ケルトン型ＳＰの設計と製作（測定編）

測定・調整

一応、完成したので以前製作した FE107 のベンテッド・フルレンジ型を中・高域として組み合わせ取り敢えず試聴してみたいのですが、その前に２・１ch のミキシング回路を作りました。ついでに中高域側のローカット・フィルターも暫定値でブレッド・ボードにオペアンプで仮組し、取り敢えず聴いてみると FE107（10cm）のベンテッド・システムでは再生されなかった重低音が出るのを確認、なかなか良い感じです。測定と試聴を繰り返し思うような特性に持って行こうと思います。設計編、製作編をご覧で無い方はこちら
ここで、測定機材を紹介しておきます。

◎ハードウエア
　ＰＣ　：MacBook Pro OSX 10.7
　ＤＡＣ：EDIROL FA-66 (6 IN, 6 OUT)
　ＭＩＣ：NADY CM-100 Condenser Measurement Microphone (Phantom 48V)
　その他：DAYTON WT3 Woofer Tester、SLIK Camera Stand、ケーブル各種
◎ソフトウエア（Mac 用）
　AudioTest：簡易型各種音源ソフト
　FuzzMeasure 3.3：サインスイープ逆畳み込み周波数（ＦＦＴ）アナライザー
　SignalScope Pro：シグナルジェネレーター、ＦＦＴアナライザー、ＲＴＡ等

主に使用する FuzzMeasure について少し説明をしておきます。
Log Swept-sine Deconvolution また Time Stretched Pulse (TSP) と呼ばれる周波数解析手法を使用し、サインスイープ波をスピーカーから再生、測定マイクで受音した信号をインパルス信号に変換（逆畳み込み）したものをＦＦＴ解析し周波数特性等を生成します。従来のＦＦＴ解析は、音源にピンクノイズやＭＬＳノイズを使用しているので音源に揺らぎがあり解析結果にも揺らぎがありましたがサインスイープ波なのでそう言った曖昧さが無く、インパルス音源よりＳＮ比もよく安定した結果が得られます。ただし、リアルタイムでの表示は出来ません。また、スイープ時に部屋の反射音・残響音も受音してしまうので、ＳＰの裸特性（無響室特性）は測る事が出来ません。この方式は、日本の青島伸治氏が発明したものです。
追伸：その後、反射音・回折波等は、演算により取り除ける事が判明しましたのですが、インパルスレスポンスで取込窓を調整する事により可能になるようです。
Woofer Tester は、スピーカーの Thiele・Small パラメター測定用ＵＳＢ接続機器で、測定事例を別紙にて紹介しているので参照下さい。

◎総合特性を測定する

先ずは、製作したサブ・ウーファーと FE107 ベンテッドＳＰの生の特性と合成特性、仮組したフィルターを通した特性を示します。FE107 は、片 ch のみ、ウーファーのレベルは、ある程度絞り込んであります。サブ・ウーファーは取り敢えず FE107 の隣に置いておきます。フィルター無し・有り、どちらの特性も FE107 のベントを塞いだ密閉特性です。ＳＰの設置状況は、ＴＶの両サイド（下）と、リスニング条件としても部屋としても良くない（悪い）と思いますが、生活空間で音楽や映像を鑑賞したいので、今の処これしかしようがありません。

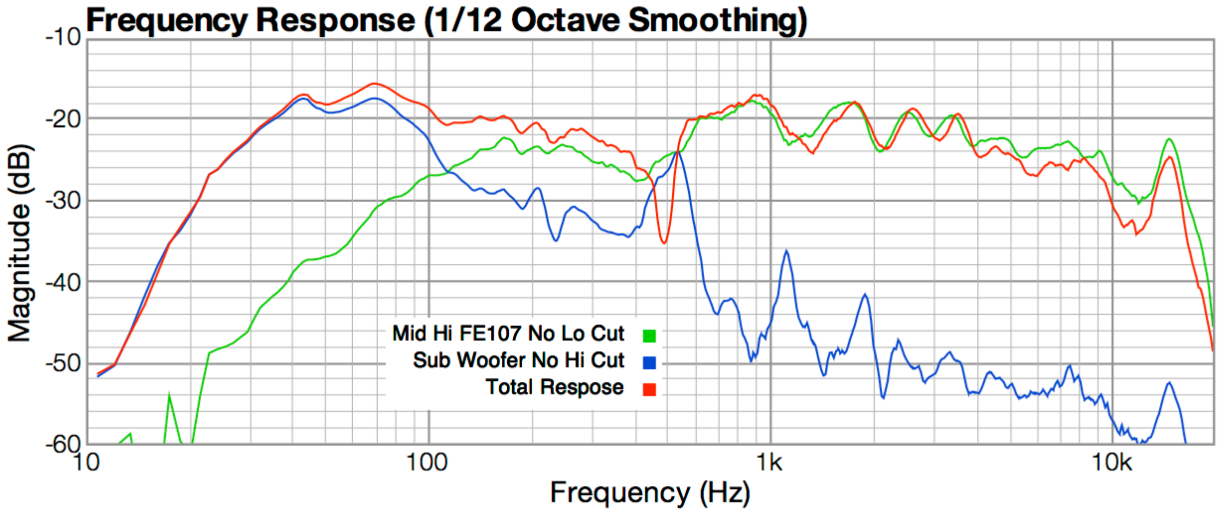


Fig 1 周波数特性（フィルター無し）

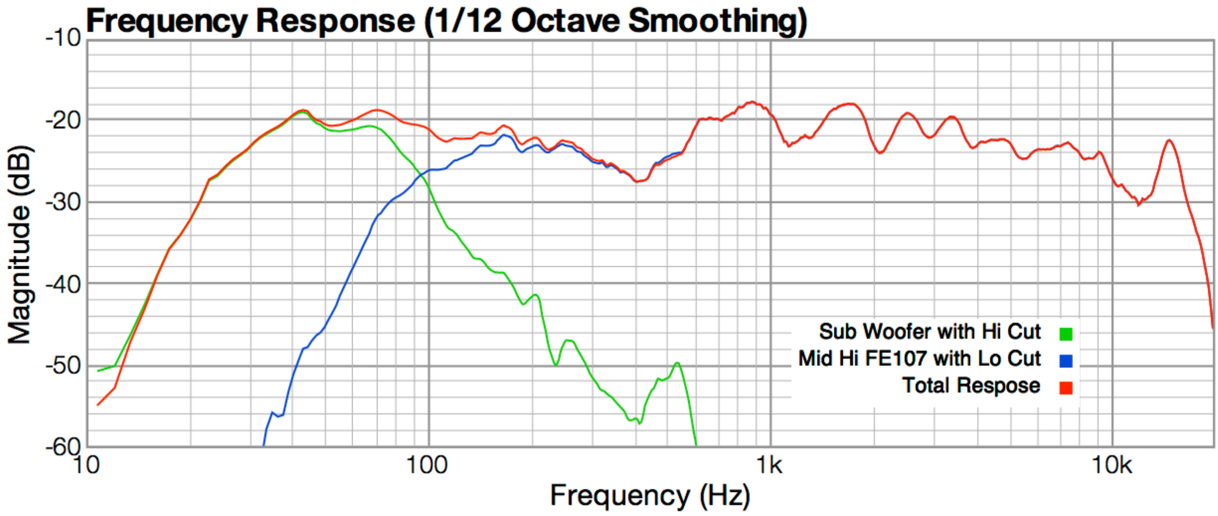


Fig 2 周波数特性（フィルター有り）

写真１ ＳＰ・マイク設置状況
Hi のベントはスチロールで蓋

フィルター無しでは、Lo と Hi の干渉がありますが、フィルター有りでは、無くなっています。Lo の高域側のスロープと Hi の低域スロープは、どちらも -12dB/oct（Hi は密閉なので -12dB/oct になります）で -12dB/oct のフィルターをかけているので -24dB/oct のスロープになっています。Lo の高域側は理論的には -24dB/oct になる筈ですが、ベントからの漏れ等が加わって -12dB/oct になっている様です。Lo の 500Hz 当たりにピークがありますがこれは、ベントの気柱共振の様です。（後述）

測定マイクは、Hi 側ユニットの高さ、バッフル面から 20cm の距離へ設置（写真１）もっと離したい処ですが部屋の影響が大きいので色々試した結果、影響のなるべく少ない位置です。

◎Lo Hi 個々の特性を見る

次に、Hi と Lo を個別に見て行くことにします。

先ず、Hi 側の Lo Cut フィルター有り・無しの比較です。Lo Cut フィルターを入れているのは、Hi 側に入力される低域をカットしたいのと Lo との干渉を防ぎたかったからです。Lo Cut の特性は、カットオフ 77Hz、-12dB/oct、105Hz に +1.5dB のブーストをしています。これは、カットオフ周波数を出来る限り高くすると Lo とのクロスオーバー付近で少しディップが生じたためです。400Hz の落ち込みは部屋と設置の影響の様で聴感上、ほとんど問題無いので、このままにしておきます。

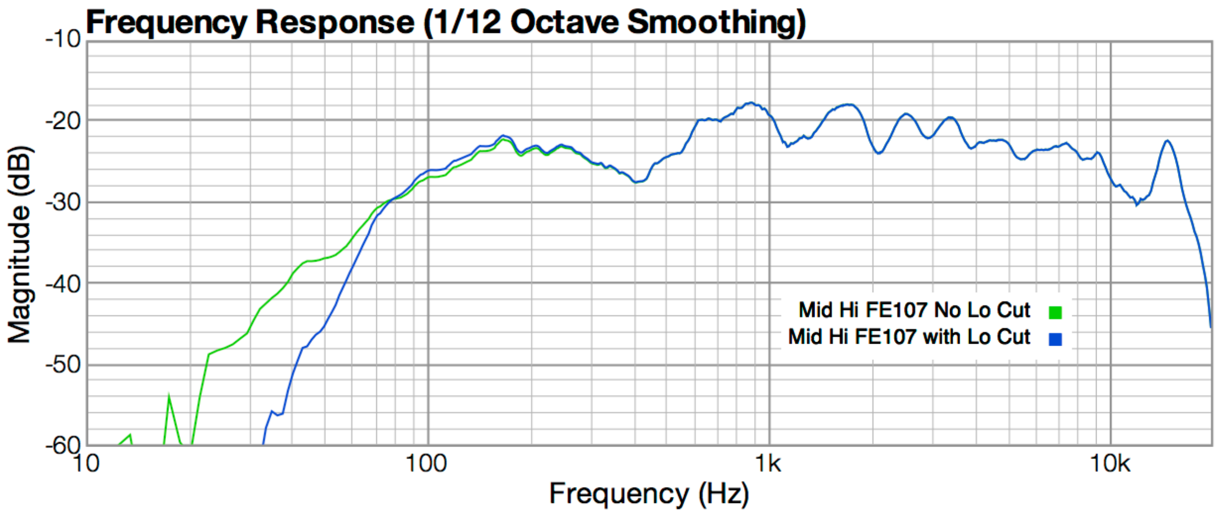


Fig 3　Hi 側ＳＰのフィルター有り・無し

Fig 4 は、Lo 側のフィルター有り・無しです。Lo の高域側は -12dB/oct と書きましたが、良く見ると落ち始めは -24dB/oct でその後ベント漏れが加わり -12dB/oct になっているようにも見えます。次頁にフィルター回路の特性を載せておきます。

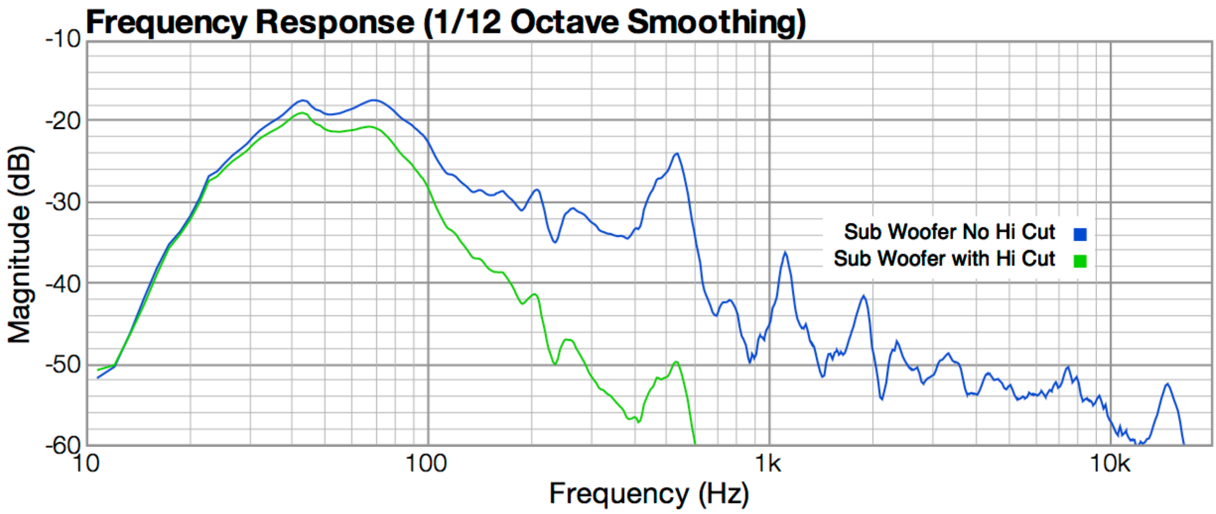


Fig 4　Lo 側ＳＰのフィルター有り・無し

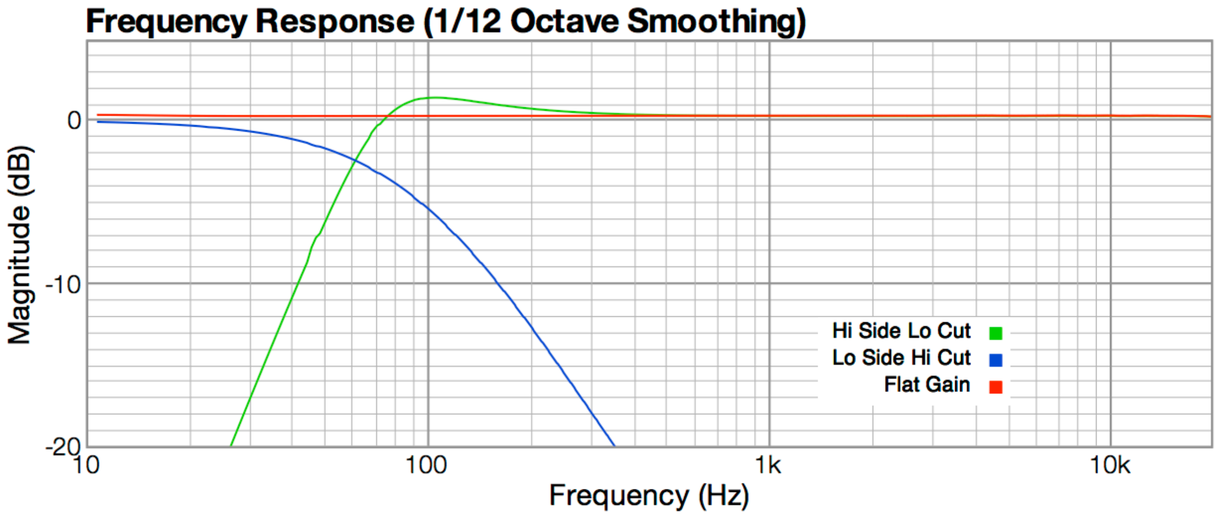


Fig 5　フィルター回路ラインレベル特性

Fig 5 で Lo Side は、サブ・ウーファーの能率補正のため実際は +12.5dB のゲインがあります。ライン・フィルターは 60Hz 位でクロスしていますが音圧上では、約95Hz でクロスしています。
後になりましたが、参考のため FE107 ベンテッドの特性も載せておきます。

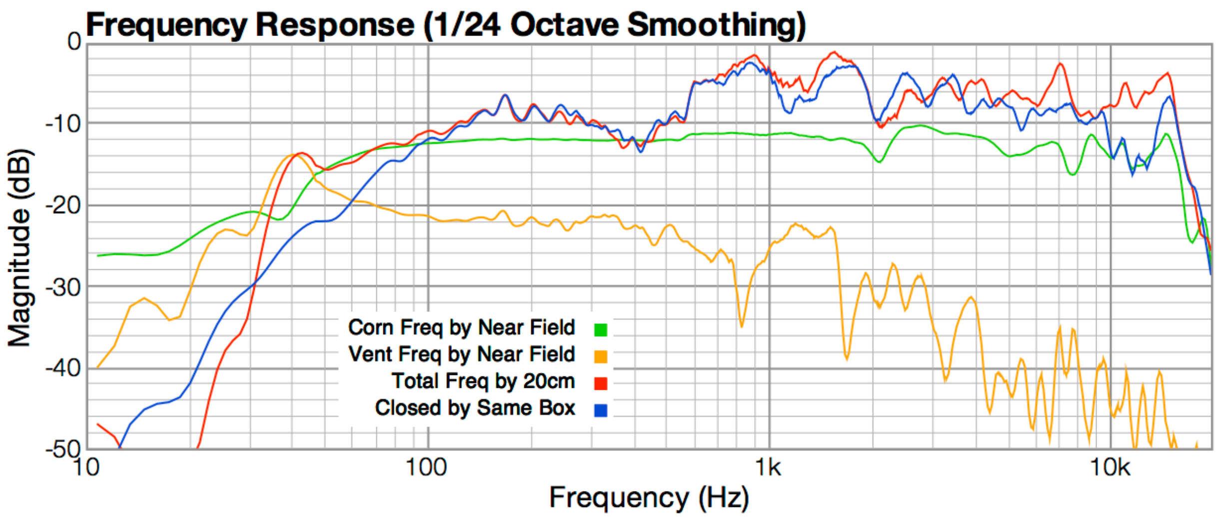


Fig 6　FE107 ベンテッドの特性

写真２　ニア・フィールド測定例

写真３　ＤＡＣ：EDIROL FA-66

FE107 ベンテッドのコーンとベントの特性は、ニア・フィールド法で測定しました。
トータルで見ると 35Hz 位まで再生しておりそこそこではありますが、相対的にレベルは下がっています。聴感的に低い方まで再生出来る様に元々こう言うふうに設計したのでしょうが無いのですが、やはり低域不足を感じサブ・ウーファー製作の動機になった訳で、今回ベントを塞いで密閉にして使用しています。
写真３ は、 ＡＤ・ＤＡ（ＤＡＣ）インターフェイスです。

◎途中ですが試聴してみる
Lo と Hi のレベルを合わせます。実は、最初の段階である程度合わせてあったのですがまだ、サブ・ウーファーになれていない時点では、スイープとピンクノイズによるＲＴＡにてフラットにした後、試聴にて確認し暫定的に決めました。測定フラットと試聴は、ほぼ一致しました。
サブ・ウーファーの設計再生帯域 25〜100Hz は、測定値を見る限りほぼ満たしている様ですが、Hi Cut しているので上側は 90Hz 位になっています。普通にリスニングするレベルでサイン波を入れてみると 25Hz は 50Hz に比べ -10dB 程で、充分とは言えないまでもそれなりの音圧で再生されるのを確認出来ました。
いつも試聴用に使っているＣＤ・ＤＶＤを挙げます。

１．Audio/Acoustics Technical CD by JAS & JACA（廃盤）
　　女声アナウンス：山田敦子、男声アナウンス：相川浩、三国幻想曲：鬼太鼓座、他
２．The Best of Jane Birkin
　　These foolish things、他
３．その他、充実した低音のソース（ＤＶＤ）
　　Live in New Orleans Norah Jones、Lisa Ono 2007 SUNSET BOSSA

アナウンスで話し声の自然さを、 鬼太鼓座は大太鼓の基音 28Hz を、 These foolish things で強力なアコースティック・ベースと男女ジャズ・ボーカルを確認出来ます。
何れも iTunes に Apple Lossless でリッピングした音源を Mac から光出力→光ＤＡＣ→仮組のミキサー・フィルター→100Wx4 デジタル・アンプ→ＳＰ ２・１ｃｈ と言う流れで再生します。
耳には、まったく自信が無いので、おこがましくもありますが、印象を述べます。
簡単に比較する方法として（Lo を ON/OFF）必然、FE107 密閉との比較になりますが、違いは言わずもがなでしょう。
山田アナは、Lo 有り・無しでの違いはあまり感じませんが、相川アナだと Lo 有りの方が明らかに声の太さに違いがでます。高価なＳＰの中にも話し声が鼻声になって嫌な印象を受ける物がありますが、そう言った事はありません、ただ、それは Hi の受け持ち範囲なので Lo とはあまり関係ないかも知れませんが、鼻声になるかならないかは、ＳＰ評価の分かり易い一つの指標となるのではと考えています。（鼻声＝胴間声と言うらしい）
鬼太鼓座は、明らかに Lo が無いと物足りません、密閉のみでも意外と引き締まった低音を再生しますが、大太鼓の基音が出るか出ないかで音の広がりと深み感がまったく違ってきますし、横笛やカネの音が Lo が有ることによって艶やかで際だって聞こえます。勿論太鼓の重低音も心地よく響き、太鼓の皮の揺れもリアルに感じます。

These foolish things も Lo が無いとボーカルやピアノが、やけに五月蝿い割に引っ込んで聞こえるのですが、Lo を加えると Lo の音圧が加わったにも関わらず五月蠅さが消え音像が浮き上がってきて存在感と広がり感が増し音楽に包まれた感じになり、それと伴に艶ややかさも加わります。Live in New Orleans と SUNSET BOSSA も今までより充実した低音で鑑賞できる様になり満足しています。Norah Jones は、低域が強調された作品（Blue Note 的音作りなのでしょうか）が多いと感じていましたが充分満足出来る様になりました。以前から、充実した低音は中高域も充実させると感じていましたが、サブ・ウーファーによりそう言った事が比較的ローコストで実現（自作）できると思います。サブ・ウーファーは、本来音源に入っている低域をそのまま再生するためのもので強調するためのものではないと言う事を付け加えておきます。

◎Lo の 500Hz ピークを探る

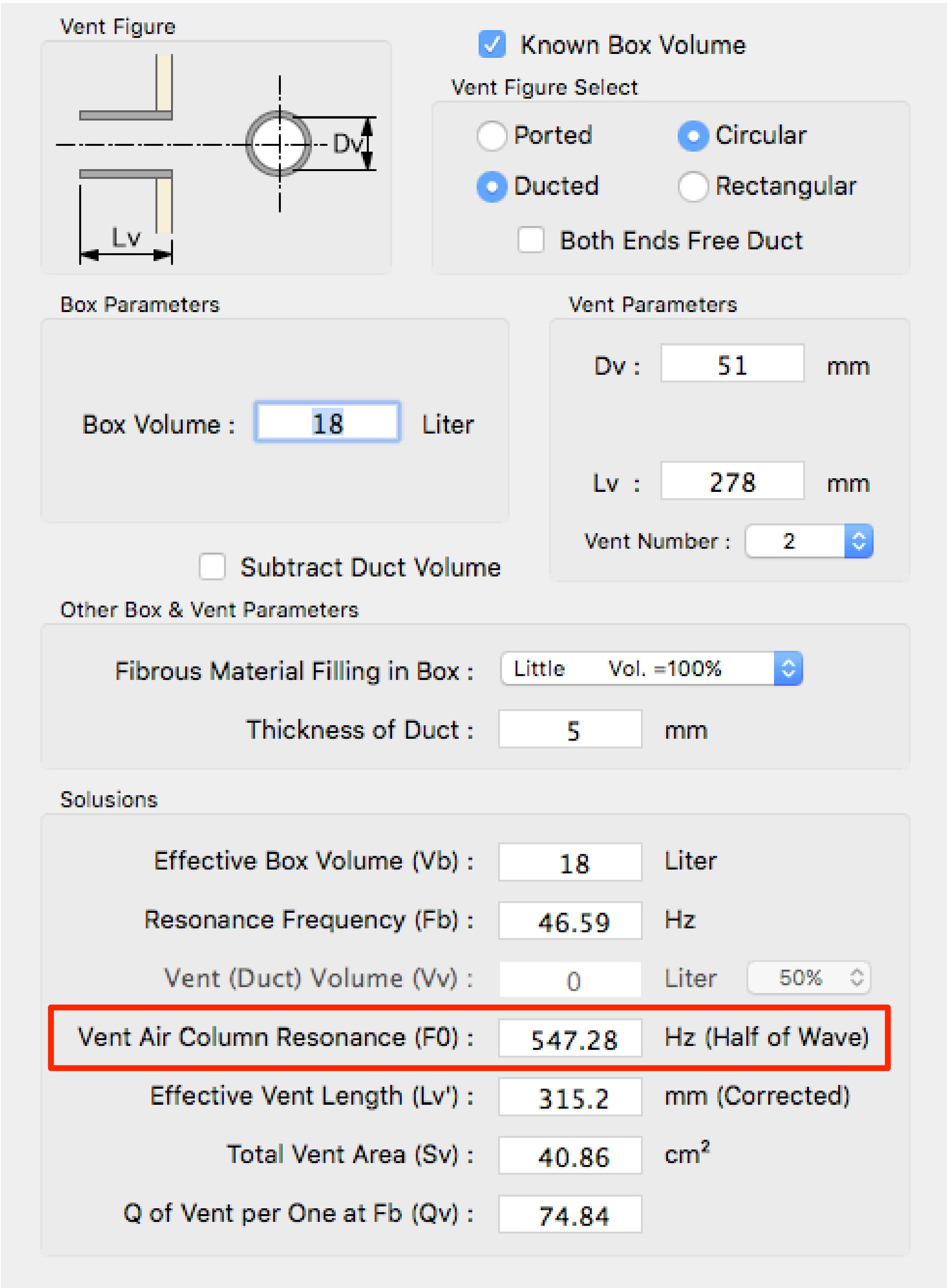


Fig 7　ResonanceCalc の画面

Lo の高域側 500Hz ピークは、ベントの気柱共振だと書きましたがその根拠を示します。Fig 7 は、拙アプリ「ResonanceCalc」のスナップですが、サブ・ウーファーのベンテッド部のデータを入力してあり赤で囲んだ「Vented Air Column Resonance」即ち「ベントの気柱共振」が、547.28Hz となっておりピークとほぼ一致します。両端開放のベントでは、１／２波長で出現しますが、ベント長が 278mm と比較的長いのでこう言った現象が生じると判断できます。

◎その他の機器環境

パワーアンプは 100Wx4ch のデジタル・アンプの３chを使用しスイッチング電源で電力を供給（写真４）、Lo のミキシングとハイカット・ローカットは、ブレッドボードへ仮組（写真５）、回路図は最後に添付しておきますが、回路的にはもう少し検討の余地があると思っています。Lo と Hi の位相は逆相にしてありますが測定でも確かめてあります。Lo と Hi のＳＰはメーカーによって極性が違う場合があるので注意が必要です。
アンプと仮組回路をチャンと作ってケースに組み込むのが今後の課題です。

写真４　デジタル・パワーアンプ、電源

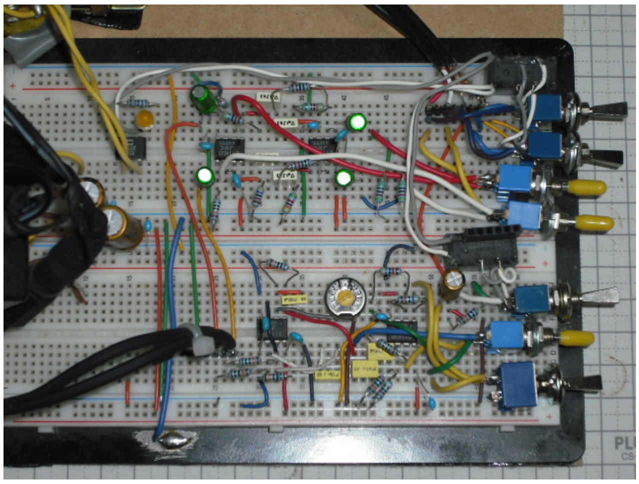


写真５　ミキシング・フィルター回路

◎低域伸張案

測定・調整をしている内に 25Hz -10dB の低域限界に不満を感じ、もっと低域を伸ばす方法を思い付きました。（どうせなら 20Hz 位まで下げたい）

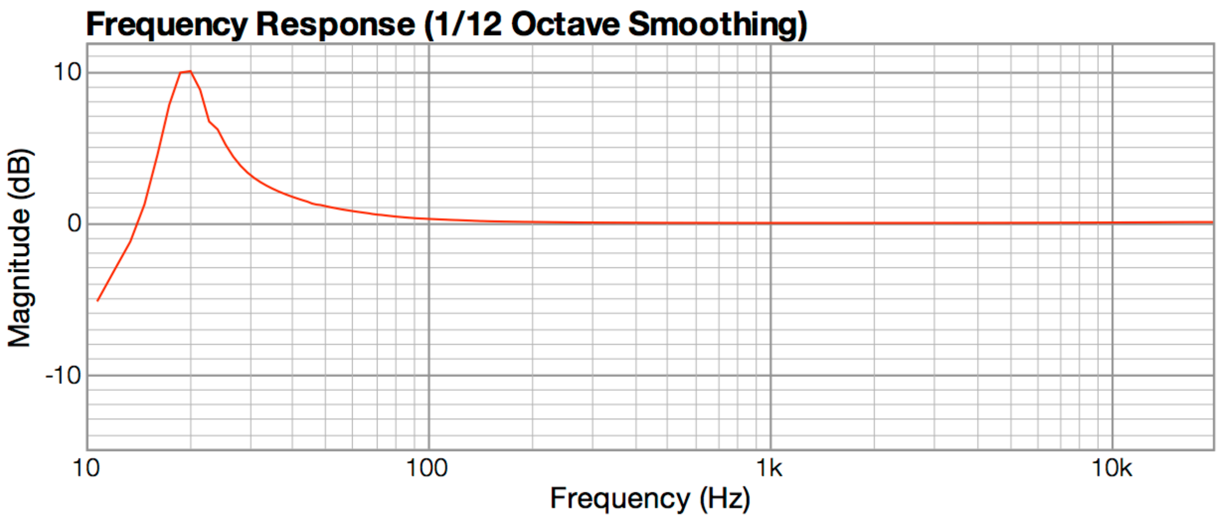
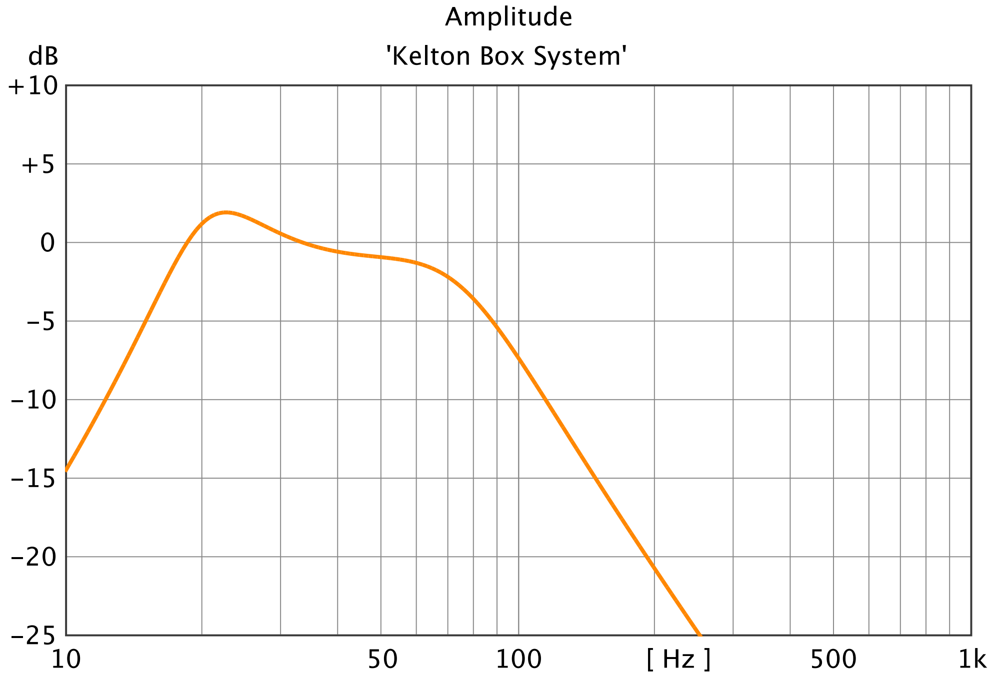


Fig 8　ロー・ブースト特性 19Hz +10dB

一つ目は、電子回路的にロー・ブースト・フィルターを入れる方法と二つ目は、二つあるベントの片方を塞いで共振周波数を下げる方法です。ブースト・フィルター法は Hi のローカット・フィルターと同じセレンキー回路で素子定数を計算で好きなようにブーストできます（Fig 8）。ベント一つ塞ぎ法は片方を塞ぐと計算で共振周波数が現状 46.5Hz から 33Hz になり特性の 20Hz に盛り上がりが出来、低域が伸張されますが能率が下がることが懸念されます。



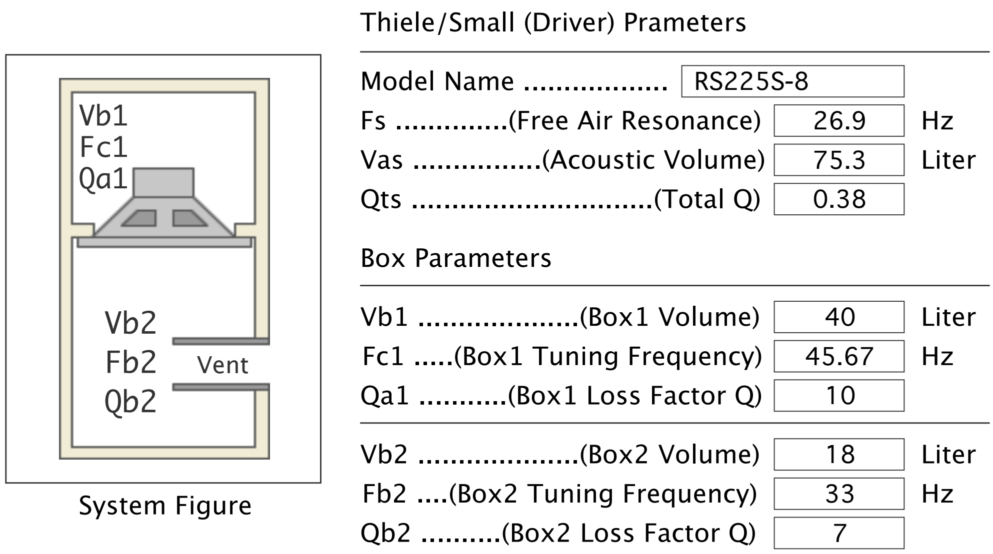


Fig 9　ベントを一つ塞いだ特性

早速、試してみます。幸いフィルター回路にはオペアンプ 1 回路が余っていますし、ベントはスチロールを筒状に削って詰め込み簡単に塞げます、Fig 10 に周波数特性測定結果を示します。20Hz で +10dB 程レベルが上がっていてブースト法と塞ぎ法では特性にあまり差は無いようですが、どちらも低域特性をかなりいじっているので位相（Phase）や群遅延（Group Delay）がどうなっているか気になるので特性を見てみます。

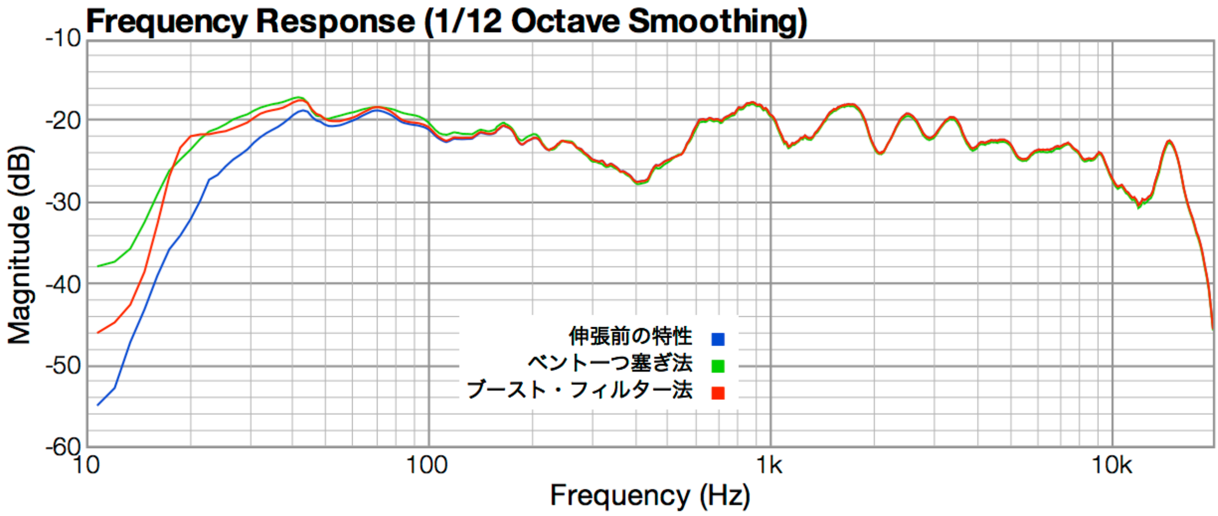


Fig 10　低域伸張前・後の周波数特性

Fig 11 が最小位相特性でブースト法の変化が大きいですが特性的にはそれなりです。

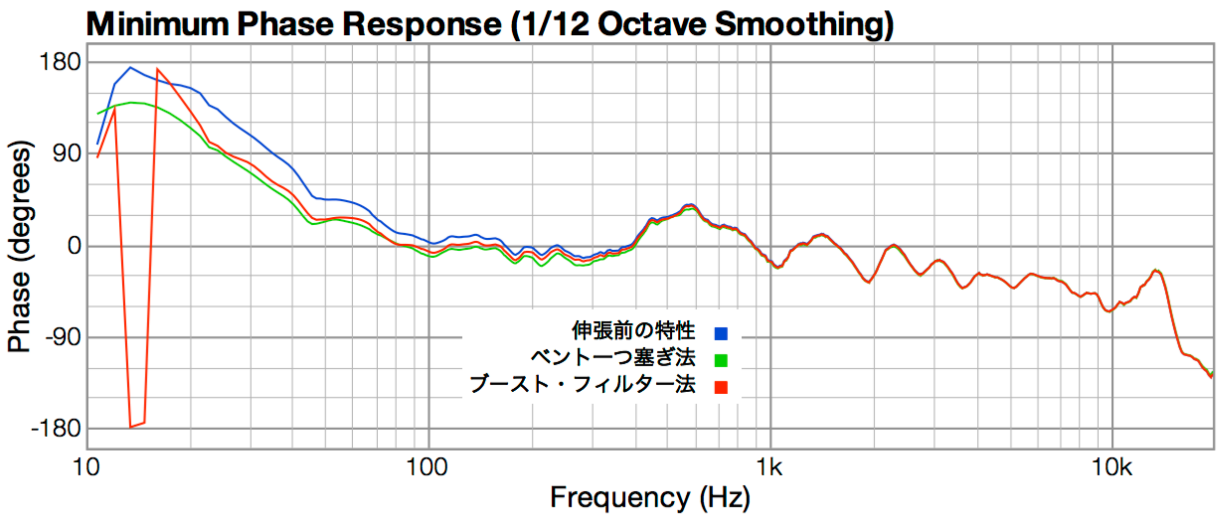


Fig 11　低域伸張前・後の位相特性

Fig 12 が、一番気になる群遅延特性でブースト法が 20Hz で 57mSec と大きくなっています。これはロー・ブースト・フィルターを追加しているための弊害です。

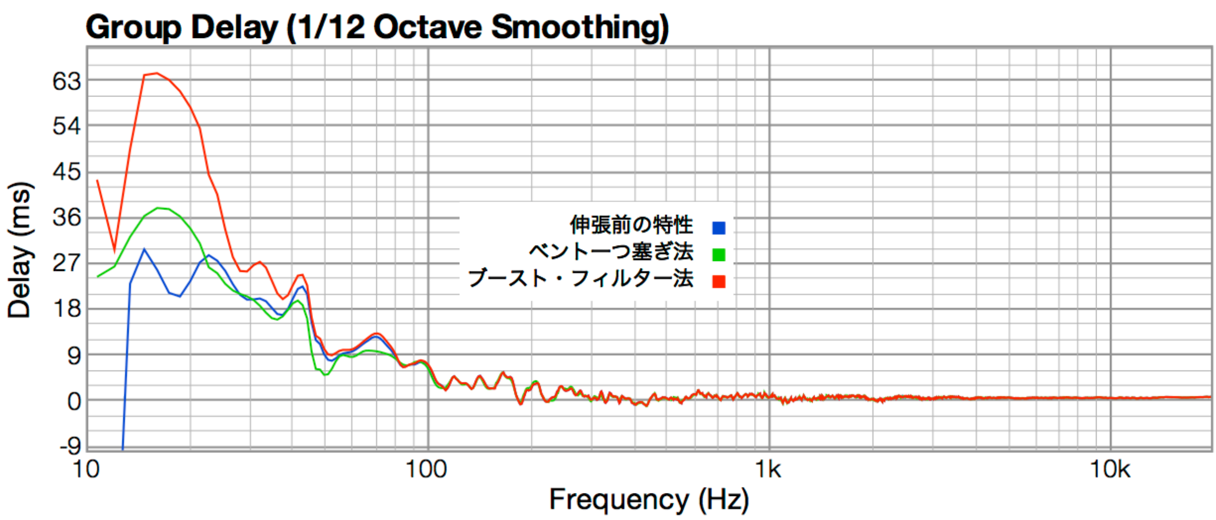


Fig 12　低域伸張前・後の群遅延特性

ロー・ブースト・フィルターの位相回転分（12dB/oct で 180°）がＳＰの位相特性に加

算され、位相を微分（変化率なので急激な変化ほど群遅延値も大きくなり、単調な変化なら群遅延は増加しない）した値である群遅延も大きくなります。一般的に密閉型エンクロージャーだと位相回転：180° ベンテッド型だと：360° と位相回転が大きくなるほど群遅延も多くなります。本ケルトン型だと位相回転：360° でロー・ブースト・フィルター： 180° と合わせて 540° になり 20Hz 57mSec はシミュレーション値（Fig 13）とも一致する数値です。また、ベント一つ塞ぎ法では群遅延 20Hz 33mSec と少なくなっていますが、ベントからの出力が 6dB 程下がりますのでアンプのゲインを上げて補正しており、それもまた懸念材料ですので、色々と試聴して確かめて見ることにします。

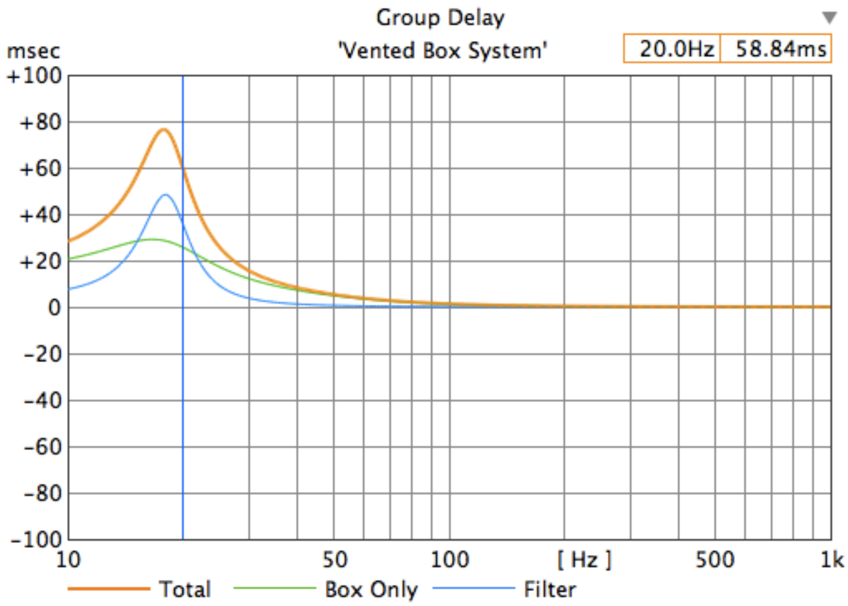


Fig 13　ベンテッド型にロー・ブーストした BoxDesignerFA の６次のアライメントの例
この例では 20Hz 58.84mSec

鬼太鼓座を聴いて分かったのですがベント一つ塞ぎ法だとコーンのストロークの（Xmax）限界で割と小さいレベルでサチレーションが生じていました。ゲインを上げた事による弊害でこのユニットには使えない方式だと判断できます。ではブースト法はどうかと言うと通常のレベルではサチルこともないようですし、（30Hz以下の成分のレベルはかなり低いと思われ、そのような低い周波数成分の入っている音源も少ないと思われる。） 群遅延の影響も気にならないと言うより違いは判別出来ないのが確認できました。 人間の聴覚上低音に対しての感覚は鈍くなることの現れでしょうか。（理論的には 20Hz で 57mSec 時間遅れが生じている、20Hz の波長：17.25m、57mSec の音波の到達距離：19.7m）
試聴を重ねる内にロー・ブースト有りの方が音的にも安定感があり、いいんじゃないかと思うようになっており、今は、殆どロー・ブースト有りで聴いています。

◎位相回転・群遅延を補正する

やはり長目の群遅延は気掛かりです。位相回転・群遅延を回避する方法として miniDSP などのデジタル・プロセッサーを Lo ミキサー・Lo Hi フィルターに使用するのが手軽です。部屋の音場を補正する事には否定的ですが、ＳＰから発せられる音その物の特性を補正してフラット化する事は原音（メディアに入っている音）再生に近づくと思います。
miniDSP OpenDRC-DA8 は FIR フィルターを利用出来、 位相回転・ 群遅延を発生しないで周波数特性のみを補正できる様なので（完全に可能かは未確認）今後、導入を検討して行きたいと思います。

追伸：その後の改良点

2017年の製作から３年余り経ち基本特性には手を加えていませんが、何点か手を加えたのでここに追伸として掲載します。現在中高域にタイムドメイン ミニを使用しています。

１．外側にフェルトを貼る

　仕上げが木そのままでは味気ないので２mm厚のフェルトを貼りました。
外壁からの不要放射を減らすのが主なのでもっと厚いのにしたかったのですが諸般の都合により入手し易い２mmにしました。
また、貼りやすいように箱の角にはトリマーでアールを付けました。

TIMEDOMAIN mini

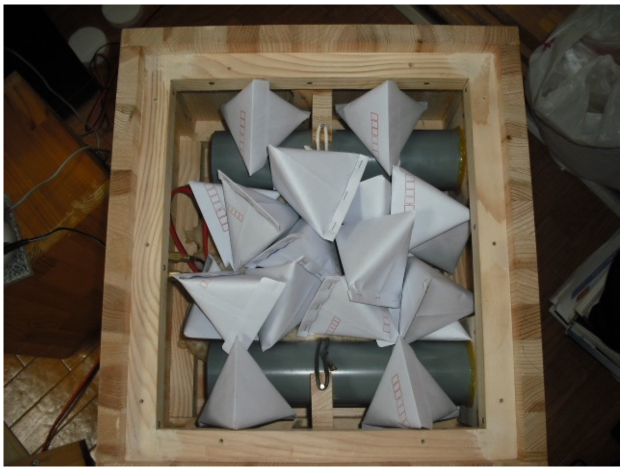
追加写真１　フェルトを貼った外観

２．内部構造に手を加える

追加写真２　アングルリブの追加

追加写真３　ＳＰ前面にネット追加

　密閉ＢＯＸ側の天板の内圧による振動が激しいので鉄製Ｌアングルを追加しましたが、効果は余りないようで、無いよりましと言った程度でした。天板その物の板構造を多重構造にする必要がありそうです。ＳＰ前面にネットを取付け内張のホワイトキューオンを箱の中心部に増量し定在波の低減を試みました。



追加写真４　吸音材を中心への増量　　　　追加写真５　戸澤式レゾネータ追加

また、ベンテッド部の吸音材を戸澤式レゾネータに変更しました。これの効果はハッキリしませんが、吸音材の充填による容積の減少（同調周波数の高域へのシフト）が少ないようです。

３．設置時の工夫

　実際に使っていると箱の振動と床への振動が気になります。インシュレータの使用が一般的ですが、同時に効果がある方法として重しの使用を考えました。１個５.８kg の御影石４枚を１枚を敷き３枚を重りにしていますが、どう言う配置が最善かは、まだ検討の余地があります。尚、箱と御影石の間には５mm厚のスーパーゲルを挟んでいます。

追加写真６　重し（御影石）設置　　　　追加写真７　重し（御影石）設置

2020/09 追加