動音響とのミックス、それが「中域」の世界です。

## 第1部 理論編

### 部屋の壁がスピーカーに変身。変身した数多くのスピーカーがモニター特性に与える影響とは？

(中原雅考)

中域を支配する「幾何音響」は、

音がボールのように壁に当たって跳ね返る

といった直感的な仮定の下に成り立っています。

つまり、幾何音響で物事を考えるためには、音も「光が鏡に当たって跳ね返る」と一緒のような振る舞いをするという前提条件が必要になります。このような条件、すなわち「入射角＝反射角」となる反射条件を「鏡面反射」と呼びます。

そこで、まずは第1回目のお話を少々復習。。

【図1】は、低域と中高域が有限長の壁に入射して跳ね返る様子を表したイメージ図です。

中高域では、入射した音は「入射角＝反射角」の条件で「鏡面反射」しています。この時、**反射波の音量は入射波の音量と同じになります。**

一方、低域では、入射波の成分の一部もしくは多くが回折してしまうため、鏡面反射にはなりません。これは、**低域にとっては反射の対象となる壁が小さすぎるためです。**このような環境下では「幾何音響」は成立しません。そのため低域では、「波動音響」を使用する必要があります。

原則として、幾何音響は鏡面反射が成立する環境でしか成立しません。そして、鏡面反射は、反射する物体が入射する音の波長に比べて十分大きいときにのみ成立します。

「反射物がどのくらい大きいと鏡面反射するのか」ということに対しては「フレネルゾーン」という理論が応用できることを第1回目で紹介しました。理論的には、第1フレネルゾーンが反射物に含まれていれば、鏡面反射可能と考えられますが、実用的には第2フレネルゾーンが含まれていることを鏡面反射の条件と考えます（なぜ第2フレネルゾーンなのかということに関しては、明解な理論見解はなさそうです。実験結果などから第1フレネルゾーンでは少々不安なので、少し保険をかけたといったニュアンスだと思っています）。

フレネルゾーンの大きさは、周波数の他にも音源位置や受信位置の関係によっても変化しますが、それがある程度のパターンで計算したチャートが【図2】です。

【図2】は、20Hzから20kHzの周波数に対して第2フレネルゾーンの直径を3種類の条件（赤、青、オレンジ）で計算した結果です。すなわち、○○Hzの音を完全に反射して跳ね返す（鏡面反射させる）ためには、どの程度の大きさの遮蔽板が必要かを表したチャートが【図2】ということになります。【図2】の赤のラインより上の黄色のエリアが、鏡面反射を与えることのできる条件を満たしているエリアです。

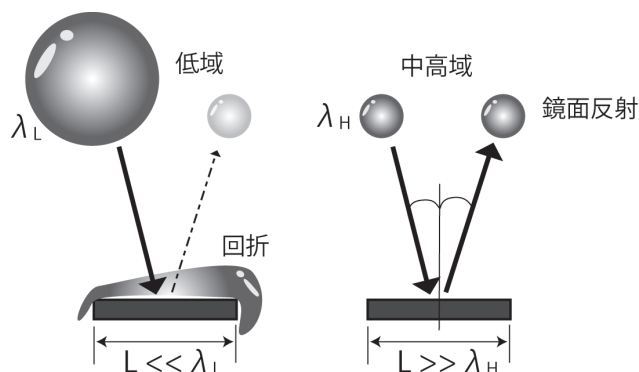
【図2】によると、たとえば、バンド演奏のレコーディング時に、500Hz近辺のボーカルのかぶりを完全に遮断するためには、直径2mの遮蔽板が必要ということになり、50Hz近辺のバスドラムのかぶりを完全に遮断するためには、直径9mの遮蔽板が必要ということになります（低い音のかぶり対策に関しては、遮蔽板に期待するよりは、マイキングを工夫の方が現実的ということになりますね）。

【図2】の計算結果を部屋の壁の大きさとして表現したものが【図3】になります。鏡面反射の条件は、壁に対してどのくらいの距離から音が入射されるか、すなわち壁の近くにスピーカーを配置するか、壁から遠く的位置にスピーカーを配置するかで異なってきますが、スタジオの多くはスペースファクターの観点から、壁の近くにスピーカーを配置することになるでしょう。従って、スタジオでは、【図3】の(C)が示す曲線より上の帯域、すなわち【図3】の青い色の領域（水色・青）が、鏡面反射していると考えられる周波数帯域と考えられます。

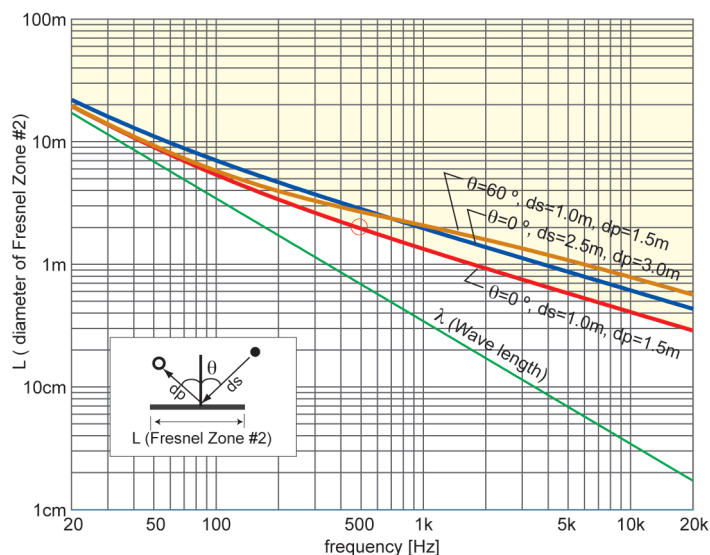
従って、今回の「中域編」で対象としている周波数帯域とは、

- ・ 6 畳程度の部屋 約 410Hz 以上
- ・ 12 畳程度の部屋 約 370Hz 以上
- ・ 20 畳程度の部屋 約 340Hz 以上

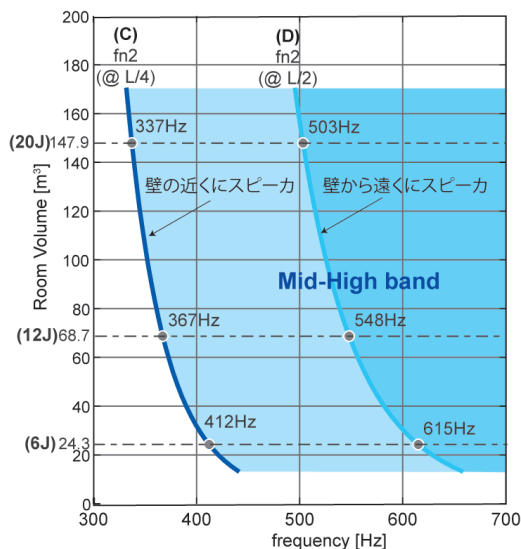
ということになりますので、今回ののお話は、およそ 300Hz～400Hz 以上が主役の帯域だと思ってお下さい。



【図1】鏡面反射と波長と反射板の大きさの関係



【図2】鏡面反射に必要な反射板の大きさ



【図3】部屋の大きさと鏡面反射周波数の関係



## 複数音源の性質

### 2箇所から同じ音が再生されるという意味

幾何音響の説明の前に、まずは「2箇所から同時に同じ音が再生される」という現象について理解しておきましょう。複数音源による位相干渉の現象は、スタジオの設計だけでなく、スピーカーの設計やマルチマイクによる収録など、様々な場面で必要となる知識です。

【図4】は、リスニングポイントからそれぞれ距離の異なる場所に設置されたA、Bの2つの音源から同時に同じ音を再生した様子を表しています。この場合、リスニングポイントでは、A、Bが再生された音の合成音を聞くことになります。その際、リスニングポイントで観測される合成音の特性は、AとBとの距離差 $\Delta d$ により、変化することになります。

#### 1. $\Delta d = 0$ (AもBもリスニングポイントから等距離に設置)

リスニングポイントで観測される合成音(A+B)は、AおよびBそれぞれから再生される音量より6dB大きな音量となります。周波数特性には変化はありません。再生音が単純に6dB大きくなります。

#### 2. $\Delta d = 8.6\text{mm}$

距離差が8.6mmになると、可聴帯域上限周波数である20kHzにディップが生じてしまいます。

#### 3. $\Delta d = 17\text{cm}$

#### 4. $\Delta d = 1.7\text{m}$

距離差が大きくなるにつれ、ディップ周波数は低域にシフトします。

例えば、 $\Delta d = 17\text{cm}$ の場合は、 $f_1 = 1\text{kHz}$ にディップが生じます。そして、さらに距離差が大きくなり $\Delta d = 1.7\text{m}$ となると、ディップは $f_1 = 100\text{Hz}$ の低域に推移します。この時、ディップは $f_1$ だけではなく、 $f_1$ の奇数倍の周波数( $f_1 \times 3$ ,  $f_1 \times 5$ ,  $f_1 \times 7$ , ...)にも発生します。

#### 5. $\Delta d = 8.6\text{m}$

距離差が8.6mになると、ディップは最低可聴周波数である20Hzに推移します。AとBとの距離差がこれ以上大きくなると、AとBの音は別々の音として分離して聞こえるようになります。

以上のように、距離の異なる2箇所から同じ音が再生される場合、その距離差によって合成音の周波数特性が変化します。この周波数特性の変化が櫛(Comb)の形をしたフィルタのようであることから、このような現象を「コムフィルタ現象」と呼びます。

コムフィルタ現象は、2つの音の位相干渉によって発生します。

【図5】は、リスニングポイントからの距離がLとL+ $\Delta d$ である音源A及びBによって生じるコムフィルタ現象の発生の様子を表した図です。

少しくらい離れているといった程度の2つの音源は、低域にとっては合成された一つの音源のように見えてしまいます。その結果、リスニングポイントにおいては、位相干渉の無い(周波数特性の変化の無い)6dBパワーアップした特性が得られます。

一方、中高域では、2つの音源の距離差 $\Delta d$ によって位相干渉が生じます。

#### 1. ディップを与える周波数： $f_1$ [Hz]

距離差 $\Delta d$ が再生音の半波長となる場合、AとBの音は互いに打ち消し合い、その合成音にディップが生じます。

これを式で表現すると以下のようになり、ディップを与える周波数 $f_1$ が得られます。

$$\Delta d = \lambda / 2 \rightarrow \lambda = 2 \times \Delta d \rightarrow f_1 = 344 / \lambda = 172 / \Delta d \text{ [Hz]}$$

実際には、半波長だけではなく、半波長の奇数倍でも同様にAとBの音のキャンセル現象が生じるため、 $f_1$ を一番低い音として、 $f_1 \times 3$ ,  $f_1 \times 5$ ,  $f_1 \times 7$ , ...といった周波数でディップが発生します。

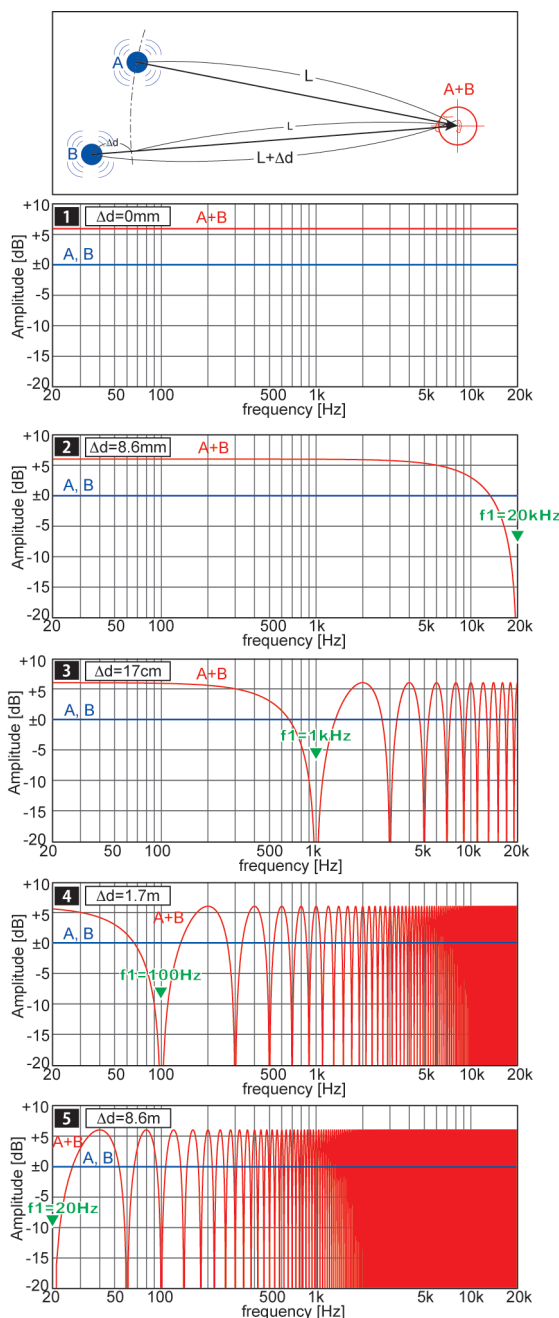
#### 2. ピークを与える周波数： $f_1 \times 2$ [Hz]

一方、距離差 $\Delta d$ が再生音の1波長となる場合、AとBの音は互いに強め合い、その合成音にピークが生じます。

これを式で表現すると以下のようになり、ピークを与える周波数がディップを与える周波数 $f_1$ の偶数倍で与えられることが分かります。

$$\Delta d = \lambda \rightarrow \lambda = \Delta d \rightarrow f = 344 / \lambda = 344 / \Delta d = 2 \times f_1 \text{ [Hz]}$$

ピークに関しても同様に、1波長だけではなく、その整数倍でも同様にAとBの音のキャンセル現象が生じるため、 $f_1 \times 2$ を一番低い音として、 $f_1 \times 4$ ,  $f_1 \times 5$ ,  $f_1 \times 8$ , ...といった周波数でピークが発生します。

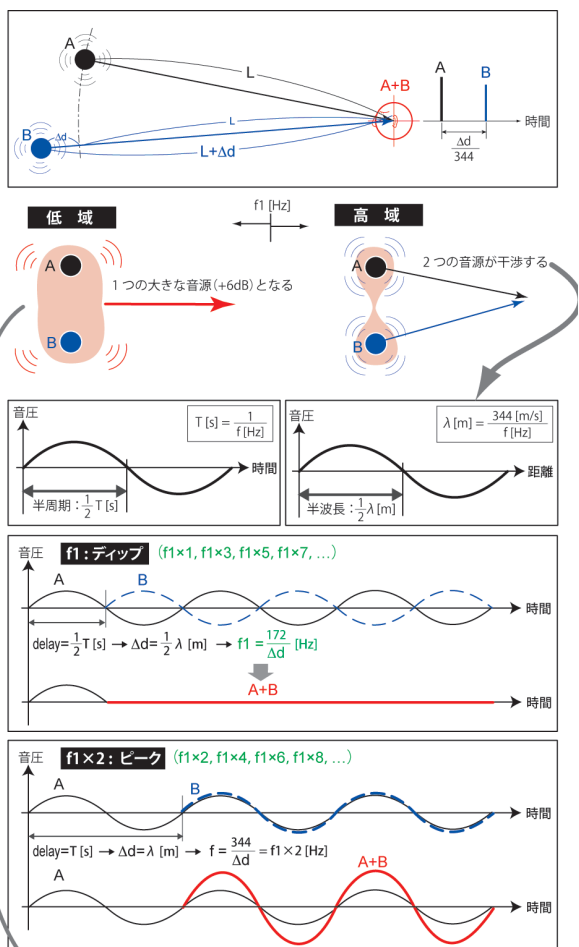


【図4】2つの音源と周波数特性

以上のように原理で発生するコムフィルタ現象ですが、実際にはピークよりはディップの方が問題になることが多いため、ディップを与える周波数( $f_1$ ,  $f_1 \times 3$ ,  $f_1 \times 5$ , ...)にのみ注目しておけば良いでしょう。

【図6】は、コムフィルタ現象による発生するディップ周波数( $f_1$ )とリスニングポイントから2つの音源までの距離差・時間差の関係を表したチャートです。このチャートによると、例えば、距離差が17cm(時間差0.5ms)の場合、1kHzにディップが生じ、距離差が1.7m(時間差5ms)の場合、100Hzにディップが生じることが分かります。

これらのディップによる周波数特性の変化は、音色の違いとしても聞き取ることが出来ます。換言すれば、コムフィルタ現象は、再生音の音色を変化させてしまいます。主観的な印象からは、コムフィルタによる音色の変化の傾向は、【図6】に示した(A)(B)(C)の3つのカテゴリーに分かれると思います。



【図5】 コムフィルタ現象

(A) LPF : 0ms ~ 0.5ms (0cm ~ 17cm),  $f_1 = \infty \sim 1\text{kHz}$

コムフィルタ現象による音色の変化が最も分かりやすい領域です。距離差・時間差が大きくなるにつれ、 $f_1$  が低い周波数にシフトしますので、その分徐々にハイ落ちした合成音として聞き取れます。

(B) BPF : 0.5ms ~ 5ms (17cm ~ 1.7m),  $f_1 = 1\text{kHz} \sim 100\text{Hz}$

(B) の領域になると、 $f_1$  と  $f_1 \times 3$  で挟まれた帯域 (すなわち  $f_1 \times 2$  のピーク) が強調されたように聞こえます。従って、高域の変化よりも 100Hz ~ 1kHz の間のどこかの中低域が強調されたように聞こえます。

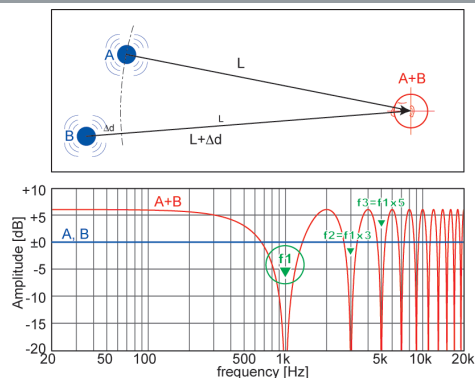
(C) ビート : 5ms ~ 29ms (1.7m ~ 10m),  $f_1 = 100\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$

(C) の領域になると、音色の変化というよりは、ブルブルといった感じのビート音が聞こえるようになります。2つの音により合成された1つの合成音が、再び2つの音に分離してゆく前兆のようです。

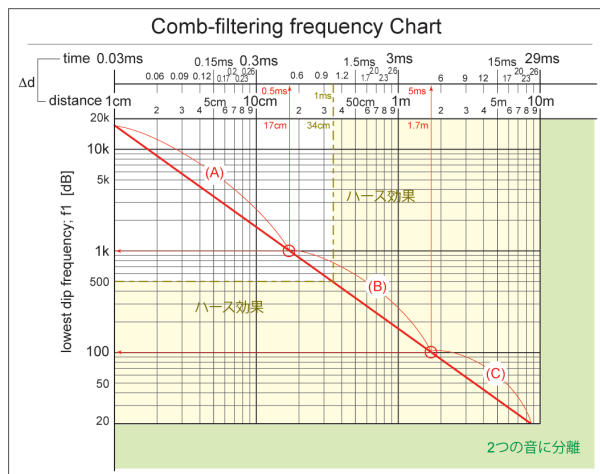
コムフィルタ現象による音色の変化に関しては、ディレイ有り無しのピンクノイズをモノミックスして聞くことで、簡単に確認できます。ProtoolsをはじめとしたDAW などでは簡単に確認できると思いますので、是非お試しください。コムフィルタ現象による音色の変化を実際に聞くと、ミキシングの際に用いるディレイというエフェクトが、広がり感だけではなく周波数特性にも影響を与えていることが良く分かります (Dleay をかけるということは EQ も同時に行っている)。

コムフィルタ現象による音色の変化は、色々なところで身近な現象として発生しています。

【図7】は、一般的な2チャンネル再生環境を表した図です。ここでは、音源AがLchスピーカー、音源BがRchスピーカーを意味しています。



【図6】 距離差・時間差とコムフィルタ周波数の関係



【図7】 音源間隔と位相干渉の例

それぞれのスピーカー（A、B）は、リスニングポイントから等距離に設置されていますが、実際にそれらの音を聞く人間の耳は、頭の真ん中に付いているわけではないので、**耳の位置を基準に考えると、A及びBは等距離にはなりません。**

その距離差  $a'-b'$  に関しては、頭の中心から耳までの距離を 10cm と仮定すると、モニター距離  $a, b$  が 1.5m の場合であっても 3m の場合であっても、 $a'-b' \approx 10\text{cm}$  となります。その結果、【図 7】の **A** に示すように、左右それぞれの耳に入射する A と B の合成音には、**2kHz 近辺にディップ**が生じてしまいます。これが、よく言われる「**ファンタムセンターによる周波数特性の変化**」です。このように、ファンタム音像による定位表現では、音源の特性を損なわずにリスナーに再生音を届けることができません。**周波数特性を損なわずに、センターに音像を定位させるには、5.1ch 等で使用されるセンタースピーカー（ハードセンター）を使用するしかないということになります。**

次に、A と B による位相干渉の様子を音圧分布として計算したものが【図 7】の **B~E** となります。**B・C** がモニター距離  $a=b=1.5\text{m}$  の場合の計算結果で、

**D・E** が  $a=b=3\text{m}$  の場合の計算結果です。図中の赤の曲線は、A、B のスピーカーをまとめて 1 つのスピーカーとして考えた場合の指向特性を表しています。これらを眺めると、**低い周波数（50Hz）では A と B が 1 つのスピーカーのように振る舞っており指向性も広いことが分かりますが、周波数が高くなると（200Hz）、リスニングポイントが青いディップのラインで挟まれており、指向性、すなわちリスニングエリアが狭くなっていることが分かります。**

また、 $a=b=3\text{m}$  の場合（**D・E**）に比べると、 $a=b=1.5\text{m}$  の場合（**B・C**）の方が、指向性（カバーエリア）が広く、A と B がより 1 つのスピーカーとして機能していることが分かります。まとめると、以下ようになります。

- ・周波数が高い / スピーカー間隔が広い → 位相干渉が激しい → カバーエリアが狭い
- ・周波数が高い / スピーカー間隔が狭い → 位相干渉が少ない → カバーエリアが広い

スピーカーの設計で考えると、ユニット同士が近くに配置（同軸が理想）してあり、クロスオーバー周波数が低いスピーカーが、クロスオーバー周波数においても広いカバーエリアを与えることができると言うことになります。

## 虚音源

### 壁の代わりに新たな音源が出現～虚像法

音が反射するという現象は、反射体の向こう側に新たに音源が生成されることと同じこととなります。このように反射によって新たに生成された音源のことを「**虚音源（虚像）**」とよびます。

虚音源を見つけ出すテクニックが「**虚像法**」となりますが、この虚像法が幾何音響学では重要な役割を担うことになります。

【図 8】は、虚像法により虚音源を作成し、反射の様子を検討する手順を表した図です。

#### A 反射の無い状態

反射のない状況では、A からの直接音のみがリスニングポイントに届きます。

#### B 反射壁が出現

反射壁が存在すると、直接音に加え、壁からの反射音もリスニングポイントに届きます。

#### C 虚音源の生成

反射壁が存在すると、壁に対して実音源 A と対称な位置に「**虚音源 B**」が表れます。つまり、**反射壁を含んだ空間は、反射壁の代わりに「虚音源 B」が存在する空間に生まれ変わります。**

虚音源の位置は、壁の位置によって決定されますが、その特性は反射壁の性質によって左右されます。

例えば、**壁が強固で大きい場合**、低域に関してもエネルギーロス無く跳ね返すことができますので、生成される**虚音源は、低域まで含んだ音量の大きな（実音源と同じ音量）特性**となります。

一方、**壁が弱く小さい場合**、中高域のみを含む音量の小さな虚音源が生成されることになります。

虚音源からリスニングポイントに届く音が、反射壁からの反射音の意味することになりますが、虚音源を作成することで、反射音に関して以下の情報を得ることができます。

##### 1. 反射音の距離

虚音源とリスニングポイントを結ぶ直線が、反射音の距離となる。

##### 2. 反射点

虚音源とリスニングポイントを結ぶ直線と壁の交点が、反射点となる。

以上のように、壁の代わりに壁に対して対称な位置に虚音源（虚像）を設ける方法を「**虚像法**」と呼びます。

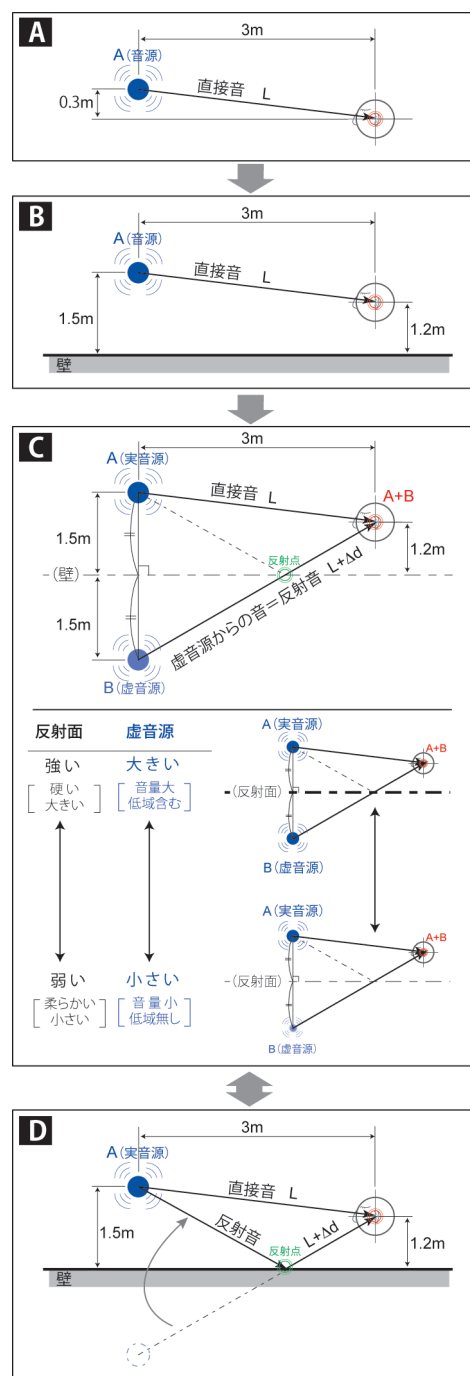
#### D 実際の空間では

**C** の虚像空間を現実の空間に戻した図が、**D** となります。

このような図を効率よく作成するためにも、虚音源を利用した虚像法を用いると便利だということになります。

以上のように、**壁の代わりに虚音源を出現させる方法が虚像法です。**

虚音源を利用することで、反射音の到達距離（時間遅れ）や、壁面上での反射点の把握が容易となり、様々な解析に役立てることができます。



【図 8】反射と虚音源の関係



## スピーカー設置

### スピーカーを置くだけでディップが発生？

壁・天井をあまり吸音していない部屋では、モード現象（前回解説）が支配的となりますが、壁・天井を十分に吸音しているスタジオなどでは、モードの影響よりも床の反射の影響の方が、モニター特性に大きく影響してしまいます。一面だけが極端に反射となっているなど、面ごとに吸音特性に偏りが大きい場合などは、モードではなく反射の検証を行うと良い場合があります。

床の反射の影響が顕著に生じた場合、直接音と床からの反射音との位相干渉によりモニター特性にディップが生じます。このようなディップは、コムフィルタ現象により生じていますので、 $f_1$ ,  $f_1 \times 3$ ,  $f_1 \times 5$ , ... といったように奇数倍音的に発生します。従って、部屋で観測されたディップが、 $\times 1$ ,  $\times 3$ ,  $\times 5$ , ... といった奇数倍音的な配列になっている場合は、モードの影響ではなく、何らかの反射波が原因になっている可能性が高いと考えることができます。

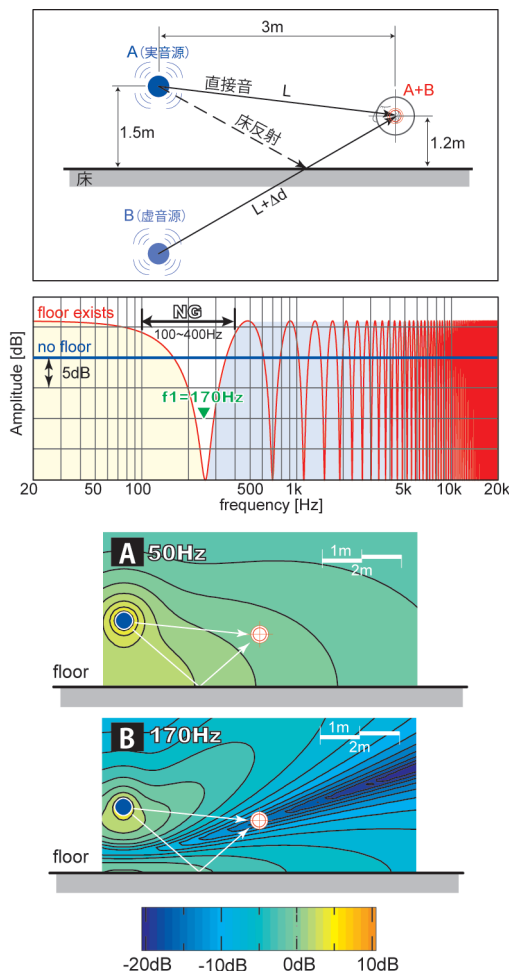
【図9】は、虚像法により床の反射の影響を検討した結果です。ここでは、モニター半径が3mで、床から1.5mの高さにスピーカーが設置されているような環境を仮定しています。

このような環境で床からの反射音と直接音がリスニングポイントで合成された場合、170Hzに大きなディップが生じてしまう可能性があります（冒頭で今回は300～400Hz以上の中高域での内容と述べましたが、多くの部屋では床は大きな面を構成していますので、このような低域での現象も幾何音響（反射と干渉）の範疇として観測されます）。

**A・B**は、50Hzと170Hzにおける再生の様子を表しています。コムフィルタによるディップ周波数、すなわち $f_1=170\text{Hz}$ 未満となる50Hzではムラの少ない音の伝搬の様子が観測されていますが、 $f_1=170\text{Hz}$ では、床からの反射音と直接音との干渉で生じる音圧の谷間にリスニングポイントが呑みこまれてしまっていることが分かります。

このように、コムフィルタ現象が原因となって発生するディップが170Hzに生じている場合、およそ100～400Hzの低域にてモニター障害が生じる可能性があります（【図9】NG帯域）。

逆の見方をすると、400以上が再生帯域となるようなスモールモニターや100Hz以下が再生帯域となるようなサブウーファに対しては大丈夫と言えます。



【図9】床反射とディップの関係

次に、コムフィルタ現象によるディップ周波数  $f_1$  と低域再生可能帯域に注目して、サブウーファの設置条件の検証を行った結果が【図10】です。

ここでは、サブウーファの再生上限を125Hz（-3dB）として、どこまでサブウーファを床から高い位置に上げられるかに関して計算を行っています。

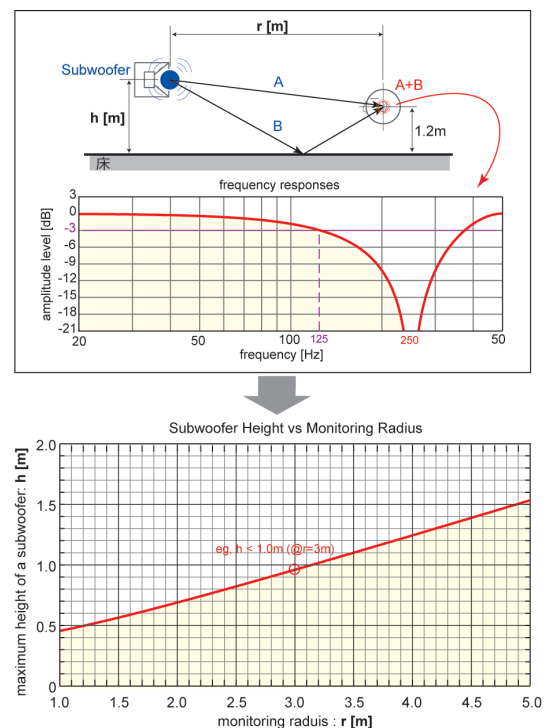
サブウーファの高さと周波数特性は、モニター半径に依存します。すなわち、モニター半径  $r$  が大きくなるほど（ファースフィールド・モニタリング）、直接音と反射音の距離差が少なくなるため、サブウーファを高い位置まで上げることが可能となります。例えば、モニター半径が3mの環境でサブウーファを125Hzまで再生しようとした場合、床から1m以下の高さにサブウーファを設置する必要がありますということになります。

以上の結果からもわかるように、サブウーファに関しては床に直に置くことが最も良い特性が得られる、すなわち床反射の影響を受けずにディップを回避できるということになります。しかし、実際のスタジオでは、コンソールデスクなどの障害物がサブウーファからの再生音をブロックしてしまうことから、サブウーファをウーファユニットが見える位置まで上げて設置しなければならない状況も少なくありません。その場合には、【図10】のチャートを用いて、高さの上限の目安を頭に入れておいてから、設置の検討を行うと良いでしょう。

一方、ラージモニターの設置に関しては、低い位置にウーファユニットを下げで設置できないことが多々あります。このようなケースでは、床反射の影響を大きく受けてしまう可能性があります。特に、モニター半径が小さい環境で（ニアフィールド）、スピーカーを高い位置に設置した場合は、床反射によるディップの影響が顕著になるので注意が必要です。

ファンタム音像の再現性の観点からも、スピーカー設置の高さの上限は、リスニングポイントからの仰角が15度以内といわれています（理想的には10度以内）。

音像と周波数特性の双方の観点からも、モニター設置の基本は、「低く」「遠く」と言うことになります。どうしてもモニターを低く設置できない場合は、ウーファユニットだけでも低い位置に設置できるように工夫すると、低域特性の改善が効果が得られる場合があります。



【図10】サブウーファの設置高さとの再生帯域の関係

次に、スピーカーとその背後の壁との位置関係がモニター特性に与える影響を虚像法で解析してみました（【図 11】）。

フリースタンドでスピーカーを設置する場合、**スピーカー背後の壁からどの程度離して設置するかで、再生特性が変化します。**この場合も、他が吸音でスピーカー背後の壁だけが反射であるような場合に、その影響は顕著に表れます。

スピーカの背後に反射壁がある場合、虚像法により、**反射壁の代わりに背中合わせの（壁を中心に対称となった）虚音源（スピーカの虚像）**が出現します。

【図 11】の虚像の図を眺めると分かるように、虚音源からは、スピーカの虚像に対して後ろ向きに音が再生させることになります。一般的なスピーカでは、後ろ向きに再生されるのは低域のみです。従って、ここで扱う B の反射音に関しては、**そのほとんどが低域成分であると考えられます。**

このように、虚音源を作図する際に、**スピーカの虚像**に関しても作図しておく、虚像から再生されている反射音がどのような成分であるかを視覚的に確認することができます。

では、背壁からの距離 d の違いにより、モニター特性（A+B）がどのように変化するかを眺めてみましょう。

## 1. d=0

背壁にスピーカーを埋め込んだ場合、すなわち**バッフルマウント**です。この場合は実音源と虚音源はぴったりと重なりますので、**ディップは生じることなく 2 倍（+6dB）の再生パワーが得られます**（【図 11】「d=1mm」参照）。

## 2. d→小

背壁から近い位置にスピーカーを設置した場合、実音源と虚音源との距離差が少ないため、**コムフィルタによるディップは高域に生じます。**

例えば、背壁との距離「d=10cm」の場合、ディップは 1kHz に生じます。**虚音源がリスニングポイントから近い位置（実音源とあまり変わらない距離）に生成されるため、その影響は大きく、ディップも深いディップとなりますが、高域における障害ですので、グラスウールなどの吸音材で比較的容易に改善することが可能であると思われる。**

## 3. d→中

背壁からスピーカを遠ざけると、**ディップが低い周波数にシフトします。**

例えば「d=1m」の場合、ディップは 86Hz に生じます。このような低い帯域の音響障害は一般的な吸音などでは改善が困難です。

**虚像がリスニングポイントから遠ざかると、その分影響力も小さくなります。**従って、d=10cm の場合に比べると、ディップの深さは浅くなっています。但し、見方によっては、86Hz 近辺のディップの幅が広い良くなったようにも見えますので、ディップが浅くなっただけでモニター障害が軽減されたとは一概には言えません。

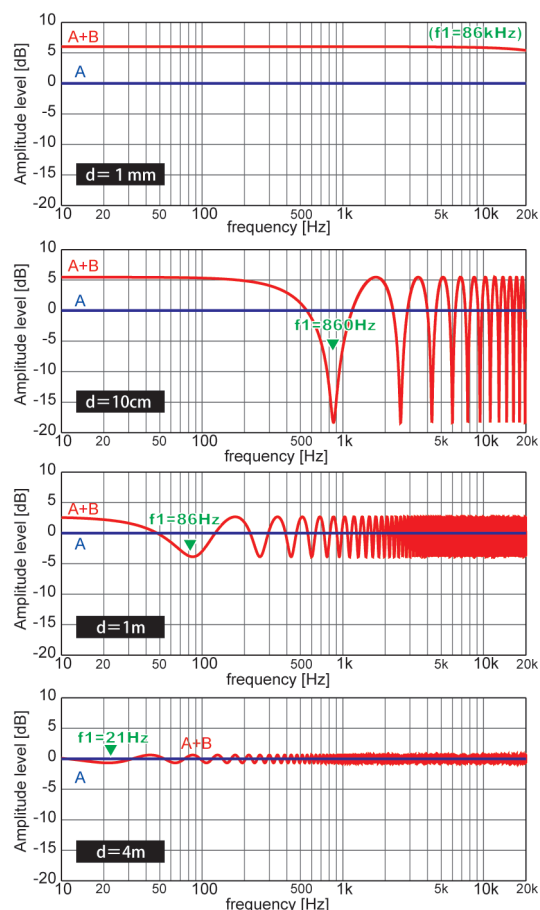
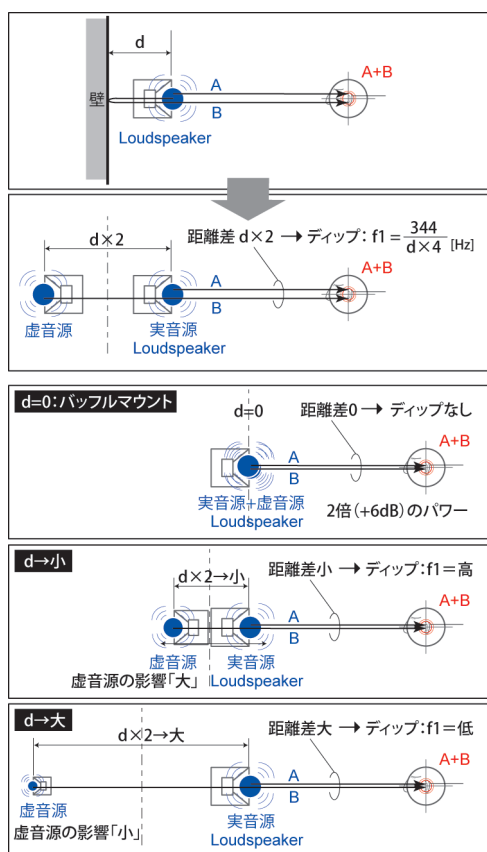
## 4. d→大

「d=4m」といったように、壁から遠く離してスピーカー設置すると、**コムフィルタ現象によって生じるディップは、可聴帯域の下限周波数である 20Hz 近辺まで推移します。**また、虚音源がリスニングポイントから、かなり遠くなるためその影響力も小さく、ディップの影響もほぼ観測できなくなります。

このような環境で低域に大きなディップが発生しているとしたら、それは背壁の影響ではなく、床の反射や部屋のモードなど、他の原因によるものだと考えられます。

以上のように、背壁からの影響という観点からは、d=0（バッフルマウント）or d=4m などといったように、**埋めるなら埋める、離すなら思いっきり離す**といった割り切りが良い結果を与えるということが分かります。

しかし、中小規模のスタジオでは、現実的には、d=10cm ~ 1m といった、どちらかというと中途半端な距離にモニターを設置しなければならない環境が多いのではないのでしょうか。そして、10cm ~ 1m の間でスピーカを色々と移動しながら、「壁に近づけると迫力は増すが、f 特が気に入らない」、「壁から離すと f 特は改善されるが、迫力が足りない」などの試行錯誤を繰り返される方もいらっしゃると思います。これらは、背壁がつくり出す虚像が原因となって生じている現象です。そのことを念頭に置いて調整を行うと、ゴールまでの道のりが近くなると思います。

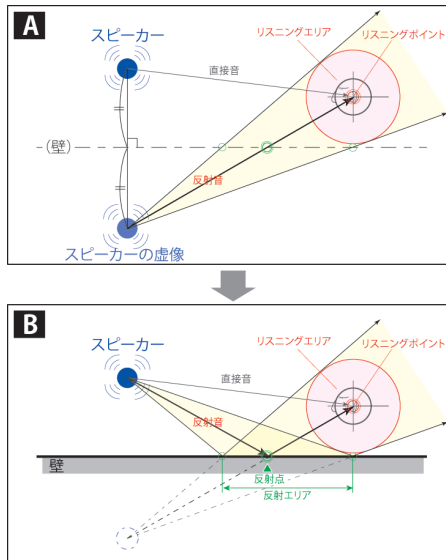


【図 11】スピーカー背後の壁の距離と周波数特性

## コンソールの表面反射の影響 虚像法で反射エリアを検証

ここまでは、リスニングポイント 1 点に的を絞って虚像法の使用方を解説してきました。ここからは、少し視野を広げて、リスニングポイント周辺、すなわち**リスニングエリア**というものを考慮しながら虚音源の影響を検討します。

【図 12】は虚像法にリスニングエリアを取り入れた例です。ここでは、リスニングポイント周辺にリスニングエリアを設けており、その結果、スピーカーの虚像（虚音源）からそのリスニングエリアをカバーする接線が引かれています。これにより、リスニングポイントに対して反射点が与えられていたように、リスニングエリアに対して反射エリアが与えられることになります。



【図 12】リスニングエリアと反射エリアの関係

以上のテクニックを応用すると、ミキシングコンソールの表面反射の影響を検証することができます。

【図 13】の**A**は、床から 70cm の高さ奥行き 1m の反射物、すなわちコンソール面がある場合に、コンソールからの反射音がどのようにリスニングポイントに影響を与えるかを虚像法を用いて作図した結果です。この結果、**コンソール面上には、リスニングポイントに反射音を与える「反射点」が存在することが確認されたため、コムフィルタ現象によるディップが顕著に観測されるのではないかと予測されます。**また、反射音と直接音との距離差が 28cm 程度なので、ディップの周波数は 612Hz 近辺であることも予測できます。612Hz といえばボーカルやダイアログなどのミックスには重要な帯域となりますので、このようなディップに関しては出来る限り軽減しておく必要があります。

しかし、**現実的にはコンソールを排除したり、その表面を吸音したりすることはできません。**そこで、ここでは**B**と**C**といった 2 種類の対処方法を虚像法で検証します。

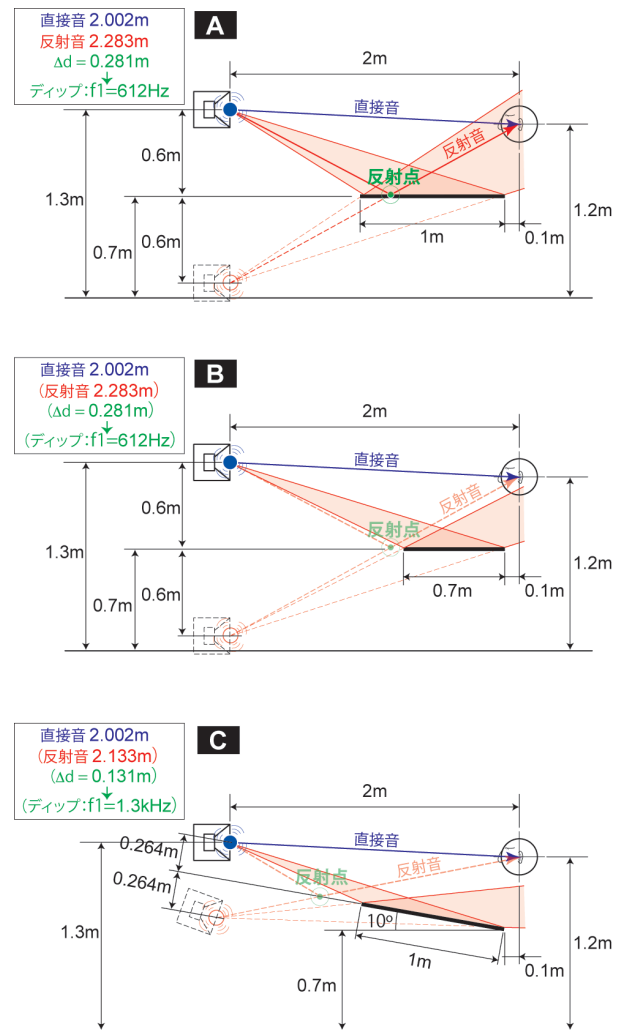
まず**B**ですが、コンソールの奥行きを 70cm に短くした場合です。この場合、**反射点がコンソール表面上に存在しないため、反射音の影響が軽減できることが期待できます【注】。**尚、直接音と反射音との距離差に関しては**A**と変わらないため、ディップの周波数は変わらず 612Hz であると考えられます。

【注】虚像法的（幾何音響的）には、虚音源を生成している反射面上に反射点が含まれない場合は、リスニングポイントに対する反射音が生じないということになりますが、現実的には（波動音響的には）、反射点が反射面の端からかなり遠ざからないと完全に反射の影響が無い状態にはなりません。

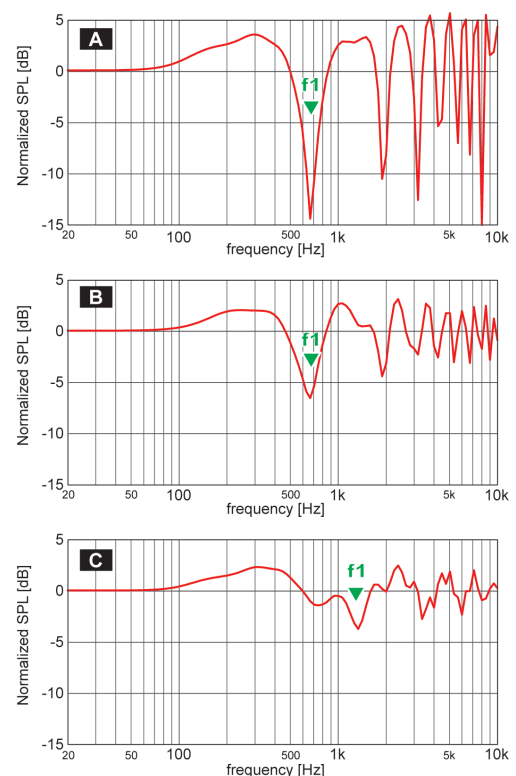
次に**C**ですが、コンソールの奥行きは変えずに 10 度傾けたケースです。この場合、**B**とのケースに比べ、コンソールよりさらに遠い位置に反射点を排除することができるため、反射音の影響をさらに軽減できることが期待できます。その上、直接音と反射音の距離差が短くなるため、ディップの周波数が 1.3kHz という高域にシフトします。音響障害の対象となる周波数が高域にシフトすると、コンソール表面の凹凸による効果でさらに反射音の軽減が期待できます。

以上の検証結果を BEM（境界要素法）という波動音響シミュレーションにより確認した結果が【図 14】です（コンソール表面凸凹の影響は加味していません）。

【図 14】の結果を眺めると、高度な波動音響シミュレーションに頼らなくても、虚像法による簡単な検証にて、かなり正確に反射の事象を予測できることが分かります。



【図 13】コンソール表面反射の影響



【図 14】【図 13】のシミュレーション結果（BEM）



## 時間特性の設計

### 初期反射音の取り扱いに関する色々な流儀

ここまでは、鏡面反射を前提とした幾何音響の中でも、位相といった波動音響的な要素を取り入れたコムフィルタリング現象を中心として、スピーカーまわりに関わる周波数特性への影響に関して解説を行ってきました。これらは、いわば中域の中でも低域寄りの「中低域」の世界です。

さて、理論の部の最後の項は、虚像法を部屋全体に適用し、部屋の響きを設計する手法に関して解説します。これは、中域でも高域寄りの「中高域」の世界ということになるでしょう。

【図 15】は、部屋の平面図形状から得られる反射音情報を虚像法を使って検証した結果です。検証と行っても、虚像法を用いて簡単な作図を行っただけです。ここでは、4つの壁に対して、B1、B2、B3、B4といった4種類の虚音源が生成されます。これらは、音源から発せられた音が最初に壁に当たってリスニングポイントまで届く「一番早い反射音」、すなわち「1次反射音」を表しています。

【図 15】の例では、虚像法により虚音源を作図することで、

直接音「A」→1次反射音「B2」→1次反射音「B4」→1次反射音「B1」→1次反射音「B3」という順番で、リスニングポイントに音源からの音が到達することがわかります。しかもリスニングポイントと虚音源との距離から各反射音の到達時間を逆算できますので、順番だけでなく、どの程度の間隔でそれらの反射音が到達するかに関しても把握することができます。

これらの反射音をどのように処理するかが、部屋の響き（音色）をどのように設計するかということに繋がってきます。

【図 16】は、より詳細に1次反射の様子を検証するために、以下の事項を加味した検証結果です。

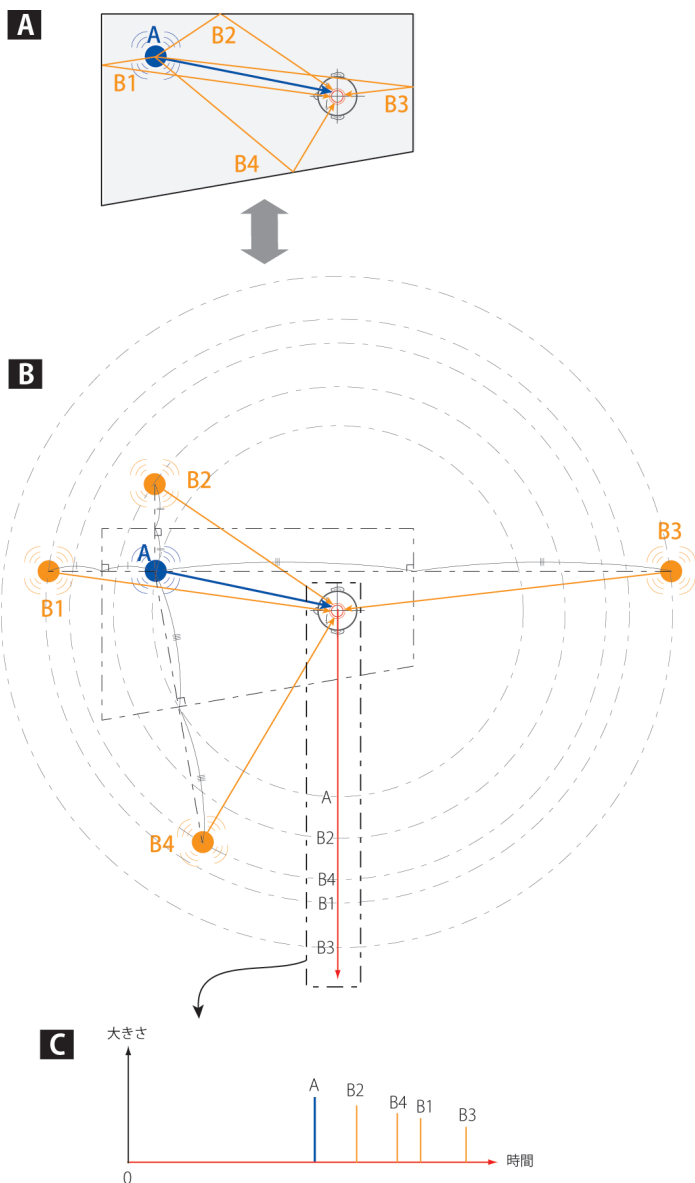
- ・リスニングエリアを設け、反射点だけでなく各壁面の反射エリアを検証
- ・スピーカーの鏡像も作図し、どのような周波数帯域が影響しそうかを検証

このような検証により、この部屋の音響処理に関して、以下の事項がポイントであることがわかります。

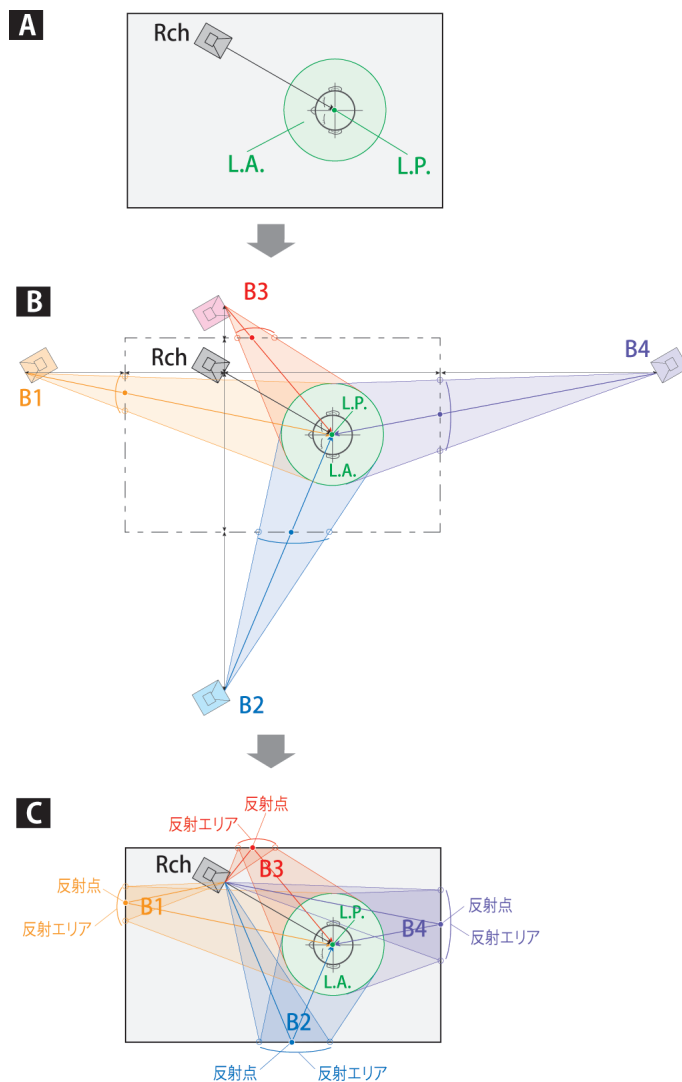
1. 背壁（B4）、左壁（B2）、右壁（B3）、壁前（B1）の順番で、反射エリアが狭くなる。  
→背壁（B4）がもっとも大きな反射面となっている。
2. 背壁（B4）、左壁（B2）、右壁（B3）、壁前（B1）の順番で、虚音源から再生される音が各スピーカーの虚像の音響軸から外れてゆく。  
→この順番で高域が減衰した反射音となっている。  
→背壁（B4）に対しては高域まで含めた音響処理が必要  
→前壁（B1）に対しては低域を中心とした音響処置を検討すればよい。
3. 虚音源は新たな音像を形成する。  
→Rchとしての音像定位を考えるとB4やB2の虚像はなるべく控えめである方がよい。例えば、B2の虚音源が強力（左壁の反射が顕著）である場合、Rchの音が左方向からも聞こえてしまうことになるでしょう。

以上を総合すると、背壁（B4）と左壁（B2）をどのように音響処理するかが、一番のポイントとなるように予測されることになります。

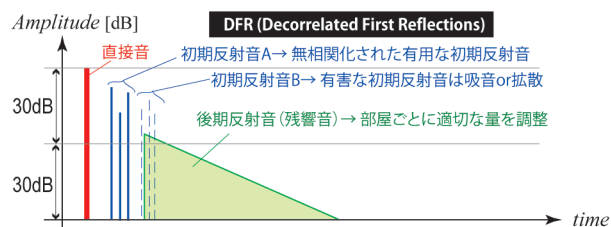
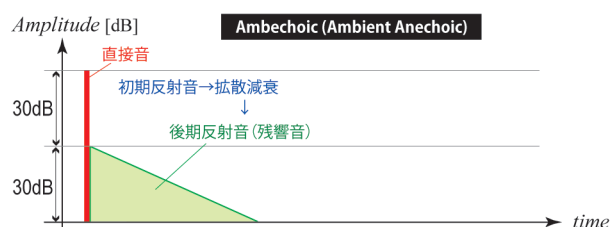
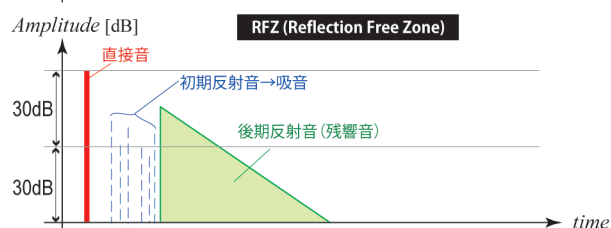
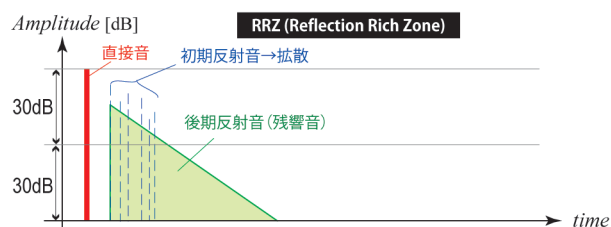
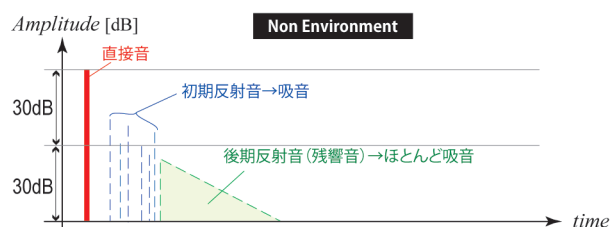
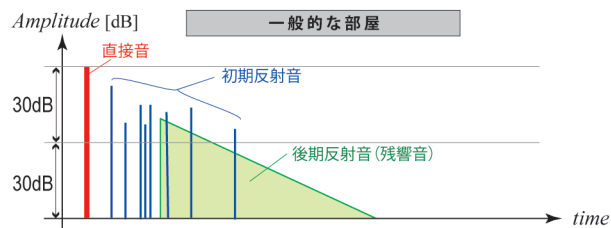
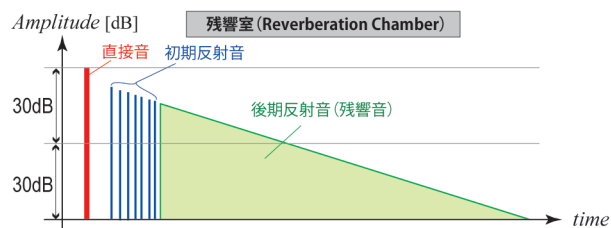
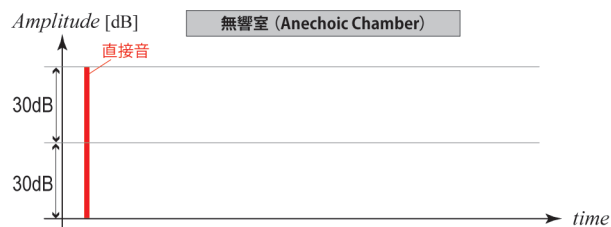
例えば、吸音パネルやディフューザーなど、世の中には様々な音響調整パーツがありますが、それらを上手に活用するためには、適当な場所にとりあえず設置してみるのではなく、虚像法などで反射音の振る舞いを検証した上で、それらの設置場所を検討すると、ゴールへ早くたどり着けるでしょう。



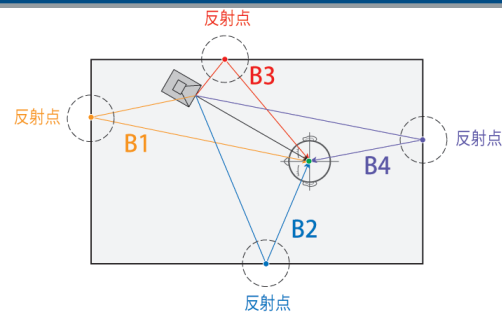
【図 15】虚像法による反射音到来パターンの検証



【図 16】部屋の反射を虚像法で検証

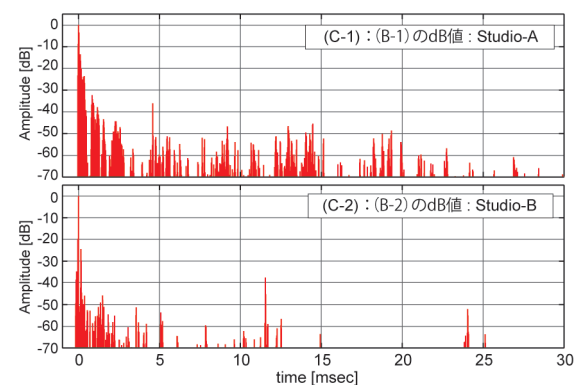
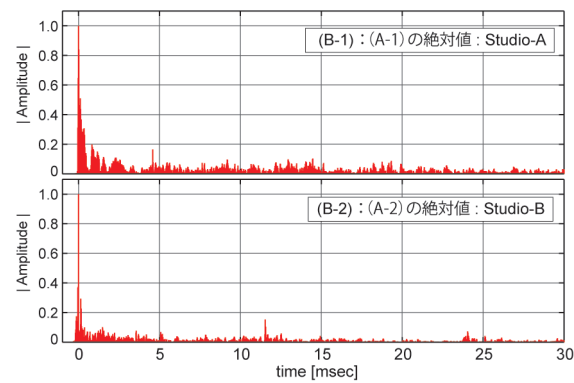
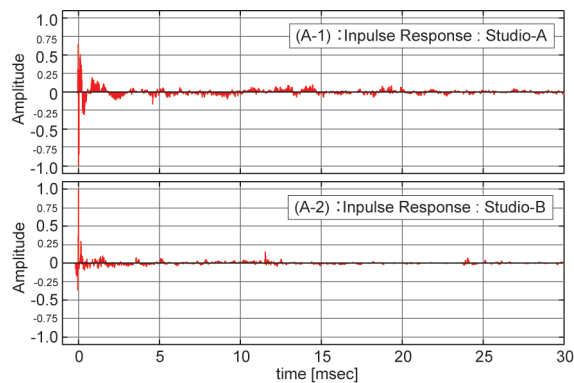


【図 17】 部屋の設計手法と反射音の関係



反射点	吸音	Non Environment
反射点	拡散 (反射大)	RFZ (Reflection Free Zone)
反射点	拡散 (反射中)	RRZ (Reflection Rich Zone)
反射点	拡散 (反射小)	Ambechoic (Ambient Anechoic)
反射点以外	吸音/反射	Non Environment (バツフル面は反射でもOK)
反射点以外	拡散	RRZ (Reflection Rich Zone) RFZ (Reflection Free Zone) Ambechoic (Ambient Anechoic)
反射点以外	吸音/拡散	DFR (Decorrelated First Reflections)

【図 18】 部屋の種類と反射音の設計方法



【図 19】 実際のスタジオの反射音測定例

虚像法で1次反射音の解析ができれば、次はその反射音をどのように加工するかが、スタジオの響き(音色)をつくる重要なプロセスとなります。そのためには、直接音に対して初期反射音と後期反射音(残響音)をどのような割合でバランスさせるかといった「時間特性の設計図」が必要になります。

【図17】は、スタジオ(コントロールルーム)設計における代表的な5種類の時間特性の設計図を示したものです(比較のために、無響室、残響室、一般的な部屋の場合を付記しています)。また、それらの設計手法を実現するために、反射面をどのように音響処理するかに関して整理した表が、【図18】となります。

## 1. Non-Environment

1970年代に、Tom Hidley, Philip Newellらによって考案された手法。スピーカを埋め込んだバツフル面と床面を除き、部屋全体をベーストラップなどを用いて広帯域吸音する方法。ベーストラップやバツフルマウントなど、現在でもスタジオ設計に使用される基本的な手法は、Tom Hidleyらによって考案された。

Non Environmentでは、直接音と初期反射音との位相干渉を防ぐために徹底して吸音(低域まで含めた広帯域吸音)を行う。

## 2. RRZ (Reflection Rich Zone)

1980年代に、George Massenburgにより考案された手法。直接音と位相干渉をおこしてしまう初期反射音に関してはディフューザーなどで拡散してしまうという手法。

## 3. RFZ (Reflection Free Zone)

1980年代に、Peter D'Antonioにより考案された手法。直接音と位相干渉をおこしてしまう初期反射音に関しては吸音して削除するが、後期反射音に関してはディフューザーなどで積極的に拡散してしまうという手法。初期反射音は無いが、残響はあるという環境になる。

## 4. Ambechoic (Ambient Anechoic)

Blackbird Studio(ナッシュビル)のStudio Cの設計に用いられた手法(2006年)。George MassenburgとPeter D'Antonioにより考案された手法。RRZとRFZの考えを融合し、直接音より30dB以下となる弱い拡散音を直接音の直後から生成する。スタジオのほとんどを細かなディフューザーで構成するのが特徴。響きのある無響室といった感じ。

## 5. DFR (Decorrelated First Reflections)

中原が考案してスタジオ設計に使用している手法。一般的な音環境には必須である初期反射音を吸音や拡散などによって加工するのではなく、有用な初期反射音は積極的に利用しようという設計手法。直接音と初期反射音との位相干渉を軽減するために、初期反射音を反射率の高いディフューザーを用いて非相関化する。

以上のように、時間特性の設計手法には様々な流儀があり、どれが正解というようなものではありません。これらの流儀の違いが、良い意味でスタジオ設計の個性となっているのだと思います。

【図19】は、2種類のコントロールルーム(Studio A, Studio B)における時間特性の測定例です。どちらも中原が設計したスタジオですが、Studio AはDFRとして積極的に反射音を利用、Studio BはNon Environmentとして吸音中心の音響設計となっています。

【図17】の概念図と比べると実際の波形は複雑で分かりにくいのですが、それでも設計意図の違いはちゃんと時間特性の違いとして表現されていることがお分かり頂けると思います。

虚像法で反射音を分析して時間特性を設計すれば、その効果は音としても測定結果としてもちゃんと表れると言うことですね。

## 第2部 実践編

### 反射で本当に周波数特性が変化するか?

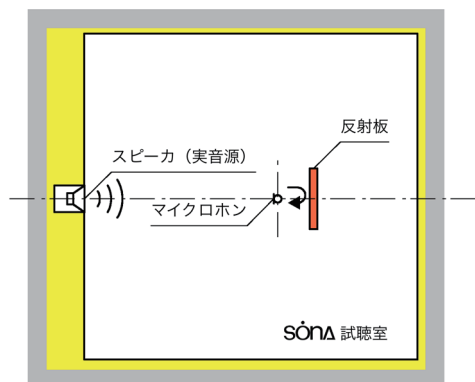
(ミカミタカシ)

さて、果たして本当のところはどうか。前回に続きまして、私ミカミタカシが実践編を担当致します。

今回はsonaの試聴室でお手軽実験をしてみました。その実験を通じて「中域」、「幾何音響」、特に直接音と反射音との干渉によってモニター特性が変化してしまうという現象を私と一緒に見ていきましょう。

## ■ 実験の概要

今回はとてもシンプルな実験です。下の平面図【図20】をご覧ください。



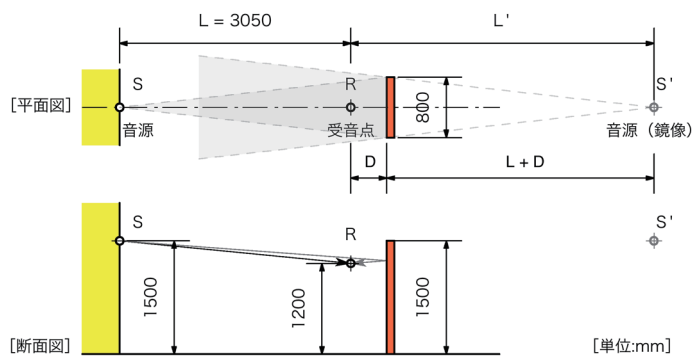
【図20】実験略図(平面図)

試聴室に設置してあるスピーカー(吸音性バツフルにマウントされています)からピンクノイズを再生し、マイクロホンで再生特性を測定します。そのとき、マイクロホン背後に反射板を設置して、その反射板からの反射音がマイクロホン上でのモニター特性にどのような影響があるのかを観察します。

この実験では反射板からの反射音だけの影響を見たいので、本当なら他からの反射がほとんどない無響室などで実験したいところですが、手近に無響室がないものですから、簡易的に試聴室で実験することにしました。

特殊な音場ではなくても反射の影響は見られるのか。試験室ではなく、一般に近い環境下でどんな結果になるのかも興味深いところです。(とは言っても試験室室内の吸音率もまあまあ高い方ではありますが。)

音源(S)と受音点(R)、反射板の位置関係だけを取り出して【図21】に示します。



【図21】音源と受音点と反射板

反射板の位置、即ち図中のDを変化させます。音源と受音点の位置は固定です。音源と受音点の距離(L)は変わりませんが、Dを変化させると反射音の音源位置(S')が変化し、それによって反射音と受音点との距離(L')も変化します。Lが固定で、L'が変化しますので、直接音と反射音との距離差もそれに合わせて変化する事になります。

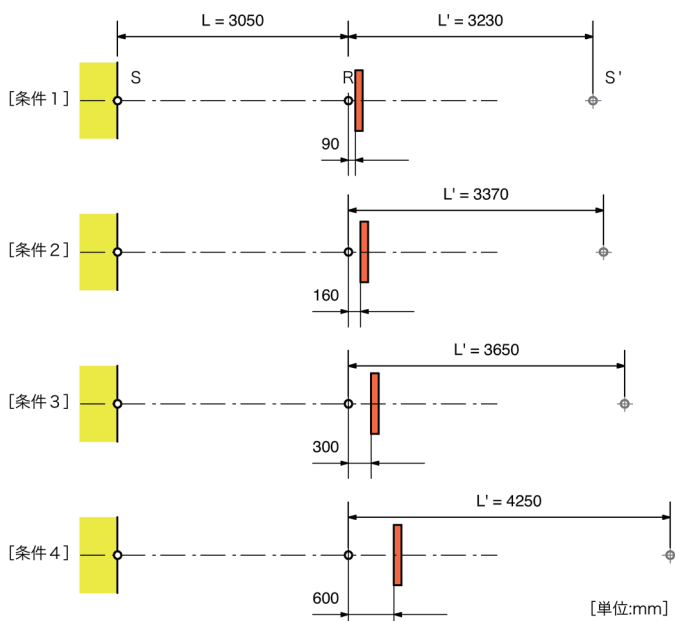
更に、今回測定を行なった4つの条件を【図22】に示しましょう。

## ■ 実験の前にちょっと計算

【図22】の4つの条件で実験を行なった訳ですが、その前に理論編を少々復習しつつ、特性がどう変化しそうなのか計算をしてみましょう。電卓のできる程度の内容ですので、皆さんも一緒に計算しながら読んでみて下さい。

直接音と反射音との経路差( $\delta$ )が半波長( $\lambda/2$ )の奇数倍になったとき、その周波数はディップになる。





【図 22】実験を行なった4つの条件

これを今回の実験に具体的に当てはめてみましょう。

もう一度【図 21】をご覧ください。経路差は図の通り、 $[\delta = L' - L]$  です。また、図を見ての通り  $[L' = L + 2D]$  ですから、 $[\delta = L' - L = (L + 2D) - L = 2D]$ 。つまり経路差は  $2 \times D$ 。マイクと壁との距離の2倍ということになります。分かりやすいですね。

(断面図を見ますと、音源と受音点では高さが違いますので、正確にはその分も計算に含めなくてはいいませんが、ここでは簡単のために無視します。このざっくり感が“実践編”のやり方！)

ということで、理論が正しければ“ $2D$ が半波長の奇数倍になる周波数”でディップが生じるはず。計算してみると、下表【表 1】のようになります(音速を  $344\text{m/s}$  として計算しました)。

	D(mm)	$\delta$ (mm)	$\delta = \lambda/2$	$3\lambda/2$	$5\lambda/2$
条件 1	90	180	956	2867	4778
条件 2	160	320	538	1613	2688
条件 3	300	600	287	860	1433
条件 4	600	1200	143	430	717

【表 1】ディップを生じると予想される周波数

【条件 1】(マイクロホンと反射面との距離 (D) が  $90\text{mm}$  の場合を例にとると、 $956\text{Hz}$  (波長) のときにちょうど経路差が半波長分 ( $\lambda/2$ ) となり、最初のディップとなることが予想され、さらに半波長の3倍となる  $2867\text{Hz}$ 、半波長の5倍となる  $4778\text{Hz}$  で高次のディップが生じると考えられます (勿論このあと半波長の7倍、9倍と続きます)。

直接音と反射音との経路差 ( $\delta$ ) が半波長 ( $\lambda/2$ ) の偶数倍になったとき、その周波数はピークになる。

こちらも同様に計算してみました。【表 2】です。

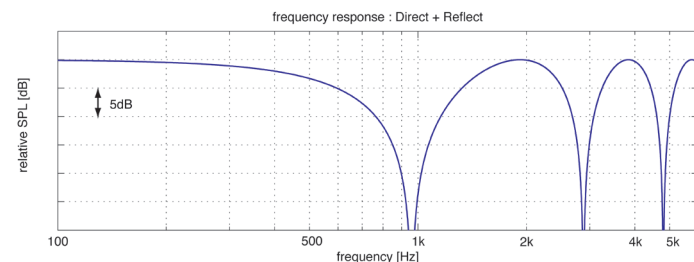
	D(mm)	$\delta$ (mm)	$\delta = \lambda$	$2\lambda$	$3\lambda$
条件 1	90	180	1911	3822	5733
条件 2	160	320	1075	2150	3225
条件 3	300	600	573	1147	1720
条件 4	600	1200	287	573	860

【表 2】ピークになると予想される周波数

「半波長の偶数倍」というのは回りくどいですが、表中の通り即ち「経路差が波長の整数倍」ということですね。これでピークを生じる周波数の計算もできました。

ここまでは電卓でもできる計算ですが、計算コーナーの最後に少しコンピュータを使ったシミュレーションの結果を見てみましょう。

電卓での計算では、どこでディップとなるか、どこでピークとなるかだけを見てきましたが、全体の周波数特性はこうになると計算できます。



【図 23】【条件 1】の受音点における周波数周波数特性 (計算値)

上図【図 23】は【条件 1】に対する計算結果です。ディップの位置、ピークの位置は【表 1】、【表 2】の結果と概ね合っているようです。

しかし、これは距離差に応じた時間差で、同じレベルの2つの音が重なり合ったという、理想的な条件で計算したのですが、実験での実際の音場は、

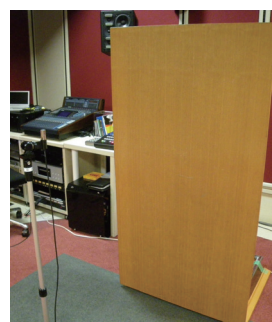
- ・ 反射板以外からの反射音 (試聴室の床、壁、天井や室内に置いてある家具、機材など) も観測される。
- ・ 反射板は 100% 反射するわけではない (多少は吸音される)。
- ・ 位相も変化する。
- ・ 反射板がそれほど大きくない (各条件とも最初にディップを生じるはずの周波数では第1フレネルゾーンもカバーできていない)。

など、計算とは条件が異なります。さあ、実際にはどうなるのでしょうか。

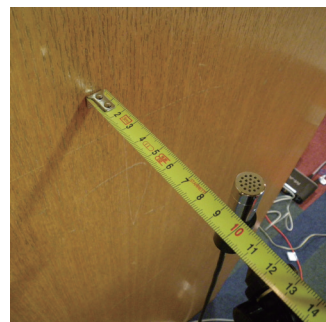
(本題からは少々逸れますが、【図 23】を見るとディップの“罪深さ(?)”がよく分かります。ピークは高々  $+6\text{dB}$  の山を作るだけなのにに対し、ピークは  $-\infty$  (無限大) となる可能性があります。即ち聴こえない帯域ができる可能性がある訳です。我々が音響設計をする際には、特にピークよりもディップに注意を払うのですが、それはこのような理由からです。)

## ■ では実験結果です

まずは実験の様子を写真で少し紹介します (【図 24】、【図 25】)。



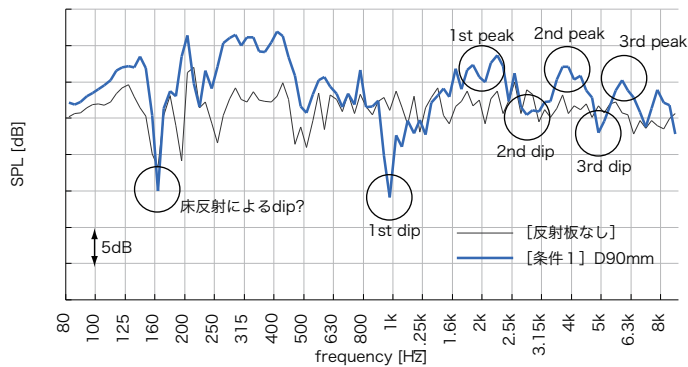
【図 24】マイクと反射板【条件 4】



【図 25】マイクと反射板【条件 1】

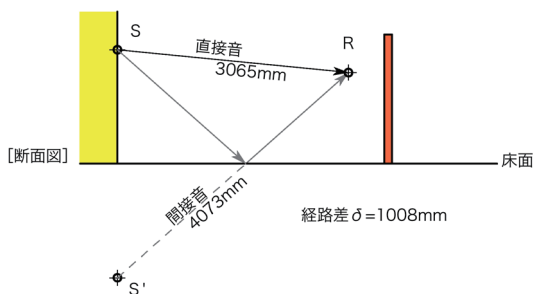
ご覧の通り、反射板は厚さ  $30\text{mm}$  程度の合板です (会社の打合せコーナーにちょうど良く置いてあった机を横にしたとも言えます)。写真には写っていませんが、音源は【図 20】に示した通り反射板に正対して設置してあるセンタースピーカです。

では測定結果を見て行きましょう。まず【条件 1】だけを見てみます。【図 26】の細く黒いラインが反射板が無いとき、青いラインが【条件 1】にしたときの結果です (ギザギザが激しいですが、細かく観察するために  $1/15$  オクターブバンドで見えています)。どうでしょう。【表 1】、【表 2】、【図 23】と見比べてみて下さい。思った以上に予想通りではありませんか。特に  $1\text{kHz}$  の少し下の  $1\text{st}$  ディップはくっきりと現れています。



【図 26】 [条件1] の測定結果

ところで、160Hzより少し上にも鋭いディップが見られます。これは何でしょう。このディップは「反射板なし」のときにも現れていますので、床の反射によるディップではないかと想像できます。低い周波数帯域ではありますが、これも「幾何音響」的に説明がつく現象です。【図 27】を見て下さい。



【図 27】 床反射による直接音と反射音の経路差

このように、床の反射によって直接音と1mくらい経路差がある反射音が受音点にやってきます。1mの経路差 $\delta$ が半波長( $\lambda/2$ )に相当する周波数はおよそ170Hzですから、そこでディップができる訳です。

(スピーカを床に置きでもしない限り、あらゆる部屋でスピーカの音はこの床反射の影響を受けています。スピーカ配置によりディップが出る周波数は変化しますが、皆さんはいつもこのような影響を受けた音を聴いていることになります。)

さて、もう一度反射板の話に戻しましょう。

【図 28】は「条件2」, 「条件3」, 「条件4」の測定結果です。

「条件2」では「条件1」同様にほぼ計算通りのディップの様子がはっきりと分かります。

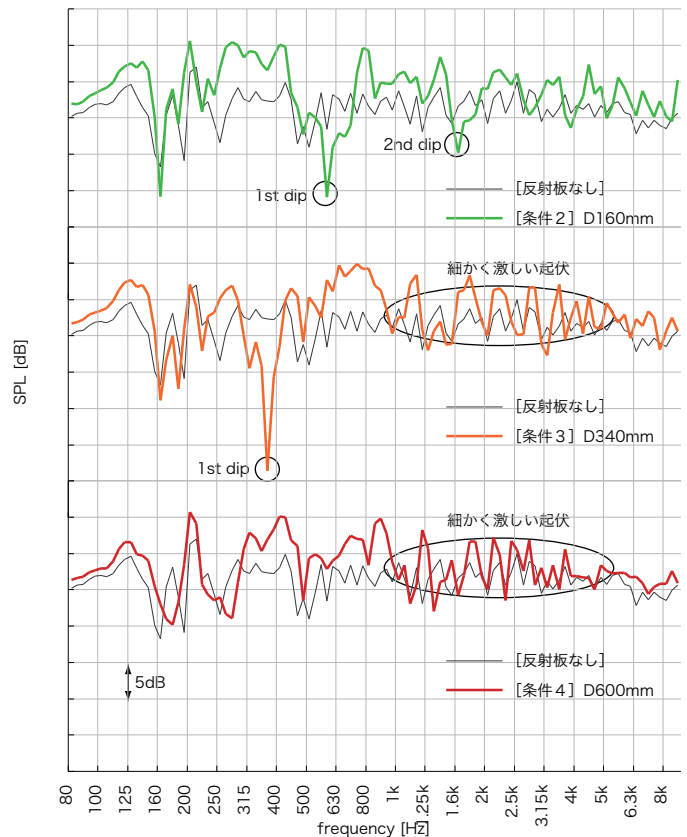
「条件3」では非常に鋭い1stディップが現れていますが、それ以外の部分は明確な山谷としては分かりづらくなってきます。更に「条件4」ではより渾然としてきます。その原因をはっきりと特定することは難しいのですが、

- ・Dが大きくなる(マイクロホンと反射板の位置が離れる)に従って、1stディップの周波数が下がるが、そのような低域をきちんと反射できていない。(反射板の大きさ、質量が足りていない?)
- ・室内で実験しているため、室内音場の低域としての振る舞い(室モード)と現象が複合し、わかりづらくなっている。

などが考えられます。

ただ、1stディップが見えづらくなった一方、高域では細かく激しい起伏が生じている事が分かります。

ディップとピークは、ここまで書いてきたように、半波長の奇数倍、偶数倍で繰り返される現象です。すなわち1stディップの周波数が低くなるほど、短い間隔でピークとディップの山谷がやってくるということになるわけです。



【図 28】 [条件1] の測定結果

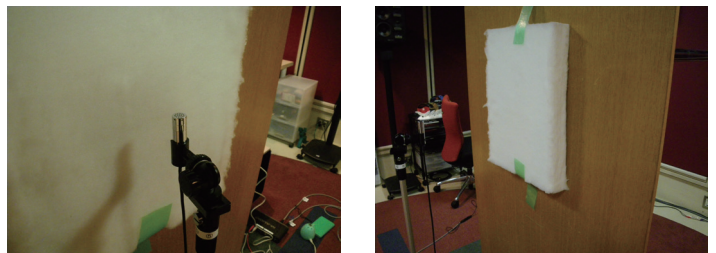
## ■ おまけの吸音対策

出来てしまった山谷はどうしましょうか。

- ・吸音する
- ・拡散反射させる
- ・反射面の角度を変化させる

などが考えられますが、最後に反射板に吸音材を貼ったときの結果を簡単におまけとしてレポートします。

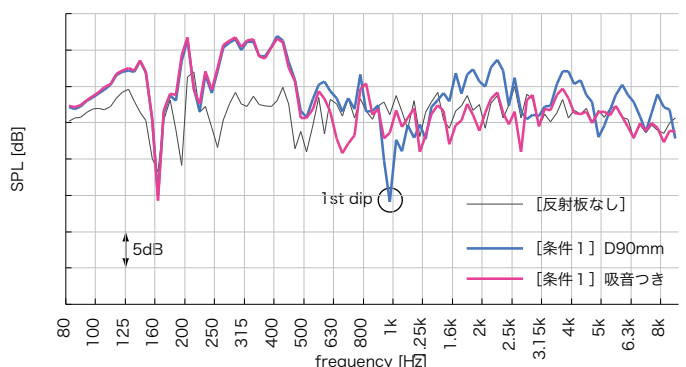
まず最初に写真【図 29】をご覧ください。かなり手抜き感がありますか？



【図 29】 吸音板を取付けました

お手軽実験ということでご容赦下さい。あくまでもお手軽にということで、私の足下に転がっていたポリエステル繊維吸音材(t50x300x420mm)を使います。

さすがにこれでは小さすぎて気休めのような気もしますが、こんなものが役に立つのか、立たないのか。とにかくやってみました。

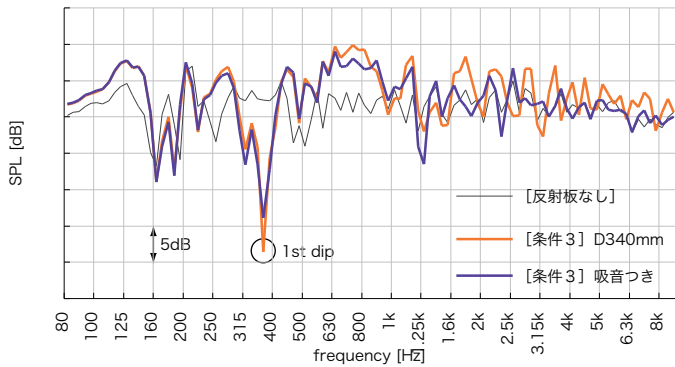


【図 30】 [条件1] 吸音材設置による効果

【図 30】は【条件1】の場合の結果です。

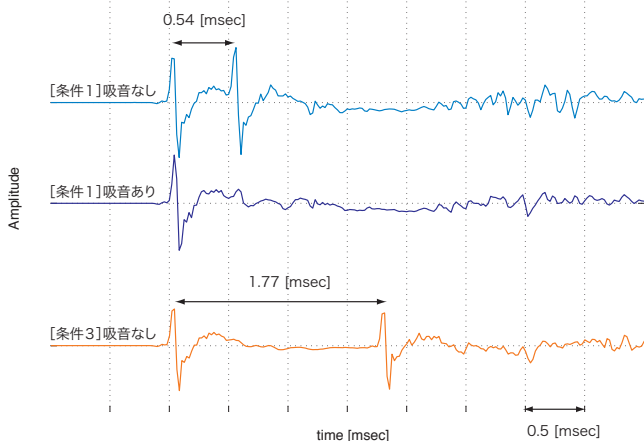
ピンク色が吸音材をつけた場合です。1stディップである1kHz以上の帯域においては、反射板が無いときの特性に近づいていることが分かります。反射音により干渉をおこす周波数帯域が高域であれば（直接音と反射音との経路差が小さい場合には）このような吸音材でも十分に効果があることが分かります。

一方【条件3】では吸音材をつけてもほとんど特性は変わりません（【図 31】）。この場合は1stディップとなる周波数が低いため、この程度の吸音材では特性を変えるほどの吸音が出来ていないと考えられます（このことは、問題を発生させる反射音と直接音との経路差が大きい場合の対策の難しさを示しているとも言えます）。



【図 12】【条件3】吸音材設置による効果

時間応答についても測定しましたので、ついでに見ておきましょう。



【図 32】時間応答（インパルスレスポンス）の例

## THX Training Seminar -Home Theater 1- 12月9日(木)開催 残数わずか! (まだ間に合います)

THX のベテラン講師がホームシアター設計の基本をレクチャー  
室モード、定在波、反射、AV アンプ、ディスプレイなど一通りの知識を習得  
受講後試験に合格すれば、THX のロゴの使用も可能な資格を授与

受講費：50,000 円（通訳・昼食付）  
会場：東京都内 主催：THX、共 催：ソナ  
申込・詳細は → <http://www.thxpm3.jp/ht1.html>



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 取締役 / オンフューチャー株式会社 代表取締役 / Audio Engineering Society 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

株式会社ソナ 設計グループ アコースティック・デザイナー。

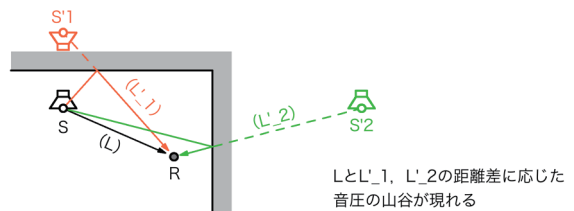
九州芸術工科大学在籍時代。（中原の後輩として）サークルのライブ活動や音響学の勉強に全力で取り組み、優秀な成績で卒業。将来を有 sight されながら大手企業へと入社するも年々音響から遠ざかってしまうことに寂しさを覚え、人生半ばでエリートコースをドロップアウトしてソナの門をたたいた。学生時代の優秀な成績が幸いしてか、音響に関してはソナ入社時からベテラン並みの手腕を発揮する。バランスを重んじる設計ポリシーと独特なデザインセンスを優秀な音響知識の上に掲げ、現在急成長中のアコースティック・デザイナー。主な読書に「週刊ベースボール」等。

【図 32】上の 2 本が【条件 1】の吸音なし（水色）、吸音あり（濃い青）を表します。吸音なしの場合には 0.54msec 後（距離にして 186.3mm、これは往復分なので片道分は 93.2mm ですから上手に設置できました！）に鋭い反射が返っていることがわかります。ほとんどなまっていな鋭い反射です。これであれば、予想通りの山谷が現れる事もうなずけます。その下の吸音ありでは反射音の波形がかなり見づらくなっています。これによって、干渉の山谷が大きく緩和されているわけです。

## ■ とても身近な現象（例えばスピーカ設置）

ここまで反射音による特性の変化を題材に中域、幾何音響の世界を覗いてきた訳ですが、今回の実験は、受音点の近くに反射板を設けるという、やや現実的ではない設定の事例でしたでしょうか。

ある程度ハッキリと結果が見えた方が良いでしょうということで設定した実験条件ですが、反射音によって特性が変化するという現象自体は、決して珍しいことではありません。むしろ、スピーカーの設置にあたっては“つきのもの”と言っても良いくらいの非常に厄介な現象です。【図 33】をご覧ください。



【図 33】反射音は必ずついてきます

スピーカを設置した場合、背後には何らかの壁を背にする事がほとんどだと思います。背後に限らず側方、また先程紹介したように床からも反射音がやってきます。

このような反射音は、必ず直接音と時間差、距離差がありますので、今回紹介したような特性の変化を生じさせていることになります。反射が全く無いような特殊な環境で無い限り、我々はそういう音を聴いているわけです。

どうでしょう。幾何音響の感覚を、身近な現象として感じて頂けましたでしょうか。次回もご期待下さい。

## 【SONA PERSONAL STUDIO DESIGN Vol. 4 予告】

よくあるスタジオ DIY 的な記事とは違い、内容が一方的に難しくて読者の皆さんを置き去りにしていないだろうか？と時々弱気になったりもしながら、早くも第 3 回が終了しました。予定では、次回がラストの第 4 回目です。

最終回の第 4 回は「高域編」です。残響時間、吸音率、距離減衰、臨界距離など、室内音響の分野に興味をお持ちの方なら耳にすることが多い「有名どころ」の理論を次回は解説させて頂く予定です。

編集部のご意見を頂ければ、最終回の後に番外編として「読者 Q&A 編」でも企画できれば、と密かに考えています。スタジオ音響に関する身近な疑問や、記事の内容などに他する質問などありましたら編集部までお寄せ下さい。