

【連載：NH ラボセミナーより 第3回】
建築音響の現場とスピーカー音質に関する測定結果
NH ラボ（株） 風間 道子

■ はじめに

NH ラボは 2014 年に中島平太郎とソニーの卒業生で結成され、良い音作りを目的としてセミナーや試作品作りを行っております。当初 1 年を経過した頃、中島さんの「スピーカーを作りたい」という発言に全員が賛同し、NH ラボ株式会社として本格的に良い音作りへ挑戦することとなりました。メンバーは、スピーカーやヘッドホンの研究・製作はもちろんのこと、木製家具や模型・陶芸制作においてもプロ級の人がそろっており、前号にもありましたように「閃いたら直ぐやる」という組織に長年在籍していたメンバーですので、思いついたらすぐ形にして、皆で試聴を繰り返しております。

さて、そんな組織に、ソニーの卒業生でもない私が一人紛れ込んでしまいました。当初はさほど考えもなく参加したのですが、数回打ち合わせに出席していくうちに中島さんの人徳に魅かれて不肖の弟子として仲間入りさせて頂きました。メンバーとは約 2 年のお付き合いになりますが、同じ音屋でも経験の違いから、異なった音の聴き方をしており、お互いの認識の違いに驚き合うことがいまだにあります。本誌では先ず筆者の自己紹介をさせていただき、次に公共ホールの建築音響設計と住宅の防音設計について、最後にスピーカーの音質改善に向けた実験結果を述べることにいたします。

■ 自己紹介

中学生のころからオーディオに興味を持ち始め、女性ながらポケットにワニグチクリップをいれて秋葉原を歩きまわったのは理系女のはしりだったのかも知れません。その後オーディオは設置する部屋の条件が大切という思いから大学は建築に進みました。大学卒業後は建築音響設計コンサルタントとして約 15 年働きましたが、時代はバブルの真最中、北海道から九州まで飛行機・新幹線と乗り継いで多目的ホールや音楽ホールの音響設計に駆けずりまわっておりました。様々な経験に伴い知識も増え充実した日々を送っていたわけですが、コンサルタントという業務は絶えず喋っており、入力された知識を打合せや現場で放出し、仕舞に入力が間に合わなくなり頭の中がスカスカになっていくわけです。この状態が問題で幅を広げた新しい知識への渴望が強くなります。音の世界は、音による現象は想定できても、原因が不明な現象が多くあります。勤務先が某技術研究所の敷地内にあったことも影響し、音を基礎から学びたくなり、大学に戻ることにしました。

大学では「これまでやってきた建築音響から研究課題を探るか、全く異なる補聴器の研究をするか？」と問われ、即「補聴器！」と答えました。理由は簡単、声のサンプルは入手の容易なこと。現在、補聴器はメガネほど完成されておらず、対象とする音源は音声に限られ、音声を聞き取りやすくすることが開発目標になっております。雑音抑圧処理や音声強調、話者識別など様々な研究を行いました。音がデジタル信号となったことで、パソコンが一台あれば、座っていて様々な実験ができます。分析や合成、試聴を繰り返し、信号処理の技術のみならず聴覚機構も学び、

あつという間に15年。さてさてこの次はとっていたところ、NHラボにご縁をいただいたという訳です。

前置きが長くなりましたが、これまでの経験で得られた知見を少しご紹介させていただきます。

1. 公共ホールの建築音響設計

音楽ホールの建築音響設計といえば、反射材や吸音材を適切に配置し、残響時間や反射音到来方向などの設計を通して音場作りと思われることでしょう。楽しいですね。音による現象は確かに教科書に書かれている理論通りです。しかしこれはあくまでも物理現象を示すものであり、建築音響設計は人間が介在して出来上がるものです。ここが建築音響の難しさといえます。

建築音響設計で重要なものと問われたら、まずは建築基準法、次に資金と時間、そして騒音対策と答えます。この3つの後に音場作りとなるわけです。コンサートに行くと、「このホールは音が悪い、誰が設計したのか・・・」という前に、諸般の事情をご理解いただきたく思います。

まず、建築基準法。コンサートホールの響きを良くするため天井を高くしたいといっても、北側射線を超えてまで高くすることはできません。建築基準法は「絶対」です。音響の計算ばかりしていると大学で学んだ建築法の解釈が薄れ、容積率を四捨五入して60%としたところ上司に怒られた経験があります。建築基準法では59.999……%までです。

次に資金。ホールは楽器だから無垢の木で作りたいと言っても、その前に立ちふさがるのが建築基準法。公共の建物の天井・壁は不燃材でつくること。不燃の木材を使用するとなるとコストは跳ね上がります。例えば内装に木材を使っても下地は鉄骨や軽鉄。よってどこのホールでも軽鉄下地の音がしています。「Never say never」という言葉があります。「決してあきらめるな、可能性はある」という励ましの言葉です。ほとんどの事柄にはこの言葉があてはまり、これは「閃いたら直ぐにやれ」につながることでしょう。資金が無いからではなく、どこかに解答があるはず。それを探るのがコンサルタントの仕事と言えるのでしょ。

実施設計から施工に移ると資金面が本当にシビアになってきます。スピーカー作りと同じく実施設計で120%の音響設計をしておく施工で生じた誤差を解決できるかもしれませんが、あくまでもお施主様のお金。設計の段階から資金を削られたときの対処法として、音響設計上の優先順位を付けておき、あらゆる場面を想定してどんぶり勘定はするようにしていました。そうしないとスパナを持った現場監督に追われて、まだ天井の貼られていない客席天井裏を走り回りことになるかも・・・。

資金と同じく時間も大切です。あわてて施工して音響的に良いことは一つもありません。音響性能を重視する建物はとにかく隙間を作らない、施工上必要とされた隙間は必ず塞ぐ、音響的に必要な隙間は塞がない、が鉄則ですが、これらは内装仕上げの裏の部分で完成時には見ることができません。音響工事は一般的な施工方法とは異なることから現場監理が大切なのですが、もし工期が短いと・・・。工期を守ろうとするみんなの善意が悪い結果に繋がることもあります。

そして騒音対策。ホールはプログラムや演奏者によって要求される音響条件は異なってきます。しかしどのような演目でも喜ばれる共通した音響条件は「静かさ」だと思います。ホールの音質評価は人によって異なりますが、うるさは共通認識になります。

騒音対策でもまた法律と資金の縛りが来ます。ホールの壁に空調設備のダクトが貫通するとき、防火区画を貫通させることからダクト内にファイアーダンパーが取り付けられます。ダンパは空気の流れを邪魔して風切り音を発生します。ダクトを太くして風速を下げれば風切り音の問題はなくなりますが、建物構造上の制約やホール壁の遮音性能の低下の問題がでてきます。解決するにはダクトの遮音性能を高めてさらに消音設備を付ける・・・、ようするに資金が必要となってくるわけです。また作業性の悪い設計や工期の短いものは遮音性能の低下を招く恐れがでてきます。これらをクリアして、やっと室内音響設計のスタートとなります。気持ちとしては音場を白紙（無音）の状態にして、音色を付ける感じです。音色は混じるので黄色い素地に青を配色しても色は濁るだけでしょう。

次にホールの大まかな音響設計をご紹介します。図1はホールの断面図を表し、右側が舞台、左側が客席になります。客席の壁・天井には音響上の役割があり、一般的な例を記入してあります。前号「第2回 たまご形スピーカー」にもありましたように、建築の世界もデザイナー（意匠）が一番強い訳で彼らのデザインを崩さないように、なるべく目立たないように、コチョコチョコと音響的配慮をお願いしていくわけです。

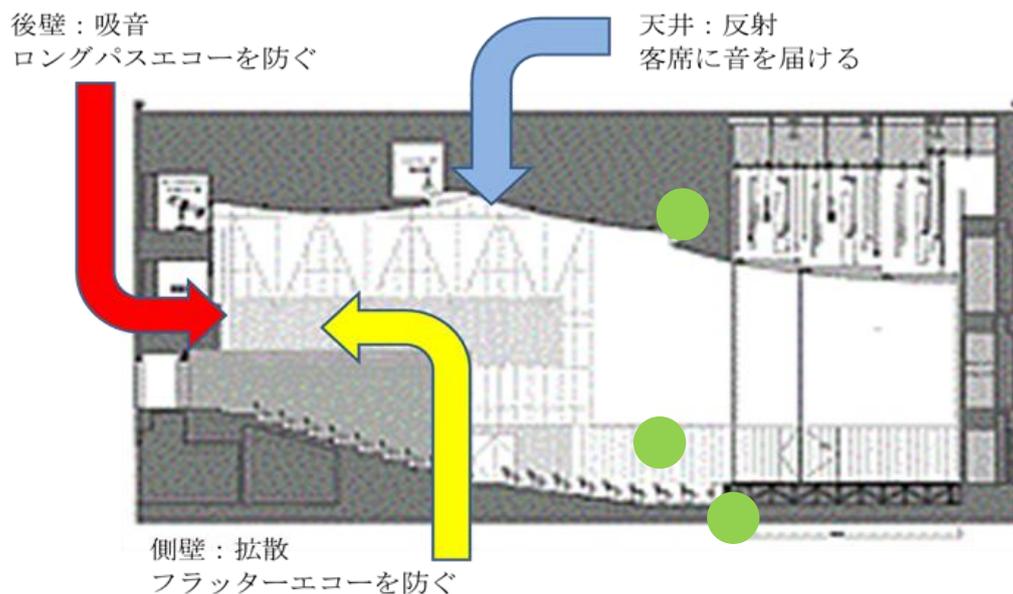


図1. ホール断面図の例

客席の天井は舞台上の音源から、聴衆という吸音材の上を渡って減衰しながら届く直接音を補強する役目があります。天井の対向面となる床は階段状で椅子や聴衆という吸音材で覆われるので、天井全面を反射材としてもフラッターエコーの心配はさほどありません。天井に傾斜を付けて、客席中央から後方に音が届くように設計していきます。気を付けなくてはいけないのが直接音と反射音の時間差。直接音が届いてから反射音が届くまでの時間差が50ミリ秒以上、行路差で17m以上あると人間は直接音と反射音を分離して2つの音として知覚します。いわゆるエコーです。天井から届く反射音は直接音を補強する役割があるのですから、20~30ミリ秒以内の遅れ時間で届くようにしてあげたいものです。

客席の左右にある側壁は音を拡散させるようにします。側壁の対向面は側壁であることから、両側壁を平行するとフラッターエコーが生じます。反射音が客席に届くように側壁を客席側に傾けたがる設計者が多くありますが、客席に届いた音は全て吸音されます。豊かな響きを求めるならば、乱反射を狙ったほうが心地よい響きとなるでしょう。

客席後部の壁は吸音仕上げとします。これは舞台から出た音が後壁に反射して再び舞台に戻る、ロングパスエコーという音の障害を防ぐためです。1,000席程度のホールですと、舞台先端から後壁までの距離は約25m。舞台から出た音が後壁に反射して戻ってくるには、最短距離で50m、時間差で147ミリ秒。完全なエコーですね。

さて、図1に記入している緑の丸はスピーカーの位置を示しています。天井につくのがプロセニウムスピーカー。これは天井の役割と同様に客席中央から後部に向けて拡声音を与えます。プロセニウムスピーカーのまわりには観客がいないので大音量でならずことが可能で、客席全体に豊かな音量をあたえることができます。そうしたとき、前列の客席に座っている聴衆はどのように聞こえるのでしょうか？演奏者は舞台上にいるのに音は天井から聞こえ、違和感を覚えることでしょうか？客席前部の聴衆が聞きとる音像を舞台に戻すため、側壁にサイドスピーカー・舞台立ち上がり部にフロントスピーカーが付けられます。いわゆる第一波面の法則（Haas効果）により、ここでは舞台上に音像が下がってきて視覚と聴覚が一致して自然になるわけです。なお客席中央から後ろにかけては前方から音がくるわけですから、プロセニウムスピーカーだけでも不自然さはさほどないわけです。

以上がホール音響設計の概略となります。実際は何百枚もの図面を舐めるように確認していく作業です。ホールが完成すると、許す限り演奏会には足を運びました。反射音の到来方向やその音質・配分を評価し、楽音の間では空調雑音を探し、余韻から残響の減衰特性を聞き取り……、現役で建築音響設計をしていたときは演奏会を心から楽しめることはなかったように思います。この癖がなくなるのに10年以上かかりました。

建築音響設計の仕事をしていたというと、「どこのホールが一番良いですか？」「どの席が一番良いですか？」と尋ねられます。しかしながら音場は演奏者が主で、ホール設計者が従の関係で、良い演奏が素晴らしい音場を生み出すこととなります。これはスピーカーの鳴りが録音に左右されるのと似ているところがあります。違うのは、優秀な演奏者はホールに適した演奏をするということです。座席に関しては、目的や演目によると思います。リカルド・ムーティのファンである筆者が一番前の席を取り、フルオーケストラの演奏音はまとまって聞こえませんが、ムーティ様のお顔を拝めて大満足。ホセ・カレーラスの演奏会で、アンコールのときに前から2～3列目に移動してみて、それまでの15列目とは全く違う、本当の生の声を聞き取ることができ、その麗しさに涙。コンサートに行くときは、良い演奏を選ぶだけでなく、それを楽しむ心を持っていくことを忘れずにしたいですね！

2. 防音室の音響設計

皆様はリスニングルームの音響設計に興味があると思いますが、あえて防音室の音響設計としました。良く聞くジャンル、設置するオーディオ機器、部屋の広さなどで要求される音響特性が異なり一概に述べるできないので、防音室の音響設計としました。

リスニングルームも公共ホールと同様で、聴取条件に関わらず、まずは室内を静かにさせ、夜中でも楽しめるように遮音性能を高めることが大切です。リスニングルームは遮音性能を高めておき、後は自分の耳で確かめながら時間をかけて自分仕様に改良していけば良いと考えております。不特定多数の人が利用するのではなく、個人のものでありますから、自分で育てていくのも楽しみの一つでしょう。

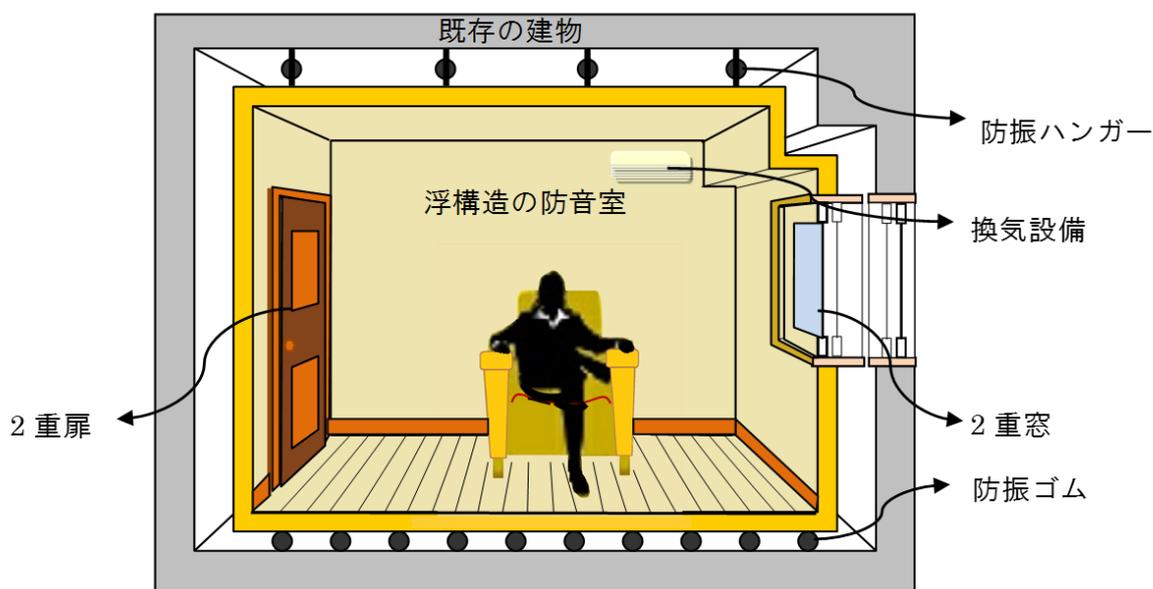


図2. 浮構造の例

図2に浮構造を採用したリスニングルームの断面図を示します。浮構造は、15年ほど前までは地下鉄や航空機の影響を受ける公共施設で用いる特殊な建築手法でしたが、現在は木造一戸建てやマンションの一室にも採用されております。浮構造は、音や振動が伝搬しないように建物本体の内側に隙間をとって部屋を作ることから、部屋が狭くなること、積載荷重が大きくなるといった問題が生じます。木造住宅の場合においては建築基準法で居室の天井の高さは2.1m以上であり、床の積載荷重は 180kg/m^2 以下と想定されて構造計算されています。これを遵守しながら、木造の建物でありながらコンクリート造と同等の遮音性能を実現させていきます。現在では本体の建築物との隙間を壁・床は25mm、天井は50mm程度、壁・天井の下地材および内装材で90mm、で浮構造を組み立てることが可能です。よって浮構造の室内は内法で最低230mm狭くなります。

浮構造を採用すると、出入口扉は2重、窓は3重以上となってきます。そうすると部屋の機密性が高くなるので換気設備は必需品です。また快適に過ごすには空調設備も必要となります。これらは外部に対して穴をあけることになるので遮音性能の劣化に注意するとともに、メンテナンスを考慮して配置することが大切です。浮構造内部の壁・天井の厚みは40mm以上あります。電気配線や照明なども施工前に配置をしっかりと決めておかないと、後からの変更は困難であり、遮音性能の劣化を生じさせます。

最善の注意をはらって防音工事を行い、設計で意図した性能が得られても音漏れの問題が生じることがあります。その原因の一つに、その建物や敷地環境の静かさがあります。高級マンションでは

スタジオ並の静かな環境が実現されており、僅かな音漏れも明瞭に聞き分けてしまいます。冷蔵庫やエアコン、自動車の騒音は静かになっていく傾向があります。それに対してオーディオ機器や楽器の価値基準には、大きい音量が出せるということがあります。一般住宅の防音工事を行っていると、暗騒音が適当に大きい環境であることを願ったりしてしまいます。不届きですよね!?

3. スピーカーの音質改善

建築音響設計の経験を通して思うことは、重大な失敗は多数の小さな間違いが重なって生じることが多いということ。遮音性能をギリギリに設計した壁に、コンセントが壁埋め込みされて、空調ダクトの経路になって、断熱材と吸音材を間違えられて・・・などが重なって、困った結果となることが多いです。これの逆のことがオーディオの世界にあると思います。良い音にするための方法を一つずつ積み重ねていくことによって、自分好みの音が完成されていく。些細なことに拘るオーディオマニアは、「気のせいじゃない?」「変わらないじゃない!」と揶揄されることがあると思います。そこで、「それは気のせではなく、事実だ!」といえるための実験を行ってみました。

図3はスピーカーキャビネットに充填する吸音材の種類が及ぼす影響を調べた実験結果です。実験は1,400 Hz に大きなディップがある周波数特性を持つスピーカーを作り、キャビネット内に充填する吸音材をアクリル・ウール・コットン・シルク・グラスウール(白)に変化させ、そのディップがどのように変化するか観測を行いました。結果は、アクリルを充填すると何も無い状態と比核してディップは 5 dB 小さくなり、同様にコットン・ウールは 15 dB、シルク・グラスウール(白)は 25 dB 小さくなりました。同じ吸音材でも材料により 10 dB 以上の変化があり、これは音質に与える影響は大きいと想定されます。なんとなく値段に応じて良い音になっていく感じがしますね。

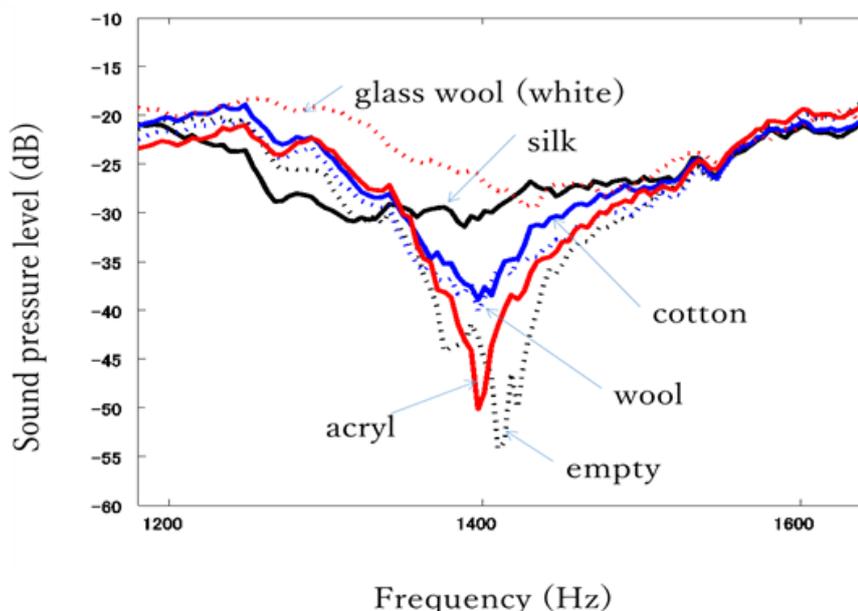


図3. スピーカーキャビネット充填材の違いによる周波数特性変化

図4は、スピーカーを高さ1,100 mmの本棚の上に設置して駆動したときに生じた箱鳴りと両サイドの壁によるフラッターエコーを改善するために行った実験結果を示します。実験には前号でご紹介したたまごスピーカーを用いました。実験はトーンバースト状の音を出し、その減衰特性を確認しました。吊りスタンドを用いることによりスピーカーの振動が本棚に伝わりにくくなり、その結果時間当たりの減衰量が大きくなりました。さらにカーテンを吊ることによりフラッターエコーが改善されて減衰量がより大きくなりました。スピーカーの音の切れが良くなっているといえます。試聴でもはっきりとわかり、努力が実ったことが実感できました。

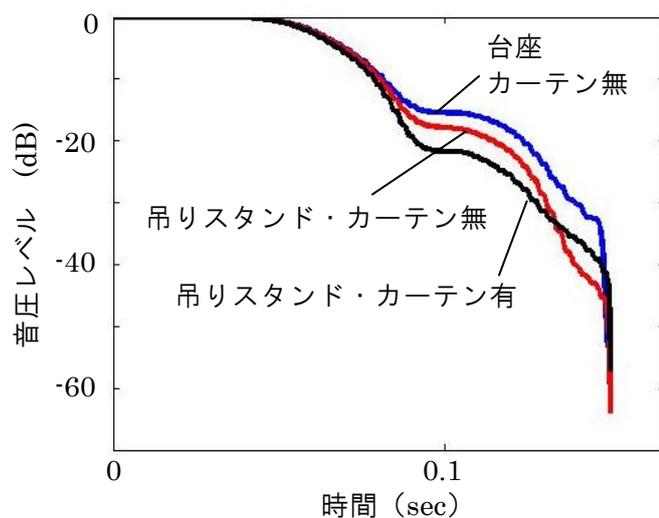


図4. スピーカー設置手法および室条件による音の減衰変化 (200Hz)

図5はスピーカーの後ろに設置した吸音材の影響を観測した実験結果を示します。実験ではスピーカーを壁から300 mm離して設置しました。まず、スピーカーにトーンバースト状音源を入力し、スピーカー正面中央から100 mm離れたところで收音した波形をこのスピーカーの基準波形とし、このスピーカーの伝送特性と仮定します。スピーカー正面中央から真横方向に200 mm離れた点で同様に、吸音体(グラスウール)有りおよび無し状態で收音をします。これら3種類の信号と入力信号の波形からそれぞれの波形包絡を算出し、入力信号の波形包絡との違いを相関値で比較します。スピーカーの背面壁からの反射音がカラーレーションなどの波形歪みが生じさせますが、吸音材を置くことによってその歪みが改善されることが実験結果からわかりました。

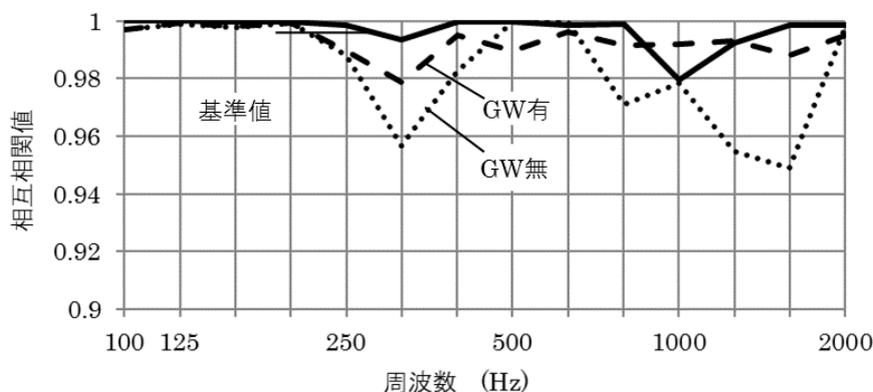


図5. スピーカー後壁面に設置したグラスウール (GW) の影響

図6に実験に用いた台座付きのたまごスピーカー・吊りスタンドおよび吸音体の写真を載せておきました。



たまごスピーカーと台座



吊りスタンド



拡散吸音体

図6. 実験に用いたスピーカーと各種材料

■ さいごに

平成生まれの人はLPレコードを知らず、スピーカーで音を聞いたことが無いとは聞いてはおりましたが、先日学生に「ステレオ」を知らないと言われショックでした。ヘッドホンのLとRでは出てくる音が違うということはわかっていましたが・・・スピーカーで音を聞いた経験が無いならば音像という認識も無くて当然でしょうが、一寸寂しいですね。しかし音を楽しむという気持ちは皆同じでしょうから、オーディオの世界はこれからも発展していくと信じて、様々な音を試聴し、ワニグチクリップを片手に試行錯誤して良い音の追求をしていこうと考えております。

著者プロフィール

風間 道子 (かざま みちこ)

(株)永田穂音響設計事務所、(財)NHK エンジニアリングサービスにて建築音響設計業務に従事。その後早稲田大学客員研究員として音声信号処理の研究。現在 NH ラボ(株) CAO、千葉工業大学非常勤講師。一級建築士、工学博士。趣味は園芸、彫金、読書。