第 七 章

電 気 音 響 機 器

電気音響変換機構を用いて音響エネルギーと電気エネルギーとの間の変換を行う機器を電気音響機器といい，大別すると音響エネルギーを電気エネルギーに変換する機器，たとえばマイクロホンや送話器と電気エネルギーを音響エネルギーに変換する機器，たとえばスピーカーや受話器とに別けられる．これらの機器の製造技術は 1930 年頃以降急速に発達しながら現在に至り，それに伴なって音響測定技術が容易かつ精密に行われるようになり，現代の音響工学の基礎が固められた．この他に現代の音響機器として円盤録音機器およびその再生機器と磁気テープ録音機器とがある．これらは厳密にいえば電気音響機器には含まれないものであるが，常識的にはこれらをも含んでおく方が妥当であろう．本章ではこれらの電気音響機器について簡単に説明する．

7・1 振 動 系 の 制 御 方 式

電気音響機器の音響端子に着目し，ここに加わる駆動力を $\dot{F}$ ，この端子の速度を $\dot{\Xi}$ とするとき，音響端子から見た振動系の機械インピーダンスは

（1）
$$Z^M = \frac{\dot{F}}{\dot{\Xi}} \qquad (\mathrm{N \cdot s/m})$$

と表わされるが，これは系全体が同一速度で振動するような振動姿態 の場合には

（2）
$$Z^M = R^M - i\left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right)$$

の形で表わされる．したがって駆動力は

（3）
$$\dot{F} = R^M \dot{\Xi} - i\omega M \dot{\Xi} + i\frac{K}{\omega}\dot{\Xi} \qquad (\mathrm{N})$$

と書ける．これを見ると，音響端子に加わる駆動力は振動系が振動することによって生ずる三つの反作用力の和と平衡していることがわかる．すなわち，振動系に $\dot{F}$ なる駆動力が加わったときの定常状態の振動速度は，(3) の三つの反作用力の和が駆動力と平衡するような大きさに保たれる．したがって機械縦インピーダンスは，系に加わる駆動力に対して系の運動を制御する作用をしていると考えることができ，(3) の第 1 項 $R^M \dot{\Xi}$ を抵抗による制御力，第 2 項 $-i\omega M \dot{\Xi}$ の慣性による制御力，第 3 項 $i\frac{K}{\omega}\dot{\Xi}$ を弾性による制御力と呼ぶ．

（1） 自由度 1 なる系，単一共振系．

7・1・1　抵抗制動 (2)

振動系の機械抵抗がその系の機械リアクタソスに比して著しく大きくなるようにすると，抵抗による制御力が他の制御力に比して著しく大きくなるから，駆動力と速度との関係は，

（4）　$$\dot{F} = R^M \dot{\Xi}, \qquad R^M >> \omega M, \qquad R^M >> \frac{K}{\omega}$$

と表わされる．このような状態で振動する糸を抵抗制御系と呼ぶ．抵抗制御の状態にあれば，駆動力と速度との比例関係は周波数に無関係に保たれるから， 駆動力を一定に保っておけば， 周波数が変化しても速度は一定である．

7・1・2　慣性制御 (3)

慣性による制御力を他の制御力に比して著しく大きくするように振動系の定数を定めると駆動力と速度の間に

（5）　$$F = -i\omega M \dot{\Xi}, \qquad \omega M >> R^M, \qquad \frac{K}{\omega} >> \omega M$$

なる関係が成立する．この状態を慣性制御と呼ぶ．駆動力を一定に保ったままで周波数を変化させると振動速度は周波数の増加に反比例して減少する．したがって周波数に無関係に速度を一定に保つためには，駆動力が周波数の上昇に比例して増大せねばならぬ．

7・1・3　弾性制御 (4)

弾性による制御力を他に比して著しく大きくした場合を弾性制御と呼び

（6）　$$\dot{F} = i\frac{K}{\omega}\dot{\Xi}, \qquad \frac{K}{\omega} << R^M, \qquad \frac{K}{\omega} >> \omega M$$

なる関係で表わされる．この状態では，$\dot{F}$ を一定に保てば $\dot{\Xi}$ は周波数の増加に比例して大きくなり，また $\dot{\Xi}$ を一定に保つためには $\dot{F}$ は周波数の増加に反比例して減少せねばならぬ．

以上の３種類の制御方式は電気音響機器の振動を制御するのに好んで用いられる重要な方式である．

7・2　電気音響機器の性能の基準

電気音響機器の性能の良否を判定するには次に掲げる諸項目について試験を行い，一定の基準に達しているかを調べる．

7・2・1　受音機器の感度

音のエネルギーを電気エネルギーに変換する受音機器の感度の基準として， $1(\mu\,\mathrm{bar})$ の音圧が振動板を励振したときに電気端子に現われる開放出力電圧（V）を採用する．音圧の実効値が $\dot{P}(\mu\,\mathrm{bar})$ のときの開放出力電圧の実効値が $\dot{V}(\mathrm{V})$ であれば感度は

(2)　resistance control
(3)　mass control
(4)　stiffness control

（1）　$$s = 20\log\frac{V}{P} \qquad (\mathrm{dB})$$

と定義される．これは　1 μ bar　の音圧が作用したときの開放出力電圧が　1V　の場合を　0 dB　とする表示方法であり，この感度の単位を　volt / μ bar　という．普通のマイクロホンの感度はマイナス数十デシベルである．ただし国際単位系を用いる場合には，感度の単位に　volt ／pascal　を用いねばならない．[1]

電気端子にインピーダンスの整合された負荷を接続した場合には，出力端子電圧は開放出力電圧の半分となるから，この場合の感度は（1）で表わされる感度より　6 dB　小さい値となる．たとえば内部抵抗　600　Ω　のマイクロホンの出力端子に約 50　kΩ　以上の高抵抗を接続した場合には出力端子電圧は開放電圧と見なされるが，出力端子に　600　Ω　の純抵抗を接続した場合には出力端子電圧は開放電圧の　$\frac{1}{2}$　となる．よって見掛の感度は　6　dB 低下する．

マクロホンまたは送話器の電気端子から出し得る電力　（watt）　を用いて感度を表示する方法がある．出力端子から見た内部インピーダンスが　$|Z_0^E|$　であるとき，出力端子に整合負荷　$|R^M|$　を接続し，振動板に　P（μ bar）　の音圧を加えたときに負荷　R^E　で消費する電力が　$\overline{W}^E$（watt）　であったとすると，出力端子に現われる電圧は

（2）　$$V' = \sqrt{R^E \overline{W}^E} \qquad (\mathrm{V})$$

である．この電圧を用いて感度を

（3）　$$s = 20\log\frac{\sqrt{R^E \overline{W}^E}}{P} \qquad (\mathrm{dBm})$$

と定義する．この場合，音圧　P　が　1 μ bar　のときに出力電力が　1 mW　となるような感度を 0（dBm）　と定めるから

（4）　$$s = 20\log\frac{\sqrt{R^E \overline{W}^E \times 10^3}}{P} \qquad (\mathrm{dBm})$$

となる．もしも　$R^E = 600\ \Omega$　であれば

（5）　$$s = 20\log\left(\frac{\sqrt{\overline{W}^E \times 775}}{P}\right) \approx 20\log\frac{\sqrt{\overline{W}^E}}{P} + 57.8 \qquad (\mathrm{dBm})$$

$$= 20\log\frac{V'}{P\sqrt{R^E}} + 57.8 \qquad (\mathrm{dBm})$$

$$= 20\log\frac{V'}{P} + 30 \qquad (\mathrm{dBm})$$

（1）　1 μ bar = 1　dyne / cm² = 0.1 Pa．
1 V / μ bar = 10 V / Pa．
1 V / Pa = 0.1 V / μ bar．

なお $R^M = 600\ \Omega$ の抵抗中で 1 mW の電力を消費する場合の抵抗の端子電圧は

（6）　$$V_0' = \sqrt{600 \times 10^{-3}} = 0.775\ \mathrm{V}.$$

受音機器の感度を測定するのに２種類の方法がある．一つは音場較正[2]といわれ，受音機器の出力電圧と機器によって擾乱された状態の空間の音圧との比を用いて表わした感度を意味する．他の一つを音圧較正[3]といい，受音機器の出力電圧と機器の振動板面上の音圧との比から定まる感度を意味する．この二つの較正法は，受音機器によって音場が乱されている場合に相違を生ずるが，また振動板が受音機器の本体の奥探い所に存在する場合にも相違を生ずる．

7・2・2　発音機器の効率

電気エネルギーを音のエネルギーに変換する発音機器の場合には電気端子に加えられる電気エネルギーの幾パーセントが音のエネルギーに変換するかを知ることが必要であり，これを効率と呼ぶ．効率を表わすのに次の二つの方法がある．

$$\text{音響効率} = \frac{\text{音響端子の音響出力（W）}}{\text{電気端子の電気入力（W）}},$$

$$\text{絶対効率} = \frac{\text{発音機器をある回路に接続したときの音響出力（W）}}{\text{その回路から取出しうる最大電気出力（W）}}.$$

現在は音響効率の方を一般に使用している．

7・2・3　発言機器の感度

発音機器の場合には通常能率を重要視し，感度という語はほとんど用いないが，時には，次に定義するような感度を用いることがある．

発音機器の電気的入力が $\overline{W}^E$ の場合に，発音機器から r だけ離れた正面の一点に生ずる音圧の実効値を $\dot{P}$ とすれば，音源から対称球面波が輻射されると仮定して音響出力を計算すると

（7）　$$\overline{W}^A = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c}\dot{P}^2 \qquad (\mathrm{W})$$

となるから，この発音機器の効率は

（8）　$$\eta = \frac{\overline{W}^A}{\overline{W}^E} = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c}\frac{\dot{P}^2}{\overline{W}^E}.$$

次に $\overline{W}^E$ が 1（W）のときに r 点の音圧 P が 1（N/m^2）となるような理想的音源の効率を η_0 とすると

（9）　$$\eta_0 = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c}\cdot\frac{1}{1} = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c}.$$

(8) と (9) に示した η と η_0 との比を発音機器の感度と定義し

（2）　flee field Calibration
（3）　sound pressure calibration

(10)
$$s = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{P^2}{\overline{W}^E}$$

と表わす．これは実際の発音機器の効率と理想音源の効率との比である．

7・2・4　振幅特性

電気音響機器の入力端子に一定の周波数の持続正弦波の信号を加えて，その大きさのみを色々と変化したときに，出力が入力に比例しているか否かを示すものを振幅特性と呼ぶ．もしも比例関係が成立していれば，これを直線的の特性と呼び，持続波形の場合には出力波形は入力波形と相似に保たれる．入力の大きさと出力の大きさが比例関係になければ，これを非直線的の特性と呼び，出力波形は入力波形と相似形でないものとなる．この波形の崩れを振幅ヒズミ [1] と呼ぶ．

振幅ヒズミの原因となる主な事項は

(i) 可動部分が機械的に飽和すること，

(ii) 磁界の不均一な場所まで振幅が増大すること，

(iii) ヒステリシス現象がある場合，

(iv) 運動方向による機械インピーダンスが不同の場合

などである．

非直線性の度合を示すのに歪率 [2] を用いる．歪率とは，入力波形が $\cos\omega t$ なる持続正弦波形の場合に，これと相似形ではないがかなりよく似た形の出力波形を

(11)
$$A_0 + A_1 \cos\omega t + A_2 \cos 2\omega t + \cdots + A_n \cos n\omega t + \cdots$$

なる FOURIER 級数で表わせば，歪率は

(12)
$$D_H = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}{A_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} A_n^2}{A_1^2} - 1}$$

と表わされる．

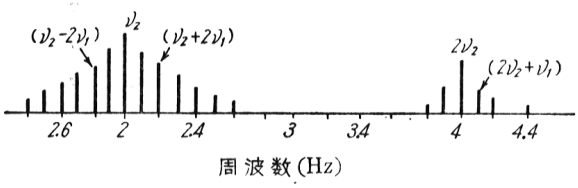
通常のマイクロホンは $10^{-4} \sim 10^{3}$ μ bar 音圧レベルで約 0 dB から 140 dB の範囲にわたって直線性の保たれていることが望ましいが，実際のものは約 10^{-2} から 10^{2} μ bar [30 dB から 110 dB] 位の範囲でしか直線性は保たれていないようである．

最近，非直線性を定量化するのに混変調歪率 [3] D_I を用いることが盛んになって来た．その原理は非常に隔った二つの周波数 ν_1 と ν_2 の正弦波信号を一定の割合で混合したものを入力端子から加え，その出力信号を取り出して見ると，もし直線性が保たれていれば出力信号は入力信号と等しく ν_1 と ν_2 の混合されたものであるが，非直線性があれば，高い周波数 ν_2 の信号は低い周波数 ν_1 によって変調されるために，ν_1 と ν_2 との他に $\nu_2 \pm \nu_1$，$\nu_2 \pm 2\nu_1, \cdots, 2\nu_2 \pm \nu_1$，$2\nu_2 + 2\nu_1, \cdots$ 等の周波数成分が現

(1) amplitude distortion
(2) klirr factor, harmonic distortion
(3) intermodulation distortion

われてくる．これらの成分は非直線性により２周波数成分の間に混変調が生じたためのヒズミであるから，混変調ヒズミと呼び，これらの原信号に対する含有率を混変調歪率と呼ぶ．[4] 同一の非直線性に対して混変調歪率は高調波歪率よりも大きな数値で現われるので，微小の非直線性の検出が容易となるために好んで用いられるようになった．

具体的な例は，たとえば $\nu_1 = 100$ Hz，$\nu_2 = 200$ Hz とすると，非直線性があれば，$\nu_2 = 2\,000$ Hz の近傍に 100 Hz 間隔でスペクトルが現われ，また $2\ \nu_2 = 4\,000$ Hz の附近にも 100 Hz 間隔のスペクトルが現われる．これらのスペクトルの大きさを周波数分析器によって測定し，その平方の和の平方根と[illegible]の信号の大きさとの比を求めると混変調歪率が求められる．また簡便法としては，[illegible]が[illegible]によって振幅変調されるときの変調度を測定して，混変調歪率を定めてもよい．



第7・1図　混変調ヒズミのスペクトル．

7・2・5　周波数特性

入力端子に振幅一定の持続正弦波信号を加え，その周波数のみをゆっくりと変化させた場合に出力がどの位変化するかを示したものを周波数特性という．周波数特性は感度あるいは能率の周波数による変化を示すものであるが，特に基準を明示しないでデシベルで表示した場合には周波数レスポンス と呼ぶ．人の耳が音として聞くことのできる周波数範囲は約 20 Hz から 20 kHz までであるが，日常生活に現われる音の周波数範囲は大体次の通りである．

談　　話	90～10 000 Hz，
電　　話	250～4 000 Hz，
秘密電話	500～1 500 Hz，
音　　楽	30～15 000 Hz．

電気音響機器の周波数特性はその目的に応じた周波数範囲内でなるべく平坦なものが望ましい．周波数帯域の表現法にオクターブバンドがある．これは可聴周波帯域をオクターブで区切って高音部，中音部，低音部等の区別を表わす方法であって，次の２通りの区切り方が多く用いられている．その一つは 100 Hz を基準とするオクターブバンドで第７・１表に示すように 11 バンドに分けられる．他の一つは物理調音階のＣ音の振動数 2^n Hz で区切る方法で第 7・2 表に示す通りである．またこれらを一括して第７・２図に示す．

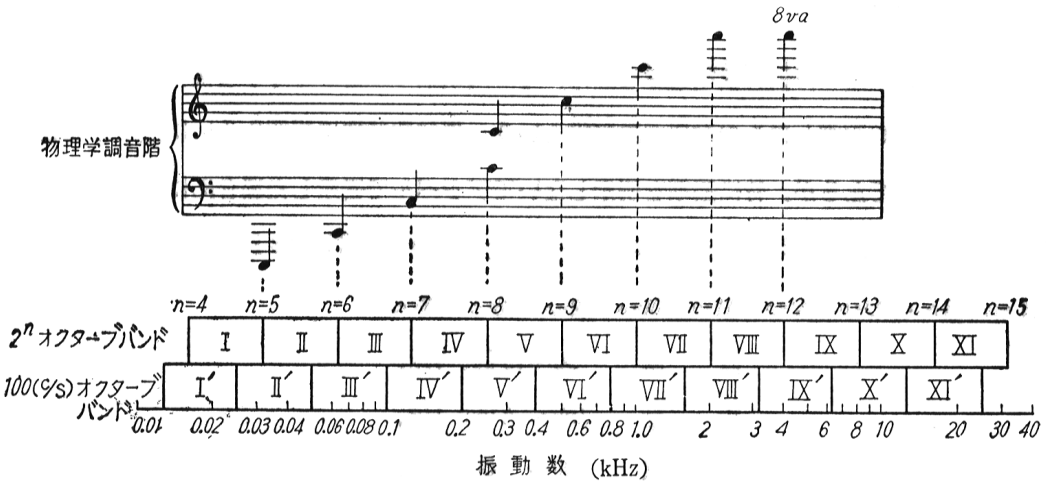
第7・1表　１００ ヘルツオクターブバンド．

バンド	周波数帯域	音域
Ⅰ′	12.5～25 Hz	超低音域
Ⅱ′	25～50 〃	低音域
Ⅲ′	50～100 〃	
Ⅳ′	100～200 〃	中音域
Ⅴ′	200～400 〃	
Ⅵ′	400～800 〃	高音域
Ⅶ′	800～1 600 〃	
Ⅷ′	1.6～3.2 kHz	
Ⅸ′	3.2～6.4 〃	超高音域
Ⅹ′	64～12.8 〃	
Ⅺ′	12.8～25.6 〃	

(4)　4・7参照．
(5)　response

第7・2表　　物理調音階のCを基準としたオクターブバンド.

バンド	周波数帯域	音域	2^n
	0～16 Hz		
I	16～32 〃	超低音域	2^4～2^5 Hz
II	32～64 〃	低音域	2^5～2^6 〃
III	64～128 〃		2^6～2^7 〃
IV	128～256 〃	中音域	2^7～2^8 〃
V	256～512 〃		2^8～2^9 〃
VI	512～1 024 〃	高音域	2^9～2^{10} 〃
VII	1 024～2 048 〃		2^{10}～2^{11} 〃
VIII	2 048～4 096 〃		2^{11}～2^{12} 〃
IX	4 096～8 192 〃	超高音域	2^{12}～2^{13} 〃
X	8 192～16 384 〃		2^{13}～2^{14} 〃
	16 384～∞		



第7・2図

この二つの区分の内，第7・2表に示す方が高中低音城の区分は人の感覚と合っている

周波数特性の変化の仕方が周波数に比例して上昇するような場合には，デシベル目盛で表わすと1オクターブにつき 6 dB の傾きの直線にしたがって上昇する．また周波数に反比例するような変化の場合には1オクターブにつき 6 dB の傾きの直線にしたがって下降する．よって，縦軸にデシベル均等目盛を用い，横軸に周波数のオクターブ目盛を用いれば，周波数の n 乗に比例して変化するレスポンスは $6n$（dB/octave）の傾きの直線にしたがって上昇し，また周波数の n 乗に反比例して変化するレスポンスは $6n$（dB/octave）の傾きの直線にしたがって減少する．

7・2・6　指向特性

発音機器の指向特性[1] とは，その発音機器を音源として使用したときに生ずる音場のエネルギー流密度が方向によって変化する様相を表わす特性である．最も単純な例は点音源または呼吸球の指向特

(1)　directivity，または directional characteristics

性であって，この場合には音場が音源を中心とする対称球面波となるのでエネルギー流密度はどの方向にも一様に分布し，指向特性は無指向性となり，その指向特性函数は1である．このような場合には，音源を中心とし任意の半径 r(m) を有する球面上の音圧は一定であり，またこの球面上の粒子速度の法線成分も一定であるから，この球面上の音圧または粒子速度を測定することによって無指向性であることを確かめることができる．

二重音源によって生ずる音場のエネルギー流密度は 3･5･4 の（66）に示すように，二重音源の軸を基準として測った角 θ によって変化する．音響出力 $\overline{W}$(W) なる二重音源によって生ずる音場の任意の点のエネルギー流密度は

(13)
$$\overline{w}(r,\theta)=\frac{3\overline{W}\cos^2\theta}{4\pi r^2}\qquad(\mathrm{W/m^2}),$$

音響出力 $\overline{W}$(W) なる点音源による音場のエネルギー流密度は

(14)
$$\overline{w}_0(r,\theta)=\frac{\overline{W}}{4\pi r^2}\qquad(\mathrm{W/m^2})$$

であるから，二重音源の指向特性函数は

(15)
$$D(\theta)=\frac{\overline{w}(r,\theta)}{\overline{w}_0(r,\theta)}=3\cos^2\theta$$

で与えられる．このような指向特性を双指向性と呼び，軸上で最大となり，これと直角の方向では零となる．なお係数3がついているのは，同一の音響出力を有する点音源の場合と比較して，二重音源による音場のエネルギー流密度が $3\cos^2\theta$ 倍になっていることを意味し，軸上では二重音源の場合には点音源の場合の3倍のエネルギー流密度が得られることを意味している．半径 r なる球面上の音圧を用いて指向特性函数を表わすと，二重音源による音場の音圧が

(16)
$$\left|\underset{\cdot}{P}(r,\theta)\right|=\frac{\sqrt{3\overline{W}}\cos\theta}{r}\sqrt{\frac{\rho_0 c}{4\pi}}\qquad(\mathrm{Pa}),$$

点音源による音圧が

(17)
$$\left|\underset{\cdot}{P}_0(r,\theta)\right|=\frac{\sqrt{\overline{W}}}{r}\sqrt{\frac{\rho_0 c}{4\pi}}$$

であることより，

(18)
$$D(\theta)=\left|\frac{P(r,\theta)}{P_0(r,\theta)}\right|^2=3\cos^2\theta$$

となる．

音響出力 $\overline{W}$(W) なる二重音源によって (r,θ) 点に生ずる音圧（16）と等しい音圧を生ずるような点音源の音響出力を $\overline{W}_0$(W) とすると

(19)
$$\overline{W}_0=\frac{4\pi r^2}{\rho_0 c}\left|P(r,\theta)\right|^2=3\cos^2\theta\qquad(\mathrm{W}),$$

よって二重音源の　θ　方向における指向性利特 [2] は

(20)
$$g(\theta)=\frac{\overline{W_0}}{\overline{W}}=3\cos^2\theta$$

となる．

指向特性函数や指向性利得はエネルギー流密度の指向性を表わすものであって，対称球面波を基準としている．これに対して，ある音響輻射器から任意の方向へ輻射される音場の音圧を，音源を中心とし，これから遠く離れた球面上で測定し，この値と音源から一定の基準方向の球面上の音圧との比を用いて指向特性を表わすことができる．これを指向性係数と呼ぶ．

二重音源を例に取れば，二重音源の軸方向を基準方向とし，任意の球面上の軸上音圧を　$P_0(r,\theta)$，軸と　θ　なる角をなす方向の点の音圧を　$P(r,\theta)$　とすると，二重音源の指向性係数は

(21)
$$R(\theta)=\frac{P(r,\theta)}{P_0(r,0)}=\cos\theta$$

で与えられる．

音響出力が等しく互に同位相の点音源が一直線上に　d(m)　の間隔で　n　個並んでいる場合に，音源から十分遠方の音場の音圧指向性係数は

(22)
$$R(\theta)=\frac{\sin\left(\dfrac{n\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)}{n\sin\left(\dfrac{\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)}=\frac{\sin nx}{n\sin x}\ ,$$

$$x=\frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta\ ,$$

λ は音波の波長　(m)，

θ は音源配列軸へなす角

で与えられる．

音響出力が等しく互に逆位相の２個の点音源が　d(m)　の間隔で配置されている双極音源の場合に，遠方の音場の音圧指向性係数は

(23)
$$R(\theta)=\frac{\sin\left(\dfrac{\pi d}{\lambda}\cos\theta\right)}{\sin\dfrac{\pi d}{\lambda}}$$

となり，　$d \ll \lambda$　の場合には二重音源の場合と一致する．

剛壁から　d(m)　の位置にある点音源から十分遠方の音場の音圧指向性係数は

(24)
$$R(\theta)=\frac{\cos\left(\dfrac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta\right)}{\cos\dfrac{2\pi d}{\lambda}}$$

(2)　322 頁参照．

で変えられる．ただし θ は音源から壁に下した垂線を基準線として測った方向である．

間隔 d なる双極音源が軸を剛壁と垂直にして壁から l(m) なる距離に置かれた場合に，遠方の音場の音圧指向性係数は

(25)
$$R(\theta)=\frac{\cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\cos\theta\right)-\cos\left\{\frac{2\pi l}{\lambda}\left(1+\frac{d}{l}\right)\cos\theta\right\}}{\cos\frac{2\pi l}{\lambda}-\cos\left\{\frac{2\pi l}{\lambda}\left(1+\frac{d}{l}\right)\right\}}$$

で与えられる．ただし l は壁と双極間の壁に近い方の音源との間の距離であり，θ は双極の軸となす角である．

半径 a(m) なる円板がその面の法線方向に振動する場合に，遠方における音場の指向性係数は

(26)
$$R(\theta)=\frac{2J_1(x)}{x},$$
$$x=\frac{2\pi a}{\lambda}\sin\theta$$

で与えられる．ただし θ は円板の中心に立てた法線を基準として測った方位角である．

辺の長さが a(m) および b(m) なる矩形板がその面の法線方向に振動する場合の指向性係数は

(27)
$$R(\alpha,\beta)=\frac{\sin(X)}{X}\cdot\frac{\sin(Y)}{Y},$$
$$X=\frac{\pi a}{\lambda}\cos\alpha,$$
$$Y=\frac{\pi b}{\lambda\cos}\cos\beta$$

で与えられる．ここに α および β は板の中心と観測点を結ぶ直線が x 軸および y 軸となす角を表わす．

任意の方向を立体角 Ω で表わすとき，指向性係数 $R(\Omega)$ と指向性函数 $D(\Omega)$ との関係は，Ω 方向の微小立体角を $d\Omega$ とすれば

(28)
$$D(\Omega)=\frac{1}{4\pi}\int_s^{4\pi}R^2(\Omega)\,d\Omega$$

で求められる．もしも $R(\Omega)$ が一つの軸に対して対称形の場合には，この軸から測った方位角を θ とすれば

(29)
$$D(\theta)=\frac{1}{2}\int_0^{\pi}R^2(\theta)\sin\theta\,d\theta$$

で与えられる．

受音機器の指向特性は，音波の入射する方向による感度の変化を表わすものであって，指向性函数を用いるよりも音圧指向性係数を用いる場合の方が多い．指向特性は可逆的であるから，発音機器として用いるときの指向特性はそのまま受音機器として用いる場合に適用できる．

音響機器の指向特性には無指向性，双指向性あるいは単一指向性などが要求される．このような指

向性を音響機器に持たせることは可能なことであるが，広い周波数帯域にわたって一様な指向特性を保つことは非常に困難であって，現代の技術では未だ解決されていない．このことは指向性係数が波長の函数として表わされていることから明らかな通り，振動板の寸法と同程度またはそれより短かい波長に対して，指向特性が周波数の函数となり，著しく変動をするようになることによる．

7・2・7　過渡特性

音響機器の過渡特性 (1) とは，入力信号の振幅や振動数あるいはその波形などが急激に変化したときに出力波形がどの程度に忠実に入力波形に追従し得るかという度合を示す特性である．この特性の良否は一定振幅の持続正弦波形を用いて測定した定常状態の周波数特性の良否では表わし切れない場合が多く，しかも音響機器の音質の良否に大きな影響を与えている場合が多い．

音響機器は音場あるいは音響回路と振動系および電気回路が結合した複雑な連成振動系を構成しているために，これを電気回路の過渡現象理論によって解析することは容易でなく，しかも 10 オクターブにも及ぶ振動数帯域にわたって過渡特性を一様に良くしようとすることは技術的にも困難な場合が多い．しかし過渡特性を良くするためには振動系の自由振動を十分に制御すれば良いことは 1・3・2 の第 1・20 図に見る通りである．したがって，音響機器の使用振動数帯域の全域にわたって，電気回路と機械振動系および音響系の全体に含まれるすべての自由振動を十分に制動することができれば良好な過渡特性が得られることになる．

一つの自由振動の減衰率を τ (s) とすると，この自由振動が過渡[illegible]を攪乱する時間は外力が変化してから 2τ (s) の間であると見なすことができる．一方人の耳か音の変化を認識するための最短時間は約 30 ms と見なすことができる．よって減衰率が

(30)　$$\tau \leq 15 \times 10^{-3}\ \mathrm{s},$$

あるいは制動係数が

(31)　$$k \geq \frac{2}{15} \times 10^{3} = 1.33 \times 10^{2} \qquad (1/\mathrm{s})$$

であれば音響的に良好な制動状態であるということができる．なお 2τ (s) の間に自由振動は e^{-2} 倍すなわち約 −17.4 dB だけ減衰する．よって特定の自由振動姿態を励振しておいて，その自由減衰波形を観測し，−17.4 dB 減衰する時間からその自由振動姿態の減衰率 τ を求めることができる．

過渡特性の良否を定量的に表現する方法は未だ確定されていない．したがって過渡特性の測定法は今後の研究にまたねばならない．現在過渡特性を調べるために用いられている方法は矩形波形あるいは衝撃波形を加えてブラウン管などを用いて記録し，その過渡波形が原形と同形であるか崩れているかを見て定性的に判定している程度である．しかし，音響機器として使用した場合の音を聞くと，聴覚は案外鋭敏に過渡特性の良否を判別するものであることは記憶しておくべきであろう．

(1)　transient characteristics

7・2・8　ダイナミックレンジ

音響機器に加わる入力信号が余り大きくなると，非直線ヒズミを生ずるし，また余り小さくなるとその機器の有する自己雑音レベルに妨害されるようになる．したがって音響機器の取扱い得る信号の大きさの範囲には限界が生ずる．これをその機器の扱い得る許容振幅限界 (1) またはダイナミックレンジ (2) と呼び，音響機器の性能を決定する重要な特性の一つである．

雑音に妨害されないで良好に信号を伝えるためには，信号のレベルは雑音レベルよりも少なくも 30 dB 以上大きくなければならない．つまり信号対雑音比 (3) は 30 dB 以上を必要とする．また日常生活に使われている音の大きさの変動する範囲は約 60 dB である．よって良好な音響機器の持たねばならないダイナミックレンジは少なくも 90 dB を必要とする．しかし現在の音響機器は，特別に優れたものを除いて，このような広いダイナミックレンジを持っているものはほとんどない．

受音機器の自己雑音レベルは，その機器で検知し得る最小音のレベルを限定する．したがって自己雑音レベルの高い受音器は弱い音の検出には使用できない．よって受音器の自己雑音レベルを表示するのに，その雑音レベルと等しい電圧を生ずるのに必要な音圧を用いて，自己雑音レベルを音圧レベルで表わすことがある．

7・2・9　電気的諸特性

電気音響機器の特性として，絶縁の良否，シールドの良否，電気的諸定数の安定度，電気インピーダンスの値の適否およびその周波数による変化などが重要なものである．ことに高インピーダンスの機器の場合には絶縁の良否が感度や音響的諸特性に影響し，またシールドの良否は自己雑音レベルに大きく影響を与える．電気インピーダンスは，これに接続する他の回路と関連して重要であり，殊にその周波数特性は音響的特性にも影響を与える．

7・2・10　機械的諸特性

音響機器の機械的諸特性として，堅牢であること，外から加えられる機械的振動に鈍感であること，風によって音を発しないこと，温度や湿度の変動によって特性が変化しないこと，機械的振動や雑音を発しないこと，回転ムラを生じないことなどが要求される．

7・3　送話器・マイクロホン

音のエネルギーを電気エネルギーに変換する電気音響機器を一般に送話器 (1) と呼び，大別して次の２種類に分類される．一つは感度に重きを置くもので，変換に件なう音質の劣化はある程度大目に見

(1) handling capacity
(2) dynamic range
(3) signal to noise, ratio, S/N, SN 比
(4) transmitter

て，感度の大きなことを目的とするものであり，電話用送話器などがこの種類に属する．他は感度を犠牲にして音質の劣化を極力少なくするように作られたもので，これをマイクロホン[2]と呼んでいる．現在の慣用語では前者を送話器，後者をマイクロホンと呼ぶようになっている．

7・3・1　送話器およびマイクロホンの分類

マイクロホンおよび送話器は，その動作機構および構造等によって色々の分類方法があるが，大別すると２通りの分類方法に分けられる．一つはエネルギー変換機構による分類法であって，エネルギー変換が可逆的に行われるものを電気音響変成器[3]，不可逆的に行われるものを電気音響継電器[4]と呼ぶ．他の分類法は動作機構による分類法であって，出力電圧が音場の音圧に比例するものを圧力型[5]，出力電圧が音場の粒子速度に比例するようなものを速度型[6]と呼ぶ．これらの分類を表示すると，第7・3表のようになる．なおここに示したのは標準的なものであって実際にはこれらを組合せたものも用いられている．電気音響機器に関する基礎的な考察については OLSON と MASSA の著書[7]を参照するとよい．

第7・3表　　送話器およびマイクロホンの分類表．

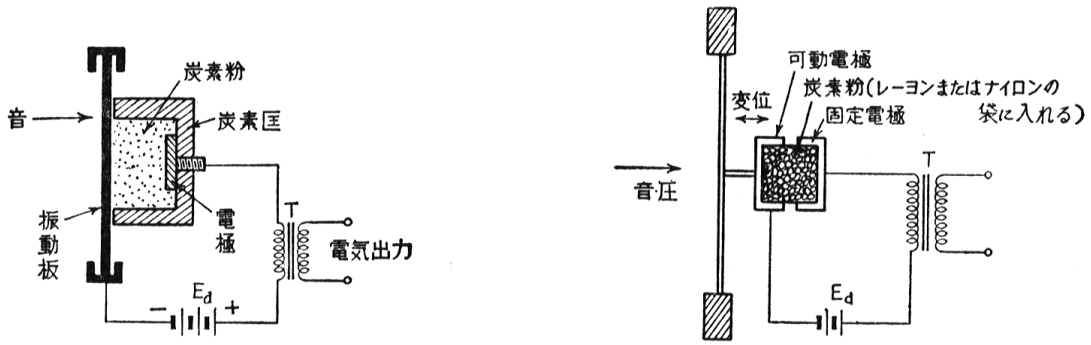
型式	名称	エネルギー変換機構	圧力型 構成の主体	圧力型 制御方式	速度型 構成の主体	速度型 制御方式
可変抵抗型	炭素送話器 炭素マイクロホン	電気音響継電	炭素粉 炭素粒	弾性	—	—
静電型	コンデンサマイクロホン	電気音響変成	蓄電器	弾性	差動蓄電器	多くは弾性
動電型	可動線輪マイクロホン	電気音響変成	可動線輪	抵抗	—	—
	バンドマイクロホン		バンド	抵抗	—	—
	リボンマイクロホン		—	—	リボン	慣性
	インダクタマイクロホン		リアクター	抵抗	—	—
圧電型	クリスタルマイクロホン	電気音響変成	圧電振動子	弾性	差動圧電振動子	多くは慣性
磁歪型	磁歪型マイクロホン	電気音響変成	磁歪振動子		—	—
電磁型	電磁型マイクロホン	電気音響変成	電磁振動子		—	—
熱型					—	—
毛細管型					—	—

(2)　microphone
(3)　electro - acoustic transformer
(4)　electro - acoustic relay
(5)　pressure type
(6)　velocity type
(7)　H.F.OLSON and F.MASSA : " Applied Acoustics " Blackiston,　1934.

第7･3表中の磁歪型は水中超音波用に用いられ，また電磁型は現在余り用いられていない．熱型および毛細管型は特殊のものであって実用性に乏しい．[8]

7・3・2　炭素送話器および炭素マイクロホン

電気音響継電型に属する送話器およびマイクロホンは，炭素粉または炭素粒を用いて音響エネルギーを電気エネルギーに変換するいわゆる炭素型のもののみが現在実用に供されている．その構造は，第7･3図に示すように炭素筐の底面に電極を設け，炭素粉または炭素粒を筐に充塡して振動板で蓋を



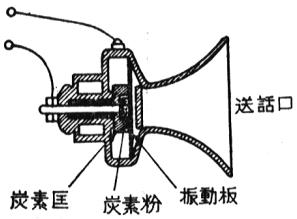
（a）　炭素型送話器の構造原理.　　（b）　新しい炭素送話器の構造.

第7･3図

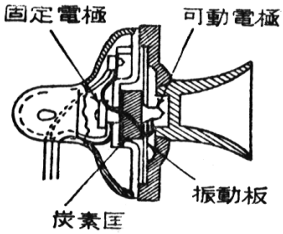
する．振動板は金属の薄板で作り，周辺を固定したもので，これが一方の電極となる．電極間に図に示すような方法で直流電流を流すと，振動板が一定の圧力で炭素粉を押している間は振動板と背面電極間の電気抵抗が一定値に保たれるので，電気回路には一定の直流電流が流れ，変圧器の二次側には電圧は現われない．もしも振動板が音圧によって振動すると，炭素を押す圧力が変動するので炭素粉間の接触抵抗が変化し，炭素粉に加わる圧力が増加するとき電流は増加し，圧力が減少するとき電流も減少し，電流変化は大略振動板の振動波形に比例する．よって振動板の振動を音圧で励振すれば変圧器の二次側にはほぼ音圧波形に比例した電圧が現われることになる．これが炭素型送話器の動作機構である．

この型のものは感度が非常に高く　−35～−45 dB　程度であるが，使用周波数帯を余り広くすることができず，かつ絶えず直流電流を流しておくために雑音レベルが高い．さらに炭素粉が湿気の影響を受けやすいことも欠点である．なお炭素粉は無煙炭を焼成して作ったものが多い．

（a）電話用炭素送話器　　電話用送話器は話声の伝送を目的とするもので，音質の良否よりもむしろ感度に重点をおいて設計されている．音質は会話の了解度が保たれる程度で十分であるが，増幅器なしで通話をするためには十分なる感度を必要とする．次に現在



第7・4図　デルビル送話器.



第7・5図　ソリッドバック送話器.

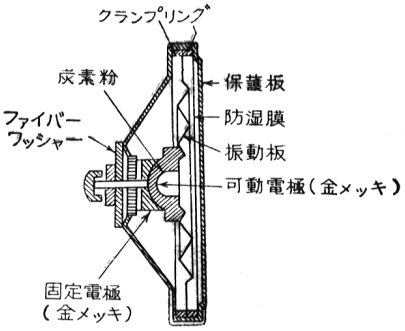
（8）　無線工学ポケットブック，第1･6編，1947年 3月版.

用いられる主なる送話器について簡単に説明しておく．

最も古くから用いられている送話器にデルビル送話器がある．これは尊ら磁石式電話器に用いられ，その構造の概略は第7・4図に示すようなものである．

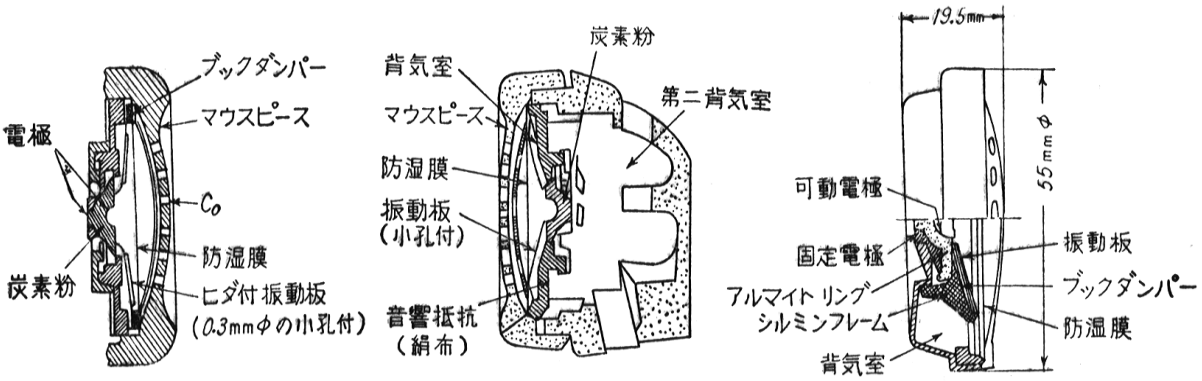
デルビル型を機構の上で改良したものに，ソリッドバック送話器があり，共電式電話器に用いられている．その概略を第7・4図に示す．

ソリッドバック型をさらに改良したものが 1–A 皿型送話器および 1–B 皿型送話器であり，わが国で3号電話器に使用されている（第7・6図）．その後アメリカで新型の F–1 送話器が現われ，さらに T–1 送話器が出現して特性が非常に改良された．わが国においても戦後 T–4送話器



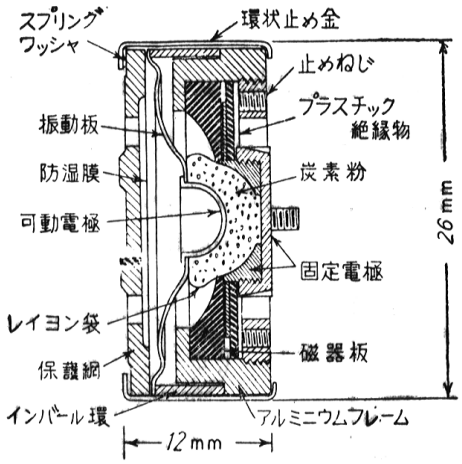
振動板は 0.076 mm ジュラルミン．

第7・6図　1–B 型送話器．



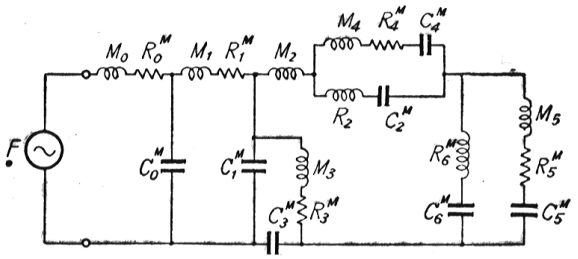
(a)　F–1 送話器(アメリカ)．　(b)　T–1 送　話　器．　(c)　T–4 送話器（日本）．

第7・7図（1）　新型送話器．



（d）　Western Electric Co. 製 ANB–MC−1 炭素マイクロホンの構造．酸素マスク内で使用するもので第二次大戦に米軍で使用した（BERANEK）．

第7・7図（2）　新型送話器．



M_0，R_0^M：マウスピースの孔の質量と抵抗，
C_0^M：図に示した箇所の空洞のコンプライアンス，
M_1，R_1^M：防湿膜の質量と抵抗，
C_1^M：防湿膜と振動板の間の空洞コンプライアンス，
M_2，R_2^M，C_2^M：振動板に関する量，
M_3，R_3^M，C_3^M：振動板背部の空洞に関する量，
M_4，R_4^M，C_4^M：振動板周辺に関する量，
M_5，R_5^M，C_5^M：炭素きょうに関する量，
R_6^M，C_6^M：振動板中央付根に関する量，
F：音圧によって振動板に作用する力．

第7・8図　F–1送話器の等価回路．

が作られ，４号電話器に使用されるようになった．

これらの新型送話器は第7･7図に示すような構造をしており，振動板はアルミニウム合金で作られ，中央に丸い凸部があり，半径方向にヒダがある．電極の内面は金めっきが施され，振動板の断面には防湿膜と２枚の有孔蓋がある．この型の特長は，

（ｉ）　口となす角度によって感度が変化しない，

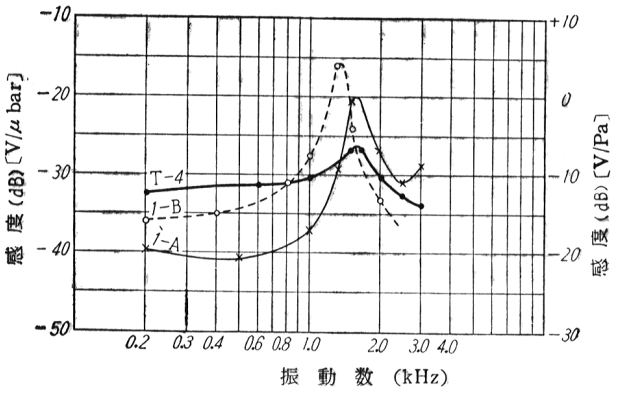
（ii）　寿命が長い，

（iii）感度が従来のものより約１０ dB 高く，平均　−30 dB 程度である，

（iv）　周波数範囲が広くなり，4 kHz あたりの感度が従来のものに比して遙かに増加している，

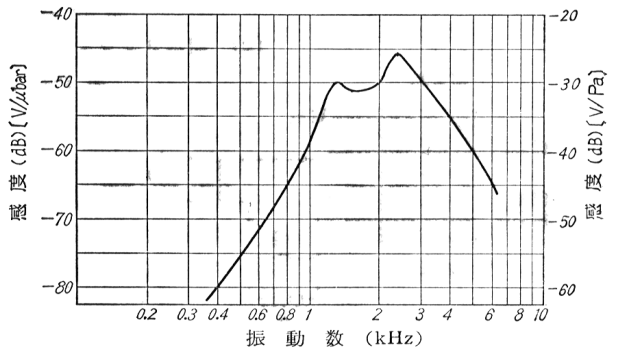
（ｖ）非直線ヒズミに基づく混変調ヒズミが減少している

という点にある．[1]　なお F−1　型の等価回路を第７・８図に示しておく．わが国の 1−A および 1−B 送話器と T−4 送話器との特性の比較を示すと，第７・９図（ａ）の通りである．[2] また同図（ｂ）には ANB−MC−1 の特性を示し，（ｃ）（ｄ）にはわが国の４号電話器の接続

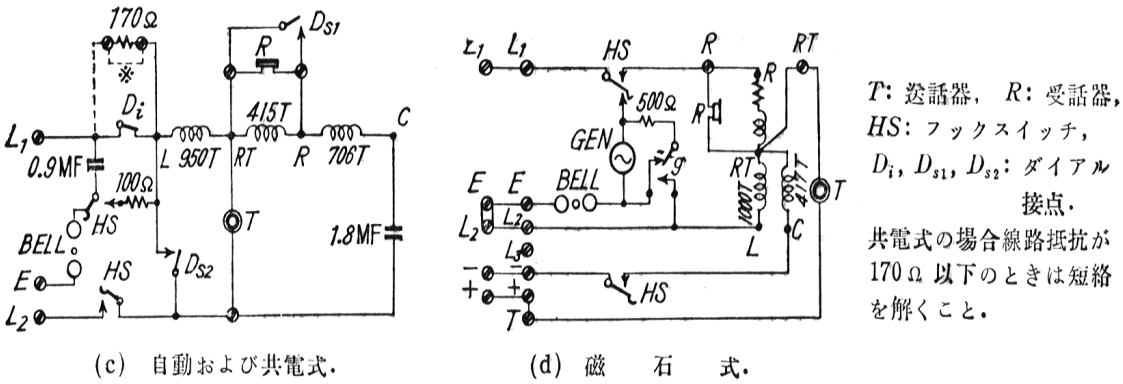


内部抵抗　1−A : $r = 120\,\Omega$,　$20\log\sqrt{r} = 20.8$ dB.
1−B : $r = 50\,\Omega$,　$20\log\sqrt{r} = 17$ dB.
T−4 : $r = 70\,\Omega$,　$20\log\sqrt{r} = 18.5$ dB.

(a)　電話用送話器の特性の例.



(b)　ANB−MC−1 炭素マイクロホンの特性.



(c)　自動および共電式.　　(d)　磁　石　式.

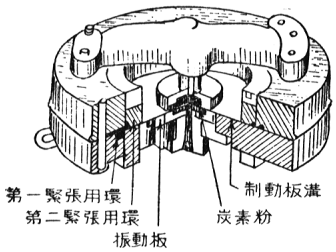
第7･9図　　電 話 機 接 続 図.

（1）　八木:“音響科学”オーム社.
W.C.JONES :“Instrument for the New Telephone Sets.”
A.H.INGLIS :“Transmission Feature of the New Telephone Sets” B.S.T.J., Vol.17, p.338 − 380, 1938.

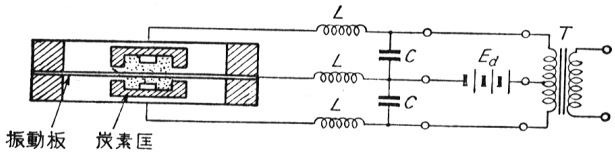
（2）　電気通信省版“４号型電話器の概要について”1949年 11月.

を示す.

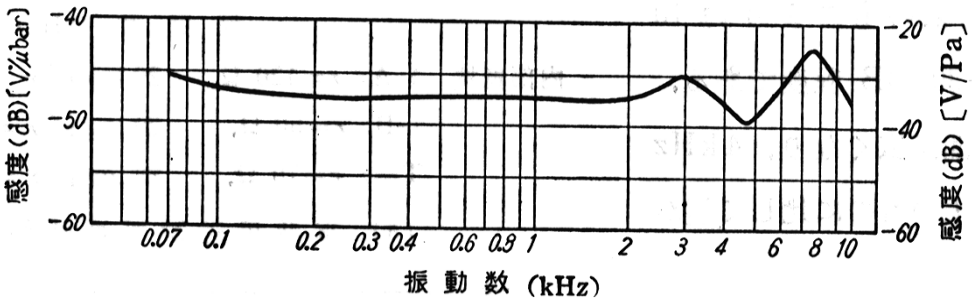
（b）炭素マイクロホン　　炭素マイクロホン[3] の初期のものでかなり良い特性を有するものに Western Electric Co. の両ボタン型マイクロホン[4] がある. 構造は第7・9図に示すようにジュラルミンの振動板の両側に炭素



(a)　両ボタンマイクロホンの構造.

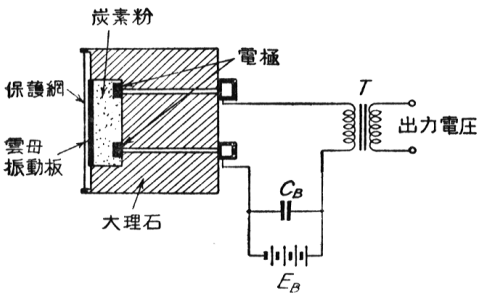


(b)　両ボタン型マイクロホンの結線.

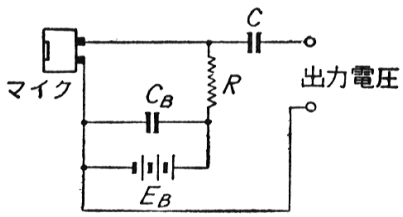


(c)　両ボタンマイクロホンの周波数特性.

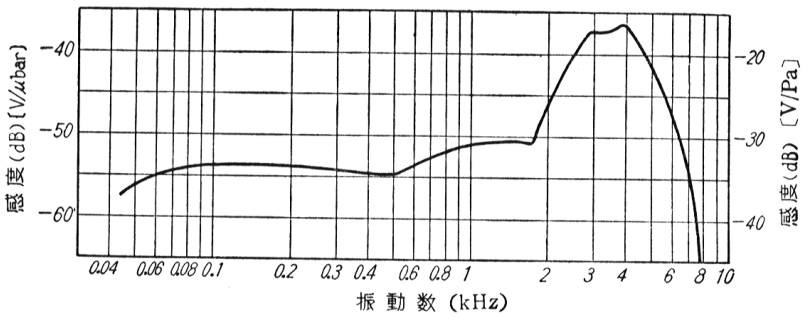
第7・10図



(a)　変 成 器 結 合.



(b)　抵 抗 容 量 結 合.



(c)　REISE マイクロホンの特性の例.

第7・11図

(3)　carbon microphone
(4)　double button microphone

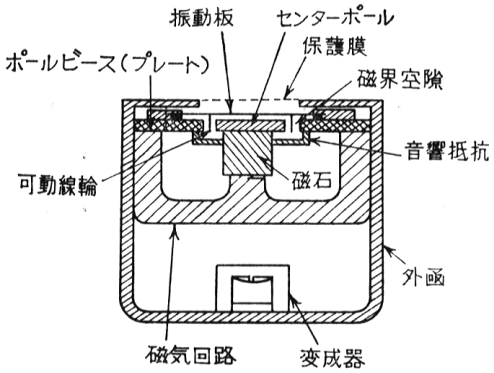
筐を備えているので両ボタンの名がある．各ボタンの直流抵抗約 100 Ω ，直流電流は約 2.7 mA で動作させる．感度の周波数特性は第7･10図に示してある．

炭素マイクロホンとして最近まで広く用いられていたものに REISZ マイクロホンがある．これは E. REISE (1923) が考察したもので，大理石の外函に小さな窪みを作って炭素筐とし，振動板には雲母板を使用したもので，大理石によって慣性を大きくすると共に耐湿構造としたものである．

構造の概略は第7･11図に示す．直流抵抗は約 1000 Ω で雑音少なく動作安定である．出力電圧を取り出すには (a) のように変圧器を用いるか，または (b) のように抵抗 R と蓄電器 C とを用いる．この場合 R には 20～50 kΩ を用いるので E_B はその電圧降下だけ高電圧としなければならない．

7・3・3　可動線輪マイクロホン（ダイナミックマイクロホン）

動電型マイクロホン[1] の最も代表的なものに可動線輪マイクロホン[2] がある．この型のマイクロホンの基本的な構造は第7･12図に示す通りである．



第7・12図　可動線輪型マイクロホンの基本的構造.

いま，振動板の有効面積を $S\,(\mathrm{m}^2)$ ，振動板に加わる音圧を $\dot{P}\,(\mathrm{Pa})$ とすると，振動板を駆動する力は

(1)　$$\dot{F} = \dot{P}S \quad (\mathrm{N}),$$

振動板を含む振動系の機械インピーダンスが Z^M であれば振動板の振動速度は

(2)　$$\dot{\Xi} = \frac{\dot{F}}{Z^M} = \frac{S}{Z^M}\dot{P} \quad (\mathrm{m/s}),$$

磁気回路の空隙の磁束密度を $B\,(T)$ ，可動線輪の導線の長さを $l\,(\mathrm{m})$ とすれば，可動線輪の端子に生ずる起電力は

(3)　$$\dot{E} = Bl\dot{\Xi} = \frac{BlS}{Z^M}\dot{P} \quad (\mathrm{V}),$$

ここに Z^M は一般に角周波数 ω の函数であり，ある固有振動数の近傍では

(4)　$$Z^M = R^M - i\left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right)$$

の形で表わされる．

このマイクロホンの電気出力が周波数に無関係に印加音圧に比例するためには (3) の Z^M が周波数に無関係な定数であることが必要である．そのためには振動系のインピーダンスを使用周波数範囲内で

(5)　$$R^M \gg \omega M, \qquad R^M \gg \frac{K}{\omega}$$

(1)　electro－dynamic type microphone
(2)　moving coil microphone，通常これをダイナミックマイクロホンと呼んでいる．

であるように選べばよい．これは，すなわち抵抗制御である．このような条件が満足されれば（3）は

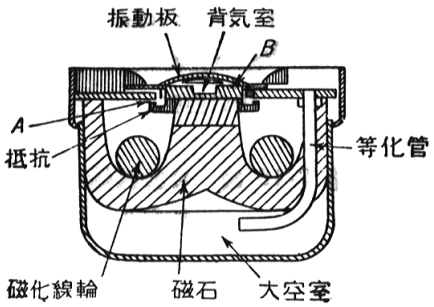
（6）　$$\dot{E} = \frac{BlS}{R^M}\dot{P} \qquad (\mathrm{V})$$

となる．なおこのときの振動板の速度は

（7）　$$\dot{\Xi} = \frac{S}{R^M}\dot{P} \qquad (\mathrm{m/s})$$

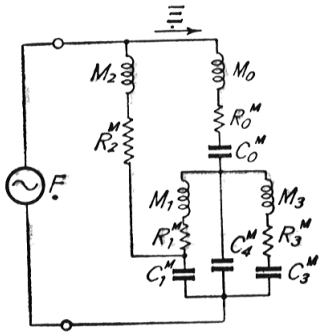
である．ここに R^M は（5）を満足することが必要であるが，さりとて余り R^M を大きくすると（6）で明らかなように出力電圧が小さくなり感度が悪くなる．実際には（6）が余り小さくならぬ程度で（5）を満足するように設計する．そのためには低周波数におけるスティフネスリアクタンス $\frac{K}{\omega}$ と高周波における質量リアクタンス ωM とを他の要素で打消して全体としてリアクタンスが十分小さくなるように設計する．

可動線輪型マイクロホンは WENTE および THURAS [3]（1931）によって始めて改良された優秀なものが作られ，それ以後次第に進歩して現代に至っている．その構造は第7・13図（a）に示すようなものであり，特長とする点は振動板を 0.025 mm のジュラルミン板で作り，中央部を球形のドームとして高次振動姿態の発生を防止し，可動線輪の質量を軽くすると共に巻間率 [4] を良くするためにアルミニウムリボンを重ね巻き [5] にし，非常に狭い磁界空隙内にそれを挿入した．



M_0：振動板と線輪の質量，
R_0^M：振動板周辺の抵抗，
C_1：大空室のコンプライアンス，
M_3，R_3^M：B部細菅の質量と抵抗，
C_4：振動板背面の空気のコンプライアンス．

（a）　構　造．



C_0：振動板のコンプライアンス，
M_1，R_1^M：A部空隙内の空気の質量と抵抗，
M_2，R_2^M：等価管内空気の質量と抵抗，
C_3：背気室のコンプライアンス．

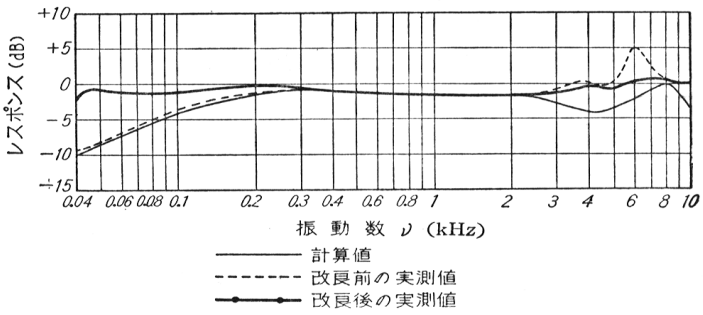
（b）　等 価 回 路．

第7・13図　WENTE の可導線輪マイクロホン

このようにして試作したマイクロホン周波数特性は第7・14図の曲線 B に示すような特性であり，低音部の感度が低下し，かつ 6(kc) あたりで鋭い共振峰を示した．そこでこのマイクの等価回路を第7・13図（b）のように求め，これから感度を計算してみると第7・14 図の曲線 A のようにな

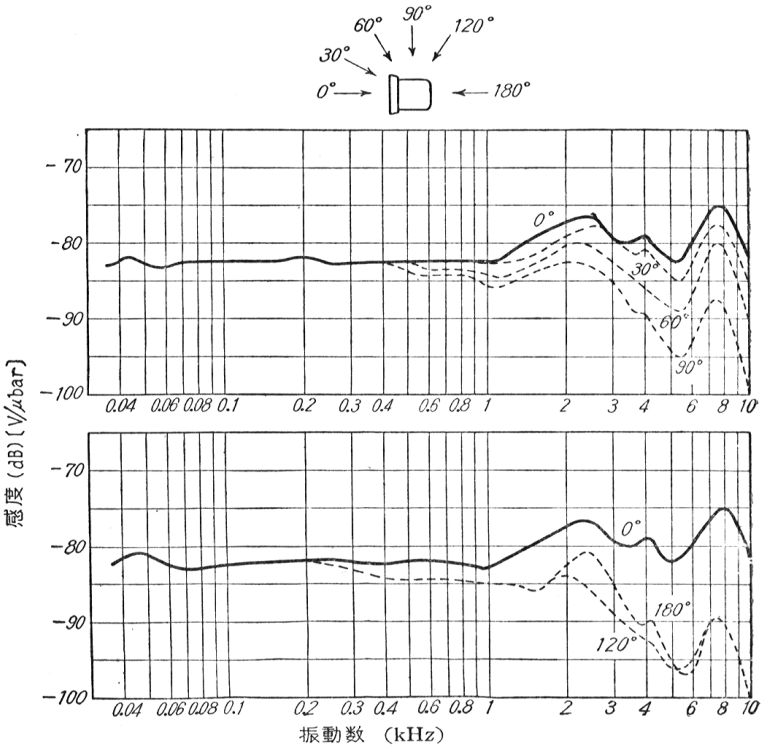
（3）　E.C.WENTE and A.L.THURAS : “ Moving Coil Telephone Receivers and Microphones ” B.S.T.J.,Vol.10, p.565-575, 1931; J.A.S.A.,Vol.3, p.44－55, 1931.
（4）　winding space factor
（5）　edge－wise

り高音部を除けば良く一致する．そこで高音部の共振の原因を探した所が，これは振動板背面の空洞の共振であることがわかり，これを除去するために第7・13図（a）に示すように振動板背面に小さな空室をつくり，これと振動板背面の空隙とを細管で結合した．この細管は粘性による抵抗として作用するので共振によるピークを抑圧することができた．低音部の感度の低下は振動系の構造[5]に原因するものであるから別途に補償する必要があり，この目的のために磁気回路の内部の空洞と外気とを等化管を用いて連絡し，HELMHOLTZ 共振器としての空洞共振を利用して低音部の感度を増大することができた．



第7・14図　WENTE の可導線輪マイクロホンの周波数レスポンス．

このような改良の結果，第7・14図のような特性が得られた．なお第7・15図はこのマイクの指向特性を示すものである．なおこれらの測定は音場較正によっている．



第7・15図　WENTE の可導線輪マイクロホンの感度とその指向特性．

このマイクロホンの設計に当り，$C_4 << C_1$，$M_1 << M_2$ であるようにし，かつ R_1, R_2, R_3 が十分大きくなるように選ぶ．このようにして得られたものの特長は

（i）　感度は約 −82 dB，

（ii）　電気的インピーダンスが低く，直流抵抗約 27 Ω，

（iii）　雑音が少なく，17 kHz までの範囲で雑音出力電圧は 7×10^{-8} V 程度であり，その等価音圧換算値は耳の最小可聴限界に近い，

（iv）　電気的インピーダンスと力係数が変化せず安定である，

（5）　振動板を支持するためのスティフネスによる．

（v）　広い振幅範囲にわたって非直線ヒズミを生じない，

（vi）　気圧や湿度の影響を受けない

などの諸点であるが，欠点として

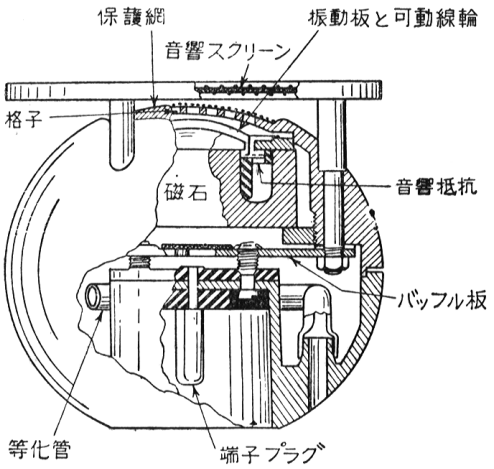
（i）　感度を良くしようとすると形状を大きくせねばならぬので，高周波の音に対して回折による音場の乱れを生じ特性が悪くなる，

（ii）　制御抵抗が十分に大きくないと振動系の自由振動が制動されないので過渡特性が悪くなり，衝撃音に対する特性が劣化する

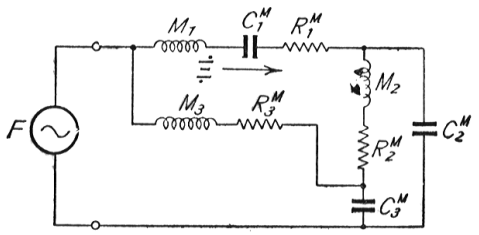
などの点がある．なお WENTE より以前に MARCONI 会社の SYKES が可動線輪マイクロホンの研究をして成得たがその方式は現在は用いられていない．

可動線論マイクロホンは圧力型であるから，本来無指向性である．しかし WENTE の可動線論マイクロホンは形状が大きいために波長の短かい高音に対して無指向性が保たれず特性が劣化している．

この欠点を除くために MARSHALL および ROMANOW [6] は球形の可動線輪マイクロホンを作り，音場の乱れを極力小さくすると共に音の入射方向による特性の相違をも減少させて無指向性マイクロホンを作った．球形は最も音場を乱すことの少ない形であることが明らかにされているが [7]，それでも球の寸法と同程度またはそれ以下の波長の音波が振動板に直角に入射する場合には相当に散乱する．散乱の影響を小さくするためには球の寸法を極力小さくする必要があるが，振動板を余り小さくすると感度が低下するので，直径約 5 cm 以下にはできない．一方入射波の方向による感度の変化も，波長が球の寸法と同程度以下の音波に対して顕著に現われる．これを防ぐために音響抵抗がその質量



（a）　構　造．



M_1, C_1^M, R_1^M：振動板と可動線輪に関する量，
C_2^M：振動板背後の空気室のコンプライアンス，
M_2, R_2^M：磁界空隙背後の細隙に関する量，
C_3^M：背後の大空室のコンプライアンス，
M_3, R_3^M：等価管に関する量，
F：音圧によって振動板に作用する力．

（b）　等 価 回 路 （OLSON）．

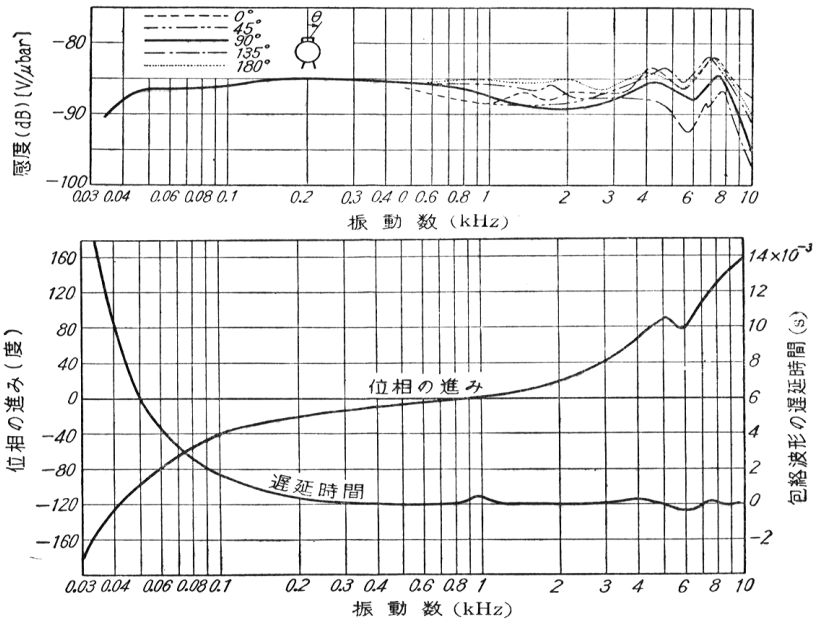
第7・16図　W. E. 630－A　無指向性マイクロホン．

（6）　R.N.MARSHALL and F.F.ROMANOW :“ A Non-Directional Microphone” B.S.T.J., Vol. 15, p.405-423,1936.

（7）　S.BALLANTINE :“ Effct of Diffraction around the Microphone in Sound Measurement” Phys.Rev., Vol.32, p.988, 1928； IRE, Vol.16, p.1639－1644.1928, 3・3 参照.

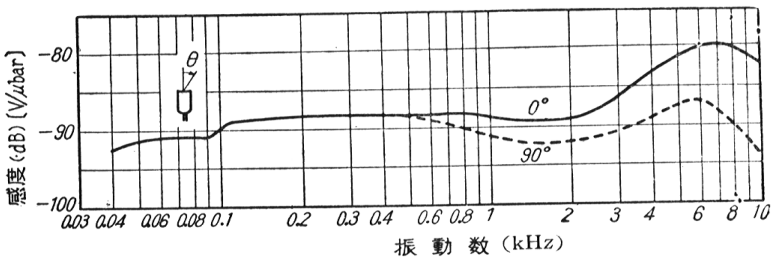
に比して極めて大きな物質で音響スクリーンを作り振動板の前面に設けた（第7・16図）．

このマイクロホンに波長の長い低音が入射する場合にはマイクロホンの周囲の音圧が一様に変化するので，振動板に加わる圧力は音の入射方向やスクリーンの影響を受けないが，波長の短かい高音が入射する場合には，正面から入射する音波はスクリーンを通して弱められて振動板に加わり，横方向から入射する音波はスクリーンの作用を受けずに直接作用して振動板前面の音圧が振動板に加わり，後方から入射する音波はスクリーン表面で反射されて振動板に加わる．このように波長の短かい音波に対して前方から入射する場合には減衰器となり，後方から入射する場合には反射板となって方向による感度の変化を軽減する．さらに振動板を小型にしたために生ずる感度の低下を補うために振動板を薄くして軽くし，かつそのスティフネスを小さくした．その結果生ずる振動板の高次振動姿態を防ぐために振動板の中央部を球形とし，周囲にヒダ[8]をつけて15 kHz あたりまで高次姿態が生じないようにしてある．マイクの内部をも改良し磁気空隙の背面に音響抵抗を設けて振動板の制動を良くし，バッフル板を設けて球体内の空洞の自由振動による共振を抑圧し，等化管を用いて球の内部の圧力を外圧に等しくすると共に低音部の感度を増している．感度は　－85 dB　程度であり，その特性は第7・17図に示すようなものである．なおこのマイクロホンは垂直に立てて音波が90°方向から主として入射するような状態で使用する．



第7・17図　W. E. 630－A　無指向性マイクロホンの特性（BERANEK）．

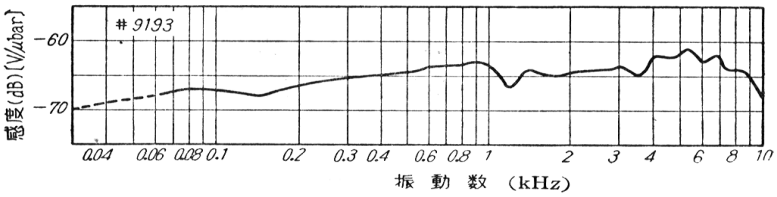
圧力型マイクロホンは本来無指向性なのであるが，入射音の波長



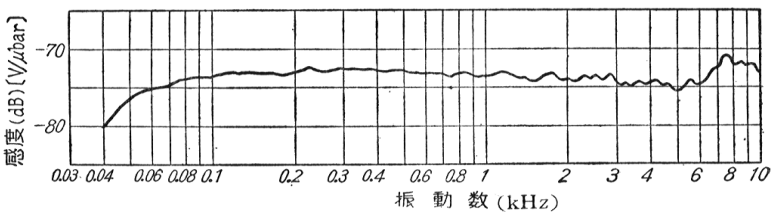
第7・18図　W. E. 630－A の特性（ BERANEK ）．

(8)　corrugation

がマイクロホンの寸法と同程度以下となると，音場が乱されるために指向性を有するようになる．したがってマイクロホンの寸法を十分に小さくすれば，かなり高周波音まで無指向性にすることできる．現在では，磁気材料が発達して小型で強い磁石が得られるようになったので小型でしかも感度が余り低くない可動線輪型マイクロホンが作られるようになり，ことさら無指向性マイクロホンと呼称する必要がなくなって来た．形状が小さい圧力型マイクロホンは大体において無指向性と見なして差支えない．第7・18図，第7・19図および第7・20図に現代用いられている可動線輪マイクロホンの例を示している．[9]



第7・19図　日本電気製　NEC 633－BLS の特性.



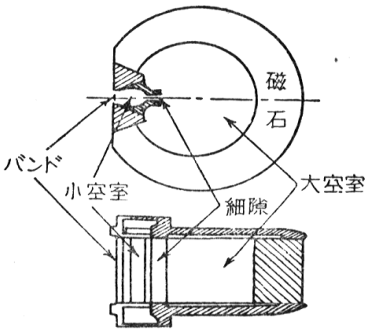
第7・20図　東京通信工業製 F－600 A の特性.

7・3・4　圧力型バンドマイクロホン

可動線輪マイクロホンの可動部分の質量を極端に軽くするために，振動板と線輪との作用を1枚のアルミニウム箔で行わせるような構造のマイクロホンが SCHOTTKY および GERLACH (1924) によって考案された．これは可動線輪マイクロホンの線輪の巻数を1回とし，かつ線輪と振動板とを兼用にしたと考えられる．その電気インピーダンスは非常に低いので変圧器を自蔵し，その二次側から出力電圧を取り出さねばならぬ．この型のマイクロホンは振動体が帯状をなしているのでバンドマイクロホンと呼ばれる．

出力電圧が音圧に比例するいわゆる圧力型とするには，抵抗制御とすることが必要で，そのためには振動系の質量および弾性を極力少なくせねばならぬ．振動板自身の質量は無視し得ても，空気の附加質量は面積で定まる一定値以下にすることができない．そのためバンドの後方に吸音物質を配置して機械抵抗を高める必要がある．

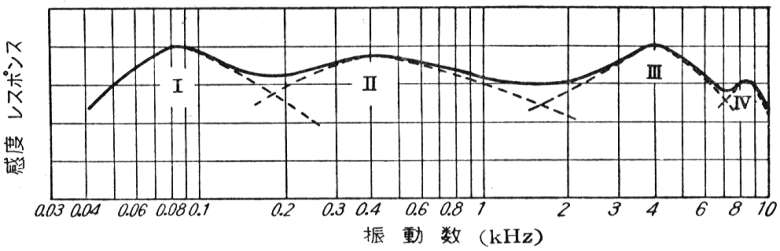
バンドマイクロホンは，その後 HARTMANN [1] によって改良され，かなり良い特性が得られるようになったが，現在では他に優秀なマイクロホンが現われたので用いられなくなった．HARTMANN のバ



第7・21図　バンドマイクロホンの構造.

(9)　可脚線輪マイクロホンは現在わが国でも多数作られている.ここに示すのはその代表的なものである.
(1)　C.A.HARTMANN :“ Ein neues electrodynamisches Bandmikrophon” E.N.T., Vol.8, p. 289－297,1931.

ンドマイクロホンは第7・21図に示すような構造をしていて，バンドのすぐ後に小空室があり，これが細隙を通して磁気回路の作る大空室に連絡している．細隙は抵抗として作用し，大空室は共振することによって低音の感度を高めている．可聴周波帯域にわたって周波数特性を一様にするためにバンド自身の共振を 80 Hz あたりに作り，大空室の共振を 400 Hz，バンドと小空室との合成共振を 4000 Hz，小空室が1個の閉管として動作する共振を 8000 Hz に生じるようにし，全帯域にわたってほぼ一様な感度となるようにしてある．その原理を第7・22図に示しておく．このマイクロホンの指向特性は 150～250 Hz では単一指向性となり，2000 Hz 以上では指向性が乱れることが指摘されている．[2]

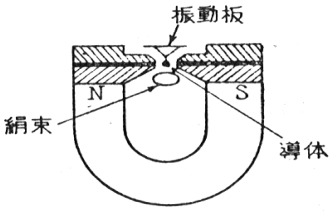


Ⅰ：バンドの固有振動数，
Ⅱ：大空室の固有振動数，
Ⅲ：バンドと小空室の合成共鳴振動数，
Ⅳ：小空室が閉管として作用する共鳴振動数．

第7・22図　バンドマイクロホンの共鳴作用説明図．

7・3・5　インダクターマイクロホン

可動線輪型の一つの変形として試みられたものにインダクターマイクロホン[1]がある．その構造は磁界内で振動し得る1本の垂直導体に振動板を附加したものである．振動板は金属または紙製で，V形支持物により導体と結合されている．圧力型であるから抵抗制御を必要とするが，感度を高めるためには抵抗は小さいことが望ましい．周波数特性は次に述べるリボンマイクには劣るが，感度が良く堅牢であるから風の吹く野外などで用いるに適している．構造の概略は第7・23図に示す．高音域の感度を高めるために音響的共振を利用し，低音域の感度を高めるために細管を用いて外気と連絡し，また絹束を導体の背後に配置して振動板の質量リアクタンスを補償し，振動板前面に単層ないし3層の絹を張って高音域の感度の上昇しすぎるのを防いでいる．電気インピーダンスは非常に低いので出力電圧は変圧器を通して取出している．



第7・23図　インダクターマイクロホン．

7・3・6　速度型リボンマイクロホン（圧力傾度型リボンマイクロホン）

前節7・3・5に述べたバンドマイクロホンのバンドの背面をも音場に曝しかつ振動片（リボン）の形をなるべく小さくして質量制御の状態とすると，リボンは空気の粒子速度に比例して振動し，その出

(2)　佐藤(孝二)，河合(平司)，その他：“各種マイクロホンの特性に関する研究，その二，指向特性” 航研報告，第 12 巻，p.332-344，1937.

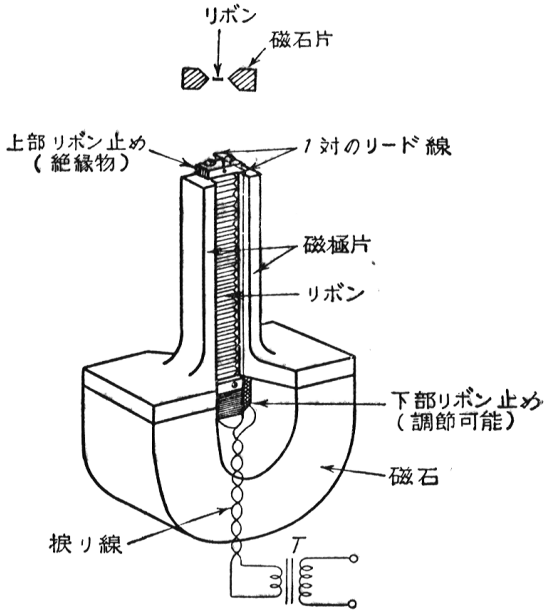
(1)　M.RETTINGER：“Review of Microphones” RCA Rev.，Vol.2，p.251－257. 1937. 誘導子マイクロホンともいう．

力電圧は周波数には無関係に音場の音圧に比例するようになり，優秀なマイクロホンとなることをOLSON[1]が指摘し，これをリボンマイクロホン[2]と命名した．その構造は，リボンの前面と背面とを均等に音場に曝さねばならぬので，磁極片の形を工夫して空気に対する抵抗を少なくし，第7・24図のようなものとなっている．

このマイクロホンの動作機構を解析するために，平面進行波音場内に置かれたリボンの振動を考えて見る．第7・25図のように平面波の進行方向を x とし，リボン面の法線が x 方向と一致するようにリボンを配置する．リボンの位置を座標原点 O とし，リボンの見掛の厚さ，すなわち前面と後背面との実効的な距離を $2d$ (m) とする．リボンによって音場が乱されないものとすると，x 方向に進行する平面波の速度ポテンシャルは

(8)
$$\phi = A\cos k(ct-x),$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

で表わされるから，空気の粒子速度 u および音圧 p は



リボンの長さ約 7 cm，リボンの幅約 4 mm.

第7・24図　リボンマイクロホンの構造.

(9)
$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = -kA\sin k(ct-x) = u_0\sin k(ct-x) \qquad \text{(m/s)},$$

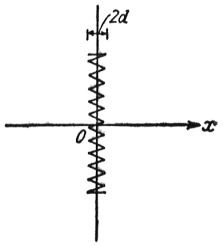
(10)
$$p = -\rho_0\frac{\partial\phi}{\partial t} = \rho_0 ckA\sin k(ct-x) = p_0\sin k(ct-x) \qquad \text{(Pa)}.$$

リボンの前面　$x=-d$　の位置における音圧は

(11)
$$p^{(-)} = p_0\sin k(ct+d),$$

リボンの背面　$x=+d$　の位置の音圧は

(12)
$$p^{(+)} = p_0\sin k(ct-d)$$



第7・25図

であるから，正面から $+x$ 方向に向ってリボンに加わる圧力は

(13)
$$\Delta p = p^{(-)} - p^{(+)} = 2p_0\sin kd\cdot\cos kct$$

となる．d が音波の波長 λ に比して極めて小さく $kd \ll 1$ である場合には

(14)
$$\sin kd \approx kd$$

とおけるからリボンに加わる圧力（13）は

(15)
$$\Delta p \approx 2kd\,p_0\cos kct,$$

(1)　H.F.OLSON :“Mass Controlled Electrodynamic Microphones, The Ribbon Microphon” J.A.S.A., Vol.3, p.56-68, 1931.

(2)　velocity microphoneともいう.

よって，リボンの表面積を S とすれば，リボンに加わる起振力は

(16)　$$F = S\Delta p = \frac{2\omega d}{c} p_0 S \cos kct \qquad (\mathrm{N}).$$

リボンを含む振動系の機械インピーダンスを Z^M とすれば，リボンの振動速度は

(17)　$$\dot{\xi} = \frac{F}{Z^M} = \frac{2\omega}{Z^M} \cdot \frac{d}{c} p_0 S \cos kct \qquad (\mathrm{m}/s)$$

であるが，インピーダンス Z^M が

(18)　$$Z^M \approx \omega M, \qquad \omega M >> R^M, \qquad \omega M >> \frac{K}{\omega}$$

を満足する慣性制御系であれば，リボンの速度は

(19)　$$\dot{\xi} = \frac{2}{M} \frac{d}{c} p_0 S \cos kct$$

となり，周波数に無関係に原点の音圧 p_0 のみに比例することが示される．しかして（9）と（10）とを用いると（19）は

(20)　$$\dot{\xi} = -\frac{2}{M} \rho_0 d S u_0 \cos kct$$

とも書くことができ，粒子速度 u_0 に比例することが示される．(19）または（20）の実効値を用いて(8）に代入すると，リボンの両端に現われる起電力は

(21)　$$\underset{\cdot}{E} = \frac{2B}{M} \frac{ld}{c} S \underset{\cdot}{P_0} = -\frac{2B}{M} l d \rho_0 S \underset{\cdot}{U_0} \qquad (\mathrm{V})$$

となる．ここに M は振動系の実動質量，l はリボンの長さ，ρ_0 は空気の密度である．

実際に第7・24図のような構造の振動系の機械インピーダンスが（18）の関係を満足しているかどうかは疑問である．よって機械インピーダンス Z^M について更に検討する必要がある．リボンの質量のみの呈するインピーダンスは

(22)　$$Z_R^M = -i\omega M_R = -iX_R^M \qquad (\mathrm{N \cdot s/m})$$

であるが，リボンが振動するときに生ずる空気の反作用による附加質量 M_A は 5・2・2 の方法にしたがって求めねばならぬ．すなわちリボンの振動速度の実効値を $\underset{\cdot}{\dot{\Xi}}$ とすれば，リボンの面に作用する反作用力は 5・2・2 の（21）より

(23)　$$\underset{\cdot}{F_c} = -\frac{i\omega\rho_0}{2\pi} \underset{\cdot}{\dot{\Xi}} \int_S \left[\int \frac{e^{ikr_1}}{r_1} da \right] da'$$

で与えられる．ここに r_1 は面上の微小面積 da と da' との間の最短空気通路の距離であり，積分範囲 S はリボンの両表面を含んでいる．リボンの表面では常に外向法線の方向を正と考えるので，$-x$ 方向を向いている面上の積分をするときは $\underset{\cdot}{\dot{\Xi}}$ を負の値として取扱う必要がある．(23）の $\underset{\cdot}{F_c}$ の値が求まればリボン面から見た空気のインピーダンスは

(24)　$$Z_A^M = \frac{\underset{\cdot}{F_c}}{\underset{\cdot}{\dot{\Xi}}} = R_A^M - iX_A^M \qquad (\mathrm{N \cdot s/m})$$

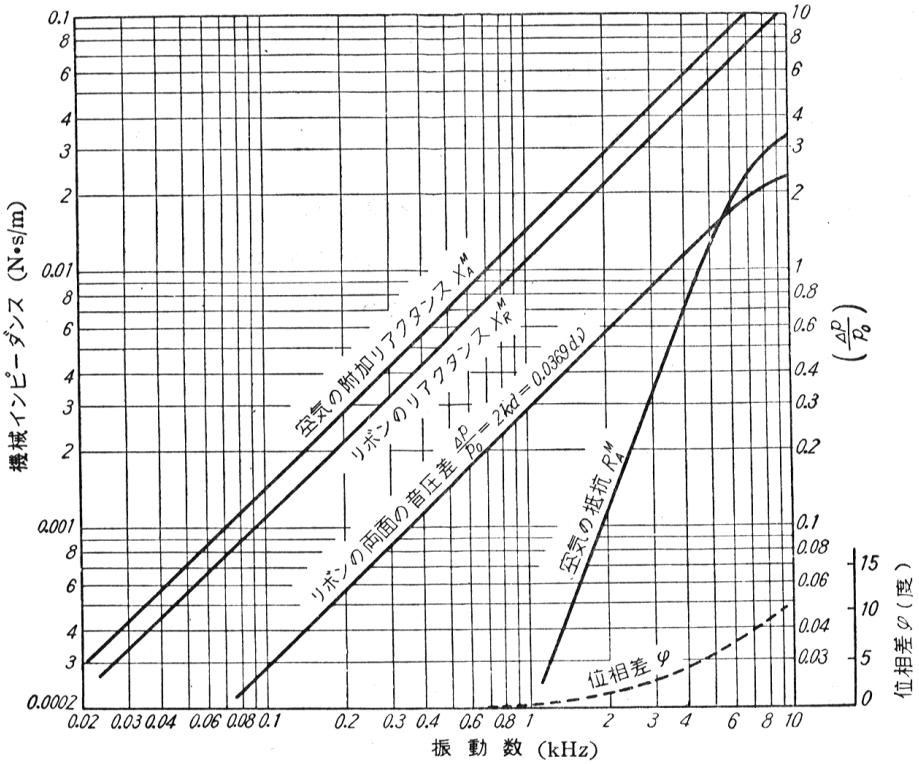
と表わされる．したがって附加質量は

(25)　$$M_A = \frac{X_A^M}{\omega} \qquad (\mathrm{kg})$$

となる．リボンと磁極片との間の空隙のリアクタンスがリボンの質量リアクタンスと並列に入ることになるが，その影響は微小である．電気回路が機械振動系に及ぼす影響は5・5・1の（19）または（20）で求められるが，このマイクロホンの構造上力係数 A が小さいので動時機械インピーダンス Z_m^M も小さく，これも無視して差支えない．よって（22）と（24）とより機械インピーダンスは

(26)　$$Z^M = R_A^M - i(X_R^M + X_A^M) \qquad (\mathrm{N \cdot s/m})$$

となる．ある特定のリボンについてこのインピーダンスを求めてみると第7・26図のように，その実数部は周波数の平方 (3) に比例するが，その値は $(X_R^M + X_A^M)$ に比べて極めて小さく，そのリアクタンス $X_R^M + X_A^M$ は周波数に比例する函数と考えることができるので（18）から（21）までの関係が成立する．なお音圧 $\dot{P}$ と振動板の速度 $\dot{\Xi}$ との位相差 φ の周波数特性は第7・26図の曲線 φ に示すようなものである．これよりリボンマイクロホンは理論的に如何に優れた特性を有しているかがうかがわれる．なお図には（15）の $(\Delta p/p_0)$ の周波数による変化をも示してある．

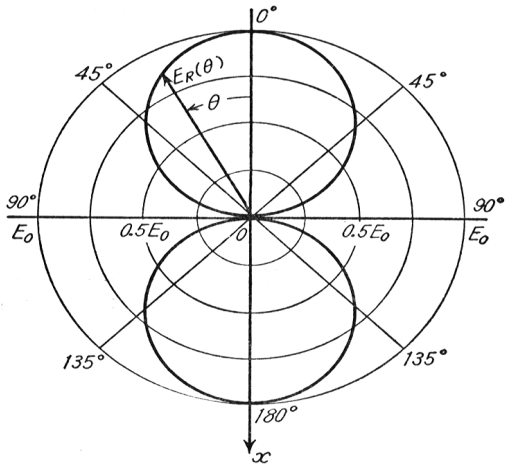


第7・26図

リボンマイクロホンの他の一つの特長はその指向性にある．構造および動作原理から推察すれば，音波がリボンの正面または背面方向から入射する場合には能率よく動作するが，側面方向から入射す

(3)　5・2・2の（38）参照．

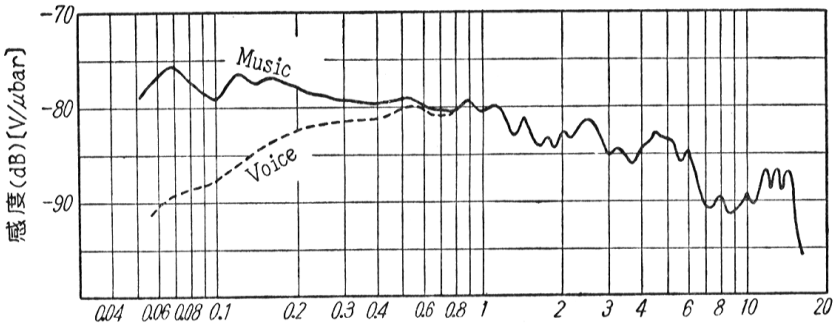
る場合にはリボンの前面と後面の間の圧力傾度が生じないためにほとんど動作しないであろうと想像される．このことは音場の空気粒子の運動を考えて見ても理解されよう．粒子速度ベクトルがリボン面に垂直であれば，リボンは励振されるが，粒子速度がリボン面と接線方向であればリボンは振動しないであろう．粒子速度の方向は音の入射方向と平行であるから，リボンの法線と音の入射方向とのなす角を θ とすると，リボンの振動速度は $\cos\theta$ に比例することが想像される．リボンマイクロホンの感度の指向性係数を求めてみると第7・27図のように，$\theta=0^\circ$ と $\theta=180^\circ$ で極大となり，$\theta=90^\circ$ と 270° で零となるような特性を有している．実際の測定においても 100 Hz から 6000 Hz までほとんど不変の指向特性が得られる．これを双指向特性[4]または８字型の指向特性と呼ぶ．一定の強さの入射音波がリボンマイクロホンへ θ 方向から入射する場合の出力電圧は，$\theta=0$ の場合を E_0 とすれば，



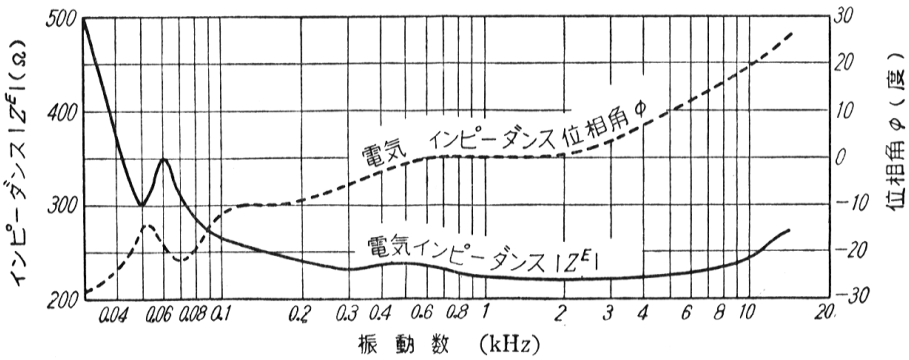
$E_R(\theta)=E_0\cos\theta.$

第7・27図　リボンマイクロホンの指向性.

(27)　$$E_R(\theta)=E_0\cos\theta \qquad (\mathrm{V})$$



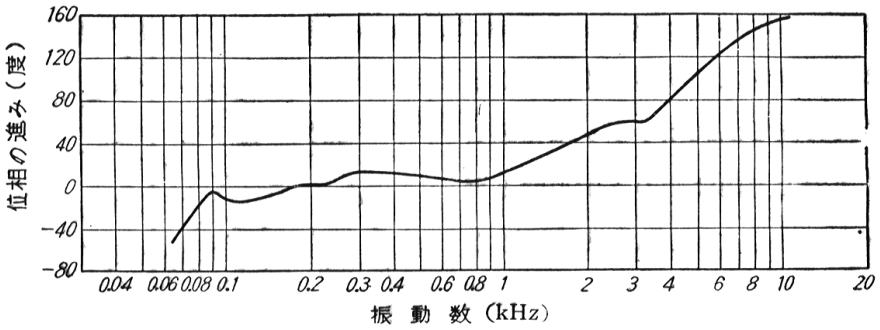
(a)　RCA 44-BX リボンマイクロホンの感度の周波数特性（富田）.



(b)　RCA 44-BX リボンマイクロホンの電気インピーダンス (BERANEK).

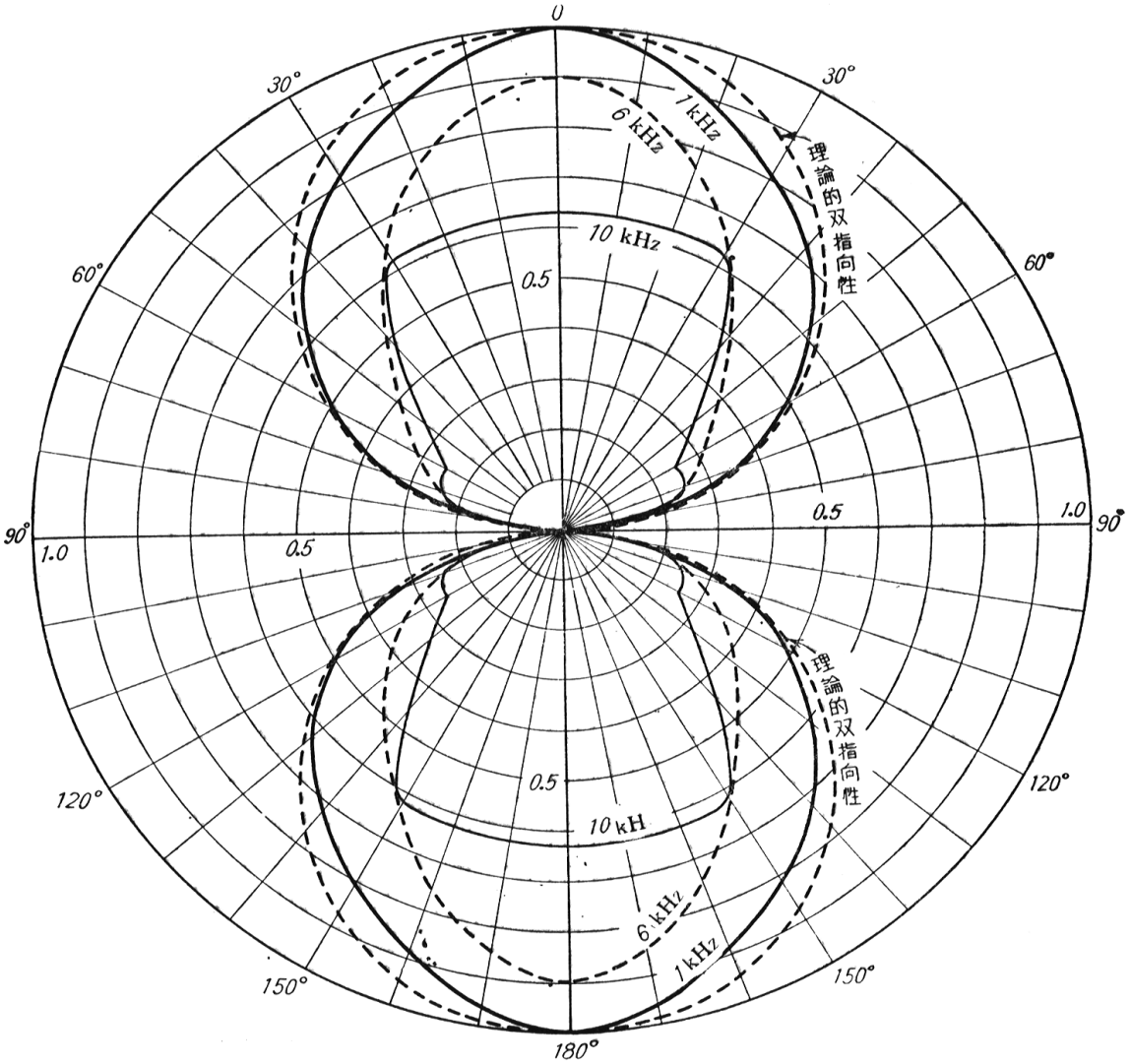
第7・28図（1）　リボンマイクロホンの特性.

(4)　bi-directional characteristics



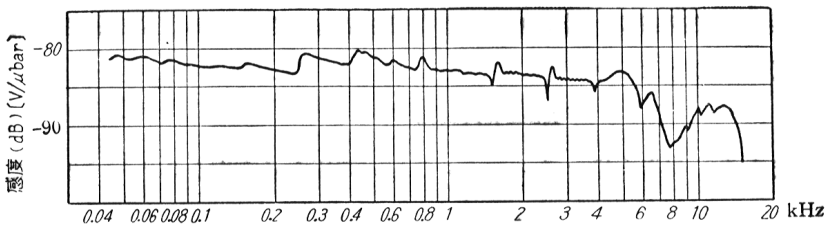
開放端子出力電圧と自由音場の音圧との位相差（BERANEK）.

(c)　RCA 44–BX リボンマイクロホンの位相特性.

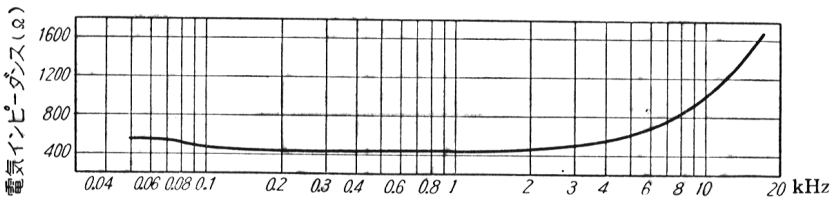


(d)　RCA 44–BX リボンマイクロホンの指向特性.

第7・28図（2）　リボンマイクロホンの特性.



(e)　東芝製マツダ A 型リボンマイクロホンの感度の周波数特性.



(f)　東芝製マツダ A 型リボンマイクロホンの電気インピーダンスの周波数特性.

第7･28図（3）　リボンマイクロホンの特性.

で与えられる．残響の多い室内の音のように四方から一様な音圧が加わる場合にリボンマイクロホンから得られる出力電圧は

(28)
$$E_{V'} = \sum_{\Omega=0}^{\Omega=4\pi} E_R^2 = 4\pi E_0^2 \int_0^{\pi} \cos^2\theta \cdot \sin\theta \, d\theta = \frac{4}{3}\pi E_0^2 \qquad (\mathrm{V})$$

であるが，同じ音を正面方向の感度が等しい無指向性マイクロホンで受けたときの出力電圧は

(29)
$$E_p = \sum_{\Omega=0}^{\Omega=4\pi} E_0^2 = 4\pi E_0^2 \qquad (\mathrm{V}),$$

よってリボンマイクの指向性能率は

(30)
$$\eta = \frac{\sum_{\Omega=0}^{\Omega=4\pi} E_R^2}{\sum_{\Omega=0}^{\Omega=4\pi} E_0^2} = \frac{1}{3}$$

となる．

リボンマイクロホンは周波数特性がよく，その指向性に特長があるので独特の用途があり，放送や舞台あるいは測定等に広く使用されるようになった．[5] 第7・28図に実際のリボンマイクロホンの感度の周波数特性を示しておく[6]．特性上の 8 kHz の谷は，この振動数でリボン前面と背面の実効距離が1波長となることを意味している．よって $2d$ は約 4 cm と考えられる．

7・3・7　動電型単一指向性マイクロホン

速度型リボンマイクロホンは広い周波数範囲にわたって双指向性を有するので，これと無指向性マイクロホンとを併用して両者の出力電圧を加え合せれば，音波が正面から入射する場合には両者の出力電圧が同相に相加わり，背面から入射する場合には速度型マイクの出力の位相が逆転するために両

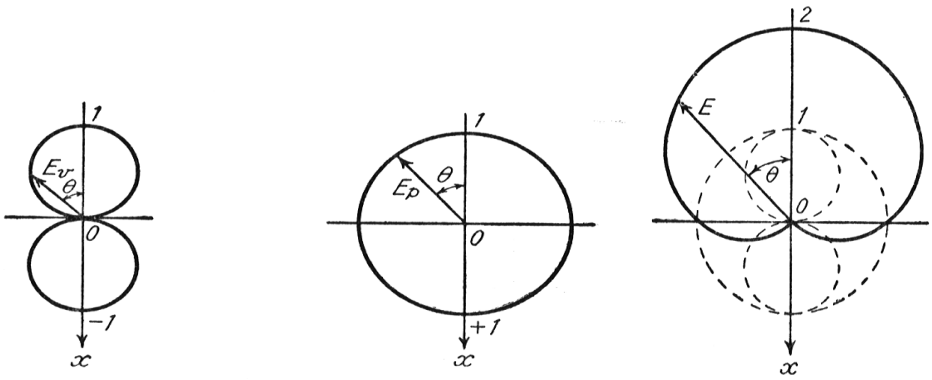
(5)　RCA 44－BX 型，東芝 A 型ベロシティマイクロホン.
(6)　NHK技研の測定による．冨田（義男）：“最新型マイクロホンの展望”無線と実験，22－28頁，1953年 6月.

者の出力は相殺して第7・29図（c）のような特性となる筈である．すなわち速度型マイクロホンの出力電圧は（a）図のように

(31)　$$E_V = E_1 \cos\theta$$

で表わされるから，無指向性マイクロホンの出力電圧を各方向から入射する音に対して一様に

(32)　$$E_p = E_1$$



(a)　双指向性
$E_v = E_1 \cos\theta$.

(b)　無指向性
$E_p = E_1$.

(c)　単一指向性
$E = E_1(1+\cos\theta)$.

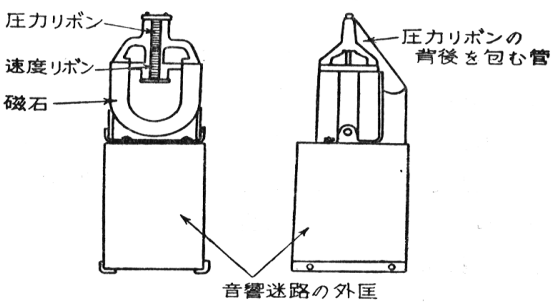
第7・29図　単 一 指 向 性.

であるようにしておけば，合成された出力電圧は

(33)　$$E = E_v + E_p = E_1(1+\cos\theta)$$

となり，指向特性はカージオイド[(1)]となり，図（c）のように単一指向性[(2)]となる．ここにE_1は速度型マイクの最大感度の方向の出力電圧である．

このような指向性を得るためには速度型マイクロホンと圧力型マイクロホンとは極めて接近していなければならない．さもないと両マイクロホンに入射する音波に位相差を生じ簡単に（33）のように表わせなくなる．また圧力型マイクロホンを無指向性とするためには，振動板の寸法が波長に比して小さくすることが必要であるが，広い周波数帯にわたって，この条件を実現するには振動板を非常に小さくしなければならない．さらに圧力型において周波数特性を一様にするためには広い周波数帯にわたって抵抗制御とせねばならぬ．そのためには振動板の背面の音響抵抗を大きくしかつ外気と遮断する必要がある．これらの点を考えてリボンマイクロホンのリボンの上半分を圧力型とし，下半分を速度型として単一指向性マイクロホンが作られた．[(3)] その構造は第7・30図に示すように，圧



第7・30図 OLSON の単一指向性マイクロホン.

(1)　cardioid
(2)　mono－directional, uni－directional
(3)　J.WEINBERGER, H.F.OLSON, F.MASSA :“ Unidirectional Microphone ” J.A.S.A., Vol. 5, p.139－147,1933.

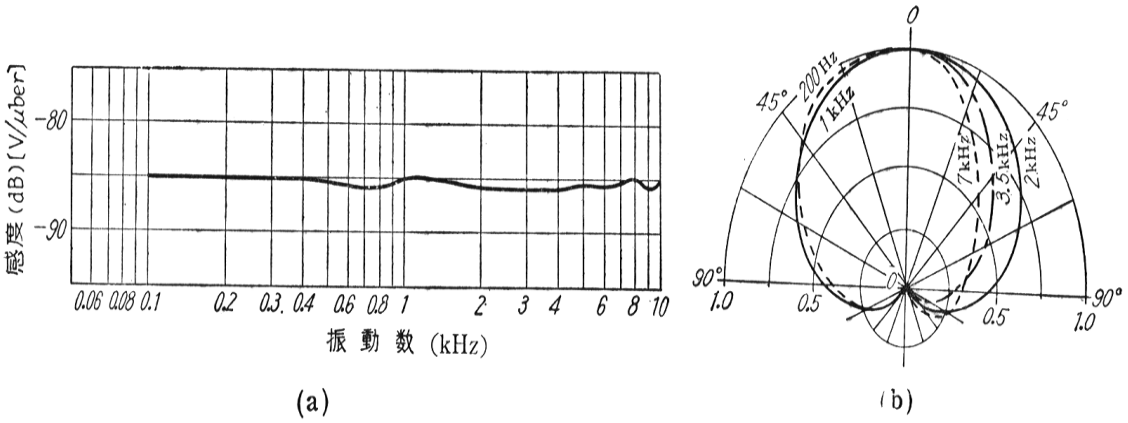
力リボンの背後には長い管の音響迷路が設けられ，管内には吸音材が詰めてあり，ほとんど無限の管の音響抵抗と等しいように作られている．しかしこのマイクロホンは迷路が大型となり，しかも十分低音域まで無限長の管として動作しないことなどのために現在は用いられていない．このマイクロホンの特性を第7・32図に示しておく．

	速度マイクロホン出力電圧の指向特性	圧力マイクロホン出力電圧の指向特性	$\left\lvert\frac{E_{p0}}{E_{v0}}\right\rvert$	合成電気の指向特性	指向性能率
(1) 双指向性	E_v, θ, E_{v0}, 0	0	0	E_t, θ, $E_{to}=E_{vo}$, 0	$\eta=\frac{1}{3}$
(2)	E_v, θ, E_{v0}, 0	E_p, E_{po}, 0	$\left\lvert\frac{E_{p0}}{E_{v0}}\right\rvert<1$	E_t, θ, $E_{to}=\lvert E_{vo}\rvert+\lvert E_{po}\rvert$, $E_{to}'=\lvert E_{vo}\rvert-\lvert E_{po}\rvert$	$\eta<\frac{1}{3}$
(3) 単一指向性	E_v, θ, E_{vo}, 0	E_p, θ, E_{po}, 0	1	E_t, θ, $E_{to}=\lvert E_{vo}\rvert+\lvert E_{po}\rvert$	$\eta=\frac{1}{3}$
(4)	E_v, E_{vo}, 0	E_p, θ, E_{po}, 0	$1<\left\lvert\frac{E_{p0}}{E_{v0}}\right\rvert$	E_t, θ, $E_{to}=\lvert E_{vo}\rvert+\lvert E_{po}\rvert$, $E_{to}'=\lvert E_{po}\rvert-\lvert E_{vo}\rvert$	$\eta>\frac{1}{3}$
(5) 無指向性	0	E_p, θ, E_{po}, 0	∞	E_t, θ, $E_t=E_{po}$	$\eta=1$

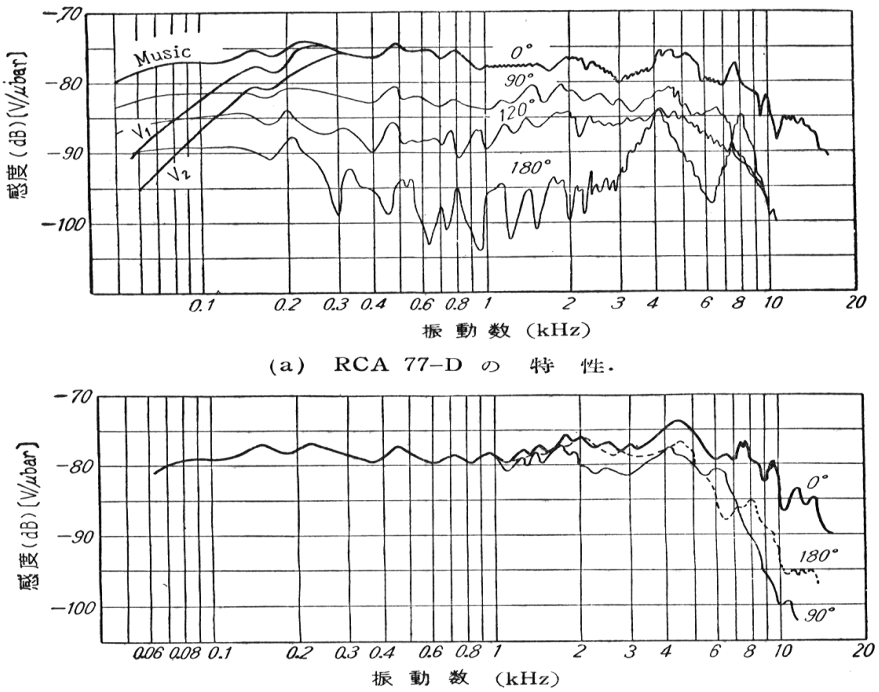
第7・31図　可変指向性マイクロホンの動作原理.

単一指向性リボンマイクロホンを改良して小型とし，圧力リボン背後の音響迷路を小さくし，かつ速度型リボンの感度と圧力型リボンの感度との比を任意に調整して指向特性を双指向性から単一指向性を経て無指向性まで変化できるようにした可変指向性マイクロホンが最[redacted]られた．[4] 速度リボンと圧力リボンの相対的速度の変化によって指向性の変化する原理は第7・32図に示す通りである．その感度の周波数特性は第7・33図に示すようなものである．[5]

また速度型リボンマイクロホンと圧力型可動線輪マイクロホンとを組合せた単一指向性マイクロホ

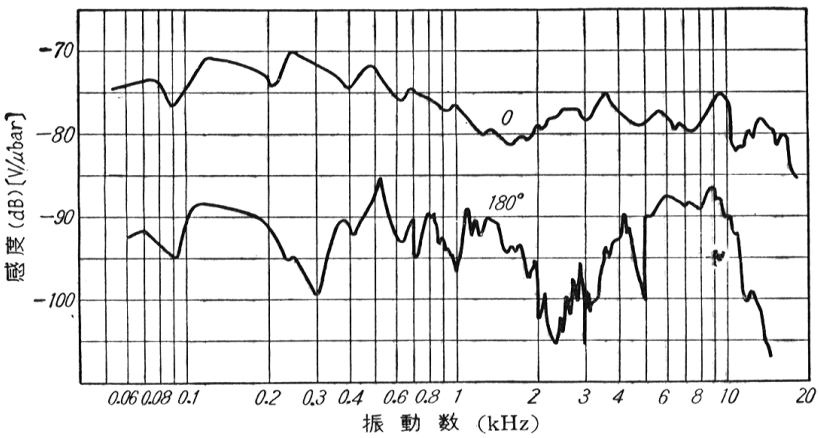


第7・32図　OLSON の単一指向性マイクロホンの特性.



第7・33図 (1)　単一指向性リボンマイクロホンの特性の例.

(4)　RCA 77－D型マイクロホン，東芝 G型マイクロホン.
(5)　NHK 技研の測定による．冨田（義男）“前掲” 無線と実験，1953年 6 月.

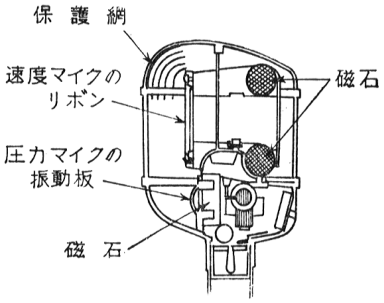


(c) マツダ G-III 型の特性.

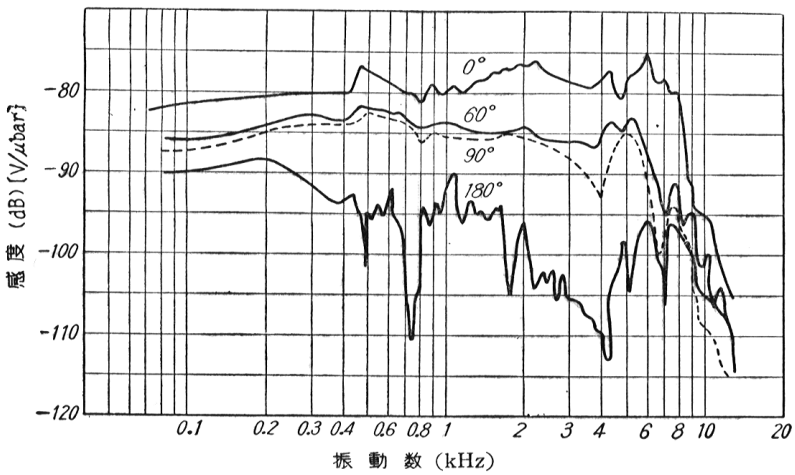
第7·33図 (2) 単一指向性リボンマイクロホンの特性の例.

ンがやはり最近作られ，広く用いられるようになった.[6] その構造の概略は第7・34図に示し，その感度の周波数特性は第7・35図に示してある．なおこの速度型のリボンのヒダは縦方向に樋状に付けられている.

可動線輪マイクロホンの振動板背面を密閉せずに小孔を設けて外気と通じ，圧力型マイクロホンに速度型の作用を加味して単一指向特性を持たせようとする試みがある.[7] 第7・36図はその構造の概略を示す．振動板背面に小孔を設け，かつ音場に曝さねばならぬので，圧力型の動作を行うための背面気室と制動用音響抵抗は別に設けてある.この型のマイクロ



第7・34図　速度型リボンマイクロホンと圧力型可動線輪マイクロホンと組合わせた単一指向性マイクロホン W.E.639-B の構造.

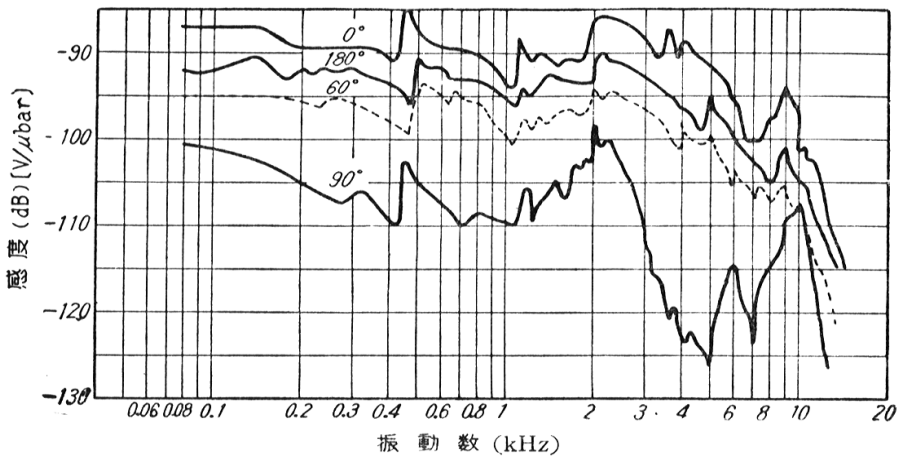


(a) WE 639-B の特性

第7·35図 (1) WE－639 B 型の特性.

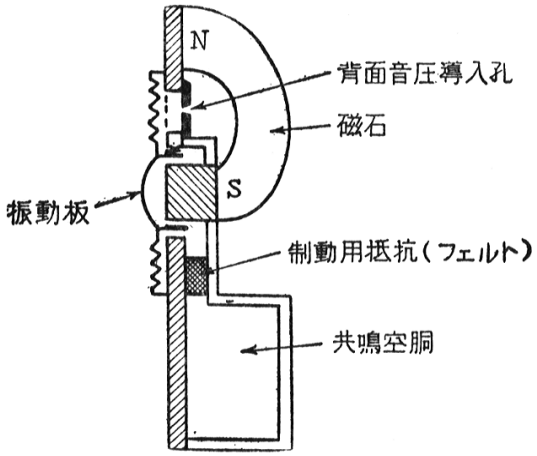
(6) Western Electric Co. 製 639－B 型および RA－1142 型.
(7) Electro－Voice 社製 731型.

ホンの感度の周波数特性は第7・37図に示す．またその指向特性は第7・38図に示す．

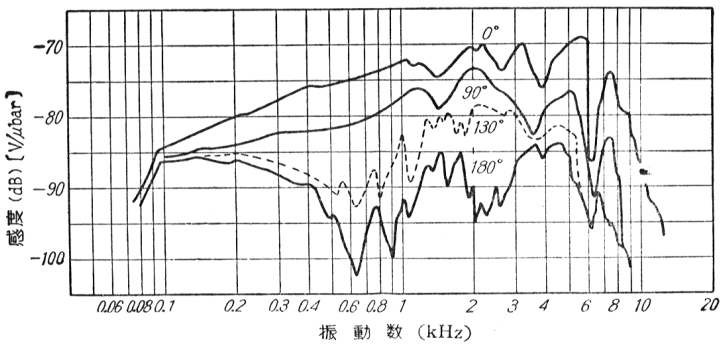


(b)　W.E.639-B の速度型リボンマイクロホンの特性．

第7・35図　(2)　WE-639 B 型の特性．



第7・36図　　圧力型可導線輪マイクロホンに速度型の作用を加味した単一指向性マイクロホン Electro-Voice 731 型の構造．



第7・37図　　E. V. 731 の特性．