

## 2 WAY スピーカーの製作

2011年11月25日  
今井 明

1. 目的
2. システムの概要
3. 予備実験及び調査
  - 1) F特性測定時の最良マイクのセット位置について
  - 2) ネットワークのコイルについて
- 4-1. スピーカーの製作（その1）
  - 1) 目標とする周波数特性について
  - 2) 検討の概要
  - 3) F特性のコントロール
- 4-2. スピーカーの製作（その2）
  - 1) 検討の概要
5. ネットワークの位相歪み等について
  - 1) ツィータの正及び逆接続のF特性の測定
  - 2) ツィータの正及び逆相とコンデンサーの関係
  - 3) 位相の測定
  - 4) 「ツィータの正及び逆接続について」のまとめ
  - 5) リスニングによる位相歪の確認
6. リスニングによるネットワークの調整
  - 1) 低音と中音の割合
  - 2) 評価基準の変更
  - 3) 中～高音について
  - 4) 低音～中音の調整
  - 5) 高音の調整
  - 6) 低音（バスレフ）の再調整
7. まとめ

## 1. 目的

自作2WAYスピーカーにおいて「良い音特性」(石井伸一郎氏提唱)のスピーカーシステムを製作すること。

## 2. システムの概要

- 1) 現有フルレンジ12cm(BOX容量24L:バスレフ)のリニューアルとする。
- 2) 中高音に透明度を持たせるために、2WAY方式とする。
- 3) ネットワーク回路の値は、F特性測定とリスニングにより決めていく。

## 3. 予備実験及び調査

- 1) F特性測定時のマイクのセット位置について

### ①測定機材 (F特性の測定)

測定ソフト: My Speaker (サインスイープ 20Hz~20KHz)  
マイク: ベーリンガー ECM8000  
パソコン(サウンドボード): 富士通ノート FMV-BIBLO-L00XC/E50

### ②スピーカー及びアンプ

#### ・スピーカー

ユニット: フォステクス FX120 (12cm フルレンジ)  
ボックス: BOX容量24Lバスレフ型、ポート共振周波数50Hz(自作)  
・アンプ オンキヨーFR-N 7 SX(コンポ付属)  
周波数特性 10~100kHz 定格出力 15W+15W(4Ω)  
※ 以後測定するインダクタンスや位相測定も上記に準ずる

### ③マイクのセットについて

- i. 床からのスピーカー距離について (スピーカー軸上50cmで測定)

・27cm、83cm、135cmの3水準について測定した。

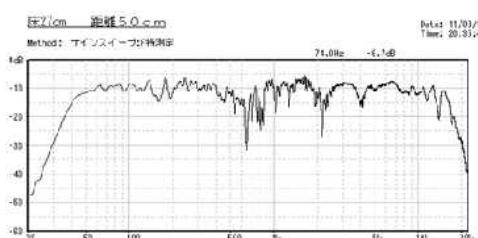


図1 床から 27cm

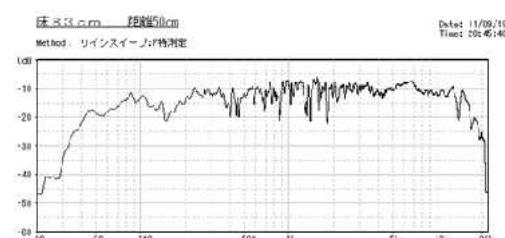


図2 床から 83cm

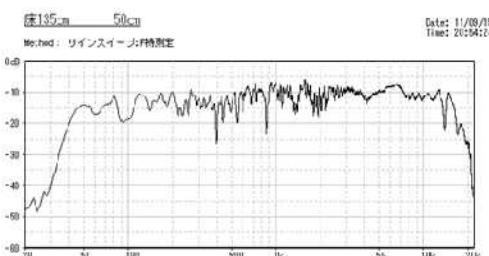


図3 床から 135cm(天井と床の約中間)

### ・測定結果

床との距離27cmは、床に近いために低域がブーストされているようである。また、650Hz及び2kHzにデップがみられた。床からのスピーカー距離は、比較的平坦である「135cm」(天井と床の約中間)とした。

## ii. スピーカーとマイク距離について（床から135cm、スピーカー軸上で測定）

- 10cm、15cm、20cm、25cm、30cm、40cm、50cm、100cmの8水準について測定した。

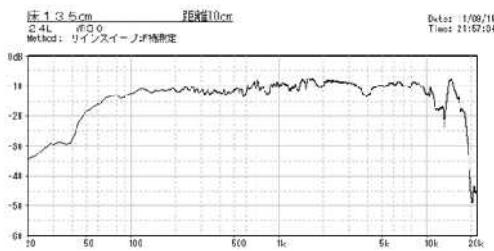


図4 マイク 10cm

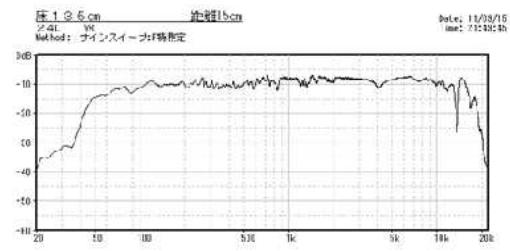


図5 マイク 15cm

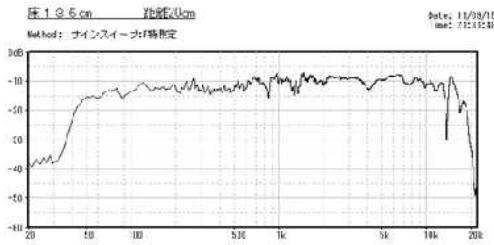


図6 マイク 20cm

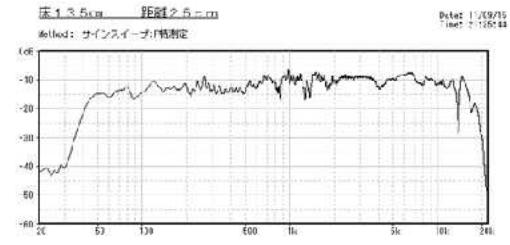


図7 マイク 25cm

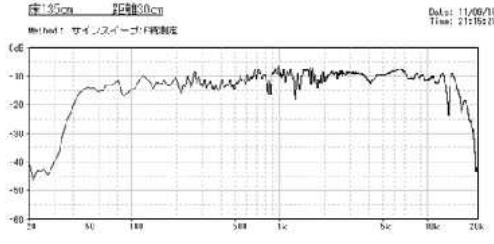


図8 マイク 30cm

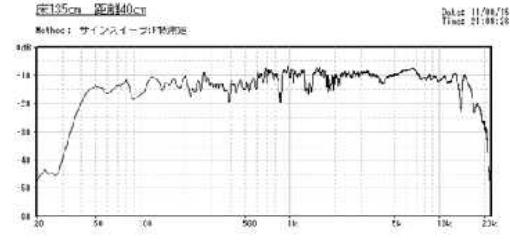


図9 マイク 40cm

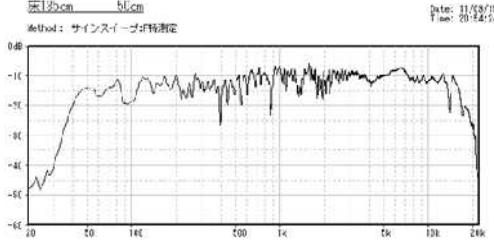


図10 マイク 50cm

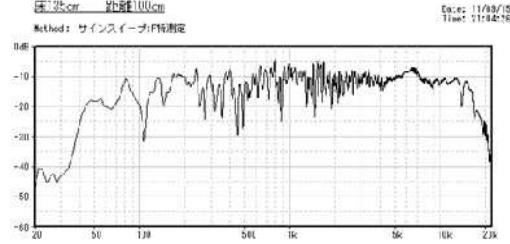


図11 マイク 100cm

### ・測定結果

- 10cmと15cmは、グラフの凸凹が少ないが40Hz付近にバスレフ特有のディップがみられるので、近すぎると思われる。また、今回2WAYスピーカーの製作を予定しているので、両方のスピーカーの高域指向性とグラフの凸凹を考慮して、スピーカーとマイクの距離は「30cm」を基本とした。
- スピーカーとマイクの距離は、低域または高域調整において、必要に応じてマイクの位置を変更する。

## 2) ネットワークのコイルについて

- ネットワークにてF特を調整するので、検討の都合を考えてコイルは自作する事にした。
- 低い周波数をコントロールすることになり、大型になる空芯コイルを避けて、フェライトコア入りコイルを検討した。

- ・コア入りコイルについて調査したところ、磁気飽和によりインダクタンスが乱れるとの情報を得た。磁気飽和を起こす電流は、周波数が変化しても一定であることから、直流電流を流して磁気飽和を確認することにした。また、一般的には磁気飽和を防止するために磁性体を大きくしている様である。

- ・そこで次の実験を行った。

フェライトコア( $\phi = 10\text{mm}$ 、長さ =  $100\text{mm}$ ) 1本とフェライトコア3本束ねて  $1.2\text{mm}$  エナメル線を巻き付けたものを用意した。測定方法は、可変式安定化電源(自作: DC 約  $1.5\sim 15\text{V}$ )に  $8\ \Omega$  の抵抗とコア入りコイルと直列につなぎ、電流を流した。計測は、方位コンパスを約  $10\text{cm}$  程離してコンパスの角度を読みとった。測定精度は無いが、コア1本と3本の相対比較で磁気飽和の確認は可能と考えた。

測定に使用したコイルは、コア1本 =  $1.1\text{mH}$ 、コア3本 =  $0.8\text{mH}$  を使用した。

インダクタンス測定ソフト: My Speaker (サイン波  $20\text{Hz}\sim 20\text{KHz}$ )



#### ・測定結果

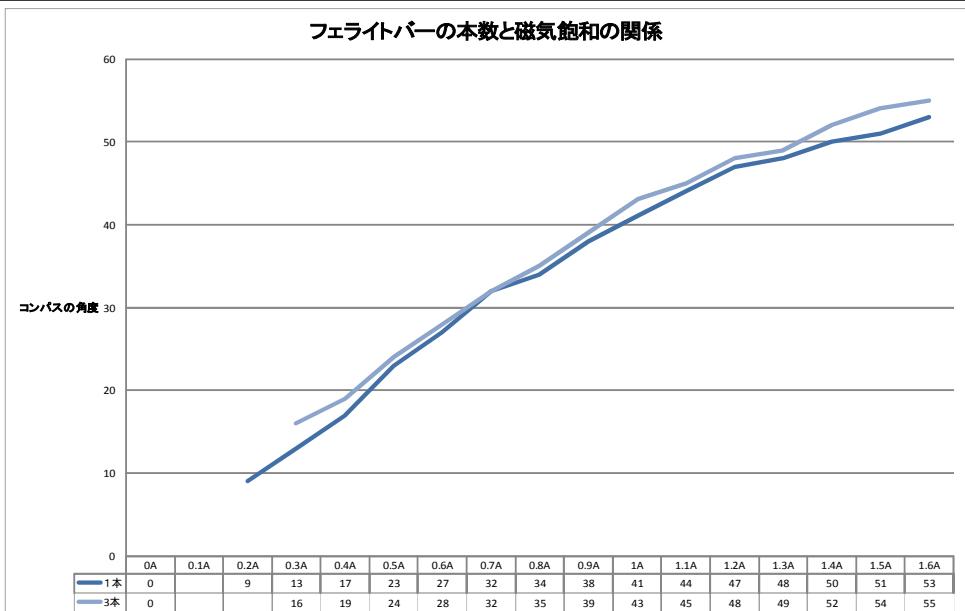


図 12 フェライトコアの本数と磁気飽和の関係

測定日: 2011. 9. 23

- ・コア1本および3本束ねの電流値  $1.6\text{A}$ においてグラフは右肩上がりを維持している。このときの電圧は  $13.8\text{V}$  であり、出力約  $22\text{W}$  迄は磁気飽和していない事を確認した。家庭における出力は、数  $\text{W}$  程度であるので十分に使用に耐えるものと考える。
- ・コア1本および3本の何れのグラフも直線でなかった。この理由は、方位コンパスを使用した為に精度が出ないのか、磁気飽和に近づいた為に傾きが弱くなっているのか不明である。
- ・コア入りコイルのインダクタンス増加率は、コアの直径と長さの比が大きい程大きい。そこでインダクタンス増加率とコイルの抵抗分増加を考慮して、コアは1本を採用することにした。

## 4-1. スピーカーの製作（その1）

### 1) 目標とする周波数特性について

#### ①イコライザーを使用した経験より

- ・イコライザーにてリスニングポイントを完全フラットにした場合に、低音は不足し、高音が強く感じられ、数曲聴くと耳が痛くなった。
- ・「良い音特性」（石井伸一郎氏提唱）の様に、1kHzを基準に低域を上げ、高域を下げる様にすると、長時間聴いても、聴き疲れすることが無かった。

以上のことより、目標とするF特性は

- ・F特性の目標カーブは、「良い音特性」を基準とし、可能な範囲F特性を近づける事にした。
- ・中・高域の透明感を出すために2WAY方式とする。

### 2) 検討の概要

#### ①現有スピーカーのリニューアル

- ・予備実験のマイク測定で使用したスピーカー（フォステクスFX120とBOX:24Lバスレフ型）を使用する。
- ・ドームツィータを追加する。
- ・ネットワーク（PST回路）の値は、F特性の測定とリスニングで決めていく。

### 3) F特性のコントロール

#### ①現有スピーカーの調査

- ・現有機のF特性（マイク位置：床より135cm、軸上30cm、以後の測定も同様）を測定した。

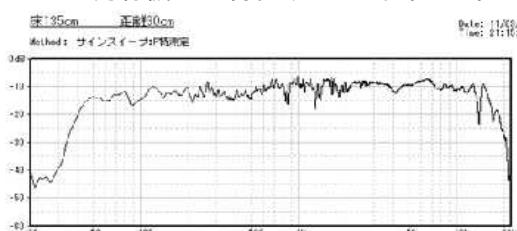


図13 現有機のF特性

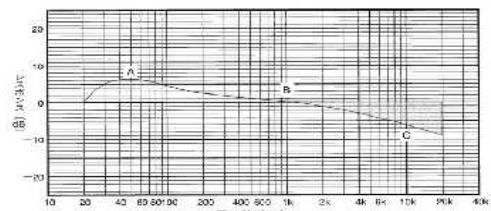


図14 「良い音特性」

- ・図13の現有機のF特性を「良い音特性」に近づける為に、低域の音圧を維持し1kHzで約-10dB、5kHzで約-15dBを目標とする。

#### ②低域部分の調整（コイル1.4mH、10mH、19mHをスピーカーに直列接続してF特性を測定）

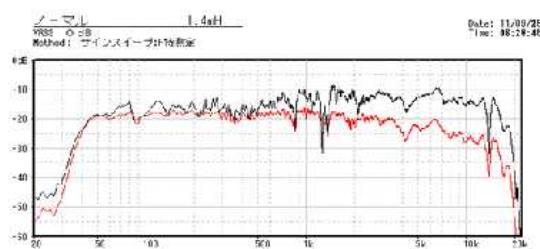


図15 コイル1.4mH 黒：ノーマル 赤1.4mH

#### ・1.4mHの評価

- 1.4mHの6dB/0ctのクロスオーバー周波数は、908Hzになる。フルレンジ一発であれば、1.4mHコイルの直列接続で十分行ける特性である。

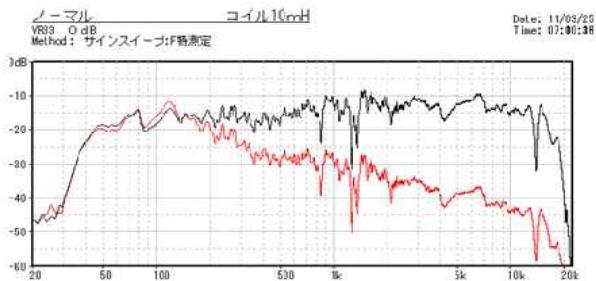


図 16 コイル 10mH 黒：ノーマル 赤 10mH

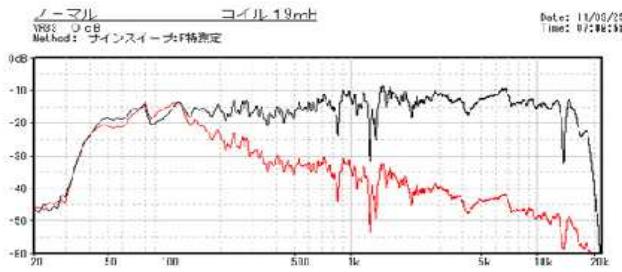


図 17 コイル 19mH 黒：ノーマル 赤：19mH

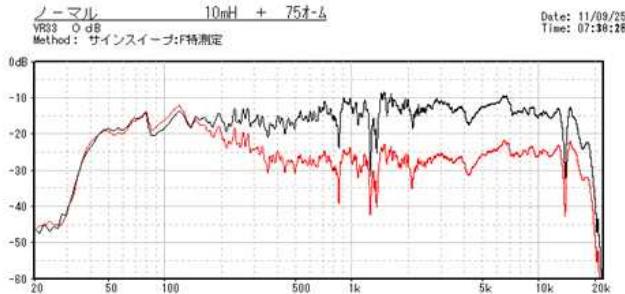


図 18 コイル 10mH + 75Ω (PST)  
黒：ノーマル 赤：10mH + 75Ω (PST)

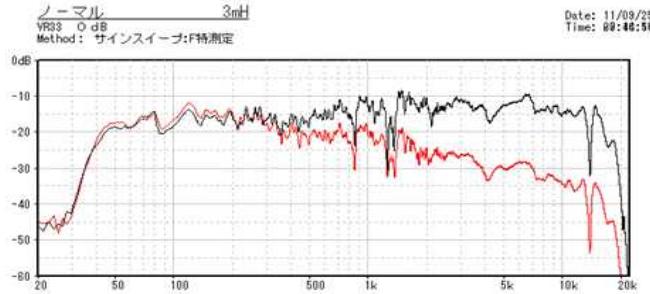


図 19 コイル 3mH 黒：ノーマル 赤：3mH

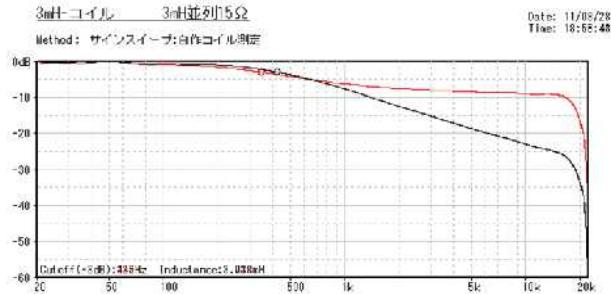


図 20 自作コイルと P S Tについて  
黒：3mH 赤：3mH+15Ω (LR 並列接続：PST)

#### ・ 10mH の評価

10mH の 6dB/oct のクロスオーバー周波数は、127Hz になる（当初、10mH 程度のコイル + 抵抗を並列接続 (PST 回路) してクロスオーバー以上の周波数を持ち上げる事を考えた）。

#### ・ 19mH の評価

19mH の 6dB/oct のクロスオーバー周波数は、67Hz になる（10mH のコイルを 2 本巻いたので直列接続して参考までに測定してみた。F 特の実測では、100Hz まで 10mH とあまり変わらず、100Hz 以上では 10mH と比較して減衰が大きい。67Hz で -3dB とはならず、理論と実測では異なる様である）。

#### ・ 10mH + 75Ω (並列) の評価

並列の抵抗値を小さくしていくば、2kHz 位まで希望のカーブが描けそうであった。しかし、500Hz 以上の F 特性は平坦であり、2 WAY のクロスオーバーが確保出来ないので断念した。

#### ・ 3mH の評価

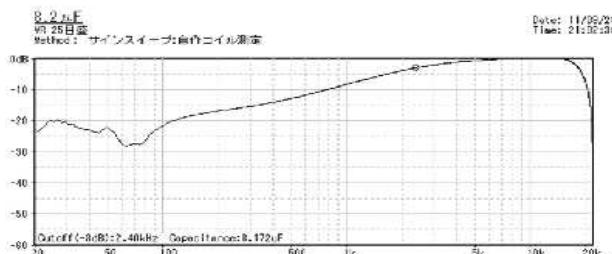
3mH の 6dB/oct のクロスオーバー周波数は、424Hz になる。フルレンジ用のコイルとして、暫定で 3mH を採用することにした。尚、3mH コイルは、10mH コイルを巻き戻した。



・ コイル 3mH に 15Ω を並列接続するとインピーダンスは、赤ラインの様に変化した。

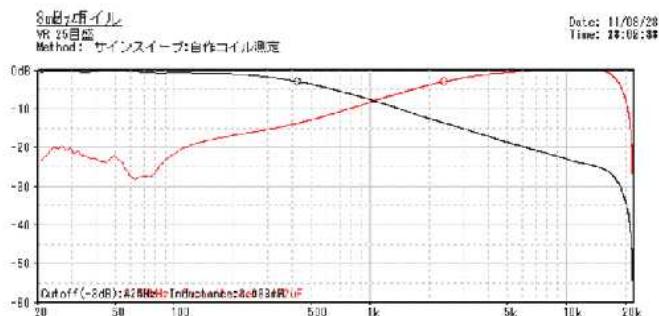
### ③高音部分の調整

今回使用するツィータ(フォステクスFT28D)の推奨クロスオーバー周波数は2kHz以上である。コンデンサー8.2μFを接続したときの、イメージを確認した。



・コンデンサー8.2μFのカーブ。

図21 8.2μFクロスオーバー周波数の確認  
(キャパシタンスの測定)



・8.2μFの6dB/octのクロスオーバー周波数は、約2.4kHzになる。クロスオーバーのイメージはコイル3mHと重ねあわせて左図の様になる。

図22 クロスオーバーのイメージ  
黒：フルレンジ3mH 赤：ツィータ8.2μ

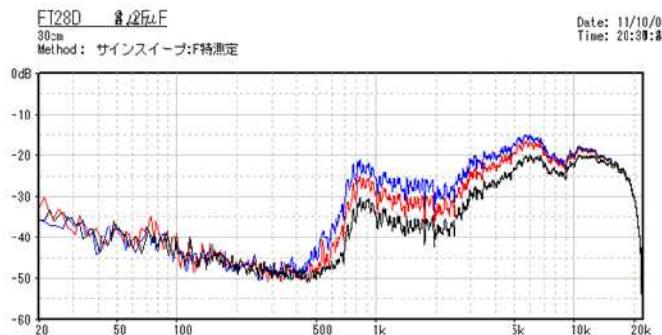
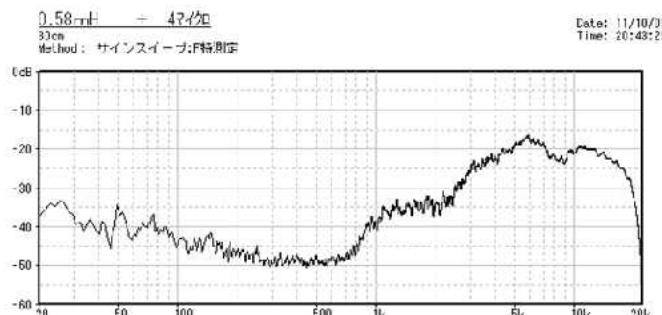


図23 コンデンサー直列接続(6dB/oct)  
青8.2μF 赤4.7μF 黒2.2μF



・フォステクスFT28Dにコンデンサーを接続してF特性を測定した。

・2.2μF(クロス9kHz)、4.7μF(クロス8.2μF(クロス2.4kHz)を接続しても図22の赤ラインの様にならなかった。ツィータのF特性が平坦であれば図22の赤ラインに近似するものと推測する。

・問題点として、800～900Hzに使用に耐えないピークがあった。高音部分のクロスオーバー6dB/octを断念し12dB/octにすることにした。

・12dB/octの暫定値としてC=4μF(クロス2.6kHz)とL=0.58mH(クロス2.3kHz)を接続してF特性を測定した。

・コイル0.58mH、コンデンサー4μFの12dB/octでは、6dB/octにみられた800～900Hzのピークは消えた。

図24 ツィータ(クロスオーバー12dB/oct)のF特性

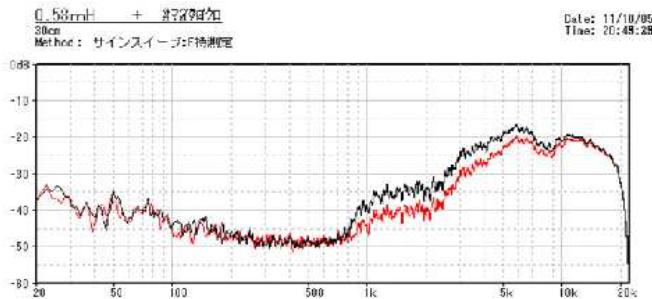


図 25 クロスオーバー 12dB/Oct の F 特性  
黒 C=4 μF (クロス 2.6kHz)、赤 C=2.2 μF (クロス 4.8kHz)

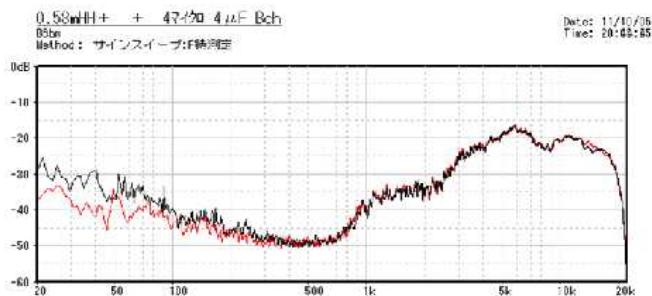


図 26 ツィータの個体差確認

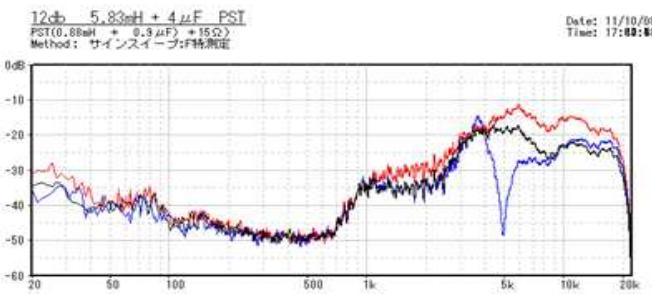


図 27 フィルタ回路の実測 F 特性  
赤：ノーマル、青：LC 共振状態、黒：LC 共振状態に 15Ω を並列接続

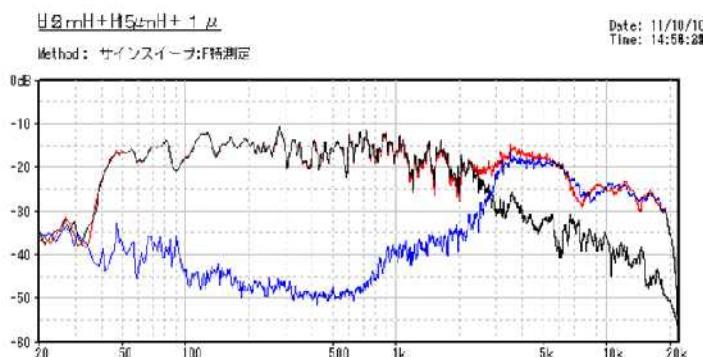


図 28 スピーカーシステム調整  
赤：低音+高音、青：高音、黒：低音

### ◎しかし

- ツィータ FT28D のカタログ F 特性に疑問が残っていたので FOSTEX e-shop にメールにて問い合わせた。回答は、「無響室という部屋で、スピーカーに 1W の正弦波入力を入れ、

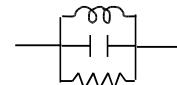
- 更に C=2.2 μF (クロス 4.8kHz) についても F 特性を測定してみた。

- コイルを L=0.58mH (クロス 2.3kHz) に固定して、コンデンサー容量を変えてみたが F 特性実測では 4 μF と 2.2 μF の差が不明確であった。シュミレーションと実測には大きなギャップがあった。

- カタログの F 特性データと実測が大きく異なるので、ツィータ個体間のバラツキが心配になり、もう 1 本のツィータについて F 特性を確認した。

- 2 個のツィータの F 特性は、概ね同一であることを確認した。左右バラバラにネットワークを調整する必要がないことを確認した。

- フォステクス FT28D は、6kHz にピークがある。「並列共振周波数」の式より約 6kHz の共振周波数の L=0.88mH と C=0.96 μF を求めた。凸の潰し具合は並列抵抗の値を変化させることにした。



$$L=0.88\text{mH} \quad C=0.96\text{ }\mu\text{F} \quad R=15\Omega$$

- 12dB の LoW カットフィルターの後にツィータ 6kHz のピークカットフィルターを接続した。その結果、約 3kHz ~ 6kHz が平坦になった。

- 低音部は、当初コイル 3mH としたが、ツィータとの繋がりがスムースでないで 3mH コイルを巻き戻し 2mH に変更した。

- これで検討終了。現有スピーカーに穴を開けてツィータをセットして完成となる。

スピーカーから 1 m の距離で測定しています。これがカタログデーターの基になります。一般のお部屋では相当静かに感じても多くの反射がありますのでたとえマイクを近づけても特性は大きく変わります。云々。」の回答であった。

- ・この回答を受けて、ツィータを再測定してみた。今迄は、測定条件としてマイク距離 30cm を設定してきた。反射等の影響を受けない距離にするために、ツィータとマイクの距離を 5mm にしてみた。

#### ④ツィータ F 特性の再測定

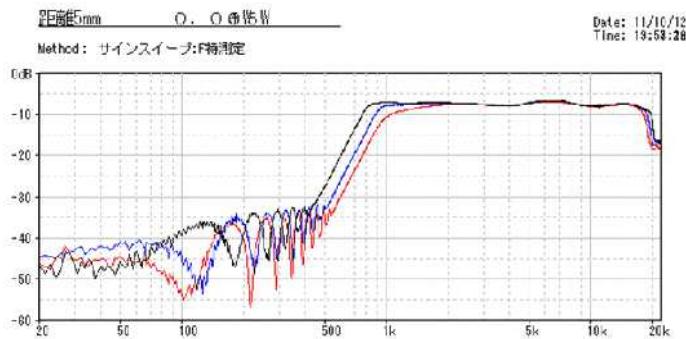


図 29 ツィッターとマイク位置 5mm の F 特性測定  
(12dB/0ct)  
黒 : 0.06W、 青 : 0.01W、 赤 : 0.005W

- ・出力 0.06W～0.005W 迄、フラットであった(懸念されたマイクの高域特性もフラットであることを確認した)。
- ・ローカットフィルターは、12dB/0ct であるが、定数は控えていなかった。
- ・ツィータの再測定した結果、マイク設定位置 30cm の根拠が崩れた。バスレフポートの音を拾う為に 30cm としたがここに落とし穴があった。ツィータの場合、無響室無しで適切な測定を行うには、マイクをスピーカーに極力近づける必要があった。
- ・ツィータの F 特性疑問点について再検討し、ツィータがカタログ通りのフラットであることが確認でき、「違和感」が取れた。
- ・スピーカーから発生する音は、コントロール出来るが、その後は、部屋の定在波や反射の影響を受ける。ここにリスニングルームの重要性がある。また、イコライザによるリスニングポイントの F 特性コントロールも有力手段と言える。

○以上、ツィータの F 特性がフラットである事が確認出来た。そこで、今までのネットワークの検討を中止し、再検討することにした。

#### 4-2. スピーカーの製作 (その 2)

##### 1) 検討の概要

- ・ネットワークのクロスオーバーは、6dB/0ct から開始し、必要により高音部を 12dB/0ct を検討する(ネットワークは、出来る限りシンプルとする)。
- ・ツィータの接続(正・逆)についても検討する。
- ・リスニングによりネットワークの定数を決めていく。

##### 2) ネットワークのクロスオーバーについて

- ・7 水準のコイルを使用して、フルレンジスピーカーの F 特性を測定した。

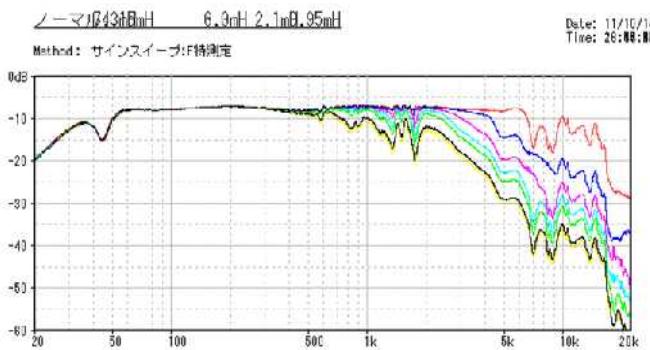


図 30-1 フルレンジ用のハイカットフィルター (6dB/oct)  
赤: ノーマル

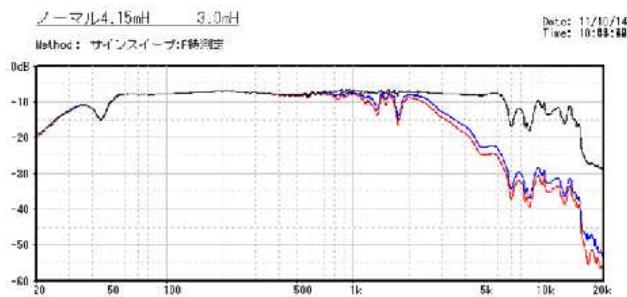


図 30-2 フルレンジ用のハイカットフィルター (6dB/oct)  
黒: ノーマル 赤: 4.15mH 青: 3.0mH

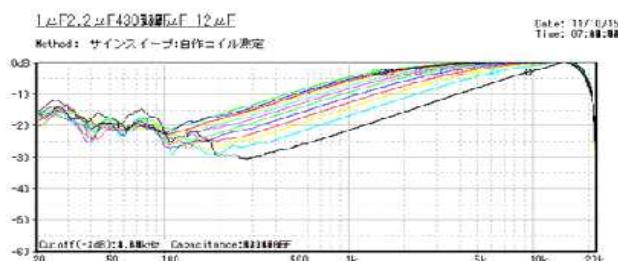


図 31 ツイータ用のローカット (6dB/oct) キャパシタンスの測定  
1μF から 12μF まで 1μF 刻みで測定

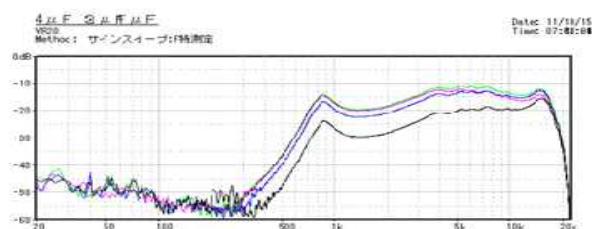


図 32 ツイータ用ローカットフィルター (6dB/oct) のF特性  
黒: 1 μF、青: 2 μF、ピンク: 3 μF、緑: 4 μF

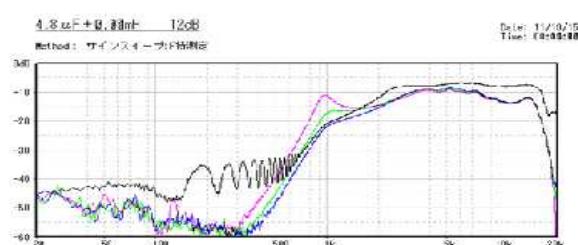


図 33 ツイータ用ローカットフィルター (12dB/oct) のF特性  
ピンク: 2.14mH、緑: 0.96mH、青: 0.62mH、黒: 0.25mH

- ・コイルは、暫定 3mH として、今後リスニング等で値を決定する。

- ・1μF から 12μF まで 1μF 刻みで、キャパシタンスを測定し、整然としたグラフを得た。

- ・マイク距離 5mm で 1 ~ 4 μF のコンデンサーについて F 特性を測定したが、図 31 のイメージと異なる。図 23 のマイク距離 30cm と同様に 900Hz にピークを認めた。

- ・フォステクス FT28D は、6dB/oct では、平坦な F 特性が得られない事が分かった。

- ・コンデンサーは 4.8 μF に固定しコイル 4 水準と取った。コイルのカットオフ周波数は、  
2. 14mH ⇒ 635Hz、0.96mH ⇒ 1.4kHz、  
0.62mH ⇒ 2.2kHz、0.25mH ⇒ 5.4kHz となる。

- ・最もフラットであったのは、0.25mH であった。

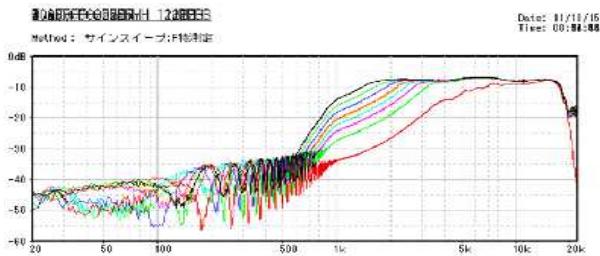


図34 ローカットフィルター(12dB/Oct)のF特性  
1、2、3、4、4.8、6、8、10  $\mu$ Fの8水準でF特性を測定した。

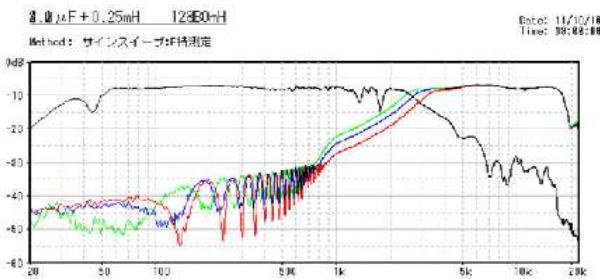


図35 クロスオーバーのイメージ  
[低音]⇒黒: 3mF、[高音 (コイル 0.25mH に固定)]⇒緑: 4  $\mu$ F、青: 3  $\mu$ F、赤: 2  $\mu$ F  
(低音及び高音のF特性を軸上 5mm の距離で単独測定し、グラフ上で重ね合わせた)

次に、図35のクロスオーバーのイメージを基にフルレンジ 3mH、ツィータ 4  $\mu$ F+0.25mH を接続してリスニングポイントのF特性を測定した。

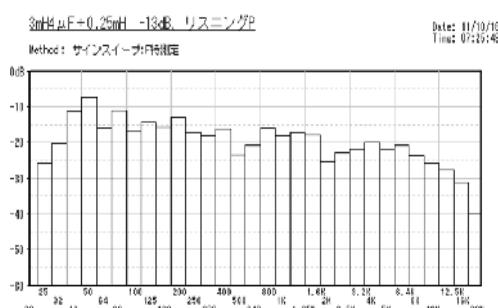


図36 リスニングポイントのF特性

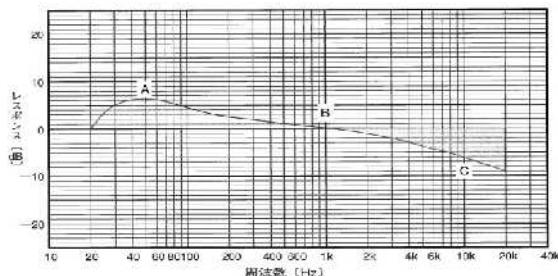


図14 「良い音特性」

- ・「良い音特性」 “なのか?” という特性を得た。
- ・クロスオーバーの 2~2.5kHz にディップがあった。(ツィータの正逆接続の記録なし。)

## 5. ネットワークの位相歪み等について

ネットワークのクロスオーバー周波数付近で位相歪が発生すると言われている。ツィータの接続方法および位相歪について確認した。

### 1) ツィータの正及び逆接続のF特性の測定

①コンデンサー  $1\mu\text{F}$  +コイル  $0.25\text{mH}$ 、

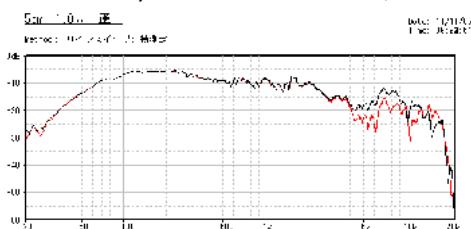


図 37-1 マイク位置軸上 5cm  
黒：逆接続 赤：正接続

マイク位置：軸上(フルレンジとツイータの中間)

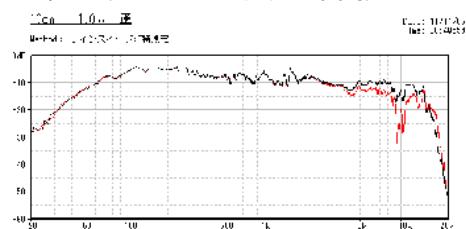


図 37-2 マイク軸上 10cm  
黒：逆接続 赤：正接続

②コンデンサー  $2.2\mu\text{F}$  +コイル  $0.25\text{mH}$

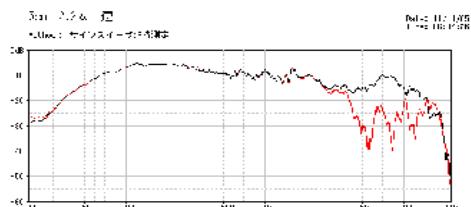


図 37-3 マイク軸上 5cm  
黒：逆接続 赤：正接続

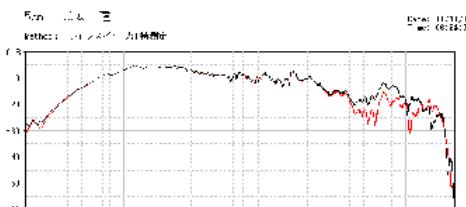


図 37-4 マイク軸上 10cm  
黒：逆接続 赤：正接続

③コンデンサー  $4\mu\text{F}$  +コイル  $0.25\text{mH}$

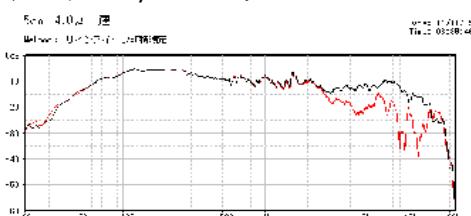


図 37-5 マイク軸上 5cm  
黒：逆接続 赤：正接続

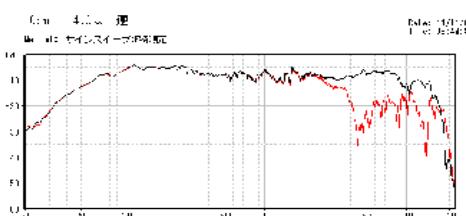


図 37-6 マイク軸上 10cm  
黒：逆接続 赤：正接続

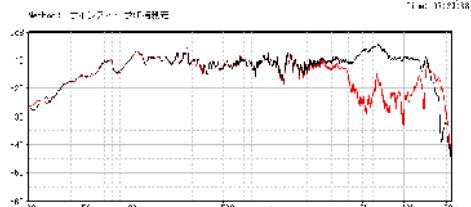


図 37-7 マイク軸上 30cm  
黒：逆接続 赤：正接続

④コンデンサー  $10\mu\text{F}$  +コイル  $0.25\text{mH}$

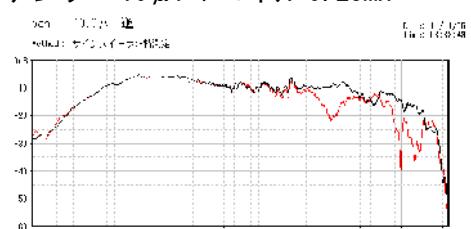


図 37-8 マイク軸上 5cm  
黒：逆接続 赤：正接続

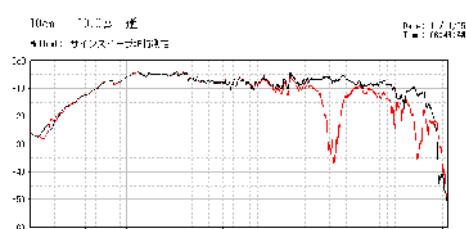


図 37-9 マイク軸上 10cm  
黒：逆接続 赤：正接続

## 2) フルレンジとツィータの正及び逆接続の各々単独データを重ねあわせた状況 (マイク軸上 10cm)

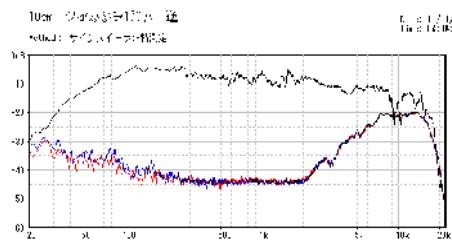


図 38-1  
1  $\mu\text{F}$  赤：逆接続 青：正接続

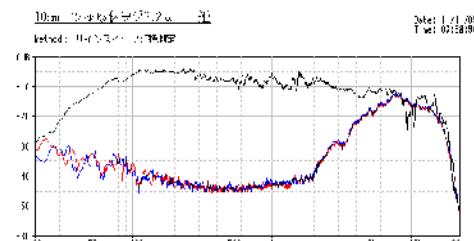


図 38-2  
2.2  $\mu\text{F}$  赤：逆接続 青：正接続

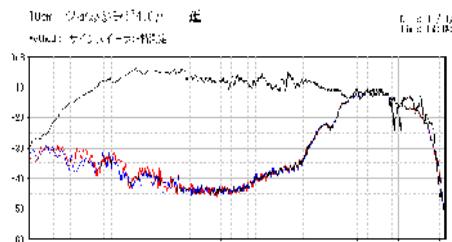


図 38-3  
4  $\mu\text{F}$  赤：逆接続 青：正接続

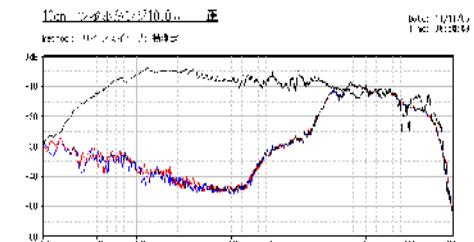


図 38-4  
10  $\mu\text{F}$  赤：逆接続 青：正接続

- ・ツィータ及びフルレンジを各々単独で取得したデータをグラフ上で重ねあわせた時は、単独のF特性データは、正逆ほぼ同等のデータでディップはみられなかった。
- ・フルレンジと同時にツィータを鳴らすと正接続は、位相歪みにより図37の赤ラインの様にF特性にディップが生じた。

## 3) 位相の測定

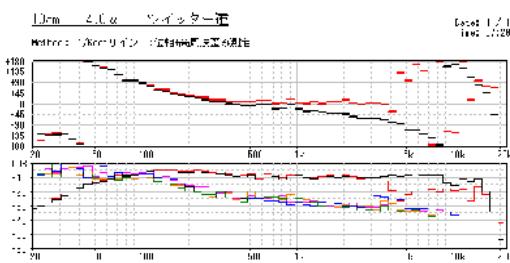


図 39-1 フルレンジ 2mH (6dB/oct) +ツィータ (12dB/oct)  
(マイク距離:10cm、ツィータ:コンデンサー 4  $\mu\text{F}$ +0.25mH)  
黒：逆接続 赤：正接続

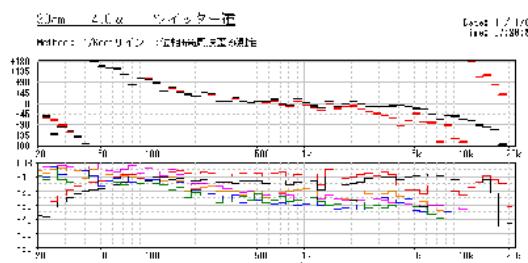


図 39-2 フルレンジ 2mH (6dB/oct) +ツィータ (12dB/oct)  
(マイク距離:30cm、ツィータ:コンデンサー 4  $\mu\text{F}$ +0.25mH)  
黒：逆接続 赤：正接続

## 4) 「ツィータの正及び逆接続について」のまとめ

- ・ツィータ逆接続は、コンデンサー容量及びマイク位置に関係なく、F特性はフラット（ディップを生じない）であった。
- ・図39-1、-2より逆接続マイクの測定位置が10cmでは約9kHzで位相反転しているが、30cmでは反転していない。従ってマイクの測定位置により位相回転状況が異なる。また、ツィータ逆接続は、正接続に対して位相が滑らかに回転していることを確認した。

## 5) リスニングによる位相歪の確認

### 【確認方法】

- ・Rch 低音（フルレンジ）のみ、Lch 高音（ツィータ）のみを接続し、低周波発信器にてサイン波

1kHz、2kHz、2.5kHz、3kHzを発生させてスピーカーより音出した。

・Rchのフルレンジは、正接続とし、Lchツィータは、正および逆接続とした。

・リスニングは、両スピーカーのセンター位置にて、耳により位相歪を確認した。位相がずれている場合は、左右スピーカーの方向に別れて聞こえる又はどちらかのスピーカーに音像が偏ると言うことである。

### 【結果】

- ・実験の結果は、何れの周波数及びツィータの正・逆接続においても音像に偏りは無かった。
- ・スピーカーに対して、頭を左右に水平移動すると全ての周波数において「干渉」による音圧レベルが変化した。
- ・両耳に達する音波の位相差と方向定位との関係は、約100Hz～1kHz（学者により1.4kHz或いは3kHz）までの音は位相差を認識できるとの事である。しかし、自分の耳では位相歪の変化を確認することが出来なかった。

## 6. リスニングによるネットワークの調整

測定による検討を踏まえて、ネットワーク値を検討した。暫定値として、フルレンジ3mH、ツィータ $10\mu\text{F}+0.25\text{mH}$ にてリスニングによりネットワークの調整を開始した。しかし、調整は、泥沼状態であり混乱に続く混乱であった。全体を要約すると以下の様になる。

### 1) 低音と中音の割合

- ・低音と中音の割合を最適にコントロールする為に、（ツィータは接続せず）フルレンジのコイルを1mH～3.7mHに変化させた。
- ・低音量は、別スピーカーによりイコライザーにて「良い音特性」に調整した、ウッドベースの響きを基準とした。その結果、確信が持てなかつたが、良好なコイルは、1～2mHであった。また、バスレフポートからの音が大きすぎる気がした。

### 2) 評価基準の変更

リスニングにおける評価の基準が曖昧で判断に確信が持てなかつた。そこでF特性が「良い音特性」に近似しているヘッドホン（ゼンハイザーHD650及びHD595）に基準を変更した。

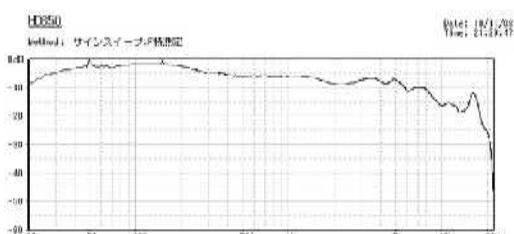


図40-1 ヘッドホンゼンハイザ - HD650 の F 特性

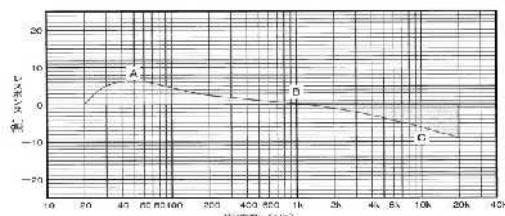


図14 「良い音特性」

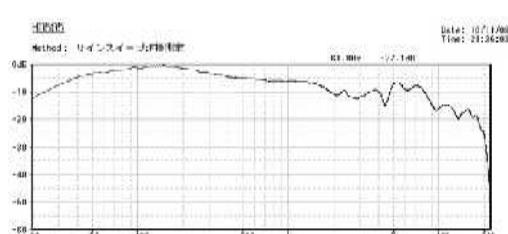


図40-2 ヘッドホンゼンハイザ - HD595 の F 特性

### 3) 中～高音について

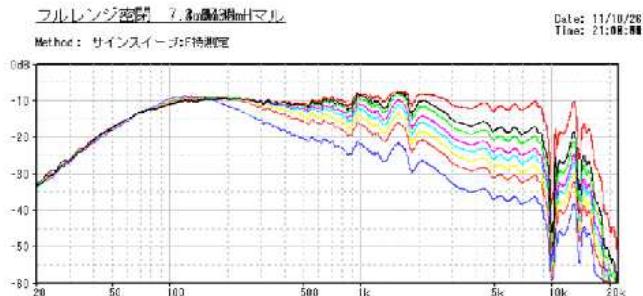
- ・ツィータをクロスオーバー2.5kHz( $4\mu\text{F}$ )にて接続すると女性ボーカルが鮮明になったが、ヘッドホンの音から遠ざかった。フルレンジである程度の中高音までカバーした方がヘッドホン

に近く、自然な音であった。コーンの分割振動という問題があるがフルレンジは、約3kHz位まで使用することにした。逆に言えば、歌声や楽器の音色を自然な音にするには、3kHz以下でクロスオーバーさせない事がポイントといえる。

- ・スピーカーの周波数特性は、重要なファクターであるが、別要素として“音色”にも考慮する必要がある。フルレンジのバランスの良さを再認識した。

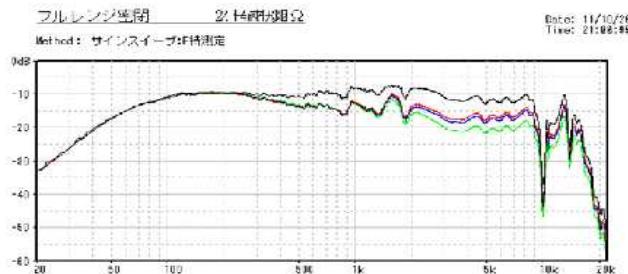
#### 4) 低音～中音の調整

今までバスレフ型で検討してきたが、リスニングにより密閉型に変更した。低音と中音の割合をPST回路でコントロールする為にF特性を測定した。



・目標カーブは、2mH(水色)が最適と判断した。

図41-1 フルレンジ密閉箱のPST回路検討  
ノーマル及びコイル0.62~7.4mHの7段階のF特性



・フルレンジにて、3kHzまでカバーする場合はインダクタンス2mH+15Ω(青ライン)が最適と判断し、コイル=2mHと抵抗=15Ωに決定した。

図41-2 フルレンジ 2mH+抵抗 3水準(PST回路)のF特性  
2mH 黒：ノーマル、赤：12Ω、青15Ω、緑30Ω

#### 5) 高音の調整

フルレンジ(2mH+15Ω)にツィータ(12dB/0ct:コイル=0.25mH固定)を逆接続して、低音と高音の分量バランス、高音の音色を確認した。ツィータ用のコンデンサーとして、1、2.2、4、10μFの4水準についてF特性の状況を確認した。

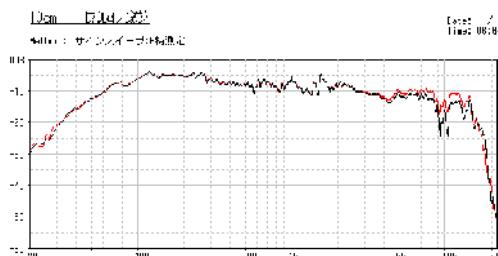


図42-1 マイク位置軸上(ツィータとフルレンジの中間)10cm  
黒：フルレンジ 赤：ツィータ1μ(逆接続)

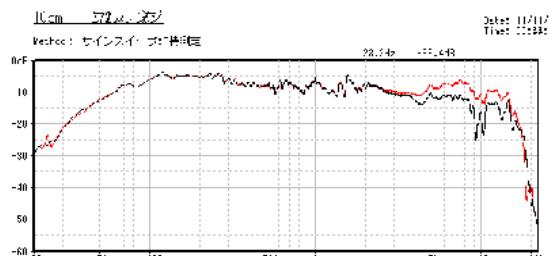


図42-2 マイク位置軸上(ツィータとフルレンジの中間)10cm  
黒：フルレンジ 赤：ツィータ2.2μ(逆接続)

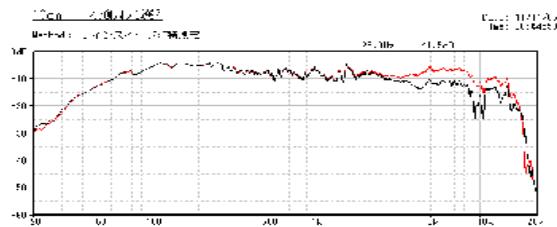


図 42-3 マイクロ位置軸上 (ツイータとフルレンジの中間) 10cm  
黒: フルレンジ 赤: ツイータ 4  $\mu$  (逆接続)

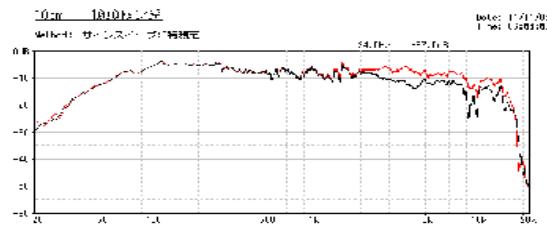


図 42-4 マイクロ位置軸上 (ツイータとフルレンジの中間) 10cm  
黒: フルレンジ 赤: ツイータ 10  $\mu$  (逆接続)

- ・3kHz よりツイータを使用するために、コンデンサーは 2.2  $\mu$ F、コイルは 0.25mH とした。
- ・ツイータのアッテネーターは、抵抗 1Ω を直列に 11 本繋ぎ、ワニロクリップで抵抗の位置を変えて減衰量をコントロールした。減衰量は約-8dB であった。

## 6) 低音 (バスレフ) の再調整

- ・低音は、密閉式としたのでバスレフ特有の“ポンつき”は、消えたが若干不足気味に感じた。そこで、バスレフポートに詰物を入れて、共振周波数をコントロールして“ポンつき”を防止しながら、低音の増強を図った。
- ・バスレフポートは、幅 20cm、縦 1.5cm、奥行 12cm である。これに、厚さ 1.1cm、奥行き 1cm、2cm、4cm、6cm、8cm の 5 水準の詰物を作成して、バスレフポートの中に詰込み共振周波数を確認した。

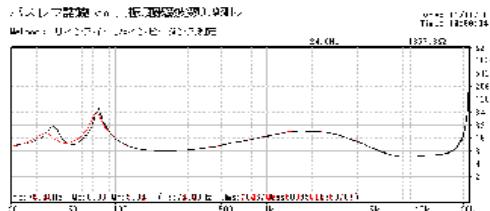


図 43-1  
黒: ポート開放 (共振 F: 50Hz) 赤: 1cm (共振 F: 45Hz)

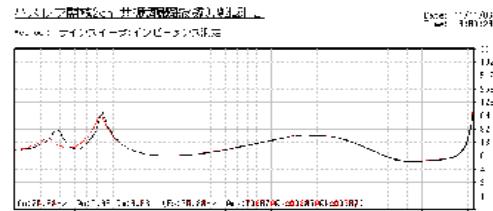


図 43-2  
黒: ポート開放 赤: 2cm (共振 F: 42.5Hz)

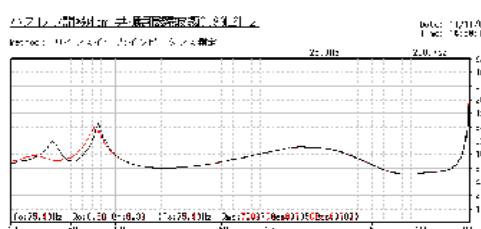


図 43-3  
黒: ポート開放 赤: 4cm (共振 F: 39.6Hz)

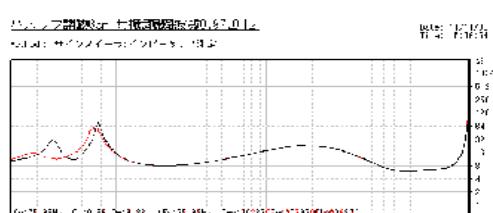


図 43-4  
黒: ポート開放 赤: 6cm (共振 F: 37Hz)

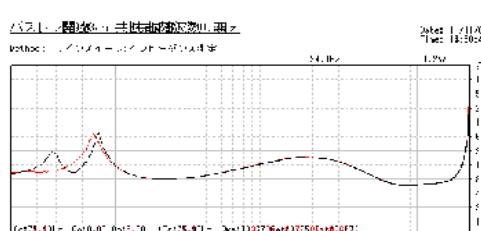


図 43-5  
黒: ポート開放 赤: 8cm (共振 F: 共振無し)

- ポートの共振周波数は、グラフのピークとピークの谷底部分となる。ポート開放で共振周波数は 50Hz(計算値と良く一致)であった。同様に詰物による共振周波数は、1cm $\Rightarrow$ 45Hz、2cm $\Rightarrow$ 42.5Hz、4cm $\Rightarrow$ 39.6Hz、6cm $\Rightarrow$ 37cm、8cm $\Rightarrow$ 共振無しという結果になった。
- リスニングによる評価は、1cm $\Rightarrow$ 45Hzにおいてバスレフ特有の“ポンつき”が若干感じられた。2cm $\Rightarrow$ 42.5Hz 及び 4cm $\Rightarrow$ 39.6Hz では、“ポンつき”は殆ど感じられず、密閉箱に比較して低音の分量は増加していた。詰物 6cm~8cm は密閉に近い音であった。詰物の長さは、暫定 2cm とした。
- 低音については、結果的にバスレフ $\Rightarrow$ 密閉 $\Rightarrow$ バスレフ(共振周波数を下げる)という順序で検討した事になった。

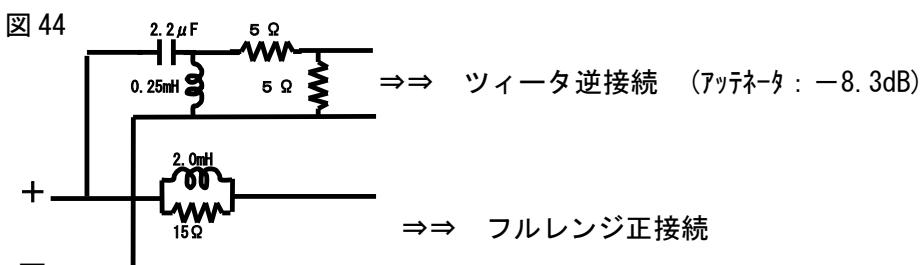
## 7. まとめ

- 1) 当初、スピーカーの再生周波数特性は「良い音特性」を目標に検討を進め、ネットワークの調整でスピーカーからの音は、ある程度のコントロールが出来た。

次に、リスニングによる評価では、別スピーカーでイコライザーにて「良い音特性」に調整した音を基準にした。しかし、別スピーカーの音が“音色”を含めて本当に基準になりうるのかと言う疑問(何か違う)が生じた。そこで、「良い音特性」に近い周波数特性である、ヘッドホン(ゼンハイザー HD650 及び HD595)を基準に調整した。ヘッドホンを基準にすると迷いなく、短時間で調整を終了した。

- ヘッドホンの“音色”に着目すると、フルレンジは低域から 3~5kHz 位まで使用した方が、自然であることが分かった。この周波数帯域は、殆どの楽器及び歌声の主要周波数を含んでおり、この帯域でツィータへのクロスオーバー周波数を設定すると自然な“音色”から外れた。仮に 1.5kHz でクロスオーバーさせるとボーカルは鮮明になるが、自然な人の声が失われる事になると思う。自然な“音色”であるフルレンジの良さを痛感した。また、低音は、バスレフポート(詰物)の調整によりヘッドホン HD650 に合わせ、高音はアッテネーターにより HD595 に合わせた。
- 検討当初は、フルレンジは透明性が無いとして 2 WAY を考えたが、日常的に聴いているマルチスピーカーの影響で、中高音の判断基準が“ズレ”ていた。
- 周波数特性は、低音域をプラスに高音域をマイナスにしている為に長時間のリスニングを行っても耳が疲れる事が少ない。人は、低音と高音の音圧バランスで、音の良し悪しを判断している様である。

- 2) 最終的なネットワーク回路は、以下の通りになった。



### 3) 周波数特性の測定

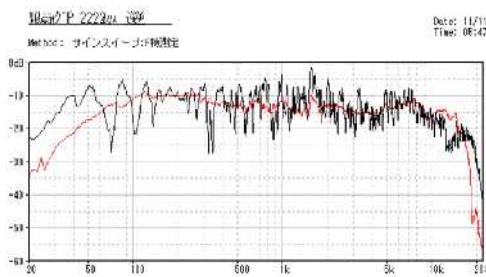


図 45-1 リスニング ポイントの F 特性(ツイータ逆接続)

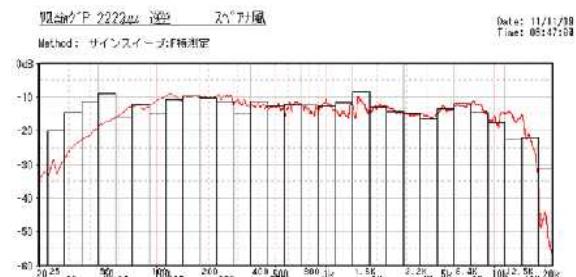


図 45-2 リスニング ポイントの F 特性(ツイータ逆接続)

黒：リスニングポイント(マイク距離 2.4m) 赤：マイク距離 10cm 黒：リスニングポイント(マイク距離 2.4m) 赤：マイク距離 10cm

- ・マイク距離 10cm の F 特性と 240cm の F 特性は、100Hz 以上で近似している。
- ・240cm は部屋の定在波腹の為に 50Hz 以下の音圧が高い。
- ・F 特性は、「良い音特性」と言えるのか？若干フラットの様である。

### 4) 終わりに

2 WAY スピーカーの製作は、初めての経験であり、検討の終点が見えなかった。そこで試行錯誤の状況を残すために、記録を取りながら(レポートを書きながら)検討を進めた。検討のポイントを心得ていれば最短で進められたと考える。しかし、試行錯誤の過程で少しばかりであるがノウハウを蓄積することが出来た。

以上

#### 【参考資料】

- ・オーディオの科学
- ・第 2 種 M E 技術実力検定試験ノート