

密閉型スピーカシステムの低音域特性について

大島 静夫

Frequency Response of the Closed Box Loudspeaker System
at Low Frequencies

Shizuo Ohshima
(昭和54年10月31日受理)

Loudspeakers of conventional design may have nearly flat response in anechoic test chambers, but will have very uneven frequency response when placed in a room.

For an approach to this problem on the closed box loudspeaker system, we use the 2 layer's voice coil which is divided into two sections. The upper layer is used for the input coil, and lower one for the control coil in order to control frequency response.

Some interesting results of the closed box loudspeaker system are apparent from the experiment as shown in Fig. 4.

First, in the case that R is connected to the control coil, the value of Q ranges from 0.76 to 0.34. Second, when C is combined to the control coil, the value of Q ranges from 0.82 to 0.24, and ω from 56 to 48 (H_z).

As the results, we can make it possible to realize flat frequency response as shown in Fig. 6.

1. ま え が き

密閉型スピーカシステムは、今日広く使用されているスピーカシステムの一方式である。しかし完成されたスピーカシステムにおいて、簡単に低音域特性を制御する方法は見当らない。スピーカシステムの低音域特性が設置状態により変動することを考えた場合、簡便に低音域特性を制御し得ることが望ましい。

低音域特性の制御が可能な方式としては、MFB方式スピーカシステム⁽¹⁾があり、歪率も改善される等非常に秀れているが、増巾器が別途必要であるため一般的とは言いがたい。

簡便な低音域特性制御の一方式として、図・1に示すような二層巻ボイスコイルを用い、上層を制御用コイル、下層を振動板駆動用コイルとし、制御用コイルにR, C, Lを接続する方法を解析し、それを実験により検討した。

その結果、制御用コイルにR, Cを接続することにより、約5 dBの範囲で制御が可能であることがわかった。まだ計算結果よりLも同様な効果を持つことが予想される。

2. 本方式による密閉型スピーカシステムの解析

2・1 スピーカ構造と等価回路

図・1にボイスコイルの断面図を示す。スピーカはコーラル(株)FLAT-8 (20cmコーン型スピーカ)を用い、図のように2分割し、上層を制御用ボイスコイル、下層を振動板駆動用コイルとして実験した。2分割することにより更に2本の引出線が必要となるが、引出線は磁気回路のギャップに接触しないように引出し、アレットにより振動板に接着固定した。

本システムの電気-機械-音響系の等価回路^{(2), (5)}を図・2に示す。等価回路の作成にあたり駆動用ボイスコイル、制御用ボイスコイルの力係数が等しいとき駆動部を除き回路が対称的になる点に留意した。回路の諸定数は以下の通りである。

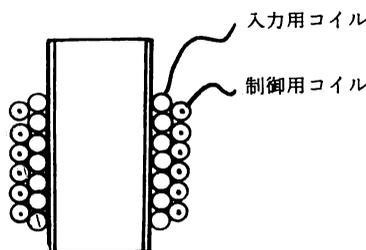


図1 ボイスコイル断面図

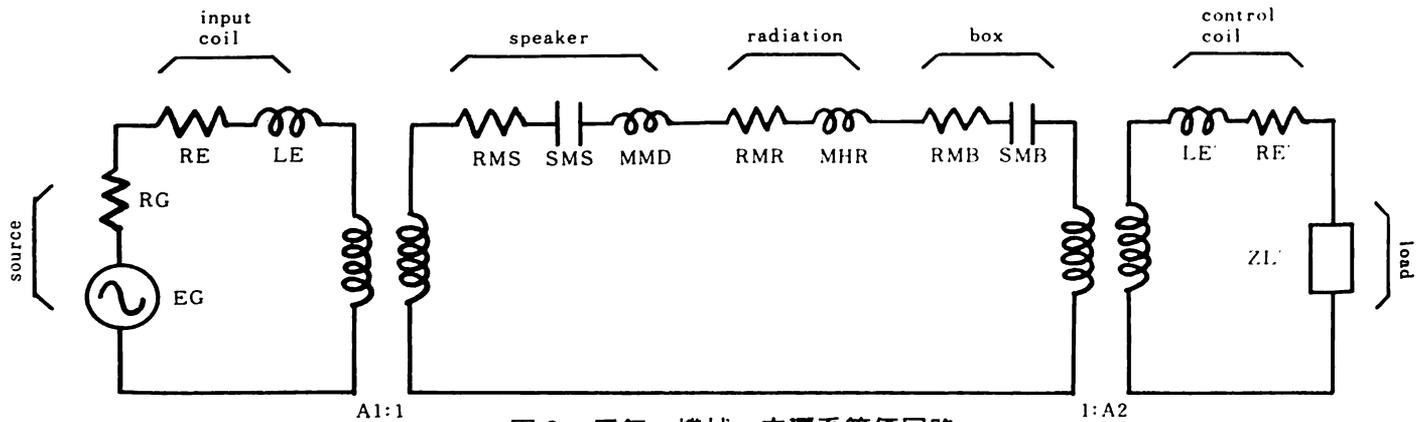


図2 電気-機械-音響系等価回路

EG：増巾器出力電圧
 RG：増巾器出力抵抗
 RE, LE：駆動用ボイスコイル抵抗，インダクタンス
 RMS, SMS, MMD：スピーカの機械抵抗，スチフネス，質量
 RMR, MMR：スピーカの放射インピーダンス
 RMB, SMB：バッフルの機械抵抗，スチフネス
 RE', LE'：制御用コイル抵抗，インダクタンス
 Al, A2：駆動用コイル，制御用コイル力係数
 ZL'：特性制御用負荷 (RL', CL', LL')

本システムを機械系に統一した等価回路を図・3に示す。ただし以下においてスピーカ無指向性と考えられる低周波領域に限定するので微小なL分は無視する。新しい諸定数は以下のである。

$$r_o = \frac{A1^2}{RG + RE} + RMS + RMR$$

$$FG = \frac{EG \cdot A1}{RG + RE}$$

$$m_o = MMD + MMR$$

$$s_o = SMS$$

$$s_b = SMB$$

$$r_b = RMB$$

$$ZL' = \frac{A2^2}{RL' + j \cdot \omega \cdot LL' + \frac{SL'}{j \cdot \omega} + RE'}$$

2・2 インピーダンス特性

図・3における電気インピーダンスは一般式⁽³⁾と

して(1)式で与えられる。

$$Z_e = RE + \frac{A1^2}{r_o + j \cdot \omega \cdot m_o + \frac{s_o}{j \cdot \omega} + r_b + \frac{s_b}{j \cdot \omega} + \frac{A2^2}{ZL' + RE'}} \quad (1)$$

ここで制御用コイルが無負荷のとき，つまり通常の密閉型スピーカシステムと等価なときのQ，および ω を Q_{oo} ， ω_{oo} として求め，RL'，CL'，LL'を接続した場合のQ， ω と比較検討する。(1)式より Q_{oo} ， ω_{oo} は(2)，(3)式で与えられる。

$$\omega_{oo} = \sqrt{\frac{s_o + s_b}{m_o}} \quad (2)$$

$$Q_{oo} = \frac{m_o \cdot \omega_{oo}}{r_o + r_b + \frac{RE}{KO}} = \frac{s_o + s_b}{(r_o + r_b + \frac{RE}{KO}) \cdot \omega_{oo}} \quad (3)$$

$$\text{ただし } KO = \frac{A1^2}{(r_o + r_b)^2 + (\omega \cdot m_o - \frac{s_o + s_b}{\omega})^2}$$

$$\text{(RL'を接続した場合) } \omega_{oR} = \sqrt{\frac{s_o + s_b}{m_o}} = \omega_{oo} \quad (4)$$

$$Q_{oR} = \frac{r_o + r_b + \frac{RE'}{KO}}{r_o + r_b + (RL' + RE')KR' + \frac{RE'}{KR}} Q_{oo} \quad (5)$$

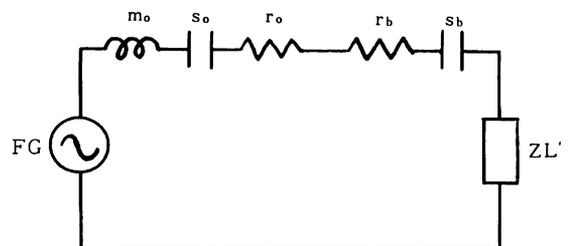


図3 機械系等価回路

密閉型スピーカシステムの低音域特性について

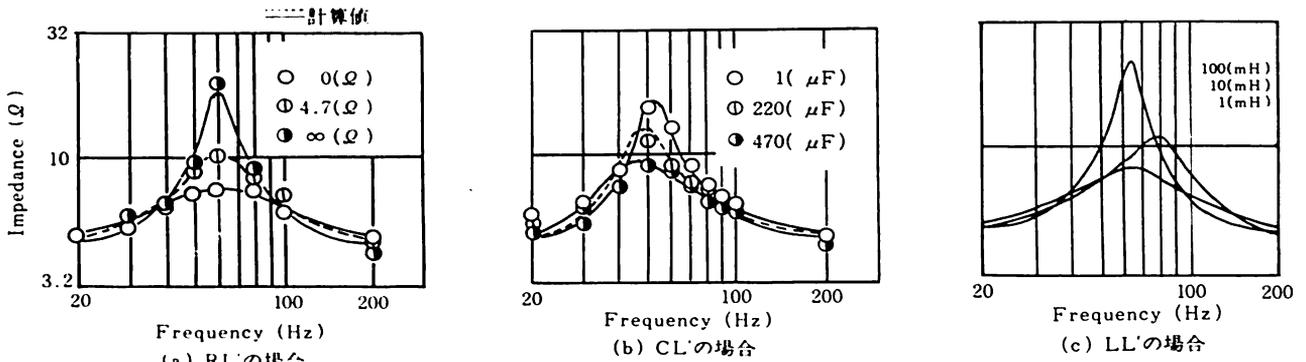


図4 インピーダンス特性

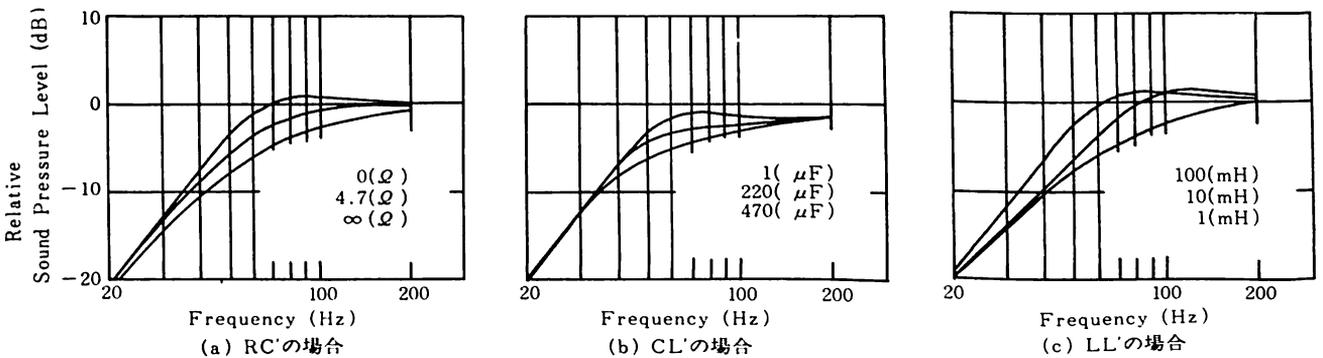


図5 音圧特性 (計算値)

ただし

$$KR' = \frac{A^2}{(RL' + RE')^2}$$

$$KR = \frac{A^2}{\{r_o + r_b + KR'(RL' + RE')\}^2 + (\omega \cdot m_o + \frac{s_o + s_b}{\omega})^2}$$

(CL' を接続した場合)

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{s_o + s_b}{s_o + s_b + SL' \cdot KC'}} \cdot \omega_{oo} \tag{6}$$

$$Q_{oc} = \frac{s_o + s_b + KC' \cdot SL'}{s_o + s_b} \cdot \frac{r_o + r_b + \frac{RE'}{KO}}{r_o + r_b + KC' \cdot RE' + \frac{RE'}{KC'}} Q_{oo} \tag{7}$$

ただし

$$KC' = \frac{A^2}{RE'^2 + (\frac{SL'}{\omega})^2}$$

$$KC = \frac{A^2}{(r_o + r_b + RE' \cdot KC')^2 + \{\omega(m_o + \frac{SL' \cdot KC'}{\omega^2}) - \frac{s_o + s_b}{\omega}\}^2}$$

(LL' を接続した場合)

$$\omega_{oL} = \sqrt{\frac{m_o + LL' \cdot KL'}{m_o}} \omega_{oo} \tag{8}$$

$$Q_{oL} = \frac{r_o + r_b + \frac{RE'}{KO}}{r_o + r_b + KL' \cdot RE' + \frac{RE'}{KL}} Q_{oo} \tag{9}$$

ただし

$$KL' = \frac{A^2}{RE'^2 + (\omega \cdot LL')^2}$$

$$KL = \frac{A^2}{(r_o + r_b + KL' \cdot RE')^2 + (\omega \cdot m_o - \frac{s_o + s_b + \omega^2 \cdot LL' \cdot KL'}{\omega})^2}$$

2・3 音圧特性

図・3の等価回路より、音圧の伝達関数を求め⁽⁴⁾、さらに定電圧回路における音圧特性を得るための変換をすると、音圧一周波数特性は(10)式のように求まる。

$$H(p) = \frac{(p^4 \cdot RL' + p^3 \cdot LL' + p^2 \cdot SL') m_o}{\Delta \cdot Z_e} \tag{10}$$

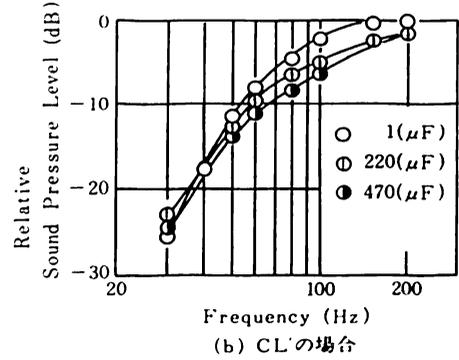
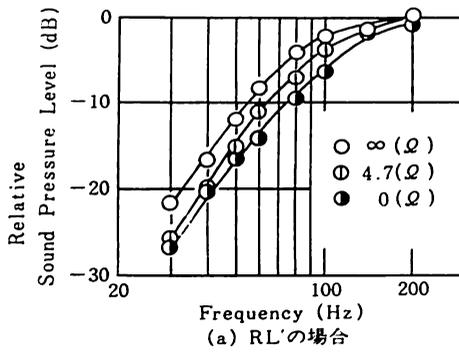


図6 音圧特性 (実測値)

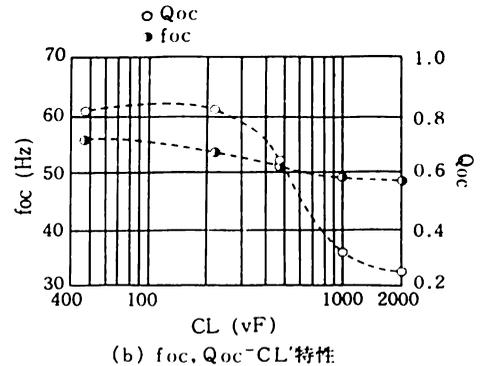
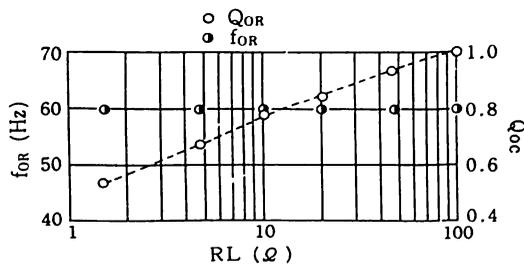


図7 (a) for, QOR-RL'特性

(b) foc, Qoc-CL'特性

ただし

$$p = j \cdot \omega$$

$$\Delta = p^4 \cdot m_o \cdot LL' + p^3 \cdot \{m_o \cdot RL' + LL'(r_o + r_b)\} + p^2 \{(r_o + r_b)RL' + m_o \cdot SL' + (s_o + s_b)LL'\} + A^2 p + p \{(s_o + s_b)RL' + (r_o + r_b)SL'\} + (s_o + s_b)SL'$$

3. 実験結果とまとめ

3.1 諸定数の決定

スピーカ定数は, Beranek⁽⁵⁾の方法により測定し, 以下のような値になった。

$$m_o = 8 \times 10^{-3}(\text{kg})$$

$$s_o = 410(\text{N/m})$$

$$r_o = 0.43(\text{N} \cdot \text{s/m})$$

$$A_1 = A_2 = 3.38(\text{w}_b/\text{m})$$

$$RE = RE' = 4.1(\Omega)$$

バッフルは内容積78ℓのものを使用した。バッフル定数はインピーダンス特性の実測値より以下のような値となった。

$$s_b = 730(\text{N/m})$$

$$r_b = 0.19(\text{N} \cdot \text{s/m})$$

3.2 実験結果と検討

制御用コイルにRL'を接続した場合,(4)式に示さ

れているように ω_{oR} は一定であり,かつ通常の密閉型スピーカシステムの ω_{oo} と等しい。(5)式に示されているように Q_{oR} は $RL' = \infty$ で $Q_{oR} = Q_{oo}$, $RL' = 0$ で最小値となる。図・4(a)の実測値はその傾向を示し,計算とも良く一致する。

制御用コイルにCL'を接続した場合(6)式に示されているように, ω_{oc} はCL'の増大とともに(ω_{oo}) \rightarrow ($\omega_{oo} - \Delta\omega$) \rightarrow (ω_{oo})の変化をする。実測では(b)図より, (ω_{oo}) \rightarrow ($\omega_{oo} - \Delta\omega$)の範囲でその傾向がでているが,更に増大した場合, ω_{oo} に収束するとは言いがたく,(1)式で省略した($j \cdot \omega \cdot LE$)の頃の影響等が誤差の原因と考えられる。 Q_{oc} は(7)式に示したが,抵抗分の変化の割合に比し,スチフネス分の変化の割合が大きいため,CL'の増加とともに $CL' = 0, Q_{oc} = Q_{oo}$ から $CL' = \infty$ で最小値に至る。(b)図の実測値もほぼその傾向を示す。以上より制御用コイルにCL'を接続することは定性的に質量を増加するのに等しいと考えられる。

制御用コイルにLL'を接続した場合の計算値を(C)図に示した。LL'は実際上($RL' + j \cdot \omega \cdot LL'$)として考えるのが妥当であろうが,傾向を把握する意味上純リアクタンスとして取扱った。上記2例より,ほぼ(C)図のような変化が予測される。また ω_{oL} の上昇よりLL'はスチフネスの増加と等価であると考えられる。

密閉型スピーカシステムの低音域特性について

次に(10)式で与えられた音圧特性式に3・1の定数を代入して得られた特性を図・5に示した。RL', CL', LL'の接続による音圧特性の制動, CL'による ω_{oc} の下降, LL'による ω_{oL} の上昇が読みとれる。

制御用コイルにRL', CL'を接続した場合の音圧特性の実測結果を図・6に示す。音圧特性からは正確な ω_0 の移動は不明であるが、制動されるのがわかる。

4. あ と が き

制御用コイルにRL'を接続することにより、図・7(a)に示す範囲内で Q_{oR} の制御が可能であること、CL'を接続することにより、(b)に示す範囲内で Q_{oc} , ω_{oc} の制御が可能であることがわかった。

音圧特性は図・6に示したが、図からわかるように共振周波数付近で約5 dB制御可能である。製作上の都合により力係数 $A_1 = A_2$ の場合のみ測定したが、 $A_1 > A_2$, $A_1 < A_2$ の条件にすることにより、さらに音圧の制御範囲は広がると考えられる。

最後に、多大の助言を戴いた電気工学科佐藤武治教授、本研究を終始協力してくれた昭和53年度卒研究生武藤順栄君に心より感謝する。

参 考 文 献

- 1) 阪本 他：スピーカとスピーカシステム, 87-110, 日刊工業新聞社, (1967)
- 2) 野村 他：非線形最適化手法による位相反転型スピーカシステムの設計, 音響学誌, Vol 34 462-469 (1978)
- 3) 早坂 他：音響振動論, 209, 丸善, (1974)
- 4) 野村 他：位相反転形スピーカシステムの計算機による最適化手法について, 信学電音研究会資料, EA-75-51, (1975)
- 5) L.L.BeraneK : Acoustics, 228-232, McGraw-Hill Book Co., Inc., (1954)