

による気泡の共振周波数と気泡径の関係は、33 Hzの周波数で共振するバブルの径は約10 cmと推定される。つまり、半径約10 cmの気泡を利用することによってバブル波を減衰させることが考えられる。被爆直前に船体周囲を気泡で覆ってしまうことができれば、バブル波によるダメージを避けることが可能となる。その概略を図5.67に示す。

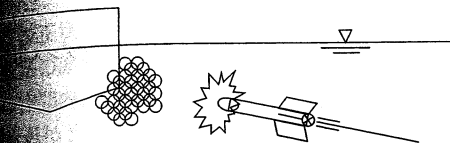


図5.67 気泡による水中爆発衝撃緩和対策

バブルダイナミクスを支配するパラメータとして、周囲圧力、半径、粘度、表面張力、比熱、弾性率、拡散係数などがあるが、パラメータを調整することによって振動エネルギーが大きくなり、気泡を作れば、大きい衝撃緩和効果が得られることになる。

さらに、バブルダイナミクスを利用すれば、高い効率の水中爆発衝撃緩和対策が可能となる。

バブルダイナミクス理論に基づき気泡を水中に分散させ、衝撃緩和に応用できないか検討したが、最近、マイクロバブルの気泡つまりマイクロバブルにいろいろな効果がわかりはじめて、注目を浴びている。活性効果、洗浄効果、殺菌効果、さらには摩擦低減効果などがある<sup>22)</sup>。今後の制振工学分野への適用を期待したい。(上入佐 光)

## 音 響 加 振

騒音低減のためには、物性の吸音特性や遮音特性など、音響特性を評価する必要がある。そのためには、音源を必要とする。建築音響においては、空間内に均等に大きな音圧を放射するために、12面体の各面に動電型スピーカを配置し、特殊なスピーカなどが使われる。

空間における2点間の音響伝達特性(周波数関数)を可能な限り厳密に求めたい場合がある。空間内の表面の一部が振動したときに、それが車体内部の音圧分布にどのように寄与するかを調べるため、振動面における体積速度に対する空間の注目する点の音圧の周波数応答関数を求める必要がある。この相反性を利用することにより、空間内の1点

に音源をおいて注目する振動面上の音圧を求めることで代替することができる。この場合にはなるべく小さな口径の高出力音源が必要となる。

ここでは、最初に動電型スピーカの原理を述べ、つぎに体積速度の校正が可能な微小音源について述べる。

### 5.6.1 動電型スピーカの原理

スピーカは方式によりいくつかに分類することができるが、そのなかで動電型(ムービングコイル型)スピーカが最も一般的に使われる。特性および効率と比較的によいこと、構造が単純であること、安価であることなどがその理由である。

動電型スピーカの構造を図5.68に示す。動電型スピーカの重要なパラメータが力係数 $A$ ( $A=Bl$ ,  $B$ :磁束密度,  $l$ :コイル長)である。コイルの直流抵抗は、 $8\Omega$ の定格インピーダンスの場合、通常5から7 $\Omega$ 程度である。動電型スピーカを駆動するには、低インピーダンスのスピーカに大きな電力を供給するための内部抵抗が小さく大きな電流を流せる電力増幅器が必要となる。

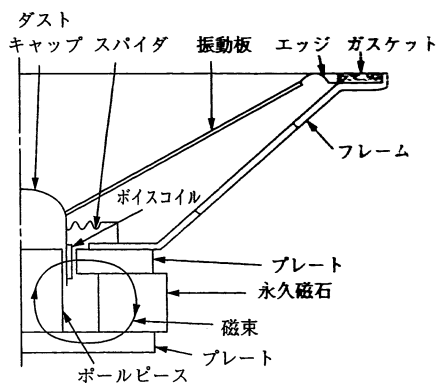


図5.68 動電型スピーカの構造図

動電型スピーカの動作は電気端子側の電圧 $E$ と電流 $I$ 、音響側の力 $f$ と速度 $v$ で式(5.182)のように表現することができる。

$$\left. \begin{aligned} E &= Z_e I + A v \\ f &= -A I + z_m v \end{aligned} \right\} \quad (5.182)$$

ここで、 $Z_e$ は電気インピーダンス、 $z_m$ は振動系の機械インピーダンスである。電気と音響の相互作用は力係数 $A$ によって結ばれている。電流 $I$ が流れると加振力 $-AI$ が生じ、振動板が速度 $v$ で振動すると、起電力 $Av$ が発生する。さらに、電圧 $E$ は内部インピーダンス $Z_0$ をもつ増幅器が $E_0$ の電圧を発生し、外力 $f$ は音響放射インピーダンス $z_a$ をもつ振動面に

加わるものとし  $f_0$  の力を発生するものとする

$$E = E_0 - Z_0 I, \quad f = f_0 - z_0 v_a \quad (5.183)$$

となる。これを用いて式(5.182)を書き直すと

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= (Z_0 + Z_e) I + A v \\ f_0 &= -A I + (z_m + z_a) v \end{aligned} \right\} \quad (5.184)$$

これを4端子網電気回路と対応させると、インピーダンスマトリックスは

$$[Z] = \begin{bmatrix} (Z_0 + Z_e) & A \\ -A & (z_m + z_a) \end{bmatrix} \quad (5.185)$$

であり、 $Z_{12} = -Z_{21}$  を満たす。このような変換機構をもつものをジャイレータと呼ぶことがある(第1編7.3.5項参照)。スピーカとしての電気的等価回路は式(5.184)において、外力  $f$  を零とおくことにより、図5.69(a)のようになる。ここで電圧と力、電流と速度を対応させる、インピーダンスアナロジーを用いている。式(5.184)において外部からの音圧が到来しないものとする、 $f=0$  となるので

$$E_0 = \left[ (Z_0 + Z_e) + \frac{A^2}{z_m + z_a} \right] I \quad (5.186)$$

が得られる。この場合の等価回路は図5.69(b)のようになる。ただし

$$Z_0 = R_0 \quad (\text{増幅器の内部抵抗}) \quad (5.187)$$

$$Z_c = (R_c + j\omega L_c) \quad (\text{ボイスコイルのインピーダンス}) \quad (5.188)$$

$$z_m = \left( j\omega m_m + r_m + \frac{k_m}{j\omega} \right) \quad (\text{振動系の機械インピーダンス}) \quad (5.189)$$

$$z_a = (r_a + j\omega m_a) \quad (\text{放射インピーダンス}) \quad (5.190)$$

である。式(5.186)は電気回路のインピーダンスにモーションアルインピーダンスという振動系が働くことにより発生するインピーダンス  $A^2/(z_m + z_a)$  が加わることを示す。図5.70はスピーカシステムの音圧特性と電気インピーダンス特性の一例を示したものであ

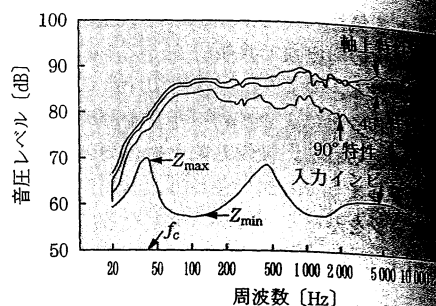


図5.70 スピーカの音圧および電気インピーダンス特性

る。40 Hz 付近に共振周波数があることが、インピーダンスの鋭さから、放射系を含めた先鋭度  $Q$  が求められる。

機械系を基本とする等価電気回路は、式(5.186)において  $f=0$  とおき、電流を消去することで得られる。

$$\frac{AE_0}{R_0 + R_c + j\omega L_c} = \left[ \frac{1}{\frac{(R_0 + R_c)}{A^2} + \frac{j\omega L_c}{A^2}} + \frac{j\omega(m_m + r_m) + \frac{k_m}{j\omega}}{j\omega + \frac{r_a + j\omega m_a}{A^2}} \right]$$

上式は、コイルのインダクタンス  $L_c$  の影響を無視すると、スピーカが1自由度の共振系であることが示している。抵抗成分には、機械系による制動抵抗  $A^2/(R_0 + R_c)$  が加わっている。実用再生用スピーカの場合は、機械系の共振周波数以上であっても、電磁制動を含めた  $Q$  は0.5以下のように設計されている。スピーカは通常、共振周波数  $f_0$  以上で使用される。共振帯域では振動速度は  $1/\omega$  に比例する。正面音圧は振動加速度に比例するため一定となる。小径径が波長に対して小さいという条件が成立する限り、放射抵抗は  $\omega^2$  に比例して上昇するため、放射パワー  $W (\propto r|v|^2)$  は一定になる。しかし、小径径と波長が同程度になると指向性が生じ、共振帯域で放射パワーは減少する。

以上のように、低域から中域にかけてのスピーカの動作は、等価電気回路で明確に記述することができる。

### 5.6.2 体積速度校正可能な小口径音源

小口径で大出力をもち、さらにその体積速度に比例する音源は音響計測においてきわめて有用である。例えば、部屋の2点間の周波数応答関数を求める際に、小口径音源であれば、空間内の測定点に決めることができるし、周波数応答関数の大きさも含めて測定することが可能となる。図

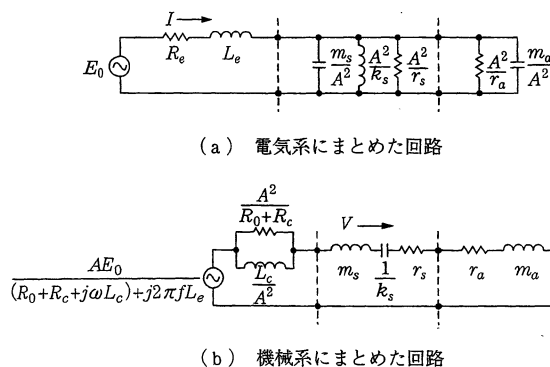


図5.69 動電型スピーカの等価電気回路

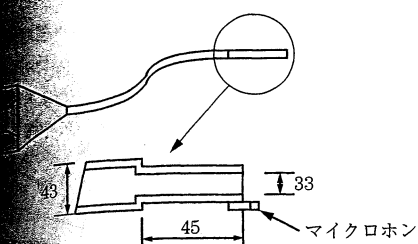


図 5.71 体積速度校正可能な小口径音源

校正機能をもつ音源の概略図である。ここで  
の原理と試作結果の例を紹介する。

空間内の二つの微小ピストン振動板の振動速  
( $V_1, V_2$ )とそれに加わる力( $F_1, F_2$ )の関係は  
の与えられる。

$$\begin{cases} F_1 = Z_{11} V_1 + Z_{12} V_2 \\ F_2 = Z_{21} V_1 + Z_{22} V_2 \end{cases} \quad (5.192)$$

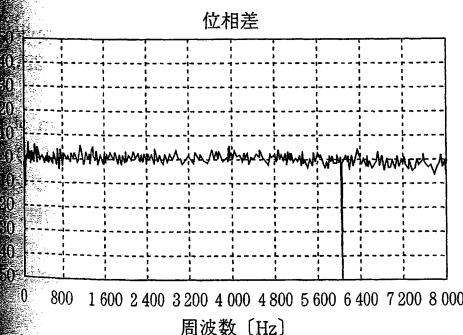
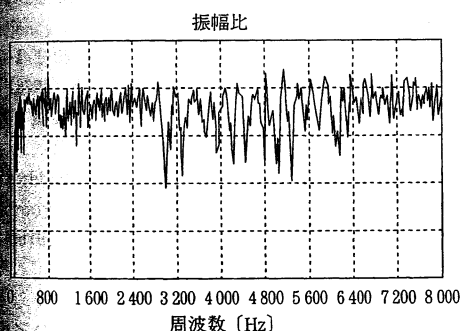
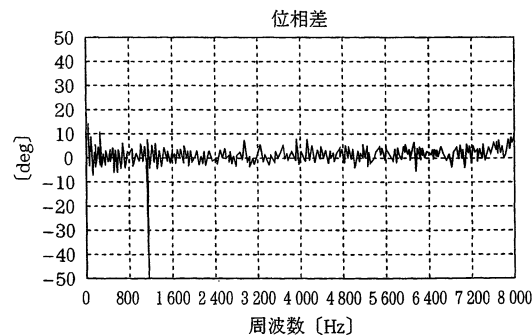
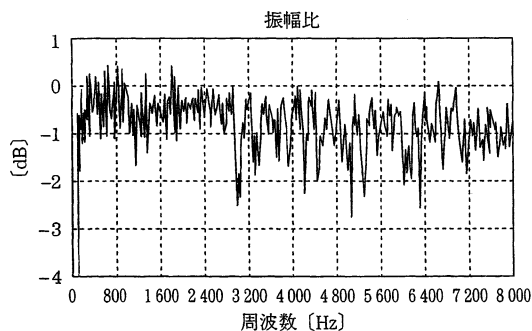
$Z_{ij}$ は自己( $i=j$ )および相互( $i \neq j$ )放射  
インピーダンスであり、相反定理から $Z_{ij} =$   
であることが知られている。上式を書き

$$\begin{cases} P_1 = Z_{11} \frac{U_1}{S_1^2} + Z_{12} \frac{U_2}{S_1 S_2} \\ P_2 = Z_{21} \frac{U_1}{S_1 S_2} + Z_{22} \frac{U_2}{S_2^2} \end{cases} \quad (5.193)$$

ここで、 $S_1$ および $S_2$ は二つの振動板の面積である。  
式(5.193)は、振動板1の体積速度 $U_1$ とそれによ  
って振動板2に発生する音圧 $P_2$ の比は、振動板2の体  
積速度 $U_2$ とそれによって振動板1に発生する音圧 $P_1$   
の比が等しいことを示している。

体積速度が知られている音源を用いれば、式  
(5.193)を用いることによって、相互放射インピー  
ダンス $Z_{ij}$ (一方の体積速度に対する他方の点の音圧)  
を測定することができる。また、音源を設置しにくい  
空間での測定の際に、音源と受音点を入れ換えて測定  
することもできる。空間の音響モード解析を行う際に  
測定量を低減できるなど便利な性質である。

図5.71のように、動電型スピーカで発生する音波  
をフレキシブルな管を用いてその出口まで誘導する。  
出口部分には校正用マイクロホン(以下の説明のため、 $M_2$ と呼ぶこととする)を設置して開口部の音圧  
を測定する。体積速度 $Q$ の微小音源が自由空間にあ  
るときの距離 $r$ における音圧 $P$ との関係は式(5.194)  
で与えられる<sup>1)</sup>。

(a)  $X_{0.5}/X_{1.0}$ (b)  $X_{2.0}/X_{1.0}$ 図 5.72 校正値  $X$  (式(5.198)) の距離依存性 ((株)小野測器提供)

$$Q = \frac{4\pi r}{j\omega\rho} e^{jkr} P \quad (5.194)$$

体積速度  $Q$  と開口部付近の  $M_2$  によって測定される音圧  $P_2$  との比  $X$  は、おかれる環境に無関係に定数であるとする。

$$Q = X P_2 \quad (5.195)$$

開口部に到達する反射音の音圧が直接の放射音圧に対して十分小さければこの条件は満たされる。校正値  $X$  の求め方は以下のとおりである。無響室内で音源にホワイトノイズを加え、開口部分から  $r$  の位置にマイクロホン  $M_1$  を置き、2チャンネルFFTアナライザのチャンネル1に  $M_1$  の出力  $V_1$  を、チャンネル2に  $M_2$  の出力  $V_2$  を入力して周波数応答関数  $H$  を求める。

$$H = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_2 P_2}{C_1 P_1} = \frac{C_2}{C_1} \frac{1}{X} \frac{Q}{P_1} = \frac{C_2}{C_1} \frac{1}{X} \frac{4\pi r}{j\omega\rho} e^{jkr} \quad (5.196)$$

ここで、 $C_1$  および  $C_2$  はマイクロホン  $M_1$  および  $M_2$  の校正値である。上式から

$$X = \frac{4\pi r C_2}{j\omega\rho C_1} \frac{e^{jkr}}{H} \quad (5.197)$$

が得られる。この値が距離によらず一定であれば、式(5.195)によって距離に無関係に開口部の音圧から体積速度を求めることが可能となり、 $X$  を校正値として用いることができる。ただし、有限の口径をもつ円筒の音源位置は端面より、多少前に位置することが知られているので<sup>2)</sup>、式(5.197)を補正し、式(5.198)を用いる。

$$X = \frac{4\pi(r-r_0)C_2}{j\omega\rho C_1} \frac{e^{jk(r-r_0)}}{H} \quad (5.198)$$

ここで、 $r_0$  は実効音源位置である。

図5.72は、図5.71の構造をもつ音源についての測定結果である。まず、 $r=1\text{m}$  で  $X_0$  を測定し、音源位置やマイクロホン位置などを再度設定しなおしてから、 $r=0.5\text{m}$  および  $2\text{m}$  で測定したときの  $X_{0.5}$  および  $X_{2.0}$  の値を正規化した結果である ( $r_0=0.0096\text{m}$  とした)。  $X_{2.0}/X_0$  の結果をみると、振幅でほぼ2dB以内に、位相差で $\pm 5^\circ$ 以内に入っていることから、1mで求めた  $X$  を0.5mや2.0mに適用しても、それほど誤差が生じないことがわかる。このように、開口部の音圧に  $X$  を乗ずることにより体積速度が得られるので、音源位置での体積速度に対する任意の点の音圧特性(周波数応答関数)を求めることが可能となる。

3.15 kHzにおける指向特性を図5.73に示す。小口径のため、 $90^\circ$ 方向でも正面に対して3dBの低下となっており、この周波数以下ではほぼ球状の指向性を得られている。出力音圧としては、ホワイトノイズ

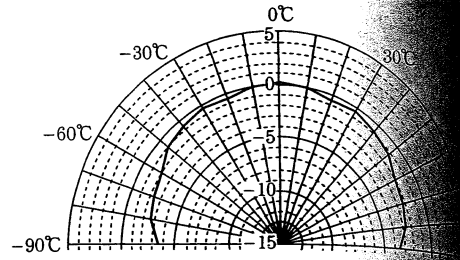


図5.73 管内径33mmのときの3.15kHzにおける指向性((株)小野測器提供)

10W入力で、開口部先端で約130dBの音圧レベルで測定されている。

## 参考文献

### 5.1 音響系の吸音手法

- 1) A. F. Seybert: Jour. Acoust. Soc. Am., 81, 1370 (1977)
- 2) JIS A 1405
- 3) H. Utsuno et al.: J. Acoust. Soc. Am., 85, 643 (1989)
- 4) L. J. Sivian: Jour. Acoust. Soc. Am., 5, 1 (1935)
- 5) U. Ingard: Jour. Acoust. Soc. Am., 25, 1 (1953)
- 6) T. H. Melling: Jour. Sound Vib., 29, 1 (1973)
- 7) 葉山ほか2名: 機論, 42-364, 3825 (1976)
- 8) 嶋本ほか2名: 日本音響学会講演論文集, 35, 10 (2006)
- 9) H. Utsuno et al.: AIAA Jour., 28, 11 (1990)
- 10) 宇津野ほか: 日本音響学会誌, 59, 1 (2003)

### 5.3 ヘルムホルツ共鳴器の予測技術

- 1) 日本騒音制御工学会編: 騒音制御工学ハンドブック 基礎編 1.1.3, 3.3.3, 技報堂 (2001)
- 2) L. Cremer et al.: Principles and applications of room acoustics, Chapter IV9, 181-223, Science Publishers (1982)
- 3) U. Ingard: On the theory and design of Helmholtz resonators, JASA, 25-6, 1073-1061 (1953)
- 4) 寺尾道仁, 関根秀久: オリフィスのレゾナンス特性と開口端補正に関するIngard理論式の有効性, 学会講演論文集, 791-792 (2001)
- 5) Morse and Ingard: Theoretical acoustics, 9.1, McGraw-Hill inc. (1968)

### 5.4 消音器, マフラの予測技術

- 1) 須山, 平田: 日本音響学会誌, 35, 165-170 (1979)
- 2) 須山, 平田: 日本音響学会誌, 35, 152-160 (1979)