

楕円ウェーブガイドを用いたパッシブラジエータ型コンパクト2wayスピーカーの製作

製作者：Task (@plus_nine96)

スピーカー名：Kepler -compact-



図1. スピーカーの前面



図2. スピーカーの後面

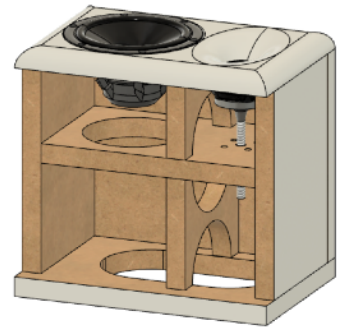


図3. スピーカーの内部

1. はじめに

こんにちは、Taskです。以前からアニソン試聴会で発表したいと思っていましたが、なにぶんこれまで風呂桶や棺桶のような大型スピーカーしか作っていなかったため、毎度出場を断念していました。しかし、今回こそはコンパクトなスピーカーを作って試聴会に参加したいと考え、製作に踏み切りました。

今回のスピーカー製作の目標は

- ・楕円ウェーブガイドを用いて水平・垂直方向の指向性を制御する
- ・持ち運びができるようにできる限りコンパクトに仕上げる

の2点です。

ウェーブガイドについては以前、指向性の狭い円形ウェーブガイドを用いたスピーカーを製作しましたが、指向性についての知識不足のためあまり良い評価をもらえませんでした。そこで今回は知識を蓄えて楕円ウェーブガイドに挑戦し、リベンジを試みた次第です。それでは以下に設計・製作の方法について記します。

2. 楕円ウェーブガイドの設計・製作

2.1 ウェーブガイドとは

ウェーブガイドとは指向性の制御を目的としたホーンのことをいい、一般的にツイーター振動板の前面に取り付けられます。ウェーブガイドで指向性を狭めることによって、クロス周波数においてウーファの軸外特性と滑らかに接続できたり、バッフルの回折や部屋の初期反射を抑えたりすることができます。また、ウェーブガイドでツイーターに奥行きを持たせウーファーとの振動板位置を揃えることによって、タイムアライメントが整合しやすくなるというメリットもあります。このようにウェーブガイドにはスピーカーの特性を大きく向上させる効果があるため、最近では市販品のみならず自作スピーカーにおいても人気の音響アタッチメントとなっています。

2.2 楕円ウェーブガイドの利点

一般的なオーディオルームにおいて、人がスピーカーの直接音を聴く角度は水平 $-30^{\circ}\sim+30^{\circ}$ 方向と垂直 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 方向と言われており、この範囲の応答を特別に「Listening Window」(以下LW)と呼びます(図4の黒色の線の領域)。LW内で応答が急激に変化してしまうような指向性の鋭いスピーカーは、視聴位置が少しでも変化すると聴く音も変わってしまうため好ましい特性とは言えません。

一方で垂直 $-20^{\circ}\sim-40^{\circ}$ 方向、 $+40^{\circ}\sim+60^{\circ}$ の軸外応答はそれぞれ床反射・天井反射を含み、水平 $\pm 40^{\circ}\sim\pm 80^{\circ}$ の軸外応答は側面の壁の反射を含み耳に届きます(図4の灰色の線の領域)。このような床、天井、壁などの反射を含む軸外応答を「Early Reflections」(以下ER)と呼び、ER内の応答が直接音に対して大きいと干渉によって応答が乱れてしまいます。

そこで図5のような楕円形状のウェーブガイドを採用することで、水平方向の指向性を広く垂直方向の指向性を狭くできるため、LW内の直接音の応答を一定にし、さらにER内の初期反射音を小さくすることが可能です。さらに、楕円にすることによってツイーターとウーファースの距離が近づくため、位相の整合が取りやすくなるという利点もあります。

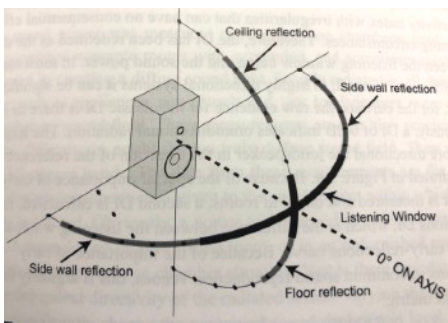


図4. LWとERの領域
(Sound Reproduction Fig.5.8から引用)



図5. 楕円ウェーブガイド

2.3 楕円ウェーブガイドの設計

いきなり3次元の楕円ウェーブガイドの設計は難しいため、はじめに円形ウェーブガイドを無限大バツフルに取り付けた状態で2次元軸対称音響放射シミュレーションを行い、水平・垂直方向のウェーブガイド曲線を決めていきました。本スピーカーで使用したツイーターはSB Acoustics「SATORI TW29R」であり、この振動板形状も正確に模写してシミュレーションに含めています。曲線形状を複数個変えてシミュレーションを行ったところ、図6のような単純な円弧曲線が最も特性の乱れが小さかったため今回採用することにしました。乱れが小さい理由として、円弧形状はバツフル面と完全に接するように描くことができ、バツフルとウェーブガイドの不連続境界が存在しないためだと考えられます。

おおよそのウェーブガイド曲線を決定し、次の段階として図7に示されるようなエンクロージャーを含めた3次元音響放射シミュレーションを行いました。図8, 9に水平方向・垂直方向の指向性シミュレーションの結果を示します。このときの目標としてLWで -1.5dB 以内の応答、かつ全体の軸外特性が平坦になるように設計しています。

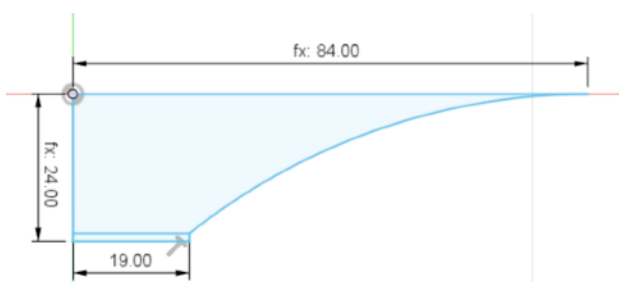


図6. 楕円ウェーブガイドの水平方向のスケッチ

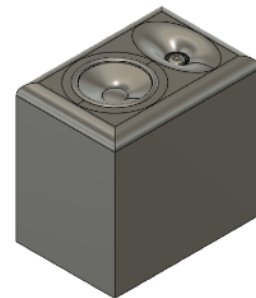


図7. 3次元シミュレーションのモデル

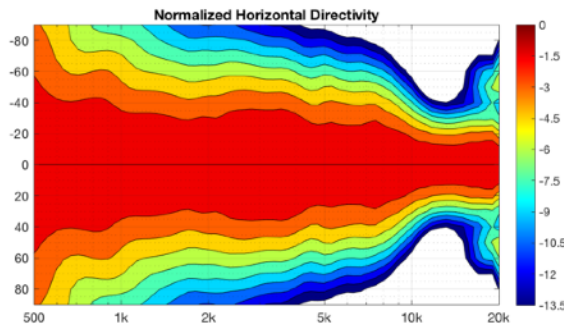


図8. 水平方向の指向性シミュレーション結果

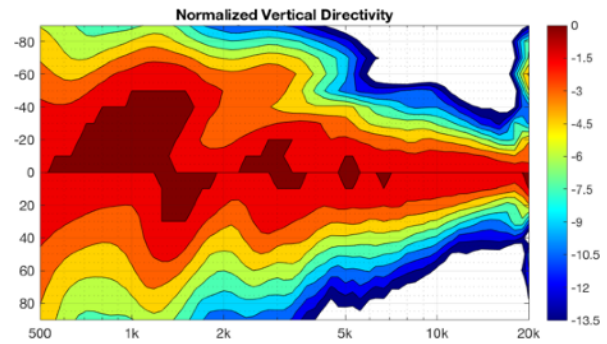


図9. 垂直方向の指向性シミュレーション結果

2.4 楕円ウェーブガイドバッフルの製作

楕円ウェーブガイドはバッフルも含めて3Dプリンタで作成しました(図10)。バッフル寸法は320×216×24mm、素材はナイロン、この条件のもとDMM.makeさんに発注し、費用は1枚3.7万円でした。ナイロンは3Dプリンタ材料の中でもMDFと同程度の優れた機械物性を誇り、バッフルに使用しても特段大きく鳴ってしまうということはありません。また、3Dプリンタの造形誤差は0.2mm以内であるため、ウェーブガイドの曲面やスロート付近の細かな造形も問題なくプリントできていました。

ツイーターのバッフルへの取り付けは、図11のような手段で行っています。バッフルの裏側に板付きナットを装着した補強板を挿入し、そこにアジャスタを取り付け、ツイーターをバッフルに押し当てる形で固定しています。バッフルの前面にボルトを出してツイーターを固定することもできますが、デザイン性や放射の乱れ等を考慮して今回はこのように裏側から支える構造としました。



図10. 作成したウェーブガイドバッフル

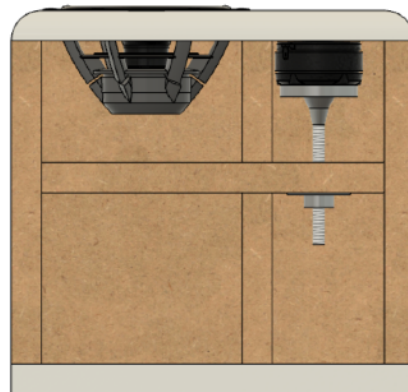


図11. ツイーターの固定方法

2.5 楕円ウェーブガイドの測定結果

楕円ウェーブガイドにツイーターを装着し、シミュレーションと同条件で水平・垂直方向の指向性を測定すると図11, 13のようになりました。図8, 9のシミュレーション結果と比較すると測定結果はほぼ一致しており、ウェーブガイドシミュレーションの妥当性について確認できました。

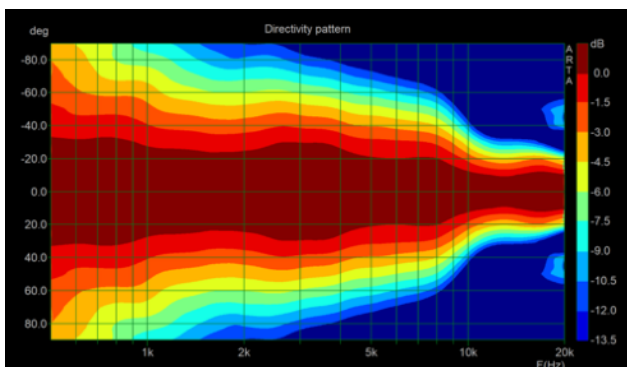


図12. 水平方向の指向性実測結果

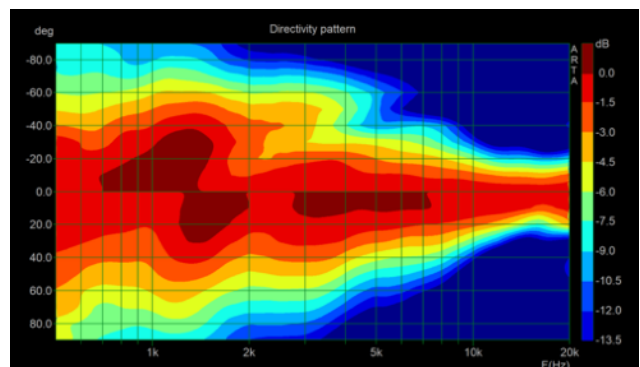


図13. 垂直方向の指向性実測結果

3. 低域のシミュレーションと測定

スピーカーのエンクロージャー形式はパッシブラジエータ型とし、ウーファーユニットはSB Acoustics「SATORI MW16P-4」、パッシブラジエータはSB Acoustics「SB15SFCR-00」を使用しました。パッシブラジエータ型とは、バスレフポートの代わりに磁気回路の付いていないユニットを配置する形式のことで、振動部におもりを付けて共振周波数を自由に変えることができたり、ポート内部による共鳴が原理的に生じないといったメリットがあります。

上記のユニットを使用し、エンクロージャー容量を9Lとしたときの低域シミュレーション結果は図14の黄線のようになります。バスレフ型の最大平坦特性(緑線)と比較すると、-6dBとなる周波数は高くなってしまいますが、バスレフ型の容量13Lに比べ4Lほど容量が抑えられています。一方で密閉型の最大平坦特性(青線)と比較すると、容量は密閉型に比べ2Lほど大きいですが、-6dBとなる周波数は低くなっていることが分かります。つまり、今回の条件ではパッシブラジエータ型はバスレフ型と密閉型のちょうど中間程度の特性になっていることが確認できます。

シミュレーションと同じ9Lのエンクロージャーを作製し、近傍界測定によって低域の応答を測定した結果を図15に示します。総合特性はシミュレーションとほぼ一致しており、振動板やパッシブラジエータの応答からもパッシブラジエータ型として正常に動作していることが確認できます。

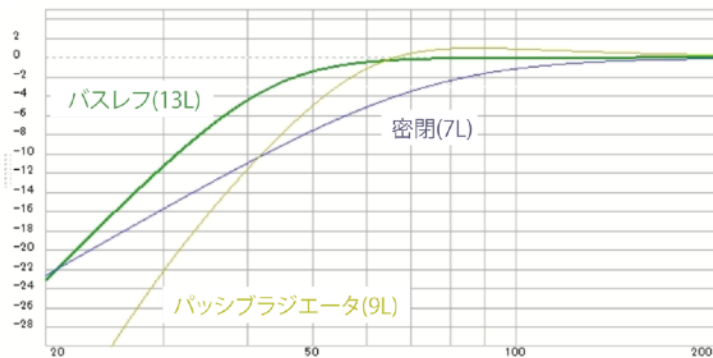


図14. 低域シミュレーション結果

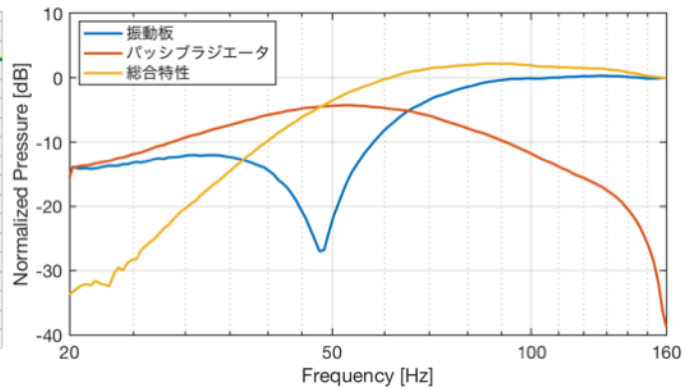


図15. 近傍界測定による低域の応答

4. おわりに

実はまだネットワークの調整や塗装などが終わっていないため、申し訳ありませんがひとまずレポートはここまでとします。最終的な総合特性やその評価については当日に発表したいと考えています。それでは当日は何卒よろしくお願いたします。