

第7・38図 E.V. 731 の指向特性 .

7・3・8 圧力型蓄電器マイクロホン

静電型電気音響変成器の代表的の例は蓄電器マイクロホン⁽¹⁾である。その電気音響変成理論は5・5・2で述べた通りであるが、実際にマイクロホンとして十分な特性を持たせるためには細部にわたる検討を必要とし、種々改良されて現在では標準マイクロホンとして採用されるものが作られるようになった。

蓄電器マイクロホンは通常圧力型であり、WENTE⁽²⁾によって初めて実用化されて以来、その優れた特性と安定性のために移動標準⁽³⁾マイクロホンとして採用されて来たが、さらに小型化され改良さ

(1) condenser microphone

(2) E.C.WENTE : "A Condenser Transmitter as a Uniformly Sensitive Instrument for the Absolute Measurement of Sound Intensity" Phys.Rev. , Vol.10, p.34 - 63,1931.

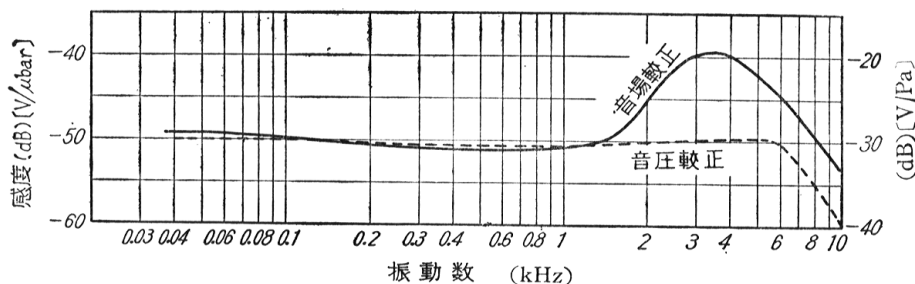
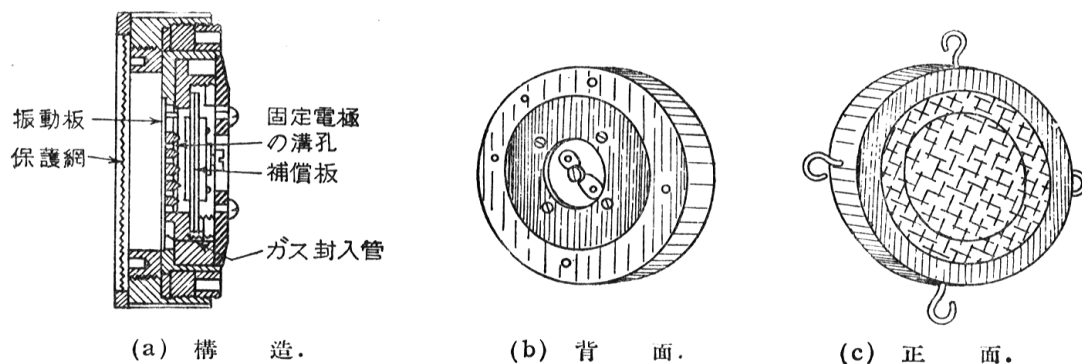
(3) travelling standard

れたものが現在用いられている．最も代表的な蓄電器マイクロホンは Western Electric 社の W. E. 394 型蓄電器マイクロホンであり，⁽⁴⁾ その後小型の W. E. 640 - AA 型が現われた．⁽⁵⁾ わが国でも標準マイクロホンとして MR - 102 型が作られていたが，最近さらに安定な MR - 103 型が実用化されるようになった．

圧力型蓄電器マイクロホンは固定電極の前面に金属膜の振動板を設けて蓄電器を形成させたもので，音圧によって振動板が受ける変位に比例した電圧変化が蓄電器の端子に現われる．この場合に出力量が音圧のみに比例し周波数に無関係であるためには，振動板系は弾性制御でなければならぬ．しかも振動系のスティフネスと質量とで定まる最低固有振動数が，可聴周波帯域内にあっては好ましくない．そのために W. E. 394 型は質量の軽い金属板（ジュラルミン合金）を 0.025 mm（1 ミル）程度の箔としたものを，その弾性限界の近くまで引張って強く張りスティフネスを増加させることによって最低固有振動数

$$(34) \quad v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (\text{Hz})$$

が可聴帯域の上限のあたりになるようにしてある．さらに固定電極と振動板との間隔も 0.025 mm 程度にし，かつ振動板と固定板との間の空気室の共振を避けるために，固定電極に多数の溝を縦横に掘り，その溝の交点に小さい孔をあけて固定電極背後の空室と連絡させることにより，スティフネス



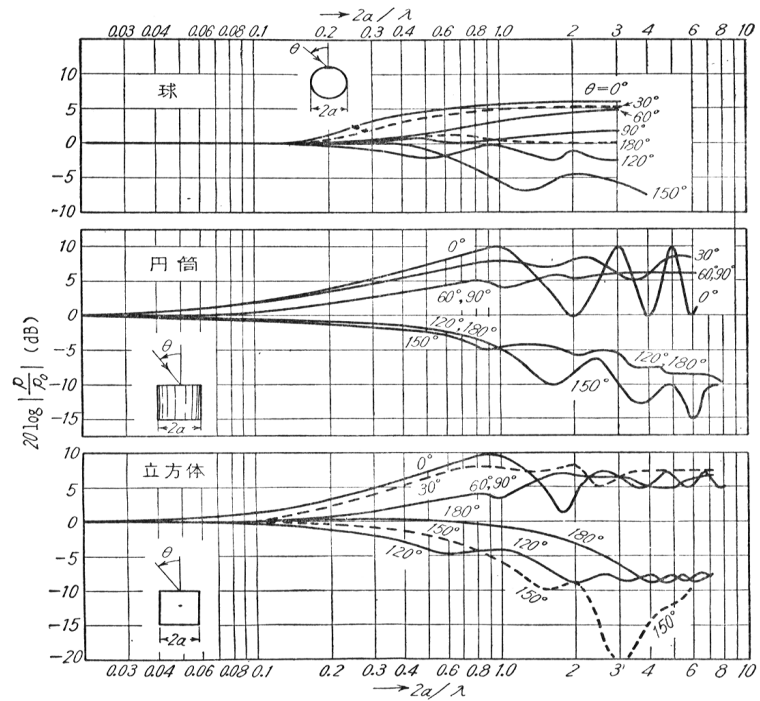
(d) W.E.394 型 の 特 性 の 例 .

第 7・39 図 Western Electric 社 394 型蓄電器マイクロホン .

- (4) W.C.JONES : " Condenser and Carbon Microphones. Their Construction and Use " B.S. T.J. , Vol.10 , p.46 - 62,1931.
 (5) Leo L. BERANEK : " Acoustic Measurement " p.217, JOHN WILLY & SONS , New York, 1950.

を周波数に無関係にしてある。(6)(7) また振動板と固定電極の間に錆の出ることを防ぐために窒素を封入し、密閉したために大気圧の変動によって感度が変化しないように、可撓性の膜を用いた補償板を設け、音圧のような速い変化には感ぜずに大気圧の変動のような緩やかな変化にのみ応ずるようにしてある。この蓄電器マイクロホンの感度は約 -50 dB であり、しかもその周波数特性は 5000 Hz まで一様である。構造の概要は第7・39図に示す通りであり、その静電容量は約 300 pF、直流成極電圧は約 200 V を用いる。蓄電器マイクロホンの欠点の一つは電気インピーダンスが非常に高いためにマイクロホンと増幅器と

を接続する線路を長くすると特性が著しく劣化することである。これを防ぐためにマイクロホンを構成する筐体の中に初段増幅用真空管を内蔵させ低インピーダンスにて出力を取り出すようにする。(8) この方法はインピーダンスについては改善されるがマイクロホン筐体の寸法が大きくなるために音場を乱し、高音部の特性を劣化させる。BALLANTINE(9)は半径 a なる球形マイクロホンの振動板の法線と θ なる角をなして入射する平面波により振動板の部分に加わる音圧を計算した(第7・40



第7・40図 球形、円筒形、立方体形の側体面上にある振動板に θ 方向から平面波が入射した場合の振動板上の音圧 P と自由音場の音圧 P_0 との比。

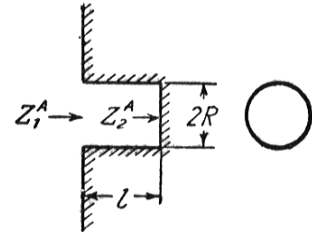
図)。これによると、回折効果を見捨てる程度にするためには、球の直径を音の最高周波数に対応する波長の 0.2 以下に保っておく必要がある。したがって非常に小型のマイクロホンとせねばならぬ。

W. E. 394 型蓄電器マイクロホンの振動板の前に円筒形の凹部がある。この部分は一端にフランジ

(6) I.B.CRANDALL : "The Air Damped Vibrating System. Theoretical Calibration of the Condenser Transmitter" Phys.Rev., Vol.11, p.449 - 460. 1918.
 (7) 小林(勝一郎), 岡原(勝) : 薄層空気の音響特性(コンデンサーマイクロホン)電学誌, 53巻, 173頁, 1933年.
 小林(勝一郎), 岡原(勝) : "コンデンサーマイクロホンの研究" 電気評論, 第21巻, 1933年.
 (8) これを前置増幅器 pre-amplifier という。
 (9) S.BALLANTINE : "Effect of Diffraction around the Microphone in Sound Measurement" Phys.Rev., Vol.32, p.988, 1928; I.R.E., Vol.16, p.1639 - 1644, 1928.

を有する閉管を形成するために音響回路と見なさねばならない．この管の開口部の音圧と底面の音圧との関係は開口部から管内を見た音響インピーダンスで規定される．第7・41図にて底面から振動板を見たインピーダンスを Z_2^A とし，開口部から見た送端インピーダンス Z_1^A を求めると，5・3・2の(73)より

$$(35) \quad \begin{aligned} Z_1^A &= \rho_0 c \operatorname{Tanh}(ikl + \theta_2), \\ \theta_2 &= \operatorname{Tanh}^{-1} \left[\frac{Z_2^A}{\rho_0 c} \right], \\ S &= \pi R^2 \end{aligned}$$



第7・41図

と表わされるが， $kl \ll 1$ の場合には

$$(36) \quad \begin{aligned} \operatorname{Tanh}(ikl + \theta_2) &= \frac{\operatorname{Tanh} ikl + \operatorname{Tanh} \theta_2}{1 + \operatorname{Tanh} ikl \cdot \operatorname{Tanh} \theta_2} \\ &\approx \frac{i \frac{\omega}{c} l + \frac{Z_2^A}{\rho_0 c}}{1 + i \frac{\omega}{c} l \cdot \frac{Z_2^A}{\rho_0 c}} = \frac{Z_2^A}{\rho_0 c + i \frac{\omega}{c} l Z_2^A} \end{aligned}$$

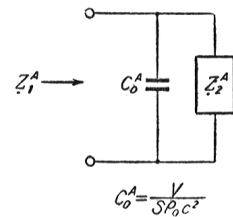
となるから

$$(37) \quad \frac{1}{Z_1^A} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\rho_0 c + i \frac{\omega}{c} l Z_2^A}{Z_2^A} \approx \frac{1}{Z_2^A} + i \omega \frac{l}{\rho_0 c^2},$$

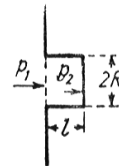
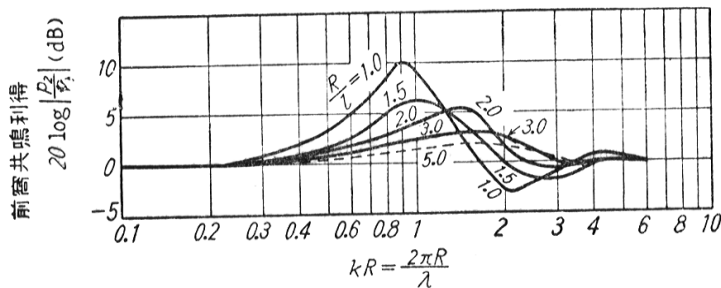
ここに $V = Sl$ は容積である．よって，音響キャパシタンスを

$$(38) \quad C_0^A = \frac{V}{S \rho_0 c^2}$$

とおけば Z_1^A は Z_2^A と C_0^A との並列回路で表わされる(第7・42図)． Z_2^A は振動板のインピーダンスであるから，その質量と C_0^A とが共振を生ずる．これを前共振⁽¹⁰⁾と呼び，開口部音圧に対する振動板面上の音圧の利得を示すと第7・43図のようになる．図の縦軸は振動板面の音圧と開口部音圧との比であり， $\frac{R}{l}$ が大きい程前共振が少ない．なおこの効果は音波の入射角によって変化しない．BALLANTINE⁽¹¹⁾は実験によってこの理論を確め，実験の方が前



第7・42図 凹部の等価回路．

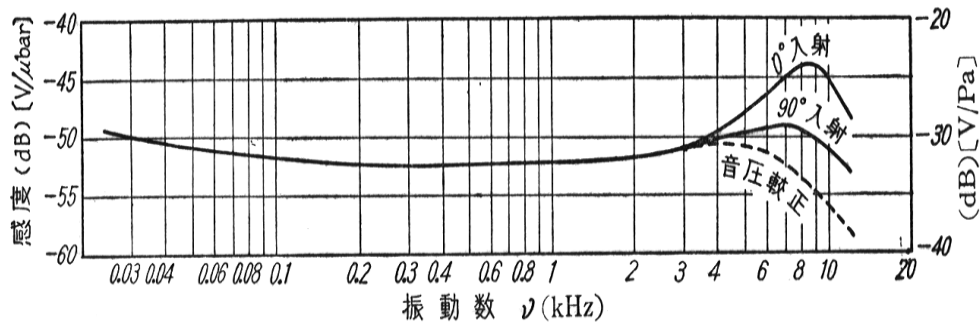


第7・43図 前窩共振による利得．

(10) cavity resonance

共振が大きく現われることを知り、さらに前窩共振のない蓄電器マイクを試作した。

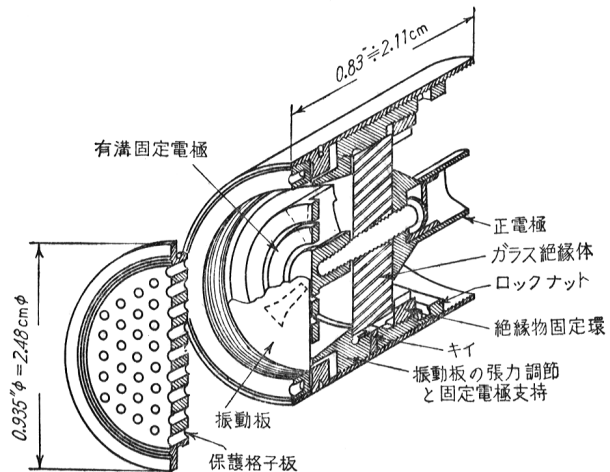
超小型の蓄電器マイクロホンは HALL⁽¹²⁾、HARRISON および FLANDERS⁽¹³⁾ によって試作された。後者のものは直径 0.6 インチのマイクロホンと同じ直径の前置増幅器とを長さ 7.5 インチの円筒の中に収容したもので、音場較正による感度と音圧較正による感度とを比較すると第 7・44 図のように



第 7・44 図 HARRISON の小型蓄電器マイクロホンの特性。

なる。振動板として絹布に金属粉をスパッタしたものを用いる試みがなされたことがある。⁽¹⁴⁾ また蓄電器マイクロホンを並列共振回路に並列に接続して静電容量の変化を電流変化に変換することにより感度を高め雑音を減少せしめる試みもある。⁽¹⁵⁾

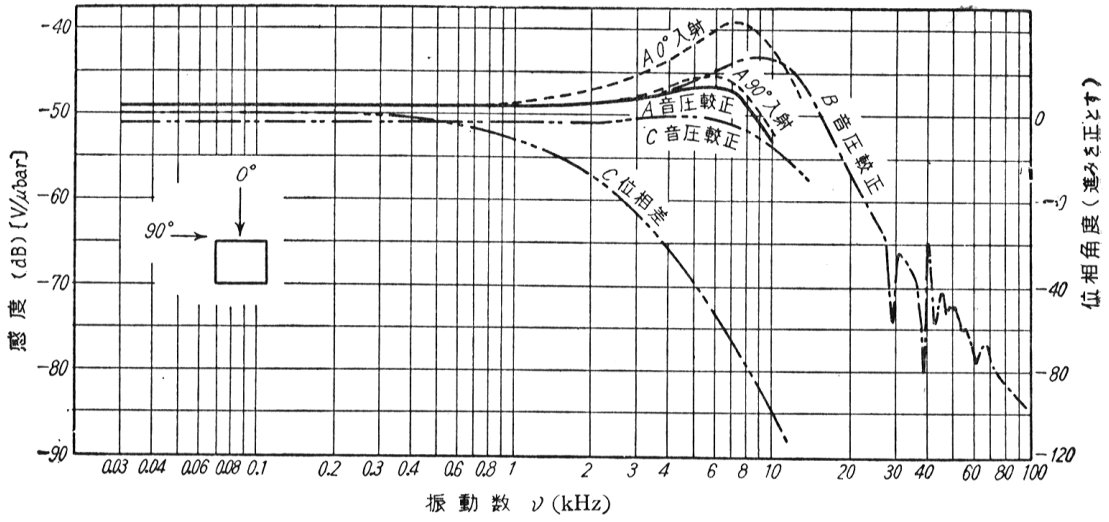
W.E. 394 型を改良して小型にし、米国の標準マイクロホンとして現に使用されているものに W.E. 640-AA 型蓄電器マイクロホンがある。その構造の概要は第 7・45 図に示す通りであり、その特性は第 7・46 図に示してある。このマイクロホンの振動板はステンレススティールで作られ、⁽¹⁶⁾ その最低固有振動数は約 7 kHz であるが、固定電極に穿ってある小孔の中を振動板の運動に伴って流動する空気の粘性および熱力学的エネルギー消費によって、共振峰を抑えている。マイクロホン部分の静電容量は約 50 pF であり、成極電圧は通常 200 V 位を用いる。



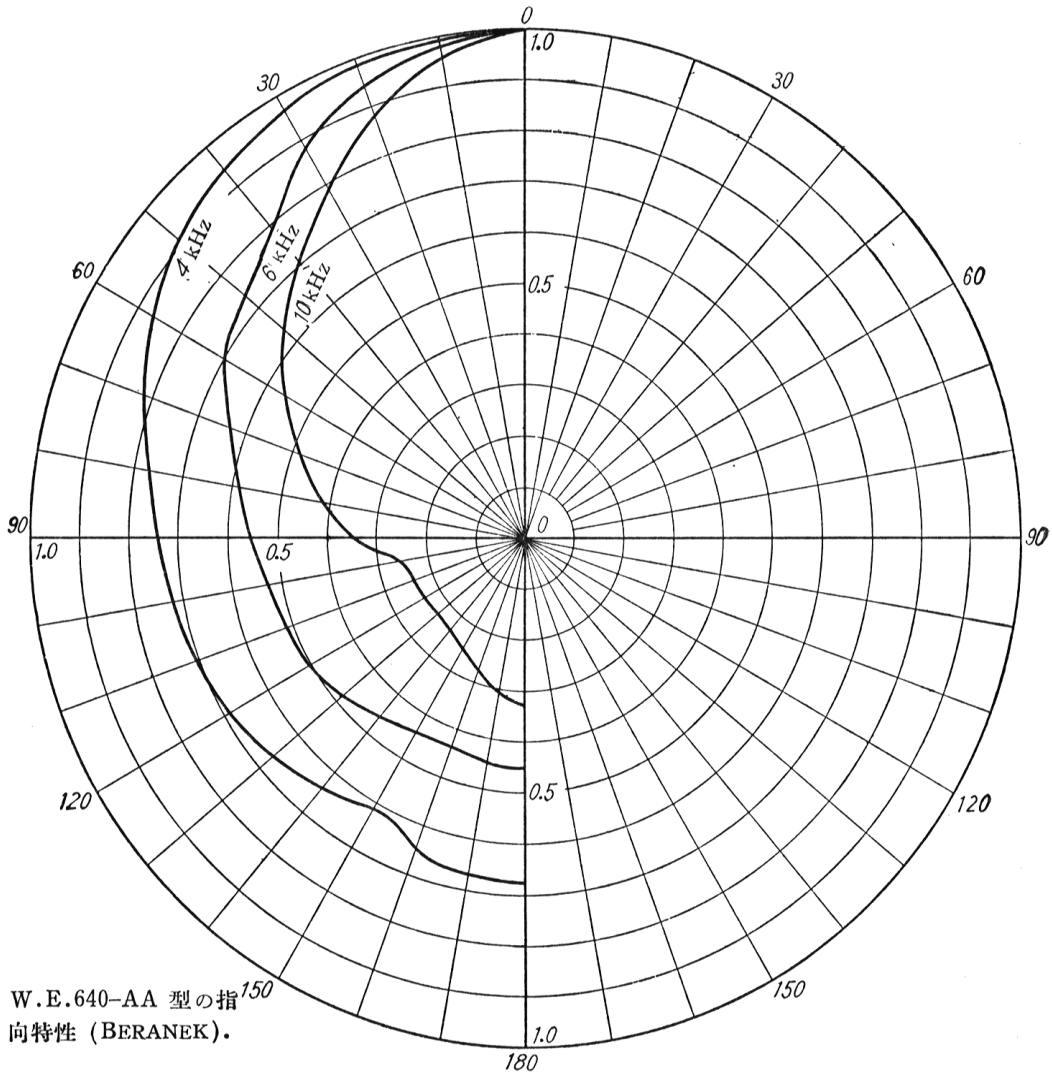
第 7・45 図 W.E.640-AA 型蓄電器マイクロホンの構造 (BERANEK)。

ギー消費によって、共振峰を抑えている。マイクロホン部分の静電容量は約 50 pF であり、成極電圧は通常 200 V 位を用いる。

- (11) S.BALLANTINE :“ Effect of Cavity Resonance on the Frequency Responce Characteristics of the Condenser Microphone ” Proc.I.R.E. , Vol.18, p.1206 - 1215,1930. (前頁脚注)
- (12) W.M.HALL : A Minuatute Condenser Transmitter for Sound - field Measurement ” J.A.S A. , Vol.4, p.83 - 93,1932.
- (13) H.C.HARRISON and P.B.FLANDERS :“ An Effcient Minuatute Condenser Microphone Sys - tem ” B.S.T.J.,Vol.11, p.451 - 461, 1932.
- (14) 押田(三郎),岡原(勝):“ 膜を用いたコンデンサーマイクロホン ”信話誌, 1935 年.
- (15) H.RIEGGER :“ Zur Theorie des Laut Sprechern ” Wics.Veroff a.d.Siemens - Konzern, Vol.3, 1924.
- (16) W.B.640-A はジェラルミン振動板である .温度や気圧の変化による安定度は 640 - AA の方が高い .



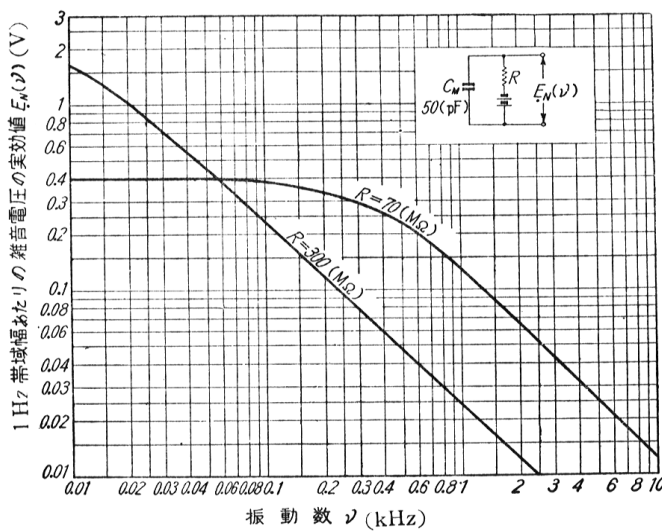
A と B および C は異なるマイクロホンである。
 (a) W.E.640-AA 型の感度の周波数特性と位相特性 (BERANEK).



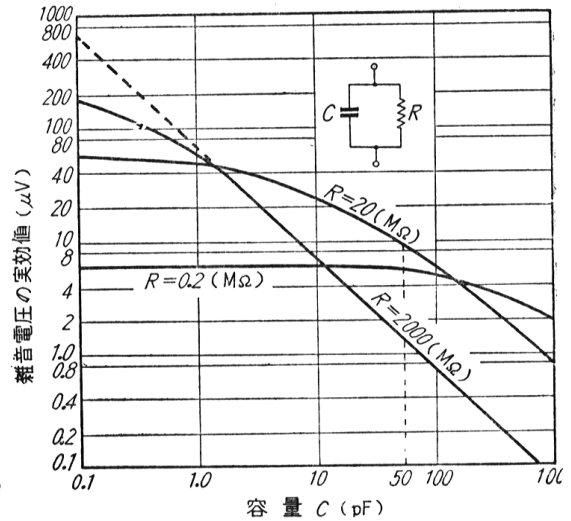
(b) W.E.640-AA 型の指向特性 (BERANEK).

第7・46図(1) W.E.640-AA 型の特性.

蓄電器マイクロホンのダイナミックレンジの上限を決定するヒズミの発生には二つの原因がある．
 一つは静電型電気音響変換器であるために原理的に発生する非直線ヒズミであって，640-AA 型の第



(c) 帯域幅 1 Hz あたりの雑音電圧．



(d) 抵抗と容量の並列回路から発生する熱擾乱雑音電圧の開放端子電圧実効値．周波数帯域は 10 Hz から 10 kHz まで (BERANEK)．

第 7・46 図 (2) W.E. 640-AA 型の特性．

二高調波含有率は

$$(39) \quad D_{H_2} = 50 \frac{E_0}{E_d} \quad (\%)$$

で与えられる．ここに E_0 は交番音圧によってマイクロホン端子に現われる開放出力電圧 (V)， E_d はマイクロホンに加えた成極電圧 (V) である．第二のヒズミ発生の原因は極めて微小の振幅の場合以外は振動板の変位が音圧と正確に比例しないことによる．しかしこの原因によるヒズミの第二高調波含有量は (39) に比して極めて小さく，640-AA 型で音圧レベル 130 dB の音を受ける場合でも 1 % 以下に保たれる．したがって蓄電器マイクロホンは忠実度の高いマイクロホンと見なすことができる．

ダイナミックレンジの下限を決定する雑音レベルは蓄電器マイクロホンの負荷抵抗から生ずる熱擾乱雑音および振動板と固定電極との間の絶縁物から発生する雑音とであるが，マイクロホンの容量はこれらの雑音発生抵抗を短絡するので高音部における雑音発生電圧を減少させる．640-AA 型のマイクロホンと負荷抵抗とを C_M と R の並列回路と仮定して $C_M = 50$ pF に対して抵抗 R を変えたときに周波数帯域幅 1 Hz の雑音電圧が周波数によって変るかを示したのが第 7・46 図 (c) である．また 10 Hz から 10 kHz にわたる周波数帯域の総合雑音電圧を知るには第 7・46 図 (d) の図表を用いればよい．

W.E. 640-AA 型の感度の周波数特性は第 7・46 図 (a) に示すように，可聴周波帯域ではほとんど平

坦であるが、7 kHz 附近で数デシベル上昇し、それ以上の周波数範囲では 12 (dB/octave) の傾斜で下降している。しかし約 100 kHz まではマイクロホンとして使用することができる。なお感度および周波数特性はマイクロホンによって多少の相違がある。また気温や気圧によって多少変動する。W.E. 640-AA 型は気温 25°C の場合に比して 40°C の場合には感度が 1~2 dB 低下し、-25°C の場合には 2~3 dB 上昇するし、また気圧が減少すると感度は上昇し、海拔 6000 m で約 1 dB、12 000 m で 2.5~3 dB 上昇する。

過渡状態の音を測定する場合には、マイクロホンの位相特性が問題となる。第 7・46 図 (a) には一定振動数の持続正弦波音場内に W.E. 640-AA 型を置いたときの開放端子出力電圧の位相とマイクロホン前面の音場の音圧の位相との差の周波数特性が示されている。位相差の周波数特性の函数表現を $\varphi(\omega)$ とするとき、位相特性函数の傾斜を包絡波形遅延時間⁽¹⁷⁾ と呼び

$$(40) \quad d_e = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \quad (s)$$

と定義する。試聴試験⁽¹⁸⁾の結果によれば位相ヒズミよりも遅延ヒズミの方が耳で気がつきやすく、1 kHz を基準として高音では約 8 ms 以下、100 Hz では 15 ms 以下に遅延時間を保っておけば十分であるといわれている。

蓄電器マイクロホンは電気インピーダンスが高いために、外界の影響を受けやすい。湿度が高くなると絶縁が低下するので特殊の防湿方法を用いねばならぬし、ハムや雑音を静電誘導的に拾う恐れがあるのでシールドは厳重にせねばならぬ。また高温は絶縁抵抗を低下させるから避けねばならぬし、激しい温度変化は寸法の変化を生じさせたり振動板の張力を変化させたりする。また絶縁されている出力端子は小さくないと浮遊容量が増加する。このように蓄電器マイクロホンは非常にデリケートなものであるが、これを正しく取扱えば四季の変化を通じて 0.3 dB 以内の感度変化に保つておくことができるといわれている。これが標準マイクロホンとして採用される理由である。

わが国においても、最近チタニウムで作った蓄電器マイクロホン MR-103 型が、電信電話公社電気通信研究所で研究され、その特性は W.E. 640-AA 型と匹敵するものであることが示された。このマイクロホンは筐体および振動板を全部純チタニウム金属で作り、温度変化に対する感度の変動を極力小さくしている。その外形寸法および特性はほぼ 640-AA 型と同程度である。

蓄電器マイクロホンの前置増幅器には低雑音真空管のカソードフォロアー⁽¹⁹⁾が用いられる。カソードフォロアーは多量の負饋還⁽²⁰⁾がかかるために、可聴周波帯におけるグリッドとアースとの間に入力インピーダンスが非常に高く(約 200 MΩ)なり、蓄電器マイクロホンのインピーダンスに比し

(17) envelope delay

(18) F.A.COWAN, R.G.McCurdy and I.E.LATTIMER : " Engineering Requirement for Program Transmission Circuits " B.S.T.J., Vol.20, p.235-249, 1941.

(19) cathode follower

(19) negative feedback

て十分高インピーダンスとすることができ、またカソードとアースとの間の出力インピーダンスは非常に低く（約 600 Ω 位）なるので次段に接続する増幅器や真空管電圧計の入力インピーダンスに比して十分低インピーダンスとすることができ、その増幅利得は約 1 で、真空管定数や可聴周波帯の周波数の変化による影響を受けない。このような利点があるので、現在は出力変成器を用いずにカソードやフォロアを使用するようになった。前置増幅器の代表的な例を第 7・47 図に示す。図の R_0 , 10 kΩ はマイクロホンの開放出力電圧を測定するための補助挿入抵抗であるから、研究室で測定に使用する場合を除けば不用であろう。ここに示した回路にて、 $2E'$ (V) なる交番電圧を加えると R_0 の両端に現われる電圧は

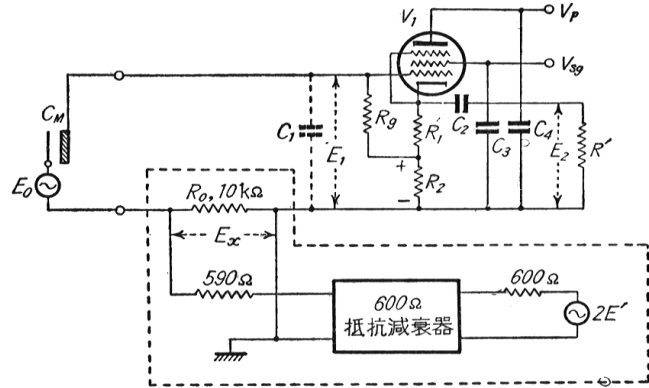
$$(41) \quad E_x = E' \cdot 10^{-\frac{A}{20}} \quad (\text{V}),$$

となる。ただし A は抵抗減衰器の減衰量

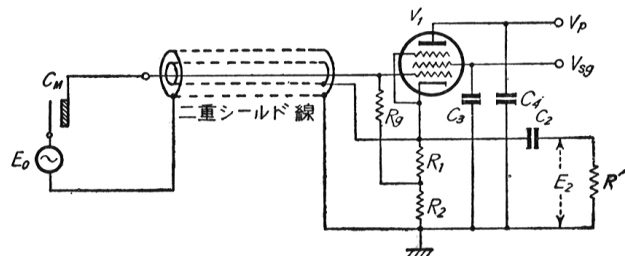
(dB) である。よってこの E_x と音圧によって生ずるマイクロホンの開放出力電圧 E_0 とを比較することによって E_0 を正確に測定することができる。 V_1 のグリッド回路はインピーダンスが非常に高いから導線の浮遊容量 C を極めて小さくしておかないと高音に対する特性が劣化する。したがって C_M とグリッドの間の導線を余り長く延ばすことはできないので、 V_1 と C_0 とは一つの筐体に収めるのが普通である。よって筐体を小型にしないと散乱効果が大きくなるので、 V_1 をなるべく小型の真空管にする傾向があり、6AU6 その他が用いられることがある。なお前置増幅器の真空管ヒーターは直流で加熱する。

マイクロホンとグリッドの間の導線を多少長くしても悪影響の現われない回路を第 7・48 図に示す。これは二重シールド線を用いてグリッドとカソードの間の容量を負饋還によって減少させたものである。この方法を用いればマイクロホンと増幅器を 2~3 m はなすことはできるが、 R_g 内にて生ずる熱雑音は (R_1+R_2) を通して増幅されるので、この雑音電圧に対してはカソードフォロアでなく、普通の増幅器のように動作することは注意を要する。

蓄電器マイクロホンを非常に低い周波数帯



C_M : 蓄電器マイクロホンの容量,
 C_1 : 導線の浮遊容量,
 V_1 を 1620 型低雑音管とするときは $C_2=0.5 \mu\text{F}$, $R_1=200 \Omega$, $R_2=100 \text{k}\Omega$, $R_g=20 \text{M}\Omega$ とするとグリッドアース間の入力インピーダンスは $3 \times 10^8 \Omega$, カソードアース間の出力インピーダンスは約 600 Ω, 利得 $(E_x/E_0) \approx 1$ である。
 第 7・47 図 蓄電器マイクロホン用前置増幅器 (BERANEK).

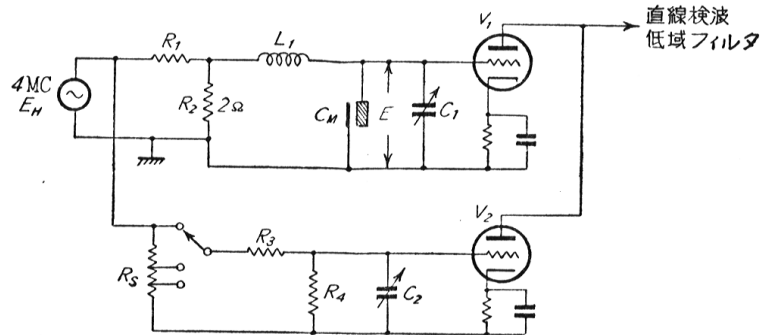


第 7・48 図 蓄電器マイクロホン用前置増幅器 (BERANEK).

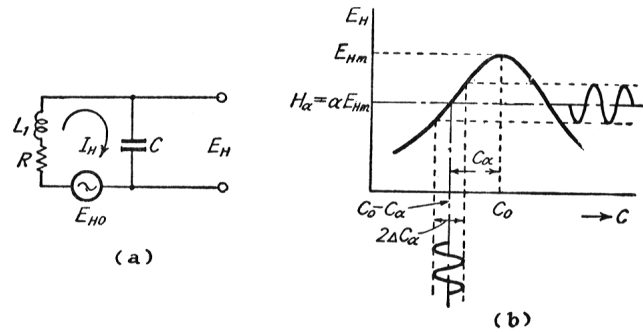
域で使用する場合に雑音レベルが高くなり測定が困難となることがある．このような場合には，直流成極電圧を加えずに 4 MHz 程度の高周波を蓄電器マイクロホンの容量変化で振幅変調して信号を取り出す方法が便利である．⁽²¹⁾ この方法で 0.1 Hz の圧力変化まで測定できるという．

その回路の一例は第 7・49 図に示すようなもので，その動作原理は第 7・50 図で説明される．第 7・49 図の C_M と C_1 との和を C とすると，

R_2 は ωL_1 や $\frac{1}{\omega C}$ に比して十分に小さく選んであるから， $R_2 - L_1 - C$ の回路は第 7・50 図(a)のような直列回路と見なすことができ，しかもこの回路の起電力 $E_{H0} e^{-i\omega t}$ (V) は 4 MHz 発振器から供給される高周波電流の R_2 による電圧降下と考えることができる．なおこの回路の抵抗 R はインダクタンス L_1 を構成する線輪の抵抗と R_2 との和である．真空管 V_1 のグリッドに加わる電圧は C の端子に現われる電圧であるから



第 7・49 図 高周波 (4 MHz) を C_M の変化で振幅変調する回路．



第 7・50 図

$$(42) \quad E_H = \frac{E_{H0} e^{-i\omega t}}{1 - \omega^2 L_1 C - i\omega CR} \quad (V)$$

であり，この回路が電源周波数に共振したときの端子電圧は

$$(43) \quad E_{Hm} = \frac{i\omega L_1}{R} E_{H0} e^{-i\omega t} \quad (V),$$

このときの蓄電器の共振容量は

$$(44) \quad C_0 = (C_{10} + C_M) = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (F)$$

である．ここに C_{10} は可変蓄電器 C_1 の容量である．

次に可変蓄電器 C_1 の共振容量 C_{10} を C_d (F) だけ減少させて

(21) H.RIEGGER : " On High-Fidelity Sound Pick-Up, Amplification and Reproduction " Zeits. f. technische Physik, Vol.5, p.577-580,1924.
G.H.HULL : " Resonant Circuit Modulator for Broad Band Acoustic Measurement " J.App. Phys., Vol.17, p.1066-1075,1946.

$$(45) \quad C = C_0 - C_\alpha = C_{10} + C_M - C_\alpha$$

としたときに、端子電圧 E_H が共振電圧 E_{Hm} の α 倍 ($\alpha \leq 1$) に低下したとすると、そのときの電圧は

$$(46) \quad \begin{aligned} E_{Hm} = \alpha E_{H0} &= \frac{E_{H0} e^{-i\omega t}}{\omega^2 L_1 C_\alpha - i\omega R(C_0 - C_\alpha)} \\ &= \frac{E_{H0} e^{-i\omega t}}{\omega^2 L C_\alpha} \left[\frac{1}{1 - \frac{iR}{\omega L_1} \left(\frac{C_0}{C_\alpha} - 1 \right)} \right] \\ &= \frac{C_0}{C_\alpha} E_{H0} e^{-i\omega t} \left[\frac{1}{1 - i\omega C_0 R \left(\frac{C_0}{C_\alpha} - 1 \right)} \right] \end{aligned}$$

と表わされる。ただし

$$(47) \quad \begin{aligned} \frac{1}{\alpha} &= \omega^2 L_1 \left(C_0 - C_\alpha + \frac{i\omega L_1 C_\alpha}{R} \right) \\ &= 1 - \frac{C_\alpha}{C_0} + i \frac{\omega L_1}{R} \cdot \frac{C_\alpha}{C_0} \end{aligned}$$

であるから

$$(48) \quad \omega L_1 \gg R$$

の場合には

$$(49) \quad C_0 - C_\alpha = \frac{C_0}{\alpha} \quad (\text{Frd})$$

または

$$(50) \quad \frac{C_\alpha}{C_0} = - \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) = - \frac{(1-\alpha)}{\alpha}$$

である。 α は通常 0.8 に選ぶ。

蓄電器マイクロホンの容量 C_M が角周波数 p (rad/sec) の正弦波音圧によって変化する場合に、その変化量を $\Delta C_\alpha e^{-ip t}$ とすれば C_α の変化は

$$(51) \quad C_\alpha = C_{\alpha 0} - \Delta C_\alpha e^{-ip t} = C_{\alpha 0} \left(1 - \frac{\Delta C_\alpha}{C_{\alpha 0}} e^{-ip t} \right)$$

と表わされるから

$$(52) \quad C_0 - C_\alpha = C_{10} + C_M - C_{\alpha 0} + \Delta C_\alpha e^{-ip t}$$

となり、蓄電器の端子電圧 (46) は

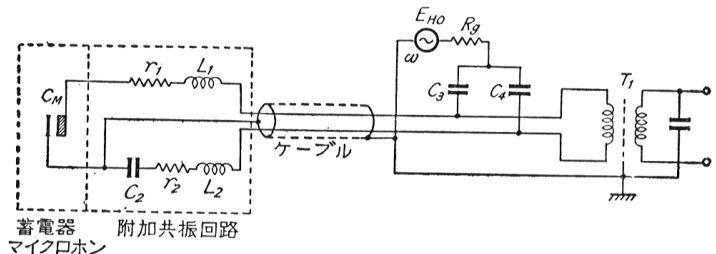
$$(53) \quad \begin{aligned} E_{H\alpha} &\approx \frac{C_0}{C_{\alpha 0}} \cdot \frac{E_{H0} e^{-i\omega t}}{\left(1 - \frac{\Delta C_\alpha}{C_{\alpha 0}} e^{-ip t} \right)} \\ &\approx \frac{C_0}{C_{\alpha 0}} \left(1 + \frac{\Delta C_\alpha}{C_{\alpha 0}} e^{-ip t} \right) E_{H0} e^{-i\omega t} \\ &= \frac{C_{10} + C_M}{C_{\alpha 0}} \left(1 + \frac{\Delta C_\alpha}{C_{\alpha 0}} e^{-ip t} \right) E_{H0} e^{-i\omega t} \end{aligned}$$

$$= -\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\left(1-\frac{\alpha}{(1-\alpha)}\frac{\Delta C_\alpha}{C_0}e^{-ipt}\right)E_{H0}e^{-i\omega t}$$

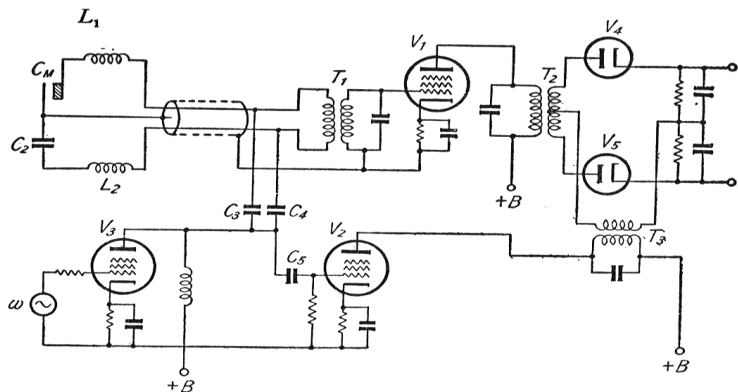
となり、 p なる信号で振幅変調される。よってこの出力電圧を直線検波すれば $\Delta C_\alpha e^{-ipt}$ に比例した出力電圧を取り出すことができる。

第7・49図の回路の下半分は高周波電圧の位相と振幅とを適当に調節して V_1 の出力電圧と合成し、搬送波成分を減少させて変調を増加しようとする回路である。HULL は R_s にタップを設けることによって 10, 100, 1000 μbar の音圧に対して 10% 変調が行えるような回路を試作した。この回路の欠点はマイクロホンに長いコードを付けることができないことおよび高周波発振器の周波数変動によって一種の自己雑音を発見することである。

HULL の回路の欠点を除去したものに ZAALBERG van ZELST⁽²²⁾ の回路がある。その原理は第7・51図に示す。マイクロホンケースの中には二つの並列共振回路 $r_1-L_1-C_M$ と $r_2-L_2-C_2$ がある。高インピーダンスの高周波発振器 (R_g, E_{H0}) の出力はこの二つの直列共振回路に供給されている。一方の回路には蓄電器マイクロホン C_M が挿入されていて、 L_1 と C_M および L_2 と C_2 とはそれぞれ搬送周波数に同調され、マイクロホンに音圧の加わらぬときには両回路の合成出力電圧 $E_1=0$ となるように調整されている。音圧によって C_M が変化すると E_1 に変調電圧の現われることは前の場合と同様である。ケーブルのインピーダンスレベルはほぼ (r_1+r_2) に等しい。よって r_1 と r_2 は L_1 および C_M の導線の抵抗をも含めて適当に調整すればよい。出力トランス T_1 は搬送周波数に同調させ、出力電圧を増幅してから直線検波を行えばよい。実際の回路を第7・52図に示しておく。この回路では、共振時に L_1 と L_2 の中には 25~50 mA の高周波電流が流れる。なお発振周波数の変動、温度変化、誘導雑音などの影響は L_1 回路と L_2 回路が平衡しているため非常に減少する。たとえば r_1+r_2 が約 30 (Ω) あるから、10 (帯域の



第7・51図 低雑音変調回路の原理。



第7・52図 ZAALBERG van ZELST の変調回路。

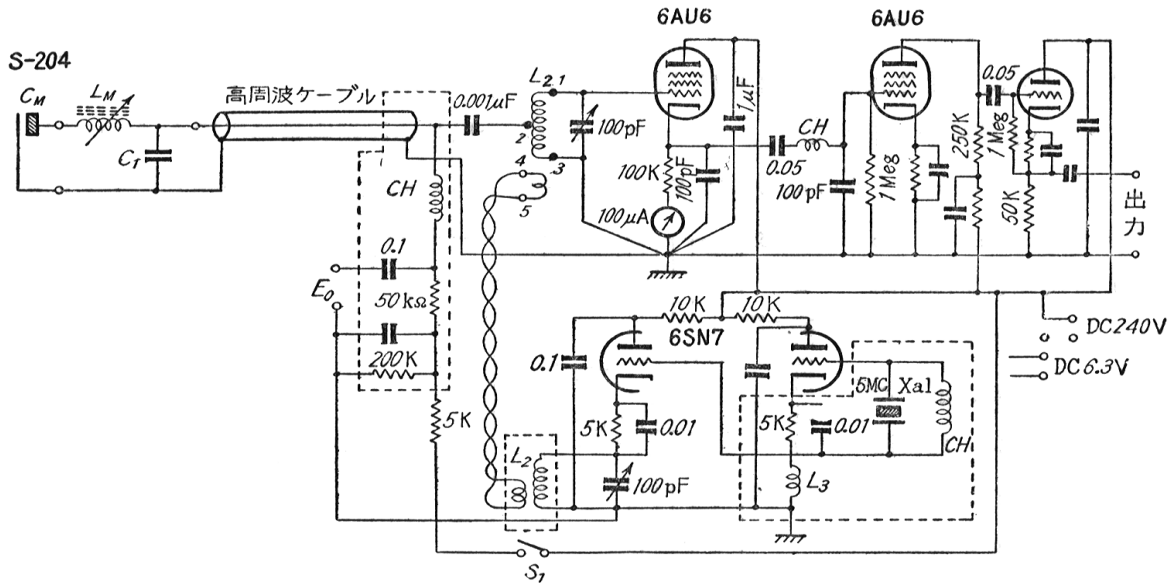
路が平衡しているため非常に減少する。たとえば r_1+r_2 が約 30 (Ω) あるから、10 (帯域の

(22) J.J. ZAALBERG van ZELST : " Circuit for Condenser Microphones with Low Noise Level " Philips Tech.Rev. , Vol.9, p.357-363, (1947-1948) .

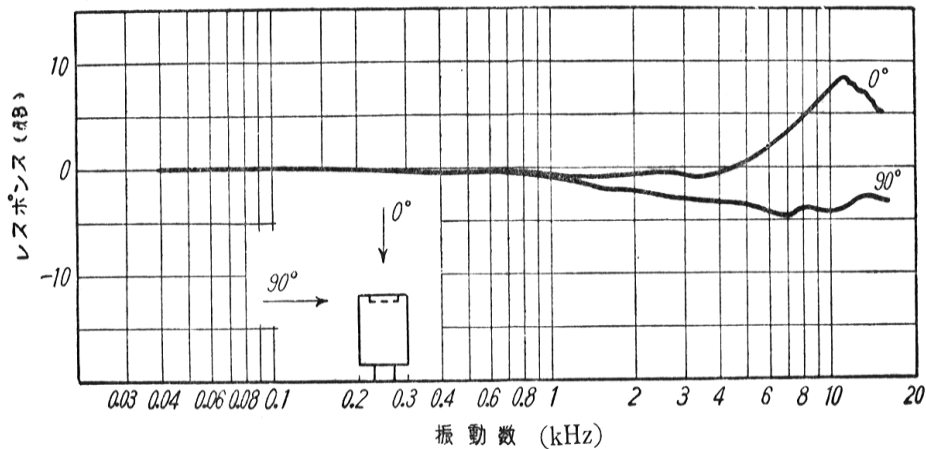
雑音電圧は 8×10^{-8} (V) となる。

わが国の NHK 技研で試作した S-204 型蓄電器マイクロホンは第7・53図のような回路を用いて 5 Mc の高周波を振幅変調し、無限インピーダンス検波回路にて検波して信号出力を取り出す方式を用いている。マイクロホンケーブルには高周波用同軸ケーブルを用い、10 m 位は延長すること

ができ、ケーブルのインピーダンスレベルは $\frac{1}{\omega C_1}$ で定まる。第7・53図の S_1 を閉じるとマイクロホンに直流成極電圧が加わるから、これと一定の周波数の可聴周波電圧 E_0 (V) を重畳するとマイクロホンの振動板は可聴周波数で励振され、その変位によって高周波電圧が変調され可聴周波出力を取り出すことができる。したがって一定の音圧による振動板の変位と等価な変位を与えるような較正用電圧 E_0 がわかっていれば、このマイクロホンの感度を E_0 によって監視することができる。なおこの回路の発振回路および検波回路を完全に防振構造とし、かつ自己雑音を極力小さくしないとダイナ



C_M :55 pF, L_M :最大 25.2 μ H, 最小 14.0 μ H,
 C_M と L_M の共振: 4.27~5.73 MHz, C_1 :0.001 μ F.
 第7・53図 S-204 高周波変調型蓄音器マイクロホン。



第7・54図 S-204 型蓄音器マイクロホンの特性。

ミックレンジを広くすることができない。マイクロホンの振動板は雲母板にめっきを施した小型のもので、その特性は第7・54図に示してある。感度は約 -80 dB である。

最近新しい蓄電器マイクロホンとして放送用や録音用に用いられるものに Altec 製 21 B 型がある。その外観は第7・55図、構造の概略は第7・56

図、特性は第7・57図に示す通りであり、マイクロホン部分の直径は 1.7 cm、長さは 0.8 cm なる小型のもので、振動板は直径 1.2 cm のガラス薄板に金めっきをしたものをスプリングワッシャで押えて固定してあり、固定電極の直径は 0.5 cm、その外側に内接シールド環が取り巻いている。容量は 6 pF しかないからこれと並列に接続される電気抵抗は 10^6

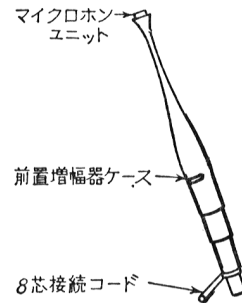
MΩ 以上でない特性が劣化する。またマイクロホン部分以外の浮遊容量の影響をも打消しておかないと特性が不良となる。そのために第7・57図に示すような前置増幅器を使用し、マイクロホンケースの下部におさめてあ

る。ただし電源部および回路部品類は別のケースに収め8芯コードで接続している。このマイクロホンは高い周波数まで無指向性にするために、ケースの形をトックリ形としマイクロホン部分の幾何学的形状をできるだけ小型にし

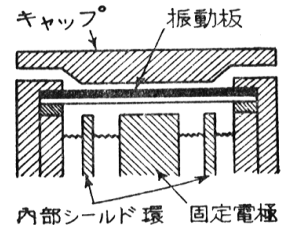
て音波の散乱を防いでいる。なお振動板を固定する方法が簡略なために、製品によって高音部特性に多少の相違があり、また特性自身も安定性に欠けていることはまぬがれない。

7・3・9 単一指向性蓄電器マイクロホン

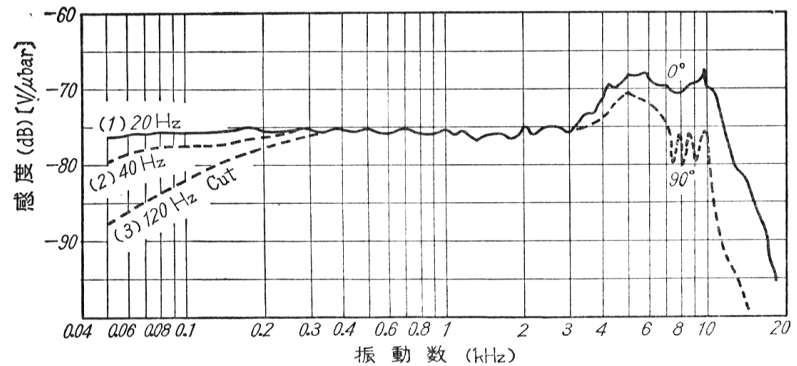
蓄電器マイクロホンをを用いると動電型マイクロホンと異なる独特の音質が



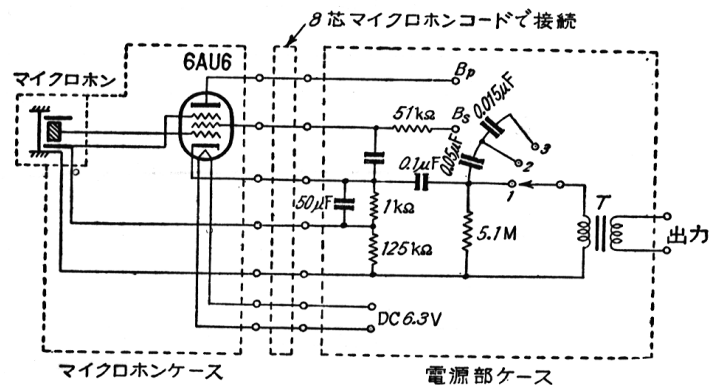
第7・55図 Altec 21-B 型蓄電器マイクロホンの外形。



第7・56図 Altec 21-B 型蓄電器マイクロホンの構造。



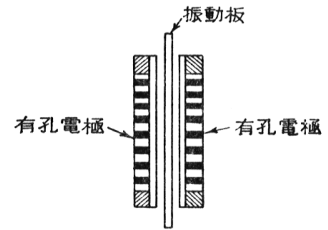
第7・57図 Altec 21 B 型蓄電器のマイクロホンの特性の一例 (畠出)。



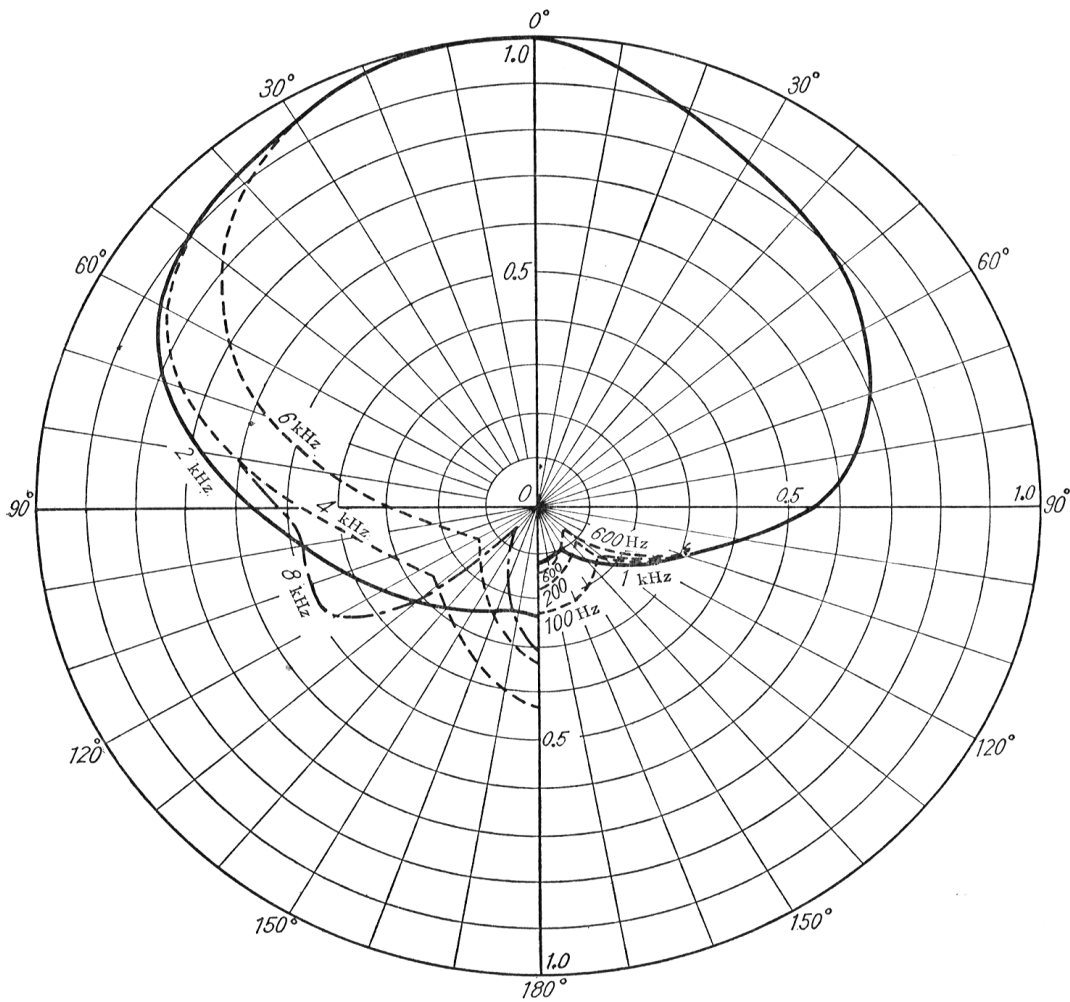
第7・58図 Altec 21 B 型蓄電器マイクロホンの前置増幅器。

得られるので、最近好んで放送や録音に使用されるようになってきた。そのために単一指向性や可変指向性を有する蓄電器マイクロホンが要望されるようになった。

速度型蓄電器マイクロホンは第7・59図のように振動板の両面に有孔固定電極を配置することによって実現される。したがって、これと圧力型マイクロホンとを組合せると単一指向性および可変指向性を有するマイクロホンが得られることは von BRAUNMUHL⁽¹⁾、BRUNO⁽²⁾、WILLING⁽³⁾等によって示されている。



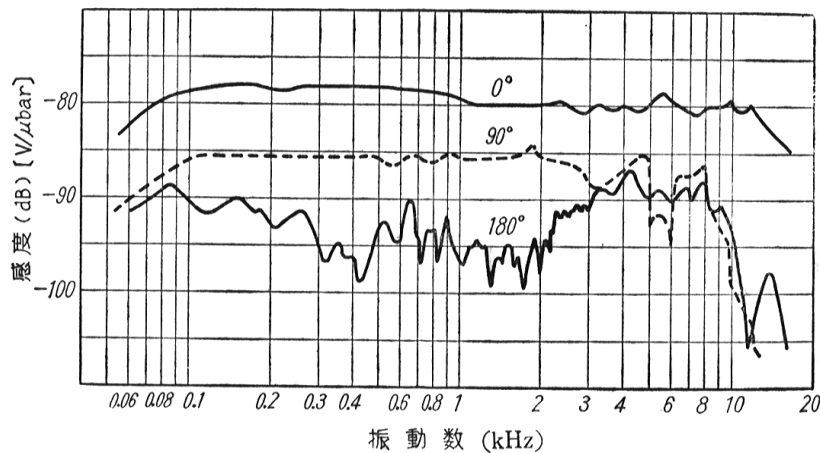
第7・59図



第7・60図 NHK 技研 CU-1型単一指向性蓄電器マイクロホンの指向特性(富田)

- (1) H.J.von BRAUNMUHL and W.WEBER :“ Kapazitive Richtmicrophon ” Hochfrequenztech. u.Elektroakustik.Vol.46, p.187-192, 1935.
- (2) BRUNO :“ A Static Velocity Microphone ” Electronics, Vol.9, p.21-22, 1936.
- (3) F.J.WILLING :“ A Minuature Directional Condenser Microphone for Acoustic Measurement ” J.A.S.A., Vol.10, p.85, 1938.

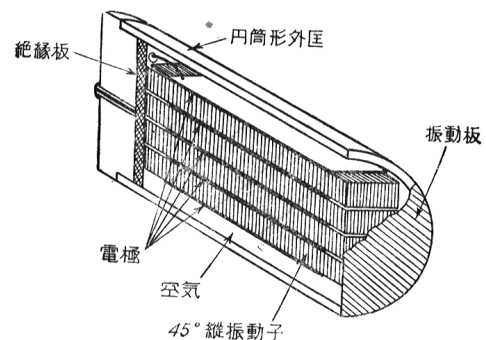
可変指向性蓄電器マイクロホンの代表的の例はドイツの Siemens 社の NEUMANN M-49 型蓄電器マイクロホンである。* これはヨーロッパでは放送および録音用に広く使われているが、その構造や特性については未だ明らかでない。このマイクロホンは成極電圧の符号と大きさを調整して指向性を変化することができるので、スタジオなどで遠隔操作を行うのに都合が良い。圧力型蓄電器マイクロホンの背面に小さな孔をあけて速度型の動作を加味し、単一指向性を持たせたものにわが国の NHK 技研の GU-1 型がある。マイクロホン部分の直径は 4 cm、厚さ 1 cm で振動板はプラスチック膜に金めっきをしてある。ケースは高さ 14 cm、直径 5 cm で前置増幅器を自蔵している。特性は第 7・60 図および第 7・61 図に示す。



感度カソードフォロア型前置増幅器の出力端子 (600 Ω) の電圧で示してある。蓄電器マイクロホンの端子電圧で表わせば 1 kHz の感度は -64.5 dB である。なお 1 kHz、1 μ bar の音圧に対する SN 比は 38.0 dB である。
第 7・61 図 NHK 技研 CU-1 型単一指向性蓄電器マイクロホンの特性 (富田)。

7・3・10 圧電型マイクロホン・その他のマイクロホン

圧電型マイクロホン⁽¹⁾は電気音響変換素子としてロッシェル塩または A・D・P. 等を用いるので、小型で軽くかつ安価であり、しかもその周波数特性を可動線輪型マイクロホンよりも平坦にすることができ、優れたマイクロホンとして重用されてよい筈でありながら、その温度および湿度に対する不安定性と機械インピーダンスおよび電気インピーダンスが非常に大きいことのために、未だ高級マイクロホンとして用いられるようにならない。しかし防湿処理が次第に完全なものになって来たので高級マイクロホンとして使用される日も遠くないであろう。この型のマイクロホンには 45° 縦振動子を利用したもの、音響電池を利用したもの、振動板と圧電板とを結合したものの、



第 7・62 図 45° 縦振動子を用いた圧電マイクロホンの構造。

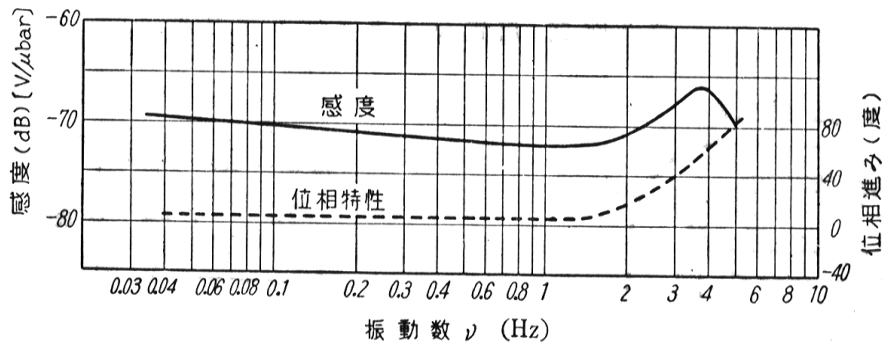
(1) クリスタルマイクロホンともいう。

* 星(桔兵衛): エレクトロニクス講座応用編, 第二章 p.99, p.104. 共立出版社 1957.

油圧を媒介としたものなどがある。

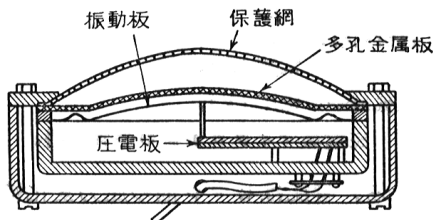
縦振動子を利用したマイクロホン⁽²⁾は第7・62図に示すような構造をしていて、ロッシェル塩またはA.D.P.の縦振動子4本を薄い金属の振動板と密着させたものである。このマイクロホンは振動板から見た機械インピーダンスが非常に大きいので、空気中の音波とはインピーダンスが整合できず、したがって空気中で使用するときの感度が非常に低い。そのために、普通の音圧レベルの音が入射したときの出力電圧は非常に小さい。しかし水中マイクロホンとして使用するときはこの欠点が除去されるので十分な感度を得ることができる。

音響電池⁽³⁾を用いたマイクロホンは、振動子自身が振動板として動作して屈曲運動をするために、機械的インピーダンスが低下して空気中で使用するのに適するようになる。しかも非常に小型でかつ両面から音圧を受けるので高音域まで完全な圧力型に保つことができ、かつ回折効果による指向性の

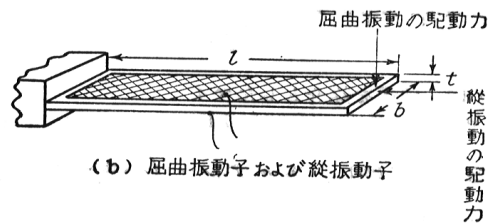


第7・63図 音響電池を用いた圧電マイクロホンの特性 (BERANEK).

乱れも少ない。音響電池1個の感度は約 $-78 \text{ dB [V/}\mu\text{bar]}$ 程度であり、その特性は第7・63図に示すようなものである。音響電池を並列に数個接続すると、電気的インピーダンスが低下すると同時



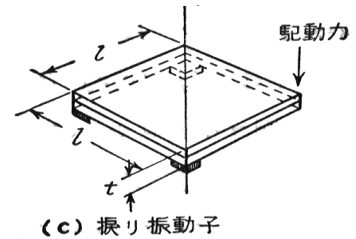
(a) 圧電マイクロホンの構造



(b) 屈曲振動子および縦振動子

に感度が高まり、マイクロホンとしての性能が向上する。

振動板と圧電板とを結合したマイクロホンにはねじり圧電板または屈曲圧電板が用いられる。その構造の一例を第7・64図に示す。振動板を用いることにより、振動板面から見た機械インピーダンスがかなり小さくなるので感度を高くすることができるが、振動子自身の機械インピーダンスがかなり大きいので振動板と振動子を含む振動系の周



(c) 振り振動子

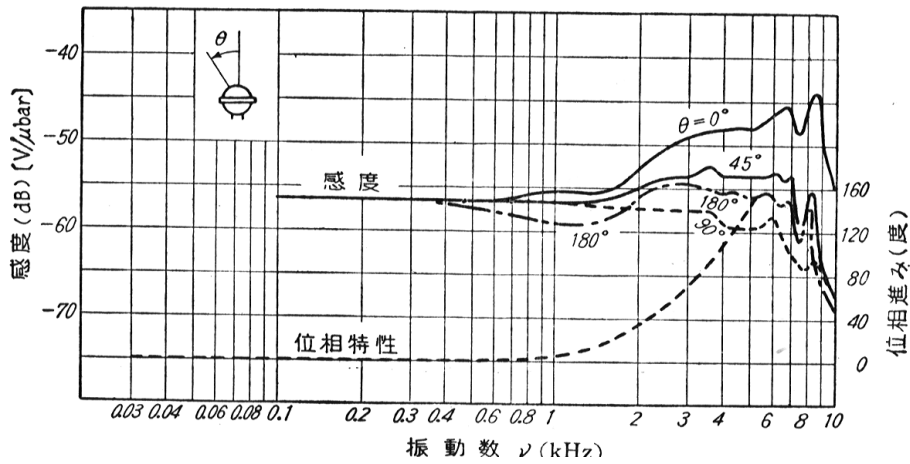
第7・64図 圧電マイクロホン。

(2) F.MASSA :“ A Working Standard for Sound Pressure Measurement ”, J.A.S.A., Vol.17 , p.29-34 , 1945.

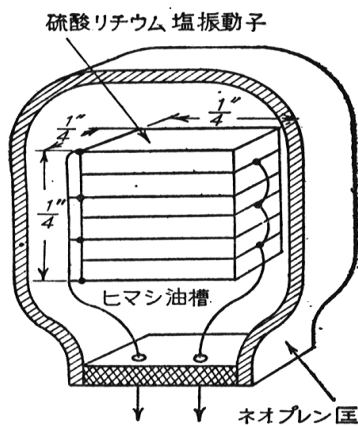
(3) 1・5・5 参照。

波数特性は余りよくない．その特性の一例を第7・65図に示しておく．

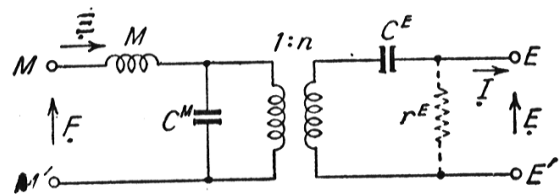
油圧を媒介としたマイクロホンは第7・66図のような構造をしていて，硫酸リチウム結晶の振動子



第7・65図 圧電マイクロホンの特性．



第7・66図 油圧を媒介としたマイクロホンの構造．(BERANEK)



- n : 電気機械変換比 (V/N),
- C^M : 振動系コンプライアンス (m/N),
- M : 振動系の実効質量 (kg),
- Ξ : 駆動点の振動速度 (m/s),
- F : 駆動点に作用する力 (N),
- C^E : 電気容量 (F),
- r^E : 容積固有抵抗,
- I : 電気端子の電流 (A),
- E : 電気端子の電圧 (V),

第7・67図 圧電型マイクロホンの等価回路．

をヒマシ油槽の中に浸し，ネオプレン（合成ゴム）で包んである．音圧はヒマシ油の圧力変化に変換され，硫酸リチウム塩振動子の全面に加わる．この振動子は厚さ 0.04 吋，幅 $\frac{1}{4}$ 吋の結晶板を6枚積み重ねて $\frac{1}{4}$ 吋立方の音響電池を形成している．その静電容量は約 23 pF ，開放端子の感度は約 $-98 \text{ dB [V/}\mu\text{bar]}$ である．

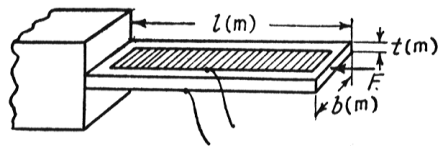
圧電型マイクロホンの等価回路は第7・67図に示す．また種々の振動子の寸法と等価回路定数との関係は第7・4表に示す通りである．なお電気容量 C^E は温度によって激しく変化する．その温度係数の例を第7・68図に示しておく．

容積固有抵抗⁽⁴⁾ r^E は，A.D.P. 以外の結晶を使用する場合には，非常に低い振動数の場合を除き，常温では問題とする必要がない．しかし，この抵抗は電気容量 C^E と並列に入らるために低周波を

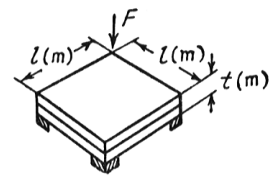
(4) bulk resistivity, 単位立方体の対向する2面間の電気抵抗 (Ω) ．

第7・4表

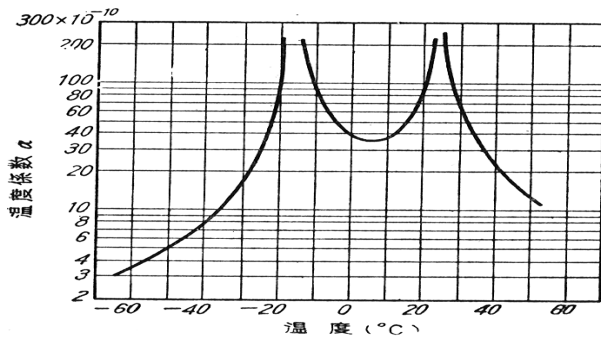
	ロッシエル塩 X板縦振動子	A.D.P. Z板縦振動子	硫酸リチウム塩 Y板縦振動子	ロッシエル塩X 板ねじり振動子	A.D.P. ねじり振動子
n (V/N)	$\frac{0.093}{b}$	$\frac{0.185}{b}$	$0.175 \frac{t}{bt}$	$\frac{0.128}{t}$	$\frac{0.233}{t}$
C^M (m/N)	$31.4 \times 10^{-12} \frac{l}{bt}$	$47.7 \times 10^{-12} \frac{l}{bt}$	$16.3 \times 10^{-12} \frac{t}{lb}$	$2.40 \times 10^{-10} \frac{l^2}{t^3}$	$4.27 \times 10^{-10} \frac{l^2}{t^3}$
M (kg)	$786 lb t$	$737 lb t$	$832 lb t$	$246 l^2 t$	$239 l^2 t$
C^E (F)	$\frac{1}{2} \alpha \frac{lb}{t}$	$130 \times 10^{-12} \frac{lb}{t}$	$91 \times 10^{-12} \frac{lb}{t}$	$1.12 \times 10^{-8} \beta \frac{l^2}{t}$	$1.12 \times 10^{-8} \times 0.0454 \frac{l^2}{t}$



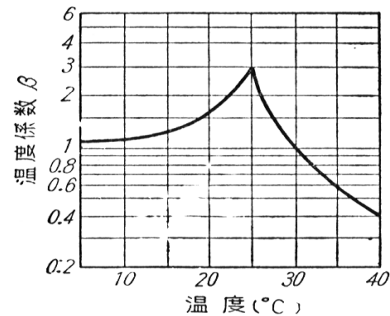
変位の方向は l と平行



変位の方向は t と平行

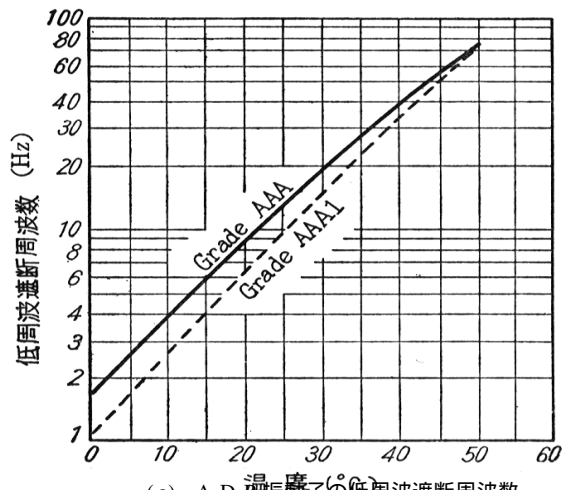


(a) ロッシェル塩 X 板縦振動子の電気容量温度係数 α と温度との関係 . $C^E = \frac{1}{2} \alpha \frac{lb}{t}$ (F).



(b) ロッシェル塩 X 板を正方形のねじり圧電板としたときの電気容量の温度係数 . $C^E = 1.12 \times 10^{-8} \beta \frac{l^2}{t}$ (F).

遮断する作用をし、この遮断周波数以下の感度は 6 dB/octave の傾斜で低下する。第7・68 図には A.D.P. の低周波遮断周波数と温度との関係を示している。また容量 C^E と電気端子に接続される負荷抵抗とが圧電振動子の抵抗を短絡しているので、熱擾乱騒音スペクトルは第7・46 図に示される通り、 C^E のリアクタンスが負荷抵抗より小さくなる周波数範囲で、周波数の増加にしたがって 6 dB/octave の傾斜で低下する。高温においては容量 C^E が減少すると共に



(c) A.D.P. 振動子の低周波遮断周波数と温度の関係 . (BERANEK) 第7・68 図

抵抗 r^E も減少するので、結晶が温度や湿度によって永久変性を生じると騒音レベルが増加する傾向を有する。

圧電型マイクロホンの非直線ヒズミは A.D.P. と硫酸リチウム塩の振動子の接合には無視できる程度に小さい。ロッシェル塩振動子は電氣的負荷抵抗の小さい場合には -18°C から $+24^{\circ}\text{C}$ の範囲で印加外力と出力電圧との間にヒステリシス現象を有し、電気容量 C^E にもヒステリシス現象が現われる。しかしこれは電気端子が開放に近い状態ならばほとんど影響を生じない。よって振動子の電気端子のすぐ近くにカソードフォロアーを配置する場合には、ヒステリシスの影響は無視してもよい。またマイクロホンを普通の音圧レベルの範囲で使用する場合には、ロッシェル塩に負荷をかけた状態でもヒステリシスの影響を無視して差支えない。

結晶板の装備方法は特性に重大な影響をあたえる。固定点の固定が不十分であったり、可動点が十分に運動できなかつたりすると、電気機械変換比 n が小さくなり、コンプライアンス C^M や実効質量 M も不適当な値となって特性を劣化させる。

ロッシェル塩に対する防湿処理は欠くことのできない重要なものであるが、なかなか完全な方法が実現できない。防湿処理は完全に気密にして、ロッシェル塩が湿度 30 % より 84 % の範囲から出ないように保たねばならない。結晶は温度と湿度との条件さえ保っておけば非常に安定であって、

第7・5表 圧電材料の性質。(BERANEK)

	ロッシェル塩	A.D.P.	硫化リチウム塩	チタン酸バリウム磁器
利用し得るヒズミ	剪断ヒズミ 膨脹ヒズミ	剪断ヒズミ 膨脹ヒズミ 縦膨脹ヒズミ	剪断ヒズミ 静水圧	剪断ヒズミ 膨脹ヒズミ 静水圧
結晶の切り方	X, 45°X Y, 45°Y	Z, 45°Z L	Y	— —
密度 (kg/m ³)	1.77×10^3	1.795×10^3	2.06×10^3	5.6×10^3
低周波遮断周波数 (25°C)	0.1 Hz	9~14 Hz	<0.001 Hz	非常に低い
永久変性を生ずる限界温度	55°C	—	—	120°C (変態点)
安全限界最高温度	45°C	125°C	75°C	90°C
漏洩が増加する温度	50°C	40°C	—	—
安全限界最高湿度 (防湿せず)	84%	94%	95%	含水率 0.1%
表面漏洩が増加する湿度 (防湿せず)	50%	50%	50%	90%
安全限界最低湿度 (防湿せず)	30%	0%	0%	0%
圧縮と引張を交互に加えたときの最大破壊応力 (Pa)	47.6×10^6	20.6×10^6	—	45×10^6

圧電マイクロホンの経時変化⁽⁵⁾は接着材と防湿処理を施すことによって生じ、これが安定するまでには数週間を要する。

(5) aging