

バスレフ等価回路とその動作

◇等価回路とTSパラメータ

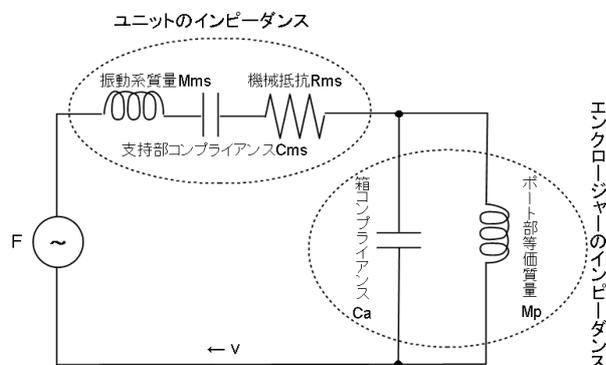
スピーカーは電気器機であり、アンプから送られてくる電力を消費するが、その特性は電氣的な要素だけでは完結しない。電気と磁石の力で振動という機械的な動きを発生するので、振動系の質量やステイフネス(バネ)などの負荷(機械系)も無視できない。さらに発生した振動が空气中に伝わる時にも負荷(音響系)が生じる。これらを総合的に考えて特性を求めていくことは複雑で大変なことである。そこで機械系・音響系の要素を電気回路のような形式で表した等価回路を使う。等価回路を使うことで、電気系の要素と合わせた特性を考慮することができるのである。等価回路を使ってスピーカーの特性を考える時、必要になるデータがTSパラメータである。TSパラメータはエンクロージャーの設計のために提唱された、スピーカーユニットのパラメータである。

◇バスレフの等価回路

多くのメーカー製品や自作で使われているバスレフ(位相反転型)について考察してみる。

次の図はバスレフシステムの等価回路である。

ボイスコイルに電流を流すとフレミングの法則により、力Fが発生する。等価回路は、このFにとって負荷になる要素を図にしたものと考えることができる。回路を流れる電流に対応するのが、振動速度vになる。



ユニットには、電氣的なインピーダンス(Re,Le)の他に機械的な負荷(インピーダンス)として働く部分があ

る。Rms,Mms,Cmsといった値がそれで、TSパラメータが詳しく記載されたデータシートで見つけることができる。(メーカーによっては違った表現がされている場合もある。) Rms[Ns/m]は振動系の機械抵抗(損失)、Mms[kg]はその質量、Cms[m/N]は支持部のコンプライアンス(サスペンション)である。これらが力Fに対して機械インピーダンスとして働く。

ユニットをマウントした箱も、力Fに対してインピーダンスとして働く。箱の容積によるコンプライアンスCaが負荷(インピーダンス)となり、さらにバスレフの場合は、ポートの等価質量MpがCaに対して並列に付加されることになる。

放射抵抗や付加質量、あるいは吸音材など負荷として働く要素が他にもあるが、ここでは省略する。電気インピーダンスもこの回路には含まれていない。

等価回路は、インピーダンスではなくアドミッタンス(インピーダンスの逆数)の形で表されていることもある。この場合は直並列が逆になるが、考え方は同じである。

磁石と電流によって振動を生み出すというスピーカーの仕組みはシンプルである。しかし、その構造に目を向けると、ユニットやエンクロージャーの動作はかなり複雑であり、本当はこのような単純な等価回路では表現しきれないが、細かな部分は省略して動作を確認していく。

◇ユニット部のインピーダンスを計算する

機械インピーダンスZmは、Rms、Mms、Cmsの和である。(等価回路参照)

$$Z_m = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}} \quad \dots \quad \omega = 2\pi f$$

電気インピーダンスZeは、コイルの直流抵抗Re[Ω]とインダクタンスLe[H]の和となる。(先の等価回路には含まれていない)

$$Z_e = R_e + j\omega L_e$$

ユニットの電気インピーダンスZeは、Leのために周

波数が高くなると上昇していくことになる。

ユニットのトータルのインピーダンスを考えるために、ボイスコイルに電流を流した時の様子を考察する。

磁束密度 B の中で長さ l のコイルに電流 I を流すと力 F が発生する。

$$F = BIl \quad \dots \textcircled{1}$$

$BI[TM]$ は力係数と呼ばれ、等価回路内で重要な働きをするパラメータである。

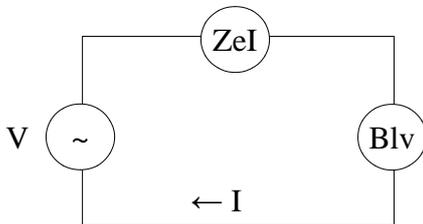
振動系を動かす力を F 、振動系の動く速さを v 、その動きを抑えようとするもの(機械インピーダンス)を Z_m とすると、

$$F = Z_m v \rightarrow v = \frac{F}{Z_m} \quad \leftarrow \textcircled{1} \text{を代入}$$

$$\rightarrow v = \frac{BIl}{Z_m} \quad \dots \textcircled{2}$$

$F = Z_m v$ は、電気回路の $E = ZI$ と形が同じであり、これが等価回路を使って計算していく上で大変有効となる。等価回路を眺めてみると、電圧の部分が力 F 、電流の部分が速度 v 、そして機械(音響)インピーダンスと、三者の関係が見て取れる。

インピーダンス Z_e をもつボイスコイルに電圧 V を加え、電流 I を流すと電圧降下 $Z_e I$ 及び、誘導起電力(逆起電力) Blv が発生する。



$$V = Z_e I + Blv \quad \leftarrow \textcircled{2} \text{を代入}$$

$$\rightarrow V = Z_e I + \frac{(Bl)^2}{Z_m} I \rightarrow V = \left(Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \right) I$$

ここで、 Z_e 、 Z_m は先ほど登場した電気インピーダンス及び機械インピーダンスであり、ユニットのトータルのイ

ンピーダンス Z は、次の式で表される。

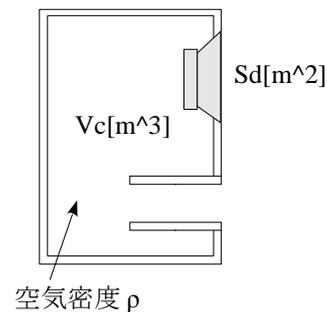
$$Z = \frac{V}{I} = Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \quad \dots \textcircled{3}$$

この式を見ると電気インピーダンス Z_e と機械インピーダンス Z_m が力係数 Bl を介して結合できていることが分かる。等価回路を使うことで、異なったインピーダンスを一つの式の中で扱えるようになるのである。

◇エンクロージャー部のインピーダンスを計算する

エンクロージャー(箱)のコンプライアンス Ca は、エンクロージャーの容積を $V_c[m^3]$ 、空気の密度を $\rho[kg/m^3]$ 、音速を $c[m/s]$ 、ユニットの実行振動面積を $S_d[m^2]$ とすると、次の式になる。

$$Ca = \frac{V_c}{\rho c^2 S_d^2} \quad \dots \textcircled{4}$$

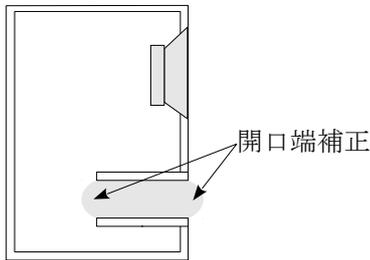


コンプライアンス Ca は実行振動面積 S_d の2乗に反比例する。ユニットの口径によって大きく変化することを意味しており、振動板が大きなユニットの方が空気を押す力が大きく、箱内の空気によって強い力を受けることになる。同じ容積の箱に違うサイズの口径をもつユニットをマウントした場合、大きな変化を伴うことになる。

バスレフのポート内の空気質量 M_p は、空気の密度とその体積の積で求められる。ポートの長さを $l[m]$ 、面積を $S_p[m^2]$ とすると、

$$M_p = \rho l S_p$$

であるが、開口端部分では、ポート外の空気も関わってくる。よってここで加わる空気質量を考慮する必要がある。これを開口端補正という。



ポートの直径を $D[m]$ とすると M_p は、次式となる。

$$M_p = \rho S p (\ell + 0.73D)$$

0.73D が開口端補正である。0.73D はポートの両端での影響を考慮したものであるが、内側(箱内)の開口端については考慮しなくてもよいとする考えもある。また、0.6D と書かれている場合も多い。

最後にコンプライアンス C_a に加算するために、ユニットの実行振動面積とポートの面積の比の2乗をかける。

$$M_p = \rho S p (\ell + 0.73D) \frac{S_d^2}{S_p^2} \quad \dots \textcircled{5}$$

約分してみると M_p はポート長 ℓ に比例し、面積 S_p に反比例ということになる。つまりポートを長くしても面積を大きくすると M_p は増えない。 M_p を増やす(共振周波数を下げる)にはポートを長くするか、面積を小さくする必要がある。

エンクロージャのインピーダンス Z_a は、これら (C_a, M_p) を加算して求める。並列であるから次式となる。

$$Z_a = \frac{1}{\frac{1}{j\omega M_p} + j\omega C_a} \quad \dots \textcircled{6}$$

ここで④、⑤式を S_d^2 でくくると、

$$C_a = \frac{1}{S_d^2} \frac{V_c}{\rho c^2} = \frac{1}{S_d^2} C_a'$$

$$M_p = S_d^2 \left(\rho S p (\ell + 0.73D) \frac{1}{S_p^2} \right) = S_d^2 M_p'$$

⑥式を上式の2式を使って書き換えると、

$$Z_a = \frac{S_d^2}{\frac{1}{j\omega M_p'} + j\omega C_a'}$$

力係数 Bl と同様、ここでは実行振動面積 S_d が機械インピーダンスと音響インピーダンスを結合する鍵となる。

◇トータルのインピーダンスを計算する

Z_a をユニットの機械インピーダンス Z_m に加算すると機械系と音響系を合わせたインピーダンス Z_m' となる。

$$Z_m' = Z_m + Z_a$$

この Z_m' を、③式の Z_m のところに代入して計算するとユニット部とエンクロージャ部を合わせたインピーダンス Z を求めることができる。

$$Z = Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m'}$$

Z の絶対値を求め、横軸に周波数 f をとってプロットすればインピーダンス特性が得られる。

◇音圧特性を計算する

入力電圧 $V(2.83[V])$ を加えた時の力 F を求める。

$$F = BlI \rightarrow F = Bl \frac{V}{Z} \rightarrow F = Bl \frac{2.83}{Z}$$

入力電圧 $2.83[V]$ というのは、 $8[\Omega]$ で $1[W]$ 相当の電圧ということになる。

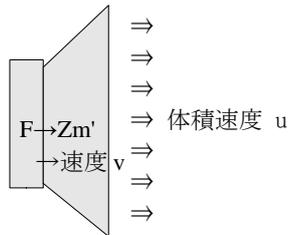
力 F を先ほどのインピーダンス Z_m' で割ると振動板の速度 v が求められる。

$$v = \frac{F}{Zm'}$$

これが見かけ上、等価回路で全体(ユニット部)を流れる電流のような働きとなる。

さらに、速度 v に実行振動面積 Sd をかけるとユニット部の体積速度 u が求められる。

$$u = vSd$$



振動する速度と面積の積である u は、空気を動かすエネルギーの量そのものであり、この数値が大きい方が強い音圧を得られることになる。つまり、振動の速度(周波数)が同じであれば、大きな振動板の方が、強い音圧を得られる。逆に振動板の面積が同じであれば、周波数が高い方が強い音圧となる。

体積速度から音圧特性のグラフを描くための数値 $mag[dB]$ を得るには次式で計算する。ここで、 $f[Hz]$ は周波数、 $po[Pa]$ は人の耳に聞こえる最小の音の強さ (dB SPL 換算)。 u は絶対値として計算する。

$$mag = 20 \log \left(\frac{\rho f |u|}{po} \right) \dots \textcircled{7}$$

次にポート部の音圧を計算してみる。等価回路から速度 v がポート部へ分流する量 vp を求める。ただし、ポートの空気の動きは振動板とは位相が逆なのでマイナスをつけて計算する。また、面積が変わることによる変換のため面積比を掛けてある。

$$vp = -v \frac{\frac{1}{j\omega Ca}}{j\omega Mp + \frac{1}{j\omega Ca}} \frac{Sd}{Sp}$$

さらに振動板の時と同様、面積を掛けてポートの体積速度 up を計算し、上記⑦式の u の部分に代入して計算すれば、ポート部の音圧が得られる。

$$up = vpSp$$

ユニット部の体積速度 u とポート部へ分流する量 up を複素加算したものを、再び⑦式の u の部分に代入し計算すれば、バスレフのトータルの音圧が得られる。

これら求めた数値 mag を縦軸にとり、横軸に周波数 f をとってプロットすれば音圧特性が得られる。

◇その他 TS パラメータを使った例

以上のように、等価回路から周波数特性をシミュレーションできるが、 Ts パラメータを使うことで、他にも設計に必要な数値を計算することができる。

バスレフの容積 $Vb[l]$ 、ポートの共振周波数 $Fb[Hz]$ は、 Qts (トータルの Q)、 Vas (等価換算容積)、 Fs (最低共振周波数) を使って次式で求められる。

$$Vb = 20 \times Qts^{3.3} \times Vas$$

$$Fb = \left(\frac{Vas}{Vb} \right)^{0.31} \times Fs$$

これらの数値を使うと、ユニットに適した(フラット)低域特性を引き出すことができる。ただし、いろいろなユニットで試してみると、きれいな特性になることもあるが、そうでないこともある。また、ユニットや環境、あるいは使う人によって、低域がフラットになっていることが必ずしも最適とはいえず、試行錯誤が必要になる。

3[dB]落ちとなる $F3[Hz]$ は、次式で求められる。

$$F3 = \left(\frac{Vas}{Vb} \right)^{0.44} \times Fs$$

これらの式は国内ではあまり紹介されていないが、海外のサイトではよく見かける。エンクロージャー設計支援ソフト $Sped$ の中では、フラットな特性を求めるときに Vb と Fb の式を使って計算している。

◇参考

$c=343[\text{m/s}]$ ・・・音速

$\rho=1.205[\text{kg/m}^3]$ ・・・空気密度

$p_0=0.00002[\text{Pa}]$ ・・・人の耳に聞こえる最小の音の強さ

◇参考文献(Web サイト)

・ラジオ技術(アイエー出版)

・オーディオの科学

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/Audio.htm>

・ISHIBASHI PRESENTS

http://www.ishibashi.co.jp/academic/super_manual3/main.htm

・Katsura のスピーカー設計

<http://www.asahi-net.or.jp/~wz9k-itu/>