

TSパラメータ

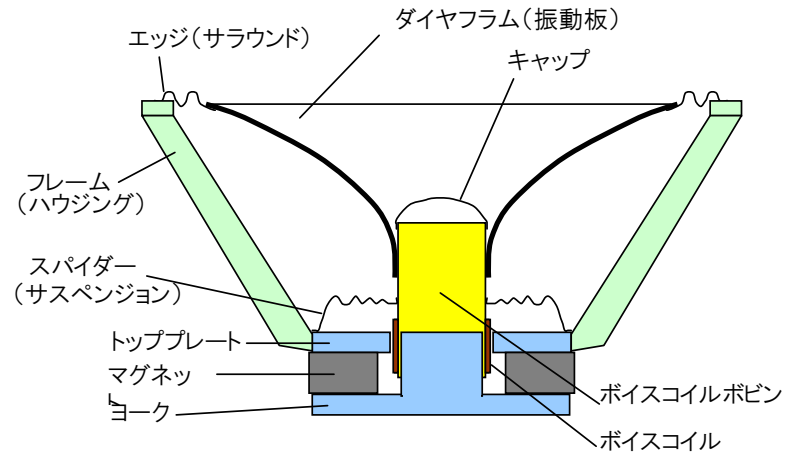
ダイナミック・スピーカの構造と構成部品名称および解析用TSパラメータについて

多くのダイナミック型スピーカは下図のような部品から構成されている。
 動作原理は、フレミングの左手の法則による。(後述)
 固有の特性を与えるパラメータには以下のものがあり、キャビネットの設計には不可欠となる。

TSパラメータ(Thiele/Small parameter)

例 (Mark Audioのフルレンジスピーカユニット:Alpair6Pの場合)

ボイスコイルDC抵抗値	R_{evc}	3.8 (Ω Ohm)
等価インピーダンス	Z_e	5.8 (Ω Ohm)
最低共振周波数	F_0	74.308 (Hz)
振動板面積	S_d	36.32 (cm^2)
振動系相当容量	V_{as}	3.696 (Ltr)
機械系コンプライアンス	C_{ms}	1.973 (m/N)
振動板質量	M_{md}	2.199 (g)
振動系等価質量	M_{ms}	2.325 (g)
駆動力係数	BL	2.679 (T·M)
機械抵抗	R_{ms}	0.32623
機械Qファクタ	Q_{ms}	1.783
電気Qファクタ	Q_{es}	0.575
総合Qファクタ	Q_{ts}	0.435
ボイスコイルのインダクタンス	L_{evc}	6.939 (μH) at 1kHz
基準能率	η_0	0.255 (%)
平均音圧	SPL ₀	86.65 (dB)
耐入力(最大入力)	Power	15 (watts Nom)
最大リニア動作可能域	X_{-max}	3.3 mm (1 way)



R_{evc} (R_e : ボイスコイルDCR)

ボイスコイルの直流抵抗値。単位は Ω (ohm)。

F_s (振動系最低共振周波数)

f_0 (エフゼロ)とも呼ばれ、単位はHz。

振動系の最低共振周波数のこと。

この周波数において振動系の速度(単位時間当たりの振幅)が最大となる。

コンプライアンス C_{ms} が大きい(振動系の保持が柔らかい)ほど、

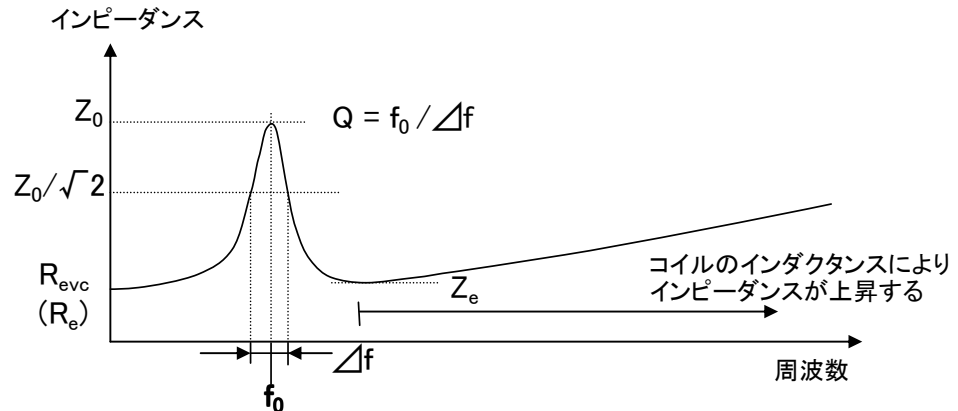
あるいは振動系の等価質量 M_{ms} が大きいほど、共振周波数 F_s は低くなる。

スペックに対するばらつきは $\pm 10\%$ 程度。

$$f_0 = (1/2\pi) \{1/(C_{ms} \cdot M_{ms})\}^{1/2} \quad \dots(1-1)$$

$$\therefore \omega_0 = 2\pi f_0 = \{1/(C_{ms} \cdot M_{ms})\}^{1/2} \quad \dots(1-2)$$

$$\omega_0^2 = 1/(C_{ms} \cdot M_{ms})$$



S_d(振動系有効投影面積)

コーンやダイヤフラムの有効投影面積で、単位はm²(便宜上cm²とする時には単位を明記)。
振動板の形状やエッジの特性に大きく依存する。
一般的には、振動板の直径にエッジ幅の1/3~1/2を加えた領域の面積をS_dとみなす。
フレームの直径が同じユニットを比べると、波形エッジよりも、幅広のロール(半円状)エッジの
ほうが著しくS_dは小さくなる。(右図参照)

V_{as}(振動系相当気柱容量)

平面バッフルにユニットを装着(後方を密閉しない状態)にして測定した振動系のスティフネス
(動きにくさ)に相当する気柱容量。単位はm³。(リットルで表示もあり)
S_dと同じ面積を持つ気柱ピストンを想定し、ユニットの振動系によるスティフネス(コンプライアンスの逆数)
をこの体積で表す。
つまり気柱ピストンによるスティフネスが、ユニットの振動系によるスティフネスと等価になる
気柱体積ということになる。
値が大きくなるほどスティフネスは小さく(保持系が柔らかく)なり、より大きなエンクロージャーが
必要になる。
ここでV_{as}はS_d²に比例する。V_{as}のスペックに対するばらつきは、±20~30%程度。

$$V_{as} = \rho_0 \cdot v^2 \cdot S_d^2 \cdot C_{ms} \quad \dots(2)$$

ρ₀ : 空気密度 1.184 kg/m³ at 25°C
v : 音速 346.1 m/s at 25°C

SI単位系を使った場合、計算結果は「m³」になります。V_{as}をリットルで得るには、計算結果を1000倍します。

C_{ms}(振動系機械コンプライアンス)

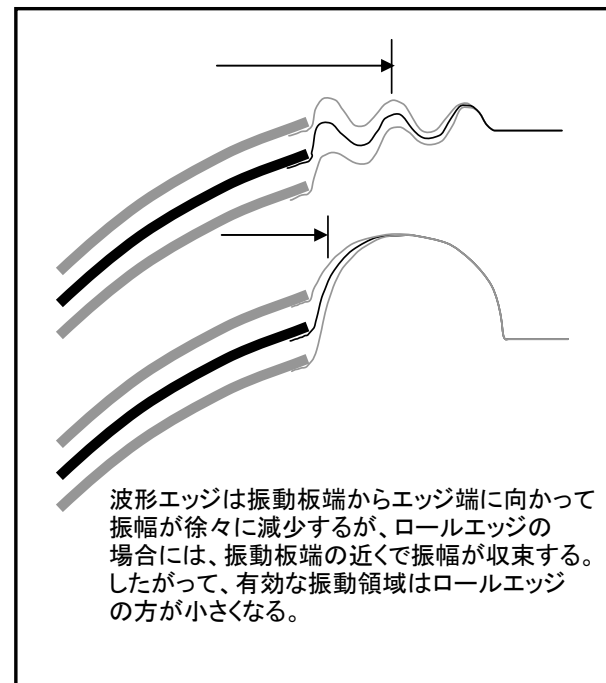
振動系を保持する部分の機械コンプライアンス(スティフネスの逆数)。単位はm/N。
単位から分かるように、一定の力を与えたときにどれだけ移動するかを表わす。
コンプライアンスが大きい(動きやすい)ほどスティフネスは小さくなり、V_{as}は大きくなる。
C_{ms} ∝ 1/V_{as}

M_{md}(振動板質量)

振動板とボイスコイルの質量。単位はg、またはkg。(SI単位系ではkgだが、扱いにくいのでgで表示することが多い)

M_{ms}(振動系可動部等価質量)

可動部の等価質量。単位はg、またはkg。
振動板、ボイスコイル&ボビン、キャップ、およびダンパーやエッジの一部からなる可動部品のトータル質量に、
さらに振動系が動く事により、一緒に動かされる空気による音響負荷相当質量を含めたもの。



TSパラメータ

BL (BI) (駆動力係数)

ボイスコイルギャップにおける磁場の強さと、磁場内にある巻線の長さの積。単位はT・m。駆動力係数と呼ばれる。

$$l = 2\pi r_s \cdot N \quad r_s: \text{平均巻き線半径} \quad N: \text{巻き数(ターン数)}$$

フレミングの左手の法則に従い、均一磁界の中で長さの電線に電流が流れると力が生じ、

$$F = BI \cdot \sin\theta \quad \theta: \text{磁力線と電流の交角}$$

ここで磁界と電流は直交しているので $\theta = 90^\circ$

$$\therefore F = BI \cdot l$$

の力がボイスコイルに生成する。

同時に、電流が変化しない場合 ($\angle l = 0$) には、逆起電力による電磁制動がかかる。

$$F \propto Blv \quad (v: VC \text{の両端に誘起する逆起電力})$$

磁気回路が強力(Bが大きい)であれば、電磁制動も強力となり、電氣的過渡応答性 ($1/Q_{es}$) が大きくなる。

$\angle l \rightarrow 0$ の場合の収束性が良いと言う事で過渡応答性が向上する。

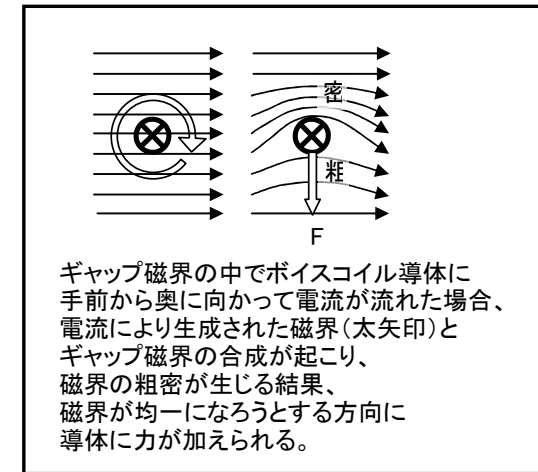
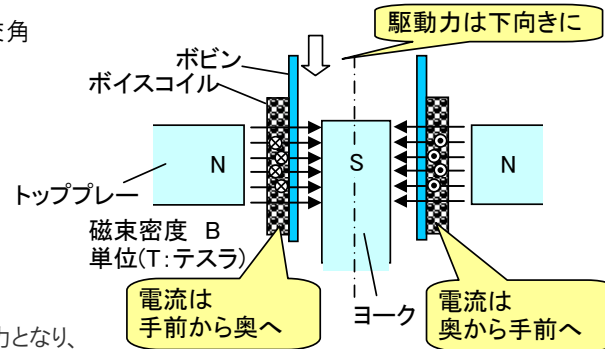
したがって、BLは電気系共振先鋭度 Q_{es} に大きな影響力を持つ。

BLが一定の領域(磁気ギャップ)の中にボイスコイルがあれば、

駆動力 $F \propto \text{電流}l$

即ち、電流と駆動力 & 制動力はリニアとなる。(Q_{es} もリニア)

⇒ 関連項目 1: 駆動に伴う非線形歪を参照



TSパラメータ

Q_{ms} (機械的共振先鋭度)

F_s における機械的共振先鋭度。無単位数。

振動系の支持構造であるエッジやダンパーの F_s における振動しやすさ。

電気系を排除するため、ボイスコイルは開放状態として測定する。

この値が大きいうことは F_s で動きやすいということで、逆に言えば抑えが効きにくいという事。

振動系の支持構造であるエッジやダンパーの損失(駆動エネルギーが熱エネルギーに変換される)を機械抵抗 R_{ms} と置くと、 $\pm X_{max}$ 以内が機械的リニア領域となり、

$$Q_{ms} = \omega_0 M_{ms} / R_{ms} = 2\pi f_0 M_{ms} / R_{ms} \quad \dots(3-1)$$

機械系インピーダンスの関係式は、

$$F = M_{ms} \cdot dv/dt + (1/C_{ms}) \cdot \int v dt + R_{ms} \cdot v$$

電気系に変換した場合、 F は電圧、質量はインダクタンス、 v は電流、コンプライアンスはキャパシタンス、熱損失(摩擦・機械抵抗)は抵抗になり、

$$V = L_s \cdot di/dt + (1/C_s) \cdot \int i dt + R_s \cdot i$$

ここで、並列接続となるため、

$$\text{電流は、 } i = V / \{ R_s + j\omega L_s + 1 / (j\omega C_s) \} = \omega C_s V / \{ -\omega C_s R_s + j(1 - \omega^2 L_s C_s) \}$$

$$\text{ゆえに } |i| = \omega C_s V / \{ (\omega C_s R_s)^2 + (1 - \omega^2 L_s C_s)^2 \}^{1/2}$$

これは $\omega_0 = 1/\sqrt{L_s \cdot C_s}$ でピークを持ち、そのときの値は

$$|i_0| = V/R_s$$

ω_1 と ω_2 では $|i|$ が $|i_0|$ の $1/\sqrt{2}$ になるので、 ω_1 と ω_2 は以下の方程式の解となります。

$$\omega C_s V / \{ (\omega C_s R_s)^2 + (1 - \omega^2 L_s C_s)^2 \} = (1/\sqrt{2}) \cdot (V/R_s)$$

この両辺を2乗して整理すれば、以下のように ω に関する2次方程式になる。

$$L_s C_s \omega^2 \pm C_s R_s \omega - 1 = 0$$

$$\therefore \omega = \{ \pm R \pm \sqrt{R^2 + 4L_s/C_s} \} / (2L_s) \quad [\text{複号任意}]$$

$\omega > 0$ より

$$\omega = \{ \pm R + \sqrt{R^2 + 4L_s/C_s} \} / (2L_s)$$

$\omega_1 < \omega_2$ とすると

$$\omega_1 = \{ -R + \sqrt{R^2 + 4L_s/C_s} \} / (2L_s)$$

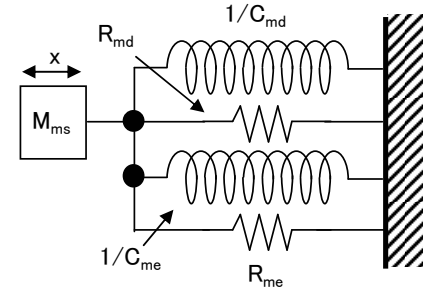
$$\omega_2 = \{ R + \sqrt{R^2 + 4L_s/C_s} \} / (2L_s)$$

従って

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1 = R_s / L_s$$

$$Q = \omega_0 / \Delta \omega = \omega_0 \cdot L_s / R_s = 2\pi f_0 \cdot L_s / R_s$$

この式は、電気系に変換した(3-1)式と同じとなる。



TSパラメータ

ちなみに電気系で並列となる場合には、

$$\begin{aligned} Z &= V/I = 1/\{ 1/R + 1/(j\omega L) + j\omega C \} \\ &= \omega LR / \{ -\omega L + j(1 - \omega^2 LC)R \} \\ \Delta\omega &= \omega_2 - \omega_1 = 1/(CR) \\ Q &= \omega_0 / \Delta\omega = \omega_0 CR \end{aligned}$$

Q_{es} (電気的共振先鋭度)

F_s における電気的共振先鋭度。無単位数。BL(BI)との因果関係が大きい。
負荷対象のボイスコイルに対し、駆動側が理想電流源(インピーダンス $\cong 0$)として求めている。

$$Q_{es} = \omega_0 M_{ms} R_e / (BI)^2 = 2\pi f_0 M_{ms} R_e / (BI)^2 \quad \dots(3-2)$$

この式からも分かるように、磁気回路が強力であれば電気系のダンピングが十分に期待でき、過渡特性も良好となる。
ただし、微小変位ではこの式が成り立つが、振幅が大きくなると非線形となり、あくまで目安でしかない。

Q_{ts} (総合共振先鋭度)

F_s における総合共振先鋭度(ダンピングファクタの逆数)。無単位数。 F_s での振動しやすさと考えれば良い。
与えられた電気エネルギーがどれだけ共振に寄与するかの変換効率とも考えられる。
電気系と機械系が並列に接続されていると見做せるため、

$$Q_{ts} = (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \quad \dots(3-3)$$

$L_{evc}(L_e)$ ボイスコイル・インダクタンス

ボイスコイルのインダクタンス成分。単位は μH 。
ボイスコイルのインピーダンスは、キャパシタンス成分が十分小さいので、

$$Z = R_{svc} + [(\omega L_e)^2 - \{1/(\omega C_{es})\}^2]^{1/2} \cong R_{svc} + \omega L_e = R_{svc} + 2\pi f_0 L_e \quad \dots(4)$$

R_{svc} の項で示したインピーダンスのグラフで、共振周波数以上では周波数上昇に伴い緩やかに上昇しているのは、このインダクタンスの影響である。
インダクタンスなど受動素子の値は、通常1kHzにて規定する。

TSパラメータ

η_0 (標準能率)

を表わす。単位は%。

基準入力または許容入力におけるユニットの能率を%で表したものの。

$$\eta_0 = \{ \rho_0 (BI)^2 S_d^2 \} / (2 \pi \nu M_{ms}^2 \cdot R_e) \quad \times 100 (\%) \quad \dots(5-1)$$

ここで $\rho_0 / 2 \pi \nu = 5.445 \times 10^{-4}$ (m²·s/kg) at 25°C/50%mois より

$$\eta_0 = 5.445 \times 10^{-4} \times \{ (BI)^2 S_d^2 \} / (M_{ms}^2 \cdot R_e)$$

また、

$$2 \pi f_0 / Q_{es} = (BI)^2 / (M_{ms} \cdot R_e) \quad V_{as} / (\nu^2 \cdot C_{ms}) = \rho_0 \cdot S_d^2$$

を代入して

$$\eta_0 = V_{as} \cdot f_0 / (\nu^3 \cdot M_{ms} \cdot Q_{es} \cdot C_{ms})$$

また(1-2)式より

$$(2 \pi f_0)^2 = 1 / (C_{ms} \cdot M_{ms})$$

$$\therefore \eta_0 = (2 \pi f_0)^2 f_0 \cdot V_{as} / (\nu^3 \cdot Q_{es}) = (4 \pi^2 / \nu^3) \cdot f_0^3 \cdot V_{as} / Q_{es} \quad \times 100 (\%) \quad \dots(5-2)$$

$$4 \pi^2 / c^3 = 9.253 \times 10^{-7} (\text{s}^3/\text{m}^3) \quad \text{at } 25^\circ\text{C}/25\%\text{mois}$$

$$4 \pi^2 / c^3 = 9.438 \times 10^{-7} (\text{s}^3/\text{m}^3) \quad \text{at } 25^\circ\text{C}/50\%\text{mois}$$

湿度により音速が変わる。