

スピーカの相互放射抵抗の測定
—— 電気的入力と振動速度による方法 ——

パトリック・エルベ

(パリ電子工学院)

鈴木英男・安齋正三・小野隆彦

(小野測器)

1990年8月24日

スピーカの相互放射抵抗の測定

A Measurement of a Mutual Radiation Resistance of Loudspeakers

- 電気的入力と振動速度による方法 -

- A Method by Use of Electrical Input and Diaphragm Velocities -

パトリック・エルベ*, 鈴木英男**, 安斎正三**, 小野隆彦**

Patrick Herve*, Hideo Suzuki**, Masazou Anzai**, and Takahiko Ono**

* パリ高等電子工学院

** (株)小野測器

* Institut Supérieur D' Electronique de Paris, Paris France

** Ono Sokki Co., Ltd. Yokohama Japan

1. はじめに

音源からの放射パワーを評価する1つの目安として放射抵抗がある。放射抵抗の大小により、音放射効率が良いか悪いかの判断ができる。また能動制御において、別の音源を付加することにより全体の放射パワーの低減を計る場合には、2つの(または複数の)音源の自己及び相互放射抵抗を知る必要がある。

前回の報告では¹⁾、スピーカを例にとり音響放射パワーと振動板の速度を計測することにより、放射抵抗を実環境のもとで求めることができることを示した。放射パワーの測定は、インテンシティを音源を囲む閉曲面で測定することにより求められるが、測定に要する時間や精度に関しては、純電気的な計測に比較して不利な点が多い。そこで今回は放射パワーの代わりに電気的な入力パワーを測定して放射抵抗を求めることを試みた。ただし、この方法では自己放射抵抗と機械抵抗を分離することができないので、求められる結果は相互放射抵抗のみである。この点からすると放射パワーによる方法に劣るが、全く異なる2つの方法で求めた結果を比較することにより、2つの方法が正しいかどうかの判定も可能となる。

2. 放射インピーダンスについて

音源1及び音源2の振動速度をそれぞれ V_1 と V_2 とし、音源1,2に加わる力を F_1 および F_2 とすると次式が成り立つ。

$$F_1 = Z_{11}V_1 + Z_{12}V_2 \quad (1)$$

$$F_2 = Z_{21}V_1 + Z_{22}V_2 \quad (2)$$

ここで、 Z_{11}, Z_{22} は音源1,2の自己放射インピーダンス、 $Z_{12} (= Z_{21})$ は相互放射インピーダンスである。音源1の全放射インピーダンス Z_1 は、上式(1)より(3)式で表わされる。

$$Z_1 = F_1/V_1 = Z_{11} + Z_{12}(V_2/V_1) \quad (3)$$

ただし、

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11} \quad (4)$$

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12} \quad (5)$$

$$V_1 = |V_1| \exp(j\theta_1) \quad (6)$$

$$V_2 = |V_2| \exp(j\theta_2) \quad (7)$$

θ_1 および θ_2 はそれぞれ振動速度 V_1 および V_2 の位相である。

3. 電気的入力パワーおよび振動速度の測定から放射抵抗を求める方法

スピーカの電気-機械変化メカニズムは図1の等価回路で表わすことができる。図1より、スピーカに入力される電気的な有効パワーは下式で示される。

$$P_{in} = \text{Real}\{Ze|I|^2 + [Zm + Z_{11} + Z_{12}(V_2/V_1)]|V_1|^2\} \quad (8)$$

ここで、 $\text{Real}[\]$ は実数部、 Ze, Zm はそれぞれ電気及び機械インピーダンスである。

$$Ze = Re + jXe \quad (9)$$

$$Zm = Rm + jXm \quad (10)$$

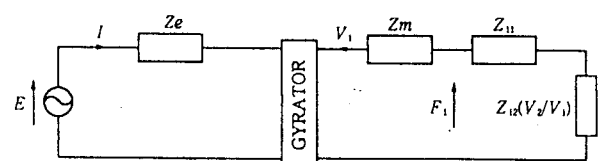


Fig.1 Equivalent electrical circuit of a loudspeaker

(8)式に(9),(10)式を代入すると(11)式となる。

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= Re|I|^2 + R_m|V_1|^2 + Real\{[Z_{11} + Z_{12}(V_2/V_1)]|V_1|^2\} \\
 &= Re|I|^2 + (R_m + R_{11})|V_1|^2 + Real(Z_{12}V_2V_1^*) \\
 &= Re|I|^2 + (R_m + R_{11})|V_1|^2 + |V_1V_2|(R_{12}\cos\theta - X_{12}\sin\theta)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

ただし、 $\theta(=\theta_2 - \theta_1)$ は V_1 と V_2 との位相差である。(11)式中、第1項はスピーカのボイスコイルで消費される電氣的パワー、第2項はスピーカの自己放射抵抗と機械抵抗とによる放射および消費パワー、第3項は2つのスピーカ間の相互干渉にともなう放射(または吸収)パワーである。

(11)式から分るように、2つの音源を異なる4条件で駆動し、その時の入力パワーと電流および振動速度を位相を含めて測定することにより、未知数としての Re 、 $(R_m + R_{11})$ 、 R_{12} および X_{12} が求められる。

本方法では、 R_m と R_{11} が分離できないため自己放射抵抗を求めることができない点が、前回の方法と比べて欠点である。

4. 計測方法

図2にスピーカの配置を示す。計測システムを図3に示す。各計測データは小野測器製FFTアナライザ(CF-360)で測定された後、ワークステーション(HP-9000 model 310)に転送され、解析された。2つのスピーカの振動の大きさ及び位相差は、小野測器製レーザードプラ干渉型速度計(LV-550)により測定した。駆動信号はFFTアナライザのピリオディックランダム信号(0~1kHz)を用いた。被測定対象物として用いたスピーカシステムはテクニクスSB-M5で、今回は、低音用スピーカ(振動板直径200mm)のみ駆動した。なお、スピーカは、半無響室(8m×8m×5.4m)のほぼ中央に配置した。

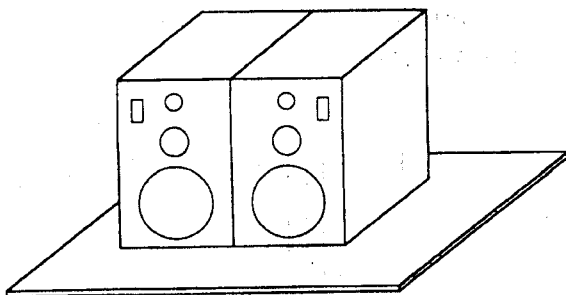


Fig.2 Two closely located loudspeakers

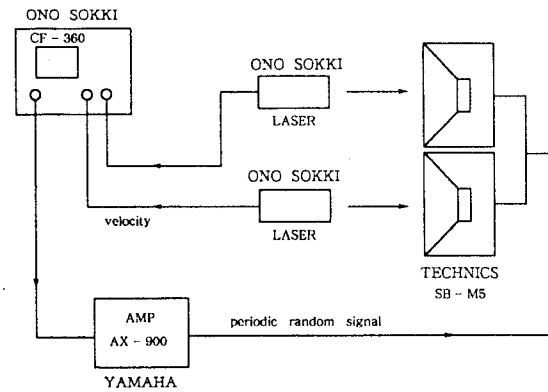


Fig.3 Velocity measurement setup

2つのスピーカの駆動条件としては以下の4条件を用いた。

- | | |
|---------------|----------|
| (1) 左右同電圧同相駆動 | (1 : 1) |
| (2) 左右同電圧逆相駆動 | (1 : -1) |
| (3) 左スピーカのみ | (1 : 0) |
| (4) 右スピーカのみ | (0 : 1) |

5. 測定結果及び検討

図4は、駆動条件(1:1),(1:-1)における、右スピーカへの入力パワーを、右スピーカのみ駆動(0:1)した時の入力パワーで正規化して示したものである。150Hz以下では大きなパワーの増減が見られる。これは、スピーカの機械インピーダンスが小さいために、放射抵抗の変化の影響を受けやすいことによるものであろう。また、150Hz~400Hzでは、(1:1)駆動よりも(1:-1)駆動が大きなパワーを必要としているが、400Hz付近で反転し、その後双方とも(0:1)駆動時のパワーに漸近する。

図5は図4と同じ条件の振動速度の変化量を示

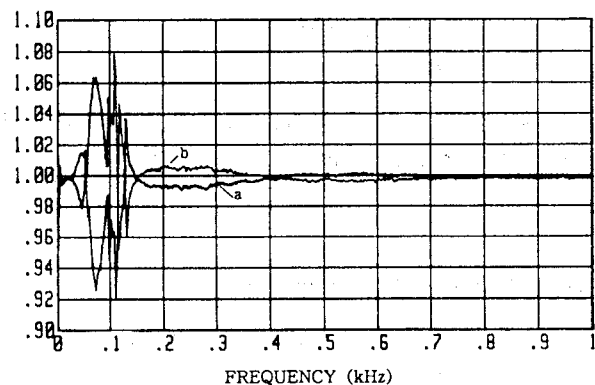


Fig.4 Normalized input electrical power when the speakers are driven in phase (a) and out-of-phase (b)

したものである。電气的入力パワーの変化と同様な傾向は見られるが増(減)から減(増)に変化する周波数が異なっており、一方のスピーカがもう一方のスピーカに及ぼす効果が複雑であることをうかがわせる。図5の振動速度の変化は120Hz付近をのぞけば数%以内であり、ほぼ定電流源であると考えるが良い。

図6は $Re, (R_{11}+R_m), R_{12}, X_{12}$ を未知数として前述の4つの駆動条件での $|I|^2, |V_1|^2, |V_1V_2|\cos\theta, |V_1V_2|\sin\theta$ を

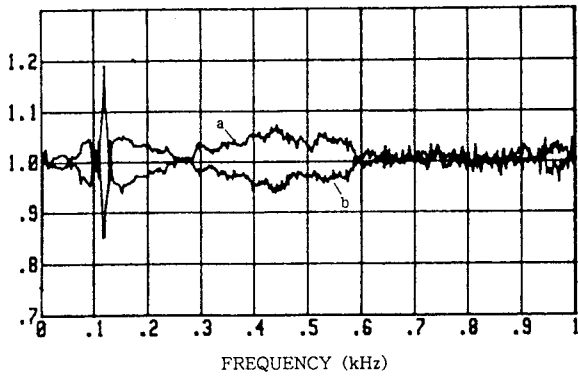


Fig.5 Normalized velocity of the right speaker when the two speakers are driven in phase (a) and out-of-phase (b)

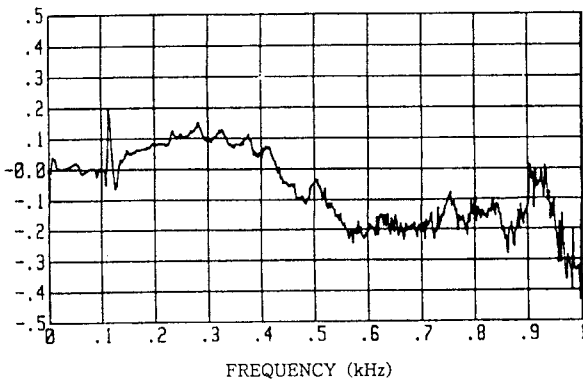


Fig.6 Normalized mutual radiation resistance R_{11} obtained using Eq.(11) and four drive conditions

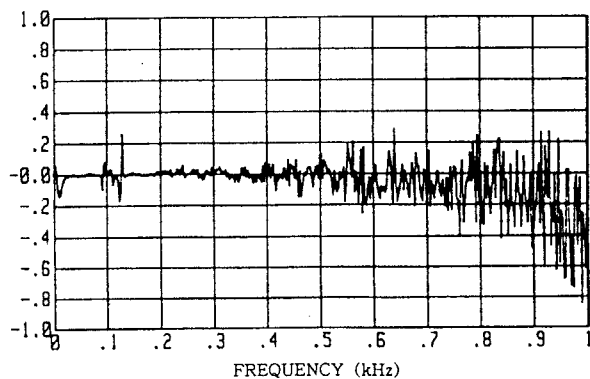


Fig.7 (R_m+R_{11}) obtained using Eq.(11) and four drive conditions

測定して求めた R_{12} の結果である。ただし結果は $\rho c \pi a^2$ で正規化してある。一応妥当と思われる結果が得られているが、図7に示すように (R_m+R_{11}) が負になるなどの理論的にはあり得ないを示した。この原因としては、(1) 4つの駆動条件での I と V_1 との比が大きく(十分独立に)変化しないこと、(2) 同相および逆相駆動では $|V_1V_2|\sin\theta$ が $|V_1V_2|\cos\theta$ に比べ $1/100$ ほどであり、 X_{12} を十分分離測定できていない、などのためであると思われる。

そこで、 $|I|^2$ と $|V_1|^2$ とが比例すると仮定し下式で表わす。

$$|V_1|^2 = k|I|^2 \quad (12)$$

また、リアクタンス成分 X_{12} に関する項は非常に小さいとして省略することにより、(11)式は(13)式に書き換えることができる。

$$P_{in} = (Re + k(R_m + R_{11})) |I|^2 + R_{12} |V_1V_2| \cos\theta \quad (13)$$

この時は未知数が2つであるので、独立な2条件で $P_{in}, |I|^2$ および $|V_1V_2|\cos\theta$ を測定すれば良い。

このようにして求めた結果を図8に示す。図9

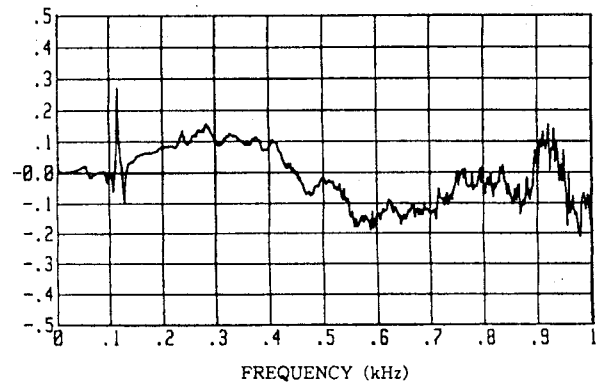


Fig.8 Normalized mutual radiation resistance obtained using Eq.(13)

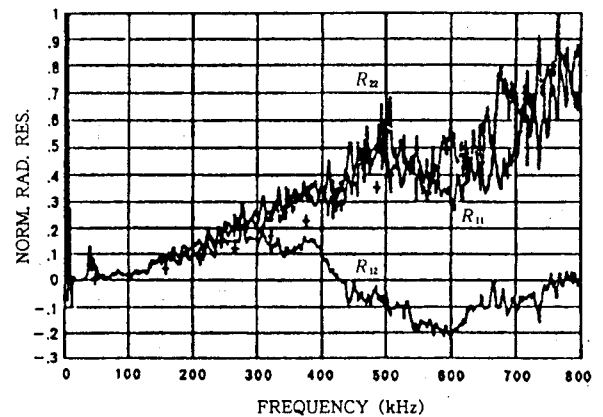


Fig.9 Normalized self and mutual radiation resistances obtained by the previously reported method

は前回報告した自己及び相互放射抵抗の結果を示したものである。測定した部屋の違いがあるが、2つの相互放射抵抗は非常によく似た傾向を示している。今回の結果は120Hz付近に鋭いピークを示すが、吸振性のシートを介して床におくと消えることが確認された。これらの結果は、電気的入力及び振動速度を測定することにより、相互放射抵抗が求められること、及び前回の方法も正しく行われたことを示していると言える。

参考のために図10に $[Re+k(Rm+R_{11})]$ の結果を示した。ほぼスピーカの直流抵抗に等しいが、周波数が上昇するに従って漸増の傾向が見られる。これは放射抵抗の上昇やうず電流損などの効果を含んでいるものと思われる。

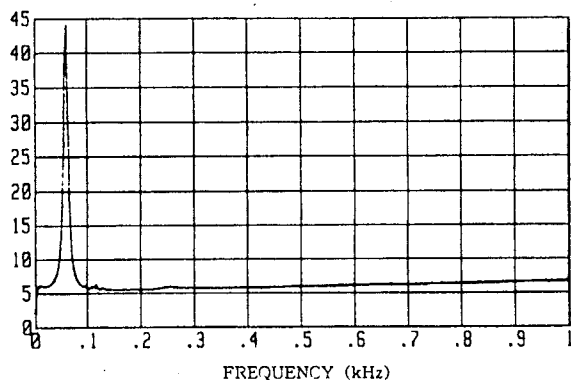


Fig.10 $[Re+k(Rm+R_{11})]$ obtained using Eq.(13) and two drive conditions

6. 結論

放射パワーを測定することなしにスピーカの放射抵抗を求めることを試みた。スピーカの相互の干渉の効果はスピーカの入力インピーダンスの変化として現われる。本研究ではスピーカへの電気入力（入力パワーと電流値）および振動速度の測定から、2つのスピーカの相互放射抵抗を測定できていることを示した。理論的にはこの方法によりスピーカの電気、機械、音響的パラメータがすべて求められるが、そのためには多数の独立な駆動条件が必要である。例えばスピーカを同相、逆相のみならず $\pm 90^\circ$ の位相差で駆動することにより、相互放射抵抗のリアクタンス成分(X_{12})が求まる。また振動板に質量を加える条件を加えれば、機械抵抗と自己放射抵抗の和をボイスコイル抵抗から精度よく分離することが可能であろう。

今回の実験により、入力パワーがスピーカの

電気、機械、音響の各部分にどのように配分されるかの理解を深めることができた。また、前回の方法の正しさも確認することができた。

文献

- [1] フランク フォサイル, 他, 「音響インテンシティによるスピーカの自己及び相互放射抵抗の測定」 電気音響研究会資料 EA89-44(1989)