

スピーカのエンクロージャの違いによる 再生音圧計算 シミュレーションハンドブック

バスレフやダブルバスレフ、MCA Pなどの色々なエンクロージャに入れたスピーカの再生(ポート、ドライバー、合成)音圧をシミュレータを使って予測する方法をご紹介します。なおこのシミュレーション結果は 2π 空間(無限大バッフルに埋め込んだ時)の特性になります。

1. 準備

1. 1 ドライバーのTSパラメーターを知る (メーカーの発表値や、測定による)

f_0 (最低共振周波数 単位Hz)

V_{as} (等価容量 単位L)

Q_{ts} (共振の鋭さ 単位無名数)

1. 2 エンクロージャの構造と寸法

C 各室の容積 (単位L)

S_d ポートの断面積(単位 cm^2)

L_d ポート長さ(単位 cm)

2. シミュレーション部品への置換え

2. 1 スピーカユニット

$M_0=1$

$C_0=1/(M_0 \cdot$

$(2\pi f_0)^2$

$R_0=\sqrt{(M_0/C_0)} /$

Q_{ts}

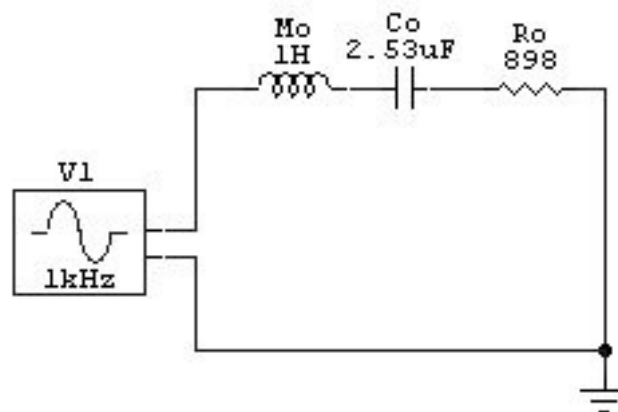
で計算し、右図の

LCR にあてはめ

ます。

それぞれの単位は

H,F, Ω です。



計算例 $f_0=100\text{Hz}$ $Q=0.7$

$C_0=1/(2 \cdot 3.14 \cdot 100)^2=2.53\text{e-}06$

$R_0 (1/0.000000253)^{0.5}/0.7=898$

2. 2 空気室

容積 C の空気室はそれぞれ

$$C_m = C_0 * C / V_{as}$$

で計算しコンデンサ（単位 F.）に置換えます。

2. 3 ポート

1) 片側が開放空間の場合、ポートの共振周波数を f_d (Hz) 音速を c (cm/sec) とすると

$$f_d = \sqrt{(S_d / (C_n * L_d))} * c / 2\pi \doteq 173 \sqrt{(S_d / (C_n * L_d))}$$

で求められ

$$M_n = 1 / (C_n * (2\pi * f_d)^2)$$

で計算しインダクタンス（単位 H）に置き換えます。

2) 両方が空気室のポートは両端の空気室を C_1, C_2 とすれば

$$C_n = C_1 * C_2 / (C_1 + C_2)$$

で置換えポート1と同様に計算します。

ポート長は端部空気の負荷質量が加わるので実際より長く見えます。これを開口端補正と言います。

また開口の状態により開口端補正の種類が2種類あります。

補正值 L はポートの半径 r 、直径 D とすると

a.) 平面にポートが付いている場合 $L = 8r / 3\pi \doteq 0.424D$

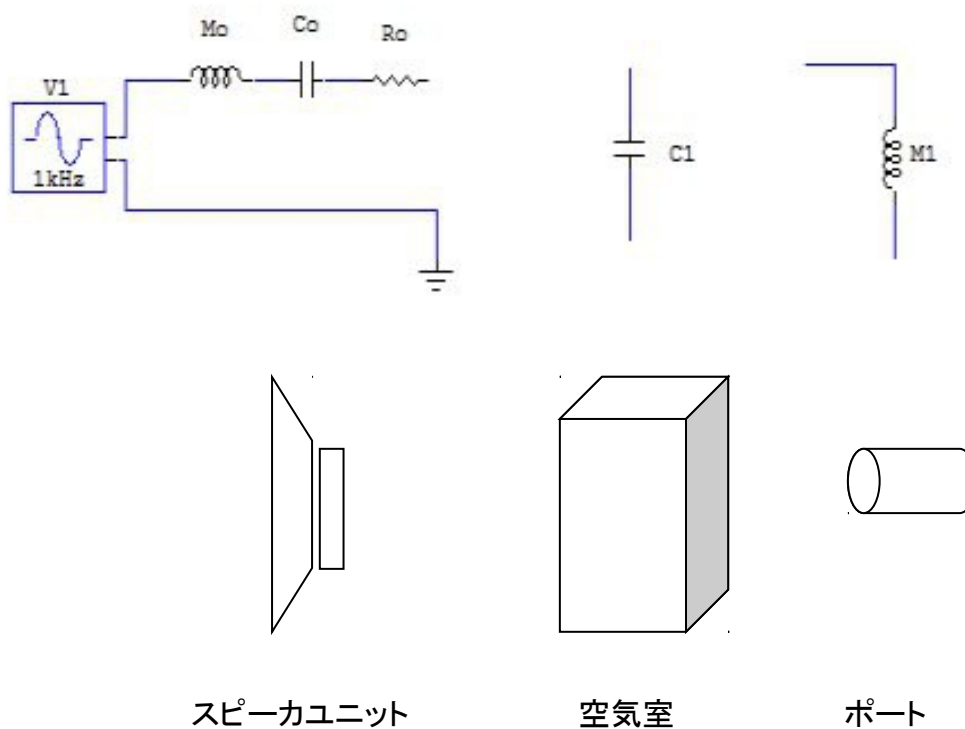
b) ポートが空間に突き出している場合 $L = 6r / \pi^2 \doteq 0.304D$

分だけ実際より長いものとして計算します。

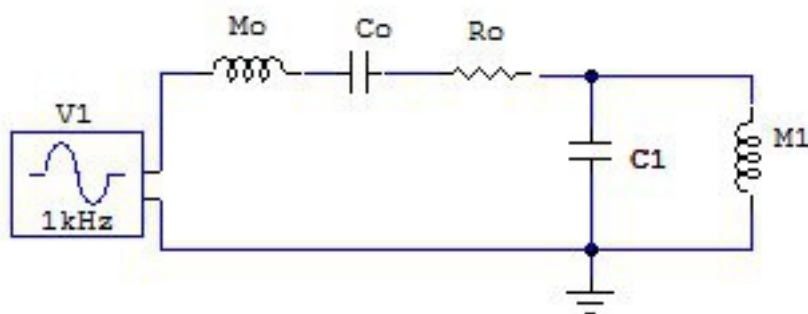
3. シミュレーションする

3. 1 等価回路図を作成する

置き替えた LCR をエンクロージャ構造図にしたがって接続します。

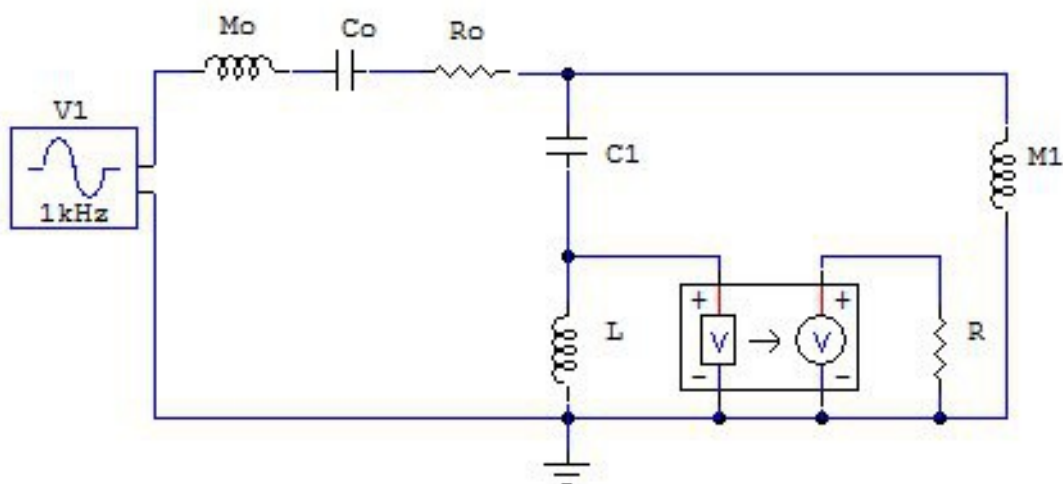


この場合この様な形になります。



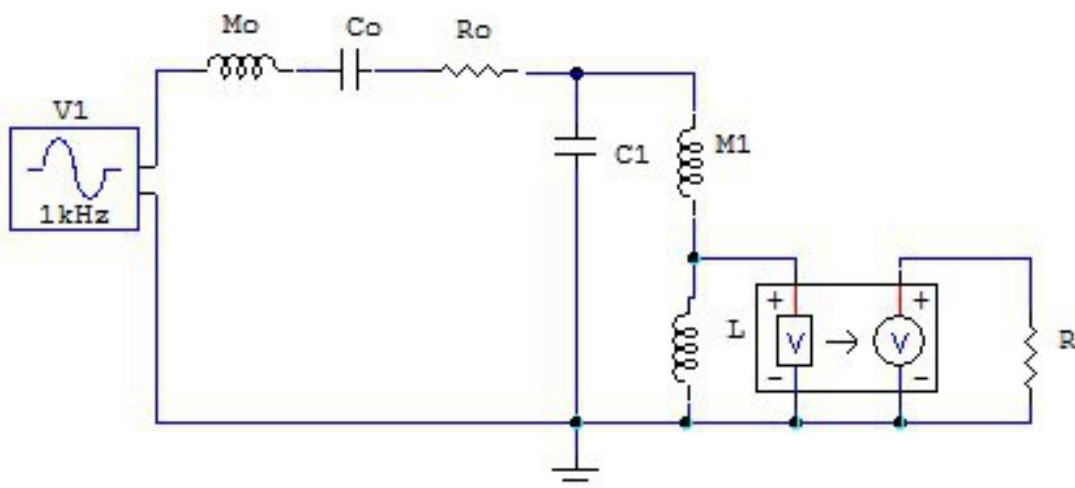
3. 2 音圧の計算

回路を流れるが空気速度を表すので、その微分値が音圧になります。シミュレーションではは直列にインダクタンスを入れその両端の電圧jを測定すれば微分となり、音圧に相当する電圧を読み取ることができます。



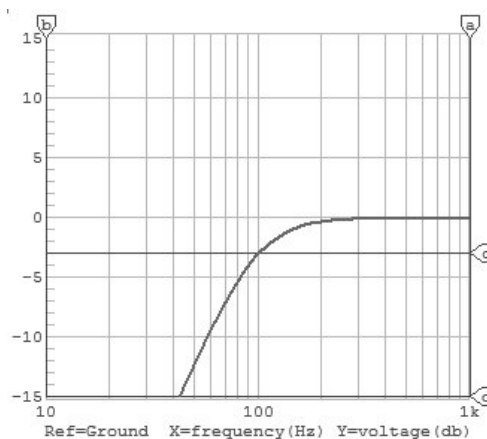
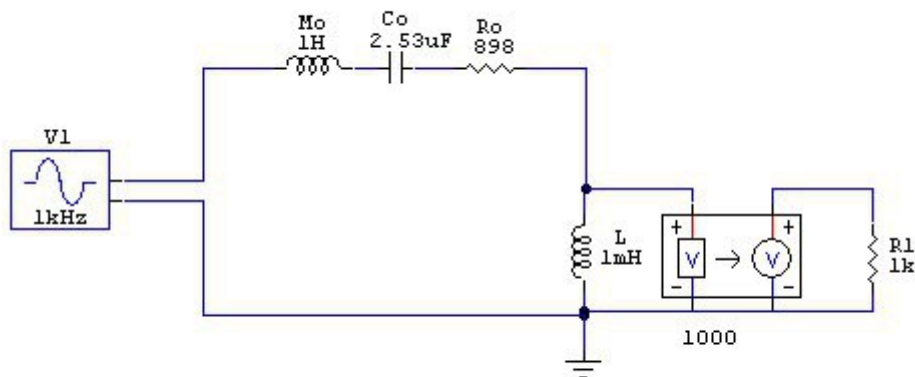
この時次の図の様に M1 を流れる電流だけを見ればポート出力が見られ、C1 と M1 の両方の合計電流を見ればユニット単体のみの出力音圧を見ることもできます。

ポート出力のみ見る場合は次のようになります。



4. 計算例

4. 1 無限大バッフルにユニットを付けた場合は
2. 1の例を使ってユニット単体の特性を見ると

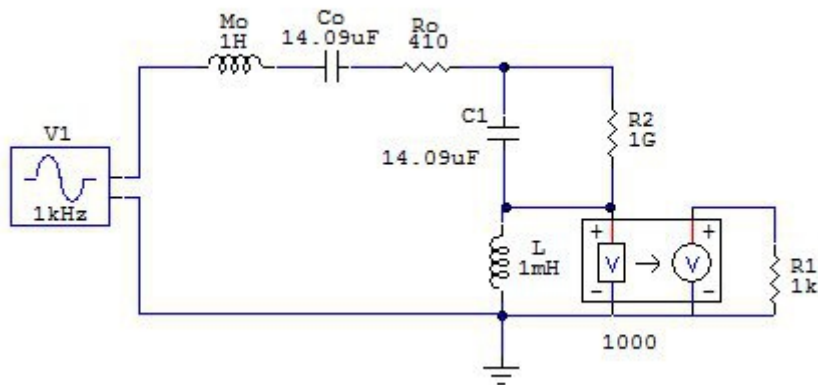


f_0 の100Hzで-3dBの1次減衰カーブになります。

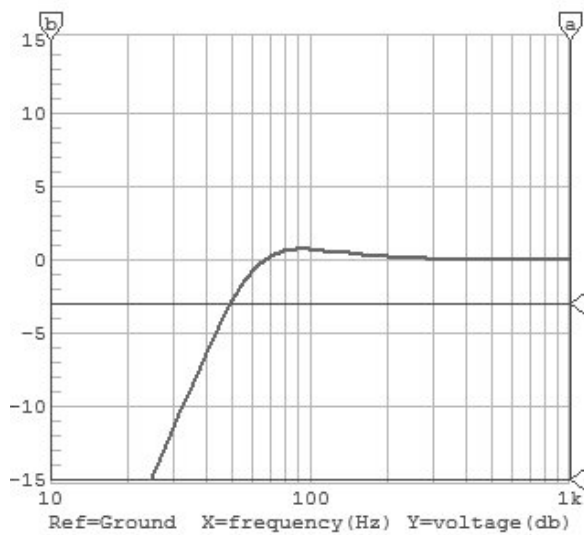
Lはユニットの特性に影響を与えない様に小さい値(1mH)とし電圧変換時に1000倍して0dBレベルの表示を合わせます。

4. 2 密閉型のエンクロージャに付けた場合

空気室 C1 ユニットに付き、このコンプライアンスがユニットのとシリーズになる(つまり空気室がスピーカのバネになる)ので、この時の等価回路は次の回路図のようになります。計算数値例 f_0 42.4Hz Q_{ts} 0.65 V_{as} 19.3L C 19.3L



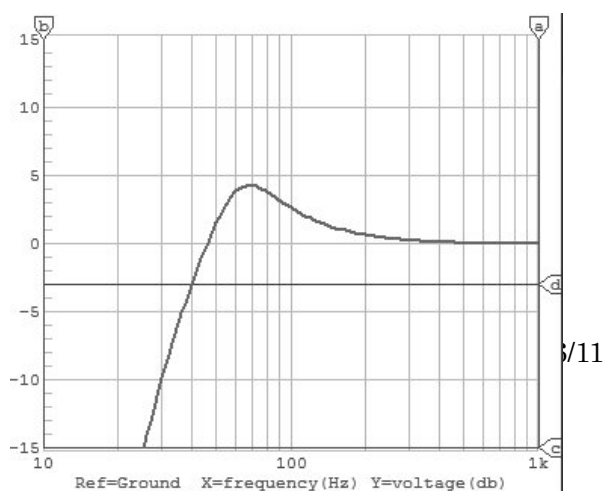
ここでR2はシミュレーションの収束を行うための手法で、結果にはほとんど影響がないので無視できます。エンクロージャでQが高くなるので少し盛り上がっています。

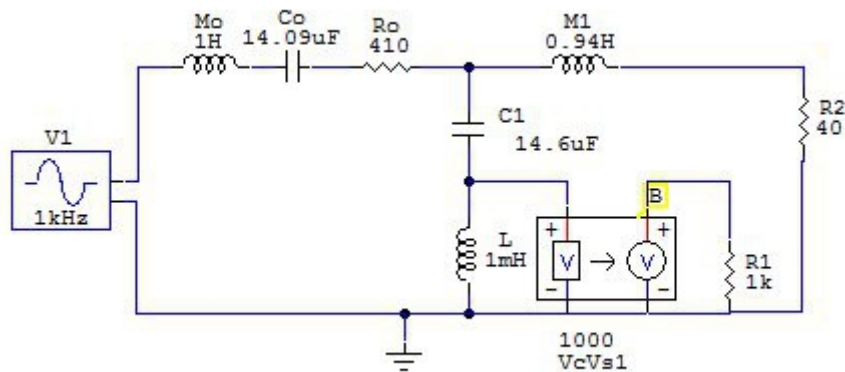


(CoとC1を直列合成した値にすればR2は必要なくなります。)

4.3 バスレフ型の場合は

空気室にポートが付くので密閉型にM1が加わります。



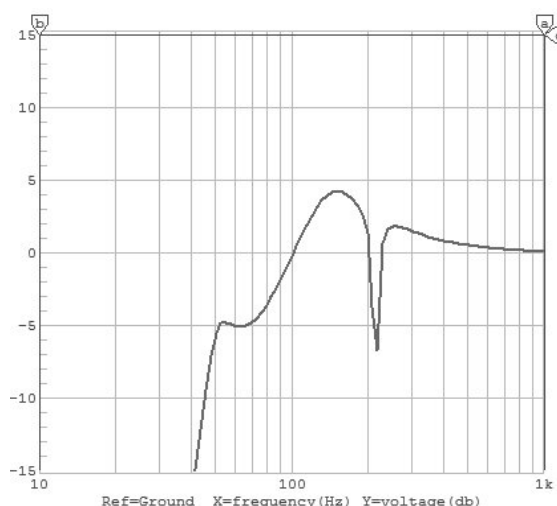
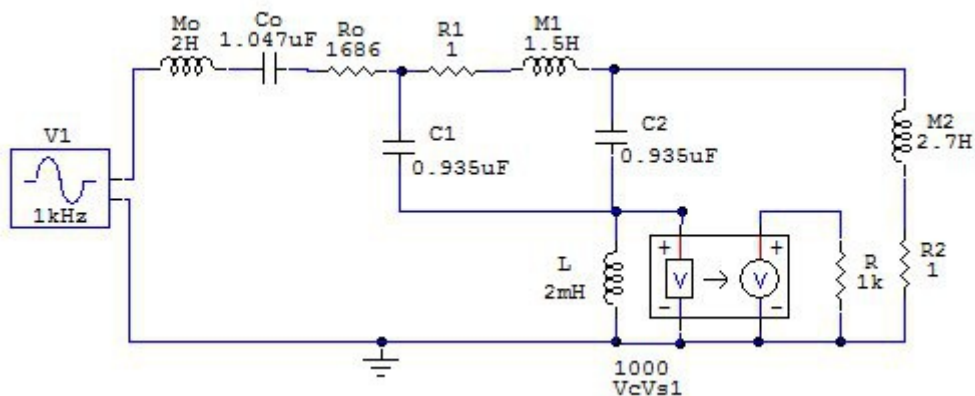


R2 はポートの粘性(もしくは絞り)を表し、共振の Q 値を決めますが、数値計算が難しいので、実際に合わせてカットアンドトライになるでしょう。

左の図は密閉型の例で共振周波数 43 Hz のポートを付けた場合です。
この例ではポート共振が少し高めで低音が持ち上がっています。

4. 4 ダブルバスレフの場合

前項のバスレフダクトに直列に更に空気室とダクトが付きますから、下の図の様に M1 の先に空気室とポートが付く形になります。



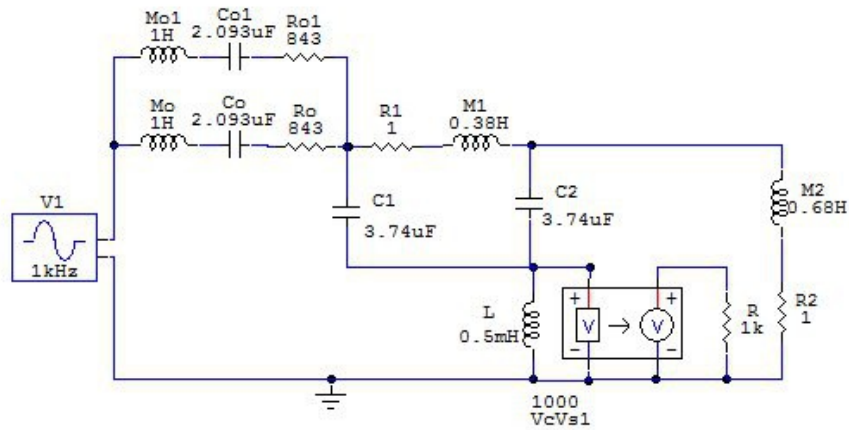
TangBand W3-881SI の計算例を上げておきます。

fo 110Hz Qts 0.82 Vas
2.8L ユニット 2 個使い
第 1 容積、第 2 容積とも 5 L

第1ポート径 3.8cm 長さ 1.2cm 第2ポート径 4cm 長さ 5cm

シミュレーション結果はこの様な感じになりました。

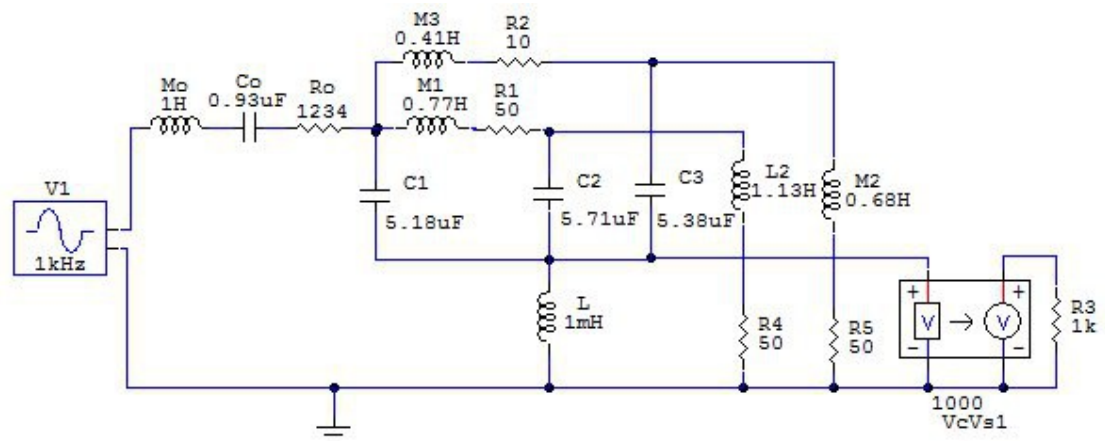
ダブルユニットは次の回路図の様に2つに分けても表記できます。



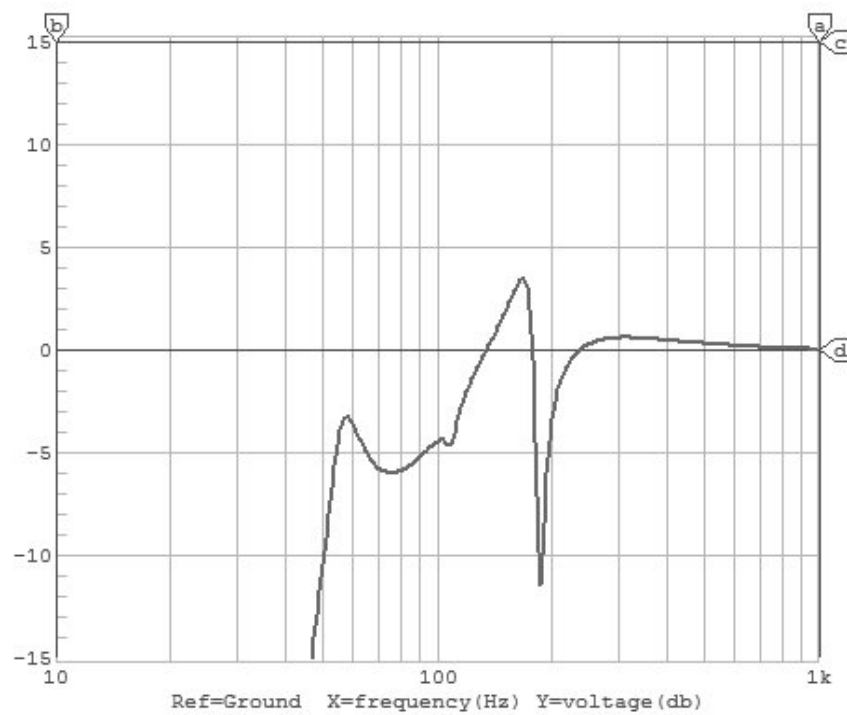
4. 5 MCAP の場合

MCAPのHome Page に紹介されている CON GIOIA を例にとって計算してみました。

ダブルバスレフが2つ並列に付く形なので下図の様な等価回路になります。

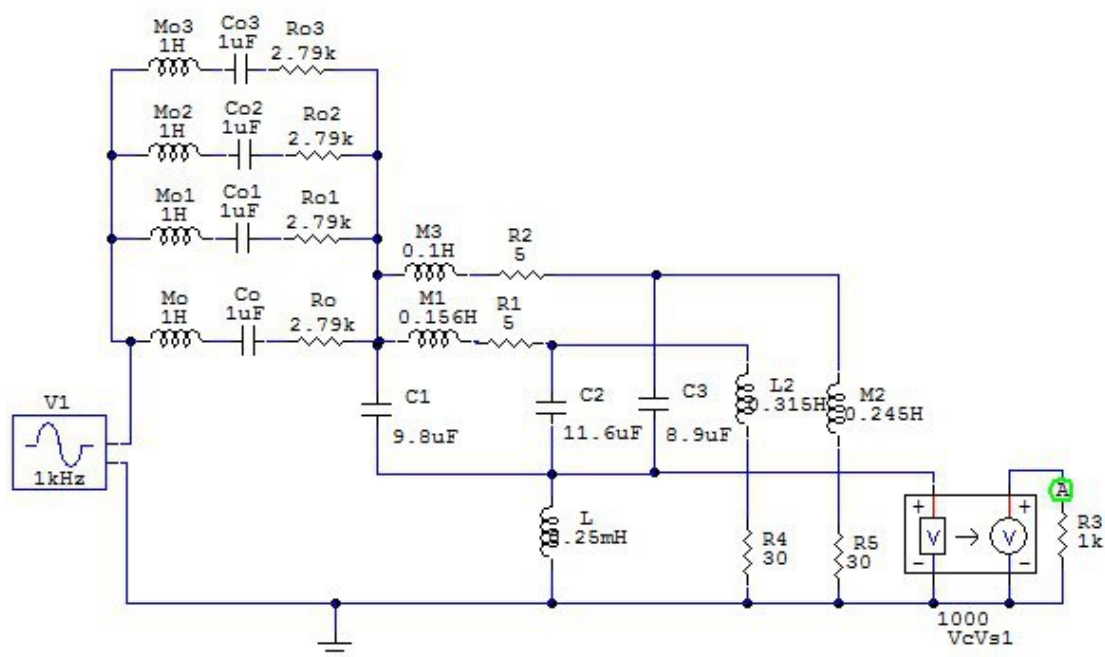


シミュレーション結果は

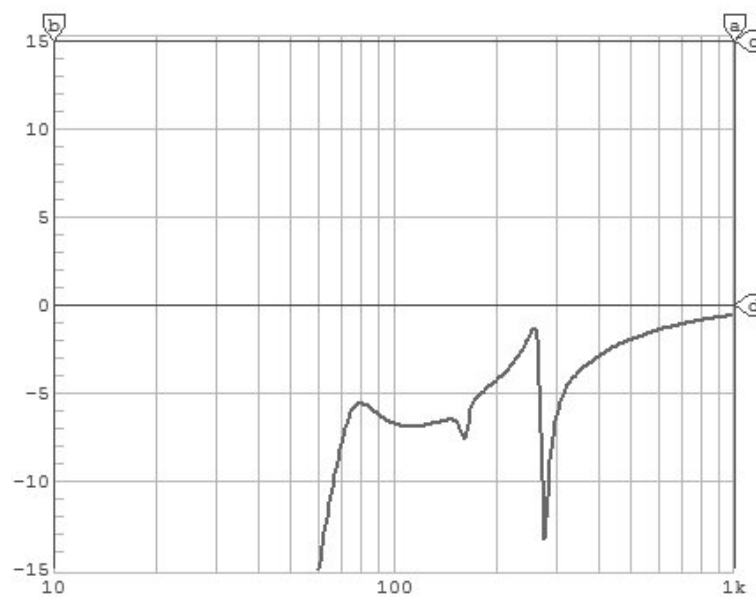


です。こちらはまだ検証ができていません。

もう1例です。同じく製作例のDU050x5a型です。



シミュレーション結果は下図のようになりました。

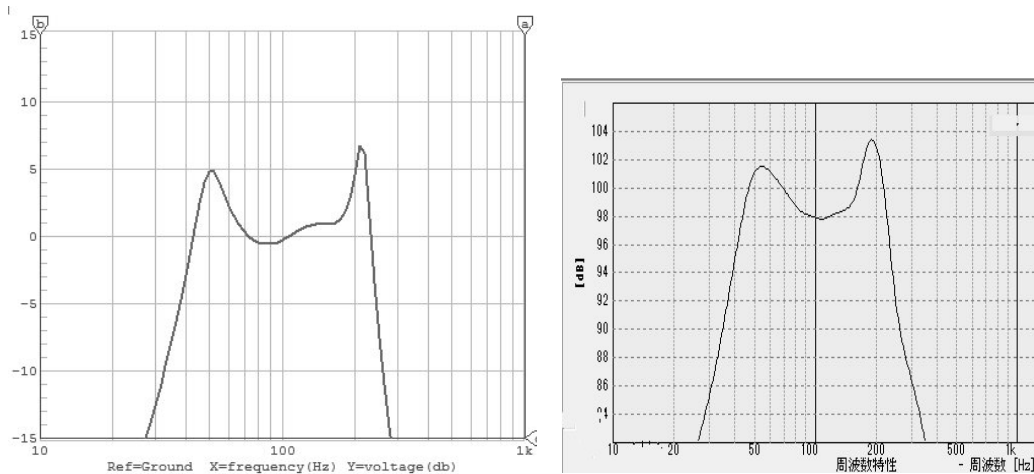


5. 検証

シミュレーションも実際と検証してみないと合っているかどうかは解りません。

しかし、特にスピーカの低音特性は測定環境の影響を受けやすいので、正確な測定が困難です。

そこで室内の影響を受けにくいポート出口直近(もしくはユニット直近)の特性を比較して見ます。



計算例のダブルバスレフにおいて第2ポート出力の例で、左がシミュレーション、右が実測値です。シミュレーションのポート粘性抵抗は仮想値で合うように入っていますが、共振周波数などは良く合っているようです。

まだ実測値との照合例が少ないですが、数値計算のかん違いが無ければ大体合いそうな感じです。

6. 補足

蛇足ですが、シミュレーションの結果はあくまで 2π 空間における結果です。実際の室内では様相が異なりますので、必ずしも 2π 空間でフラットが好ましいとはかぎりません。

使われる環境に合わせた最終目標を定めて、それに近づける設計が必要だと思います。

そう考えれば設計解は一つでなく製作者の使用目的に合わせて、目標とする最終特性ごとにこのようなシミュレーションを使えば最適な設計することができるようになるのではと思います。