U. D. C. 621.395.613.322

接触抵抗型音響電気変換器の諸問題
——送話器感度の構成要素ならびに炭素粉の加荷特性——

Problems of the Acoustic-Electric Transducer of Electric Contact Resistance Type
——Constitution Elements of the Specific Responce, and Loaded Characteristics of Carbon Granule——

西　山　静　男*

内　容　梗　概

まず炭素送話器の感度構成の要素を炭素粉のみの感度の項と機械コンプライアンスの項と振動板の能率による項とに分離し，多数の試料より相互の偏回帰係数よりこれを立証した。さらに炭素送話器で代表される接触抵抗型変換器が他種変換器に比しつねに約 42 db 以上高いことを証明し，音響→機械→電気の各系の変換において炭素粉によつて機械→電気変換において大なる利得が生じることをあきらかにした。

ついで振動板に集中機械インピーダンスが附加したために面積率が 20～30 %程度低下することを実証し，これを三分の一程度に改善する方法を提起した。さらにこの送話器を用いて実装状態の炭素粉の機械インピーダンスを測定し，通電によつて振動板が熱変形を起し，電極が変位して発生する炭素粉の加荷特性について実験的解析を試みた。すなわち炭素粉の機械インピーダンスの加荷特性は顕著に表われ，しかもそれが変位特性，周波数特性を有する。マイクロホン能率も圧縮圧力の小さい範囲の 1 ミクロン以内ではかなり大きい，あるいはまた雑音発生の原因はほとんど加荷によつて発生するものである。これらの現象は閉路，脈動現象で実際に起つていることを別に証明した。

〔I〕 緒　　言

炭素送話器で代表される接触抵抗型音響電気変換器は他方式の変換器に比し感度が非常に高いが特性が不安定であるという大きな欠点を有する。この原因を解明せんとするもので実装状態の振動板および炭素粉の振動特性さらに音響電気変換特性を実験的に検討したものである。

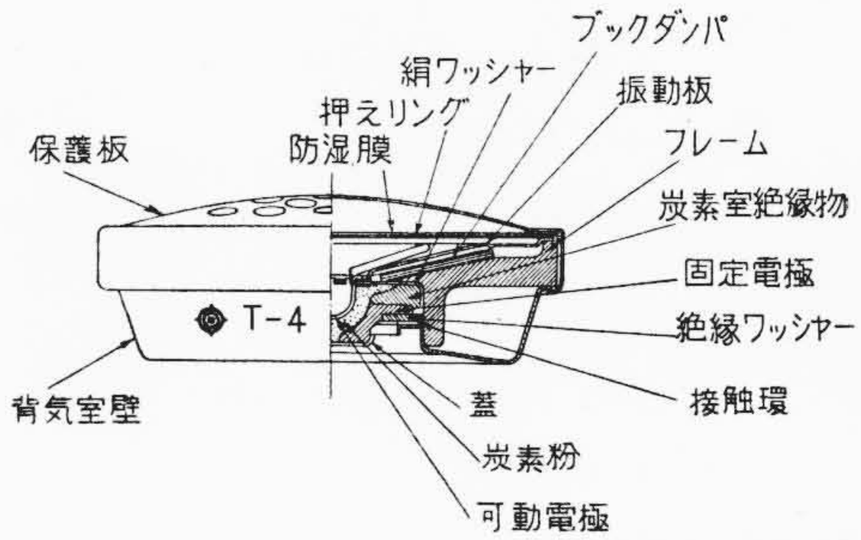
解明の順序として動作原理より感度を各構成要素に分離し，かつこの型の感度がほかの変換器に比しとくに高い理由をあきらかにした。

次に炭素粉の加荷（加圧）特性について述べ，まず炭素粉が実際に取付けられた状態で振動板の振動姿態に及ぼす影響についてこれを量的に表わす方法と振動板改善の手段を検討した。さらに接触抵抗型の大なる欠点である接融抵抗要素の加荷特性について述べる。これは接融面の接融圧力がきわめて低いものではあるが，なんらかの原因で接融圧力の変ることにより音響機器として機械—電気変換能率，機械インピーダンスが変化すること，および雑音が発生する現象を総称したもので，4号送話器を例にしてこれらの加荷特性を実験的に検討した結果を綜合して報告した。

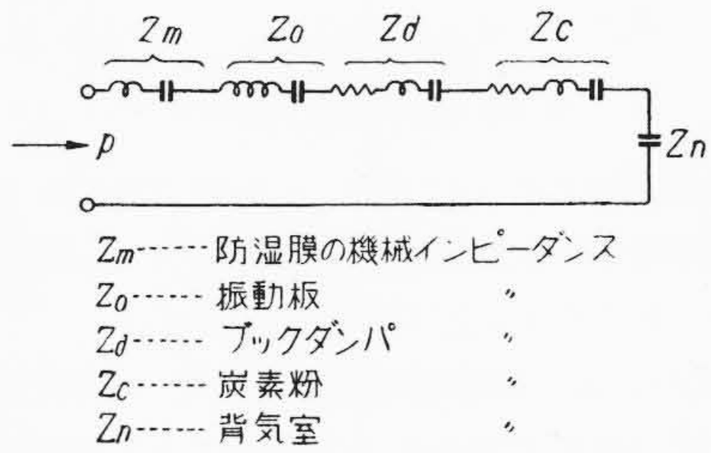
〔II〕 感度（変換係数）の構成要素

（1） 構成要素の分離

この種の一般の構造としては第1，2図のごとく振動板を受音用振動体とし，接触抵抗体を変換要素とした粉体を振動体に密着せしめる。さらに背気室を作つてスティフネス素子を附加した場合は粉体および背気室の機械インピーダンスは2端子網として振動板の機械インピーダンスに直列につながれる。もつとも代表的な送話器の例としては4号型送話器をあげることができる。振動面



第1図　4　号　送　話　器　構　造
Fig. 1. Construction of No. 4 Transmitter



第2図　音　響　等　価　回　路
Fig. 2. Acoustic Equivalent Net Work

* 日立製作所戸塚工場

S 上に一様駆動力の $P\varepsilon^{jwt}$ なる音圧を加えて駆動した時着目点 X に生ずる振動変位の特定方向 (λ_X) 成分 $\xi_{\lambda X}$ はよく知られているごとく振動系の損失を無視して[1],

$$\xi_{\lambda X}=\frac{P}{M}\sum_m\frac{1}{w_m^2-w^2}(\lambda_X\Xi_{mX})\iint(\Xi_m ds)\,\xi^{jwt}\quad\ldots(1)$$

ここに，M：全質量

w_m：第 m 様式自由振動角周波数

Ξ_m：第 m 様式振動の基準函数

Ξ_{mX}：X 点における第 m 様式振動の基準函数

音響電気変換の感度を単位音響勢力当りの皮相電力の比とする。ただし音響インピーダンスは一定とみなして省略し一般に次のごとくデシベル表示をする。

$$K_T=20\log\frac{|e|}{|P|\sqrt{R_T}}\quad\ldots\ldots(2)$$

(1) 式より　$|P|=\dfrac{|\xi_{\lambda X}|M}{\sum_m\dfrac{1}{w_m^2-w_2}(\lambda_X\Xi_{mX})\iint(\Xi_m ds)}$

$$K_T=20\log\frac{|e|}{\sqrt{R_T}}\frac{\sum_m\dfrac{1}{w_m^2-w_2}(\lambda_X\Xi_{mX})\iint(\Xi_m ds)}{|\xi_{\lambda X}|M}$$

$$=20\log\frac{|e|}{\sqrt{R_T}|\xi_{\lambda X}|}\frac{1}{M}\sum_m\frac{1}{w_m^2-w^2}(\lambda_X\Xi_{mX})\iint(\Xi_m ds)$$

送話器として用いる時は第一様式振動のみを考えればよいから $m=1$ したがつて

$$K_T=20\log\frac{|e|}{\sqrt{R_T}|\xi_{\lambda X}|}\frac{1}{M(w_1^2-w^2)}(\lambda_X\Xi_{1X})\iint(\Xi_1 ds)$$

$$=K_C+B+G\quad\ldots\ldots(3)$$

ただし

$$\left.\begin{aligned}K_C&=20\log\frac{|e|}{\sqrt{R_T}|\xi_{\lambda X}|}\ \text{db}\\ B&=20\log\frac{1}{M(w_1^2-w^2)}\ \text{db}\\ G&=20\log(\lambda_X\Xi_{1X})\iint(\Xi_1 ds)\ \text{db}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots(4)$$

X 点を振動板の中心にとり，λ を軸方向にとるとき，K_C は炭素粉の単位変位当りの交流出力で，変換要素として用いたときの炭素粉の感度に相当する。

(2) 式のごとく接触抵抗型では電圧 e は変位に比例するので変位感度型である。スティフネス制御を用いるため B は後述のごとく低周波では変換器の振動系の機械等価コンプライアンスの周波数特性をデシベル表示したものである。

また G 基準函数の定義より振動板の X 点の λ 方向の有効面積にほかならない。したがつて (3) 式の各項が感度を構成する三要素と称することができる。後述のごとくこの変換器の特性を論議することはこれらの各要素の検討に帰着する。

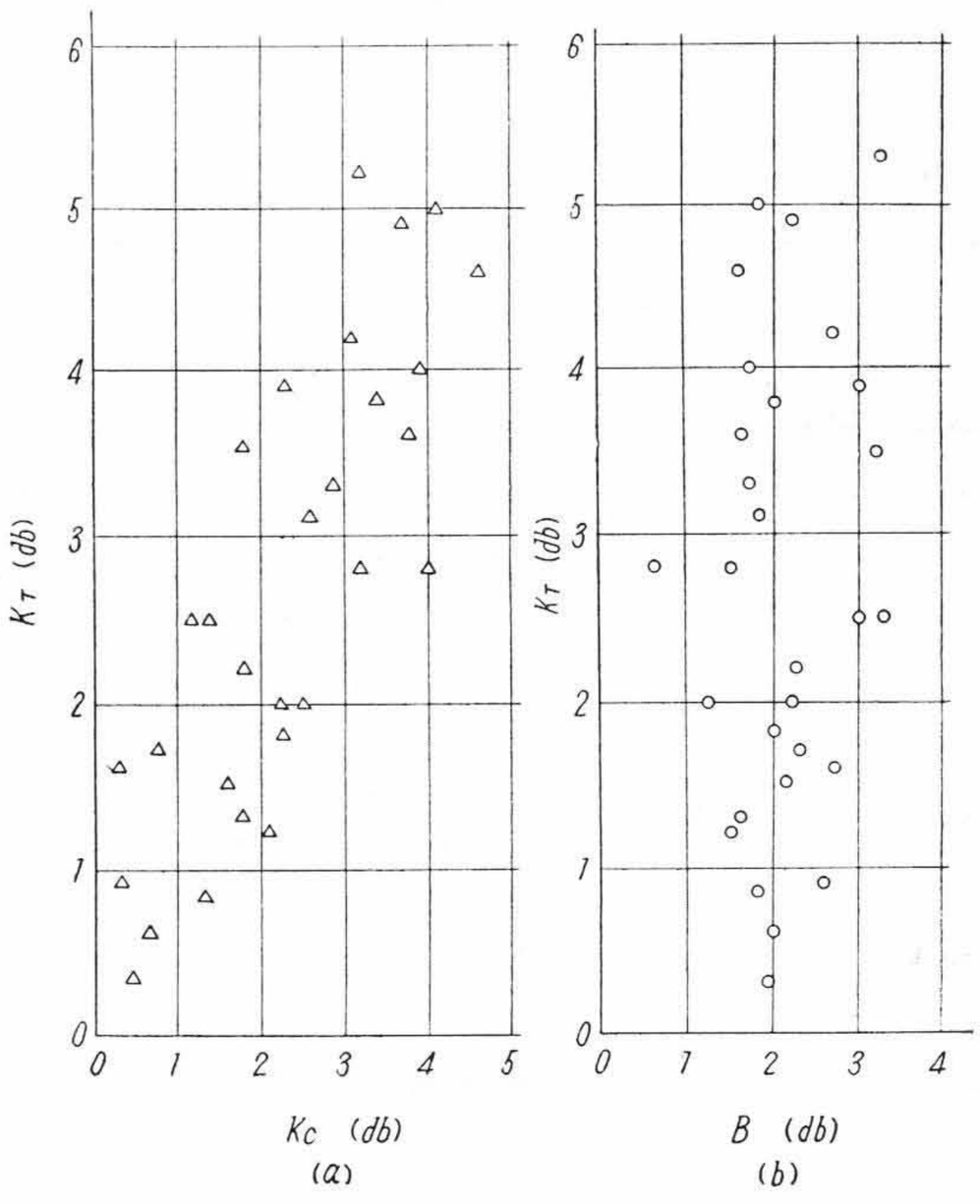
そこで (3) 式の関係を実際の例について確かめるために次のごとき実験を行つた。第3項の G は振動板の形状によるもので簡単には変えることができないので一定値とし，接触抵抗要素としての炭素粉の種類をかえて第1項，2項の K_C, B による K_T の影響を求めると次のごとき結果を得た。

その方法はまず使用炭素粉の K_C をべつに測定し，これを挿入した送話器について一定起振力で音圧駆動し，そのときの音圧．交流出力より (2) 式から K_T を求めまた変位より B を実測したものである。K_C の測定はバイブロメータを用いた炭素粉の変換係数測定法によつた。[2] また B は別に詳述せる装置[3] により一定駆動力のときの振動板中心部の可動電極の変位を測定したものであつて，駆動音圧ならびに振動板の面積率が一定であれば B は振動変位に比例する。

測定した電話回路は饋電流一定 (50 mA) の定電流回路である。この定電流回路は自動電話の基本回路であるから後述するごとき送話器回路は取扱いの便宜上特別にことわらないかぎりこの回路を用いるものとする。

第3図 (a), (b) はそれぞれ K_C, B による K_T の影響を表わしている。

炭素粉が変われば K_C, B 共に変わるのである。いまこの結果と (3) 式の関係と対照するに K_T, K_C, Bは すべてデシベルで求めたものであるから K_T が K_C, B の一次函数であらわされると考えてよい，まず K_C, B の



第3図　K_T と B, K_C の関係
Fig. 3. Relation between K_T and B, K_C

係数が1にあらざる任意の定数 a, b で表わされる直線関係と仮定して（5式）のごとく表わす。

$$K_T = aK_C + bB + G \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

G を一定として第3図の測定結果より直線回帰として偏回帰係数 a, b を定める最小自乗法の手法を用いれば公知のごとく

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{\gamma_{KC\cdot KT} - \gamma_{KC\cdot B}\,\gamma_{B\cdot KT}}{1-\gamma_{KC\cdot B}^2}\,\frac{\lambda_{KT}}{\lambda_{KC}} \\ b &= \frac{\gamma_{B\cdot KT} - \gamma_{KC\cdot B}\,\gamma_{KC\cdot KT}}{1-\gamma_{KC\cdot B}^2}\,\frac{\lambda_{KT}}{\lambda_{B}} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (\ldots 6)$$

ここに γ, λ はそれぞれ添字の表わす函数間の相関係数および標準偏差を示すものである。第3図より数値計算の結果は

$$\left.\begin{aligned} \gamma_{KC\cdot KT} &= 0.115 \\ \gamma_{B\cdot KT} &= 0.804 \\ \gamma_{KC\cdot B} &= -0.388 \end{aligned}\right\} \quad \left.\begin{aligned} \lambda_{KT} &= 1.39 \\ \lambda_{KC} &= 0.78 \\ \lambda_{B} &= 1.22 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

しかして（6）式より

$$\left.\begin{aligned} a &= 0.90 \\ b &= 1.14 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

この結果より偏回帰係数 a, b は試料による分散が多いけれどもほぼ1に等しいことを示している。したがつて（5）式は（3）式の形に表わされることが結論としてえられ（3）式が実際の場合にも成立していることがわかる。また K_C と K_T の関係より炭素粉の感度から送話器の感度を規定せんとするときは非常に誤差の多いものであることもわかる。

（2） 変 換 係 数

接触抵抗型変換器と他種の型の変換器との間の変換係数の比較を次に行つた。音響電気変換について考察し，単位音圧当りの皮相出力を変換係数として用いた場合これを K_q と表わせば

$$K_q = 10 \log \frac{ei}{P} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

ここに e：誘起電圧（V）
i：電流　（A）
P：音圧　（bar）

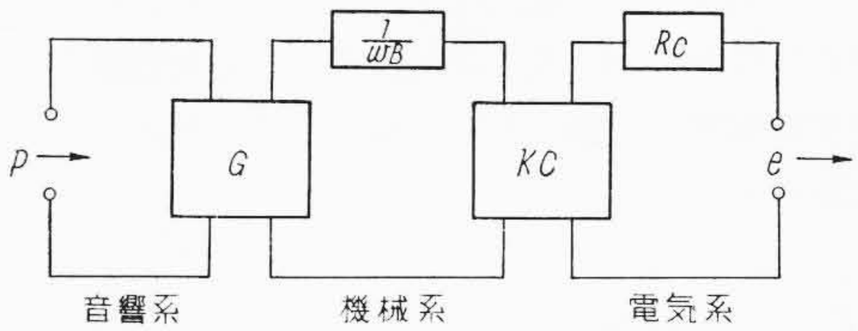
接触抵抗型として4号型送話器を考えると，日立製作所でえられた多数の生産品の平均値として $K_T = -52$db ((2)式)，変換係数 K_q を C.G.S. 単位で表わし $K_q = 28$db をえている。ただしこれは300サイクルの値で周波数が十分低くスティフネス制御で K_q の一定値の範囲である。

またほかの変換器の音響→電気変換に関する変換係数 K_q は音響入力端子を 20 cc の結合室よりえたときを考え変換定数 θ_s を用いて[4]

$$K_q = -10 \log \frac{\gamma P_o}{w V_c} + 10 \log |\theta_s| \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

第1表 各型変換器の変換係数
Table 1. Conversion Coefficients of Various Transducers

係数＼型	想理変成器	4号受話器	電磁型受話器最高限度	チタン酸バリウムを用いた最高限度	ニッケルを用いた最高限度	4号送話器
$10 \log \theta_s$	0	−17.8	−10.0	−11.5	−20.0	
K_q	−13.8	−31.6	−23.8	−25.3	−33.8	28.0



第4図 変 換 回 路
Fig. 4. Transducing Net Work

γ：断熱指数
P_o：大気圧
V_c：結合室の容積
w：角周波数

かつ θ_s 値は各種の変換器については第1表に示すごとくに与えられる[4]。

$\gamma = 1.4$　$P_o = 760$ mmHg　$V_c = 20$ cc　$f = 300$ C.P.S

として炭素送話器について K_q を求むれば表示のごとくである。理想変成器では $\theta_s = 1$ であつて，これより $K_q = -13.8$ db をうるがこれに比較してもすでに約 42 db 感度が高いことを示している。かように他種のいかなる変換器に比しても驚異的に高い変換係数であることが示される。

変換器には偏極勢力が必要であつて，これは変換周波数を一致させることもあるが同時に一般の変換器では変換の能率を最良の状態に置くこともその目的である。しかし送話器のごとき接触抵抗型では偏極の直流勢力はそれ自身が直接変換されるものであつて，機械振動により抵抗を変調することによつて直流勢力の一部をして振動に比例した交流勢力に変換させるもので，音響ないし機械勢力は単に直流の開閉作用を行うものである。この動作原理はほかの変換器と本質的に異なる。

（3） 音響—機械—電気系

この種の変換器は変換の過程に音響→機械→電気の2回の変換を通じて行つている。ここでは変換の各段について変換係数を検討する。

機械系の起振力は音圧 P，有効面積 G の積であつて，G は音響—機械系の変換の大小を表わす。B は低周波では等価コンプライスで $1/wB$ が機械振動系の機械インピーダンスである。この機械系から電気系への変換は

接触抵抗要素の K_c で行われる。したがつてこれらの変換系例を図示すれば**第4図**のごとくである。各段は順次音響，機械および電気回路に絡がれる。この内機械—電気変換間のみ不可逆であることはよく知られている。音響入力端子において音圧 P が全面積 $\iint_S ds$ に加えられるとき，振動系の機械インピーダンスの有効駆動力として変換される力は変成比を κ とすれば $\kappa P\iint_S ds$ である。しかるに面積率と変成比はひとしい[5]から面積率より κ は求められる。(4)式の G は振動板の有効面積を表わすもので面積率の定義から全面積に対する比として κ は次式であらわしうる。

$$\kappa=\frac{S_e}{\iint_S ds} \quad \cdots\cdots(11)$$

ここに $S_e=(\dot{\lambda}_X\dot{\Xi}_{1X})\iint(\dot{\Xi}_1 d_s)$

κ の値は形状により一般に1以下の任意の値をとりうるが，4号送話器を例にとつて実測の結果 0.82 をえた。したがつて振動面上に一様分布した音圧の 82 %が機械系を駆動することを意味する。全面積は 19.64 cm² であるから $S_e=16.30$ cm² となる。

(4) 式において

$B=20\log Y_1$ とおけば

$$Y_1=\frac{1}{w_1^2-M\left\{1-\left(\frac{w}{w_1}\right)\right\}^2} \quad \cdots\cdots(12)$$

十分低い周波数においては $(w/w_1)^2\ll 1$ かつ

$w_1^2=\dfrac{S}{M}$ なるゆえ

$$Y_1=\frac{1}{s}=\frac{1}{s_c+s_d+s_b} \quad \cdots\cdots(13)$$

$s=s_c+s_d+s_b$

s_c：炭素粉の入力機械インピーダンス中のスティフネス

s_d：振動板の可動電極よりみたスティフネス

s_b：振動板に換算した背気室のスティフネス

4号送話器を例にとると

$s_c=2.15\times10^7$ dyne/cm

また附加質量法より s_d，s_b，を求めれば

$s_d=9.06\times10^6$ dyne/cm　$s_b=2.27\times10^7$ dyne/cm

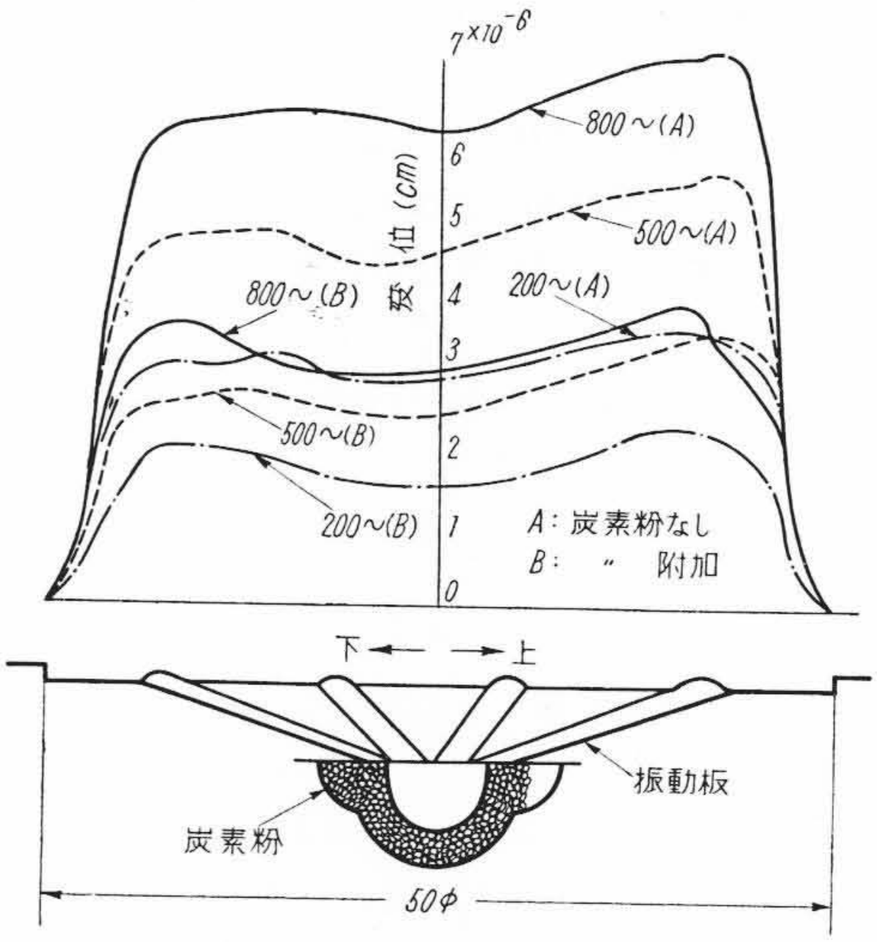
を得る。いまこの機械系の着目点の振動変位を $\xi_{\lambda X}$ とすると，(1) (11) (13) 式より

$$\xi_{\lambda X}=PY_1S_e \quad \cdots\cdots(14)$$

なるゆえ，この振動系の vector power を P_m とすれば 300 サイクルにおける P_m は

$$P_m=\frac{1}{wY_1}(w\xi_{\lambda X})^2$$

$$=\frac{wP^2s_e^2}{s} \quad \cdots\cdots(15)$$



第5図　4号振動板上の変位分布の比較
Fig. 5. Comparison of Distribution of Displacements on the Diaphragm of the No. 4 Transmitter

音圧 $P=20\,\mu$ bar においては

$$P_m=0.15\,\mu\text{ Watt} \quad \cdots\cdots(16)$$

これが炭素粉の開閉動作によつて電気系に取出しうる電力 P_e は前節と同様の平均感度の −52 db を用い，かつ $P=20\,\mu$ bar とすれば

$$P_e=1.26\times10^{-2}\text{Watt} \quad \cdots\cdots(17)$$

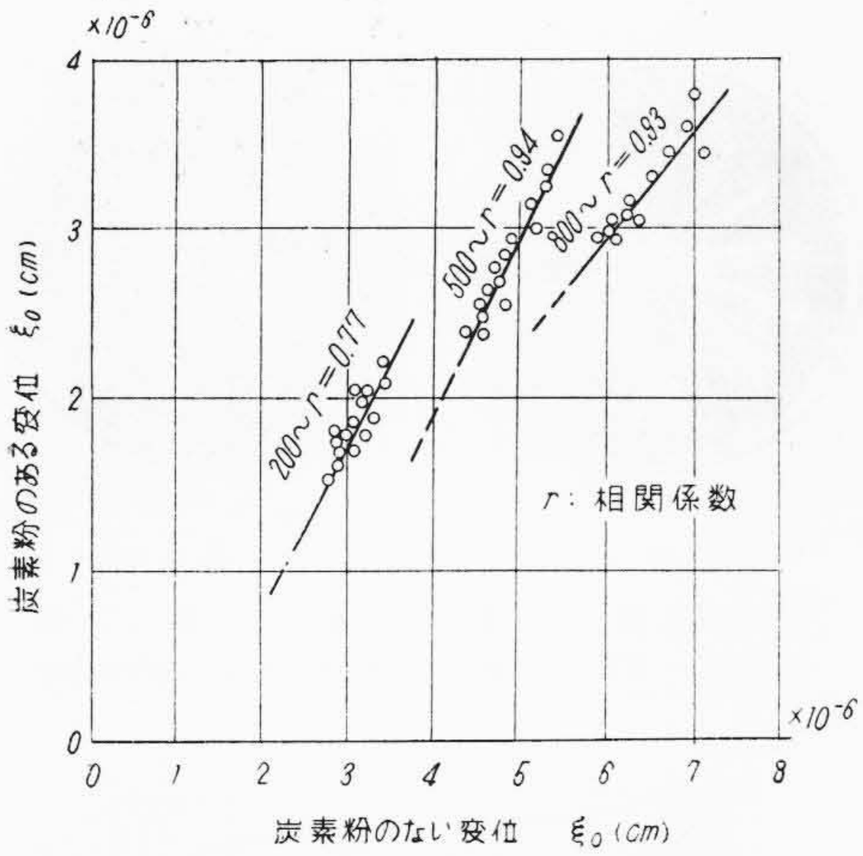
となる。

上記の機械電気変換能率において P_m は Vector Power であつて P_e/P_m よりただちに能率と考えることはできない。しかし炭素粉のリレー動作において直流偏倚電力がその振動の Vector Power に比例して変換されるので，両者の比を一応能率と考えて $P_e/P_m=49.2$ db がえられる。

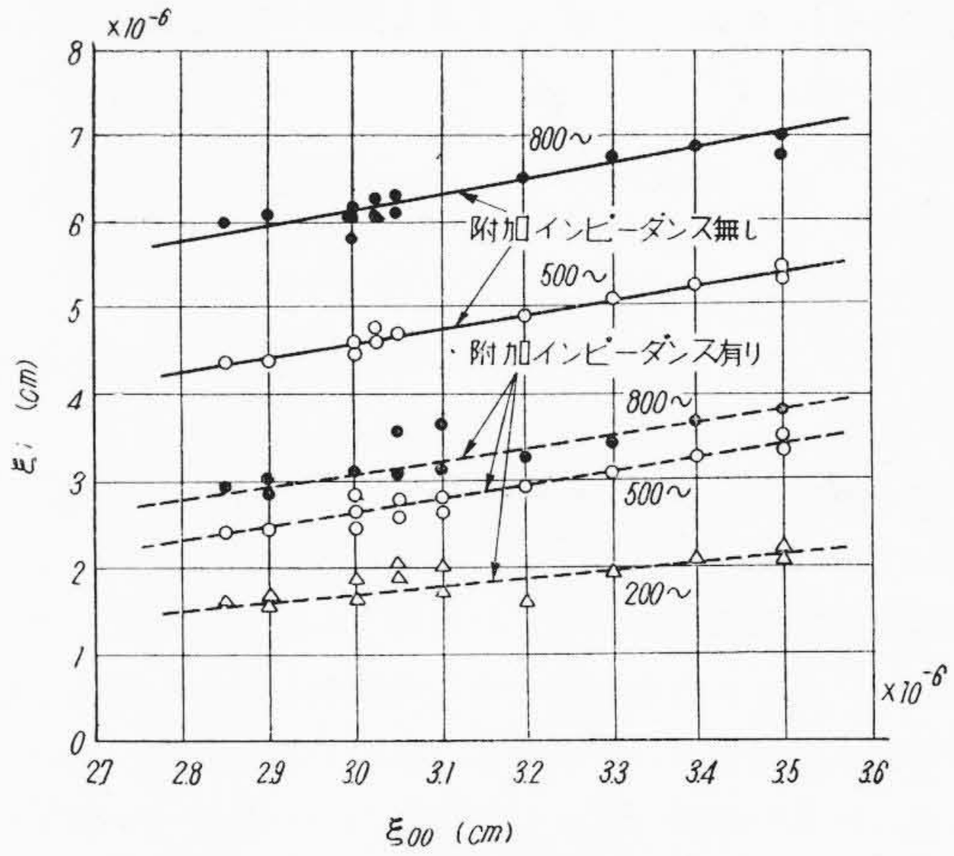
かように炭素粉を変換要素として利用した場合，偏倚電力の損失を無視すれば機械勢力を非常に増巾して電気勢力に変換しうるのである。電力系の質の変換と同時に量の変換を行ない利得の高い増巾作用を表わす。

〔III〕 振動板の振動模様の炭素粉による影響

次に炭素粉が送話器に実装されたときの機械インピーダンスを実験的に検討するため，まずその準備として本章では炭素粉の集中機械インピーダンスの附加のために振動板の振動模様にあたえる影響について測定した。振動模様を測定するにさいしては変位，位相は一定音圧により振動板を駆動した場合で既述のバイブロメータ法[1][2]を用いて測定した。送話器の構造は前報で利用したとおなじく背気室を開放して背面より音圧をあたえたものである。変位分布の実測の結果はすでに報告[1][2]したと



第6図 炭素粉の附加による変位の差
Fig. 6. Comparison of Displacement Loaded by Carbon Granule



第7図 基準模様に対する周波数附加インピーダンスの影響
Fig. 7. Characteristics of Frequency and Loaded Mechanical Impedance for Standard Vibration Mode

ころで**第5図**のごとく，それぞれ 200 c/s, 500 c/s および 800 c/s の低周波における変位であつて振動板単独のものと炭素粉を附加したものとの比較を示す。

4号送話器では中心部は円錐形にしてスティフネスを増大しているため，図のごとくその変位は大きくかつ一様で面積率がいちじるしく向上している。炭素粉を附加したものは全体に大きく抑制せられているが各点の対応からその比はおおむね一定で，このときの位相差も測定の結果では1度以内で無視できる程度の僅少値であつて，図示の変位は同位相と考えて差支えない。

この変位の振動模様の変化を量的に把握するために次のごとき手法を用いた。すなわちそれぞれの周波数において振動板の円錐の部分について中心より 0.25, 0.5 mm ……の相対応する位置における炭素粉の附加の有無に対して両者の関係を求めたものが**第6図**である。各周波数において振動板のみおよびこれに炭素粉を附加したときの変位をそれぞれ ξ_o, ξ_c としてあらわせばおおむね直線関係であることがわかる。これをつぎの関係式に表わした。

$$\left.\begin{aligned}\xi_c&=1.14\,\xi_0-1.65\times10^{-6}\text{cm}\ (200\ \text{c/s})\\ \xi_c&=1.03\,\xi_o-2.11\times10^{-6}\text{cm}\ (500\ \text{c/s})\\ \xi_c&=0.78\,\xi_o-1.71\times10^{-6}\text{cm}\ (800\ \text{c/s})\end{aligned}\right\}\ \ldots(18)$$

ここで炭素粉の附加によつて振動が単純に制動されて振動模様に変化がなければどの対応点を取つてもそれぞれの回帰係数は一定であるはずで

$$\xi_c=K_i\xi_o\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(19)$$

なる形式を表すべきである。しかるに事実は (18) 式のごとく常数項を含む直線方程式であつて炭素粉による集中附加インピーダンスの附加で振動模様が変化を受けたことを示す。同じ手法を用いてこれらの測定値のうち周波数も低くもつとも安定し，かつ単純な振動模様である 200 c/s の附加インピーダンスのない場合の振動模様を標準模様として，ほかの周波数およびインピーダンスの有るもの無いもののすべての場合の回帰線を求めると**第7図**のごとくで一般の式として (18) 式と同様な直線的な関係式をえた

第2表 周波数，附加インピーダンスの影響
Table 2. Effect of Frequency and Added Impedance

周波数	附加インピーダンス	K'_i	C'_i	q'/q
200 c/s	無	1.0	0×10^{-6}	1.00
	有	1.0	−1.4 〃	0.82
500 c/s	無	1.5	0.0 〃	0.98
	有	1.5	−2.1 〃	0.80
800 c/s	無	1.9	0.5 〃	1.02
	有	1.7	−2.3 〃	0.68

$$\xi_i=C'_i+\kappa'_i\ \xi_{oo}\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(20)$$

ξ_{oo}: 200 c/s 附加インピーダンスの無いときの基準の変位

各曲線について C'_i, κ'_i の計算の結果を整理して表示すれば**第2表**のごとくである。

そこで (9) 式の形式の模様が (20) 式に変化したために生ずる面積率の変化を次のごとく求めた。体積変位は標準振動の場合を ΔV, (20) 式の場合を $\Delta V'$ とすれば

$$\left.\begin{aligned}\Delta V&=\iint_S\xi_{oc}ds\\ \Delta V'&=\iint_S\xi_i ds=C'_i\iint_S ds+\kappa'_i\iint_S\xi_{oc}ds\end{aligned}\right\}\ldots\ldots(21)$$

ΔV, $\Delta V'$ に対応する振動板の中心部よりみた面積率

をそれぞれ q および q' とすると面積率の定義より

$$q=\frac{\Delta V}{\xi_{io}} \qquad q'=\frac{\Delta V'}{\xi'_{io}}$$

$$\frac{q'}{q}=\left(\frac{C'_iS}{\iint_S \xi_{oo}ds}+K_i\right)\frac{\xi_{io}}{\xi'_{io}} \cdots\cdots\cdots\cdots (22)$$

ここに　$S=\iint ds$（全面積）

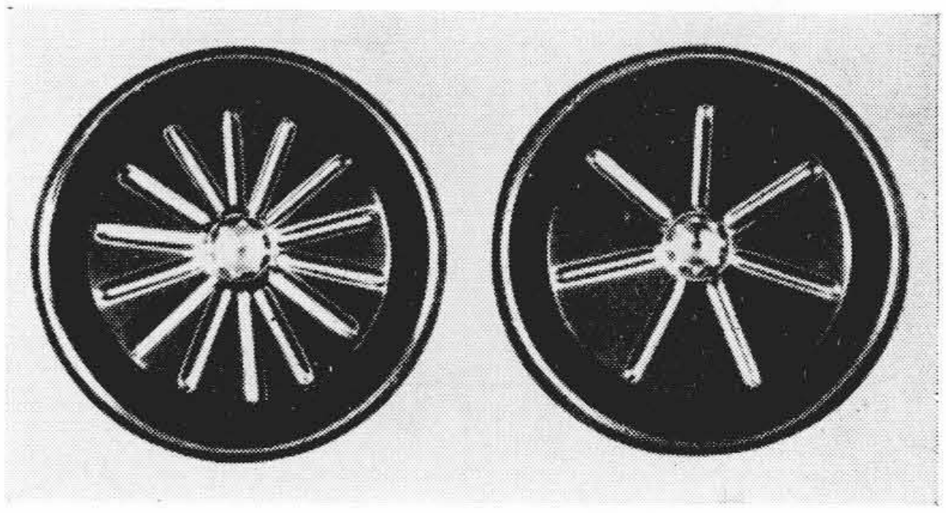
ξ_{io}, ξ'_{io}：それぞれの着目点（ここでは中心部）の変位

$\iint_S \xi_{oo}ds$ は 200 c/s の振動板単独の場合の体積変位であつて**第5図**で示したごとく簡単な形では表われない振動模様である。しかしこれらのうち周波数が低く附加インピーダンスのない場合でこの形がもつとも単純な形状で図式計算を用いて求めることができる程度のものである。計算の結果 $\Delta V=4.72\times10^{-5}$ c.c かつ $q=83\%$を得た。(22) 式より q'/q を求めた結果は**第2表**にあげている。振動模様の周波数のみに対する影響は**第2表**に示す結果であきらかなごとく，附加のない場合の 500 c/s, 800 c/s における差はそれぞれ2％程度でほとんど $q'/q\fallingdotseq1$ とみなしうるものである。また集中附加のあるものは約 20～30％の面積率の低下をきたしている。

かようにこの振動板では振動模様の変化はかなり存在すると見るのが妥当と考えられる。集中附加が加つても振動模様が変らないということは設計上きわめて重要なことである。とくに送話器などのごとく音響→電気変換器では入力側では空気を媒質とするため音響インピーダンスは低く，これに整合するために振動板のインピーダンスをできるだけ下げ空気の特性インピーダンスに近づける必要があつて，かかる場合は附加インピーダンスの影響をとくに受けやすい。

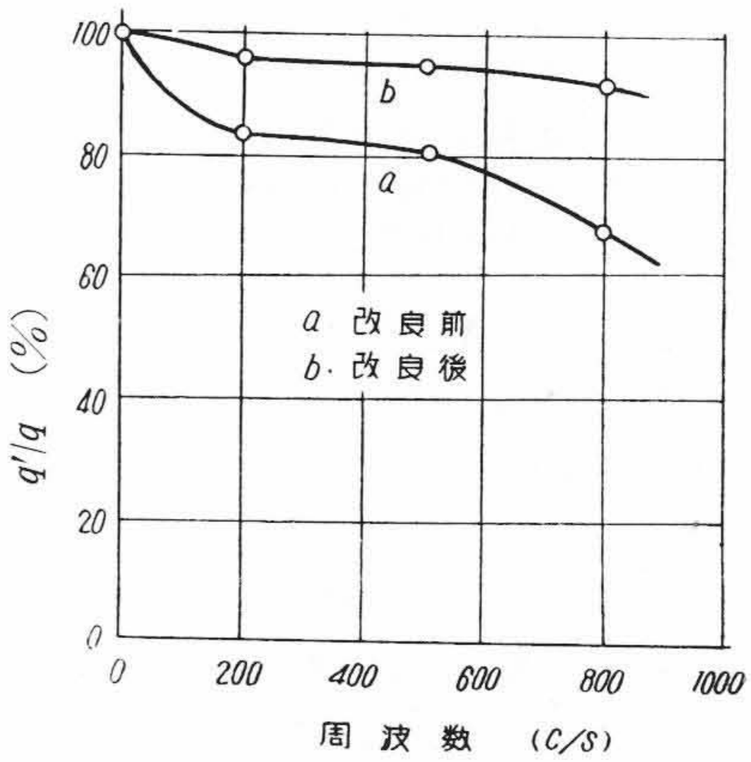
振動板の塗装技術が許しうるならば実効質量を増加せずに円錐部のスティフネスを増加するために円錐の頂角をさらに小さくするか，あるいは適当にコラゲーションの数を増加することが望ましい。しかし第V章以下に述べるごとく接触抵抗型には脈動現象などの特異な現象が発生するゆえ前者のごとき円錐形の頂角を小さくすることはその弊害を増長することであつて，その方法で附加インピーダンスの影響を減少するには両者を勘案した最適値が存在することは理解するに難くない。

上記のほかの対策法として振動板に半径方向にコラゲーションを附する方法を用いて溝を深くかつ本数を多くすれば顕著に改善できる。筆者はこのコラゲーションの修正により**第2表**の試料を改善して炭素粉の附加インピーダンスの影響を減少した。**第8図** (a)は改良前，(b)は改良後の構造で深さ 0.5 mm のコラゲーションの本数を2倍にしたものである。**第9図**は改良前後の面積率の減少率 q'/q の比較で，約 1/3 程度に減少しえている。かようにコラゲーションのみにより改良することができ，またこの場合には脈動現象などには影響を与えない。なおここに得た改良前後の q'/q の測定も前述の方法と同様に振動模様を求めて (22) 式の方法で測定したものである。



(a) 改良前　　(b) 改良後

第8図　振動板形状
Fig. 8. The Photographs of Diaphragm



第9図　q'/q の改善
Fig. 9. Improvement of q'/q

〔IV〕 入力機械インピーダンス

変換係数はスティフネス制御の部分を考えると入力機械インピーダンス中のスティフネスの大きさに逆比例する。

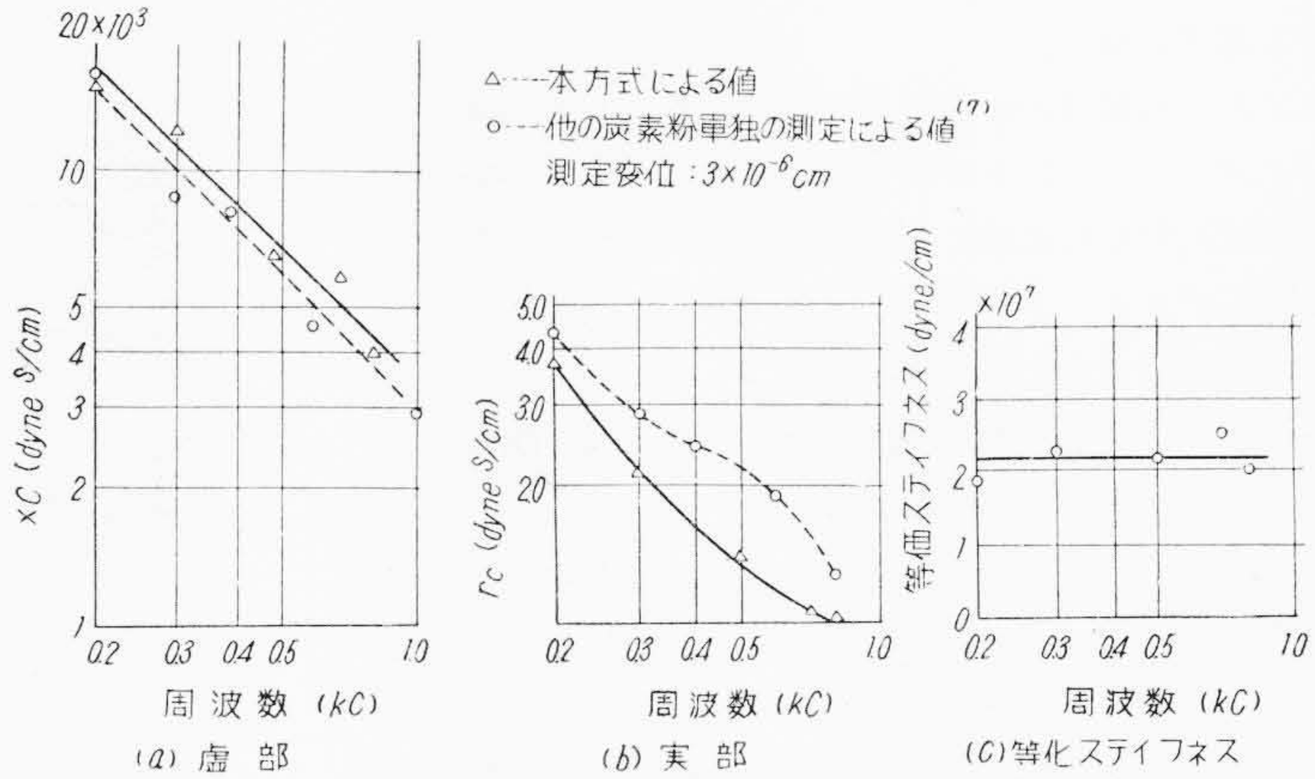
しかるに4号送話器を例にして考えても第II章第3節で述べたごとく炭素粉のスティフネスはほとんど系全体の約 40 ％を占めておりその大小はただちに全体の性能に影響する。したがつて本節においては前章に関連してとくに実装状態における入力機械インピーダンスについて論じた。

(1) 測定理論

粒体の振動は変位，周波数特性を有し複雑であつて純粋には線型には取扱いえない。しかし入力機械インピーダンスの測定は比較的簡単である。すなわちもつとも一般には低機械インピーダンスのバイブロメータの振動系

に炭素粉のインピーダンスを附加し，駆動したときの速度と位相より求められる[7]。筆者はここでは主として前節と同じように炭素粉を組込んだ構造上の問題として取扱つている。

そこで炭素粉が実際の送話器に使用されているときを考える。炭素粉は集中した機械インピーダンスとして働かすと前節で述べたごとく炭素粉の影響を受けて，振動板のスティフネスが高くないときは振動模様がくずれ面積率が低下する。このために後述のごとく変成比が落ち有効駆動力が減少して炭素粉の機械インピーダンスは見掛上急激に増加する。本節でとくに機械インピーダンスを取上げた理由は実際の送話器に組込まれた状態において振動板に与える効果も含めて測定し，とくに後述の振動板の熱変形によつて起因する炭素粉の機械インピーダンスの加荷特性も測らんとしたものである。



第10図　炭素粉の入力機械インピーダンスの一例
Fig. 10. An Example of Input Mechanical Impedance of Carbon Granule

振動板および電極関係を4号型を用い測定の要領は前章同様振動板の背面より全面に音圧による一様分布駆動力を加えて炭素粉に起振力を与えた。

振動板単独および炭素粉を附加したときの基準函数をそれぞれ Ξ, Ξ' とすれば有効面積として (22) 式は

$$\left.\begin{aligned} S_e &= (\lambda_X \Xi_{1X}) \iint_S (\Xi'_1 ds) \\ S'_e &= (\lambda_X \Xi'_{1X}) \iint_S (\Xi'_1 ds) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (23)$$

が成立する。この式において音圧による全駆動が着目点 X の起振力に変換される比率すなわち変成比は面積率 $q=\dfrac{S_e}{\iint_S ds}$ に等しいことは既述の通りである。したがつて全駆動力は $\iint_S Pds$ に変成比を乗じて求められる。この位相測定には既述[6]の位相測定回路で行つている。

振動板に集中附加があつた場合には面積率が20～30%の低下するが第III章のごとく改良により顕著に軽減している。かように減少した状態ではもしこの僅少な変化を無視できると仮定すれば実装の機械インピーダンスが次の考察によつて求めることができる。すなわち各点の振動変位の位相差がないため等価な実効集中インピーダンスと置くことができるので X 点から見た実効質量 md はよく知られているごとき

$$md=\frac{M}{\Xi_1{}^2{}_X} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (24)$$

M：振動板の全質量

また一般に振動板の共振周波数 w_0 は単独では振動板材料のヤング率，比重，厚みおよび面積をそれぞれ E ρ, h, および S として

$$w_0=k\,(\Xi_{1X})\frac{\sqrt{E}}{\rho}\cdot\frac{h}{S}=\sqrt{\frac{s_d}{m_d}} \cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

で表わされることは知られている。比例常数 $k(\Xi_{1X})$ が振動様式の函数であつて，上述のごとく振動模様が不変であれば附加インピーダンスがある場合でも振動板自身は上式に表現される等価は集中インピーダンスで振動を行つていることを意味する。したがつて実効スティフネス s_d は振動模様がくずれなければ一定と考えられるものである。また機械抵抗 r_d についても振動板上のすべての点における勢力散逸の分布も一定であつて総計は単に変位量あるいは速度量により決定されるものであるからいわゆる機械抵抗は定数として扱いえられる。以上の議論より振動模機が変化しない範囲では振動板の機械インピーダンスの三定数はつねに定数として取扱いうる。したがつて z_d は振動板単独のときの値をあらかじめ測定しておきそのまま利用すればよいのである。炭素粉のないときは線型振動であるからこれらの定数は附加質量法，共振法で容易に測定できる。以下この方法で各種の炭素粉の測定を行つた。

(2) 正常な粗接触における入力機械インピーダンス[6]

粒体相互の接触圧力は自重による微少圧力である。この粗接触における機械インピーダンスを 200～800 c/s について測定した結果は第10図のごとくである。

変位特性を有するので変位一定で測定し実部，虚部に分離している。虚部はほとんど周波数に比例して減少しているため $\dfrac{s_c}{w} \gg wm_c$ と仮定できるので虚部の内実効質量を無視した等価スティフネス s_{ce} は，$s_{ce}=wX_c$ として求めると一定値となる。またこの結果あきらかなことは炭素粉の機械インピーダンスはほとんどスティフネ

スにあり質量はまつたく無視し得，かつこれに比し抵抗分も非常に少い。

これらの値は図に併記するごとく低インピーダンス型バイブロメータによる測定結果[7]とほとんど一致する。ゆえに正常な粗接触にしてかつ振動模様が変らないときはバイブロメータで求めた値をそのまま実装状態の値として取扱つて大きな誤りはない。

（3） 吸湿率と入力機械インピーダンスの関係[8]

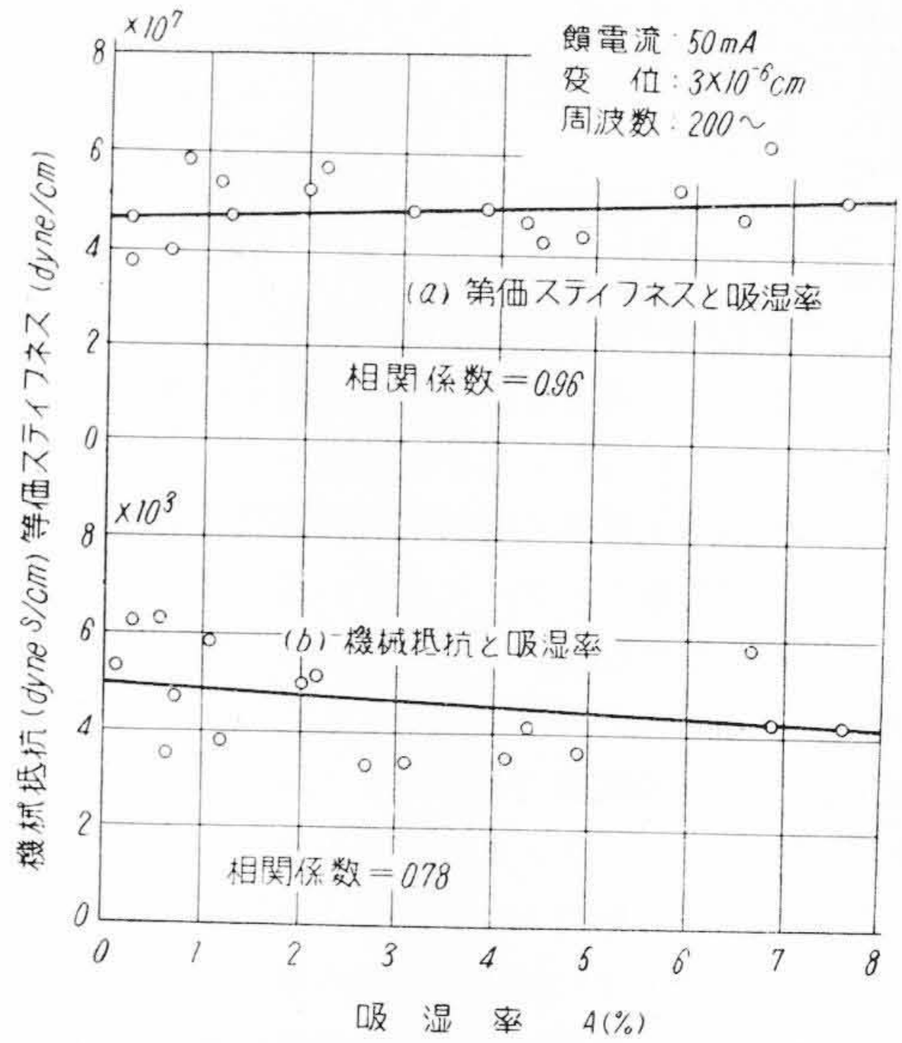
マイクロホン能率は吸湿率の少いほど高くなることはすでに証明した通りである[8]。ここでは吸湿率と入力機械インピーダンスの関係について，とりあえず加荷特性（次章で説明）の測定結果を示した。測定は前項の方法を応用したもので吸湿率 7％ 程度の非常に多いものから 0.1％位の少いものまでの試料について測定した。実装状態にして正常の粗接触のときに電流を通したために発生する加荷特性を生じて全体の虚部，実部からスティフネス，機械抵抗に分離した結果は第11図 (a) (b) のごとくおおむね直線関係がえられる。ただし吸湿率は乾燥吸湿の重量比で定義したもの[8]を用いている。等価スティフネスの回帰直線 $s_{ce}=0.035\,A+4.8$

（相関係数＝0.96）

機械抵抗の回帰直線　　$\gamma_c=-0.07\,A+5.0$

（相関係数＝0.78）

等価スティフネスに関しては回帰係数は正で吸湿率の少い程スティフネスは低くなるが，機械抵抗に関してはやや逆相関である。スティフネス制御で動作する故これを低くすることは炭素粉としては実用上きわめて有利である。マイクロホン能率においても吸湿率の少い程改善されることとあわせ考え炭素粉の焼成で吸湿率を下げるようにすることがきわめて大切である。従来の水素雰囲気中の焼成法では数％であつたものを変更して真空処理あるいは窒素雰囲気中の処理にあらためて吸湿率を数分の一に減少し現在は 0.2％以下にとめている（別に報告[9]したごとく経時変化減少のためにも有効である）。



第11図　吸湿率と等価スティフネス，機械抵抗
Fig. 11. Relation between the Absorption and the Equivalent Stiffness and the Mechanical Resistance

〔V〕 炭素粉の加荷（加圧）特性

接触抵抗型変換器に存在する現象で閉路後時間とともに変化する性質には次節以下で述べる脈動，閉路現象あるいは異常現象がある。その原因は熱膨張により可動電極が変位して炭素粉の接触圧力を変えさせるところに原因がある。

音声による交番振動に，緩漫な変位が重ね合わさるために炭素粉の機械インピーダンスおよびマイクロホン能率が変わり，その結果上記の諸現象が発生するのである。いまこの重ね合わせによつて炭素粉の正常接触の諸特性がどのように変化するか，すなわち加荷特性について以下説明する。

炭素粉は元来自重のみによる粗接触で動作しているが加圧，減圧によつてもつとも大なる影響を受けるものは主として機械インピーダンス中とくに等価スティフネスであつて，この値は一部すでに前章で説明した。マイクロホン能率の変化も比較的僅少であるがこれも特異な特性を示す。

そこで炭素粉自身の加荷特性を論ずるに先立つて実際の送話器の閉路，脈動現象において炭素粉の加荷特性がどの程度に含まれるかをまず実測する。

（1） 閉路脈動現象中の変換能率の変化[10]

炭素送話器の直流電源の閉路直後数分間は感度が不安定になり後に安定化する現象がある。これを閉路現象と称し測定などで一番困る問題である。この閉路現象にも次章で述べるごとく感度あるいは抵抗が単に過渡的かつ緩漫な変化をするものと，いわゆるパッキング（凝固）としてきわめて急激に変化する現象との二つにわけることができる。本節で述べるところはまず前者について行つたものである。

4号送話器は定電流回路において閉路直後感度が急激に下るが，この原因も炭素粉の加荷特性に基因するものであつて，このことは後述のごとき方法で実証した。さらにこの二つの加荷特性において機械インピーダンスとマイクロホン能率のいずれがより多くの原因であつて，感度降下の原因になつているかを実験によつて分離し

た。

送話器の時間的変化を検討する際に，送話器能率 η_T すなわち単位音圧当りの抵抗変調度とするのが抵抗による影響が打消されて物理的意味が明瞭になるので次のごとく表わす

$$\eta_T = 20\log\frac{\Delta R_T}{R_T}\ \frac{1}{P} = \eta_V + B + G \quad \text{.....(26)}$$

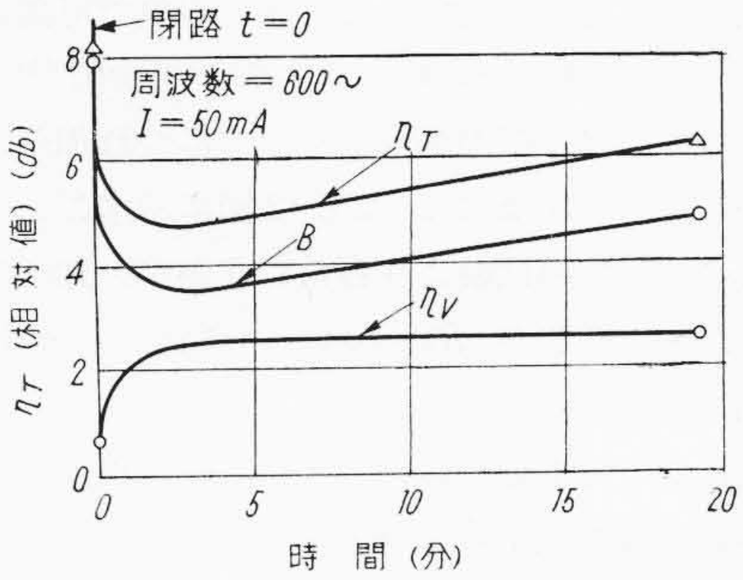
第1項 η_V は炭素粉のマイクロホン能率，またの B, G の定義は（4）式で示すものである。

ここで閉路中の交流出力，変位，振動模模を測つた。模様を比較し，温度変化の過渡状態の進行中ではその変化はほとんど無視し得られることを確めた後 (26) 式第1項，2項の変化を求めた結果は**第12図**のごとくである。その測定法は送話器を一定の音圧 P で駆動し，そのときの交流出力電圧 e, 抵抗 R_T ならびに直流電流 I を求めて(26)式より η_T を知る。またその振動変位 ξ を既述の方法[3][6]で求めると η_V は e, ξ, I より計算せられる。また B は第II章で詳述したごとく音圧一定にして振動模様が変らなければ面積率が一定であつて駆動力は常に一定と考えられるので，B は ξ に比例することがあきらかである。

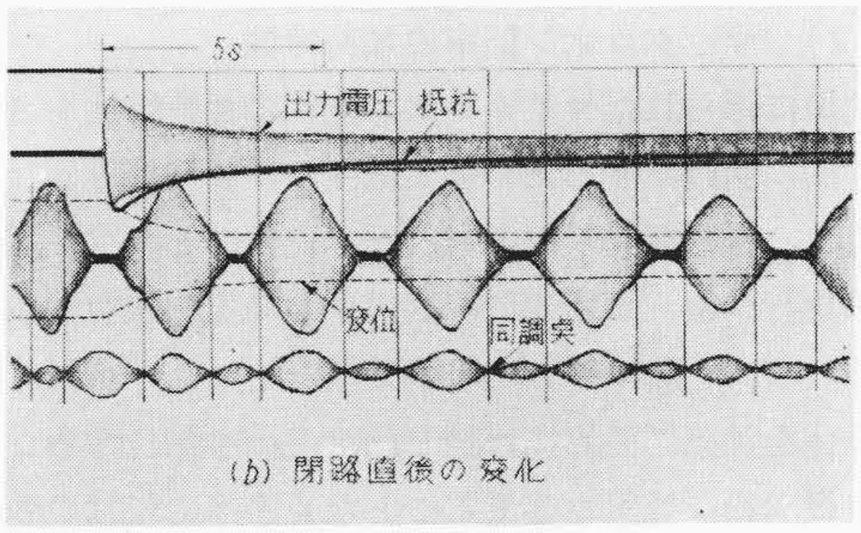
以上のごとく考えると閉路直後から η_T, B および η_V は求められ，かつ G は一定とされるので，図に示すそれぞれの関係が得られる。

図は4号送話器を例にとつたものであるが 5～20 分程度の長時間にわたる変化の間では η_V, G が一定であるから大部分 B の変化に起因する。すなわち大部分は炭素粉の等価コンプライアンスが変化するためであることがわかる。

以上は時間任意の点で間歇的に求めたものであつて，閉路直後の変化の大きいところは現象に追随して迅速に求めることは測定の煩雑さから到底不可能である。これを確めるために図(b) のごとき実験で補足した。すなわち測定電極の振巾を大きくしたり小さくすることを繰返す。しかる時Bはほとんどコンプライアンス成分であつて閉路現象によつて振巾が変つても振動の位相はほとんど同じであるところから測定電極の振巾を増減して途中で両者の振巾が一致した点においては測定電極と振動板の相対変位は零となりコンデンサ マイクロホンの出力も零となる。図はこの関係を明瞭にするオシログラムであつて各曲線は出力電圧，抵抗，測定電極と振動板との間のコンデンサ マイクロホンの出力が零となる瞬間は測定電極と振動板の相対速度が零なる同調点である。この結果閉路現象の急激な変化中の振動板の振巾が把握でき，その点を連結して閉路直後の変化のはげしいところでも η_V, B を知ることができるのである。その結果閉路直後約5秒以内で B の大きな変化は終つており，これよりマイクロホン能率は機械インピーダンスに比し僅少ではあるが加荷特性を有することも知つた。

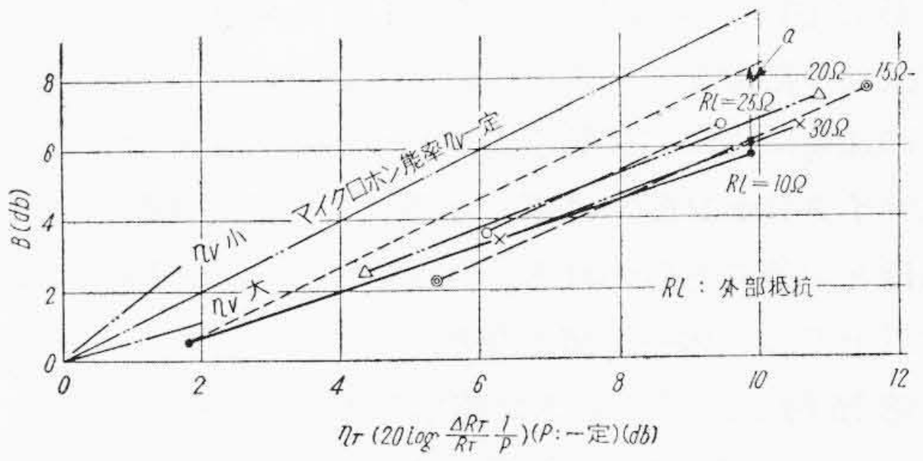


(a) 長時間の変化



(b) 閉路直後の変化

第12図 第1種閉路現象中の η_V, B
Fig. 12. Characteristics of η_V, B during Ist Class,Switch-in Phenomena



第13図 脈動現象における B, η_T
Fig. 13. Characteristics of B, η_T during the Microphone Oscillation

脈動現象中の抵抗，変位の変動は既報[10]のごとく周期的で振巾も大きい。また振巾は同じ構造にあつても外部電気回路の条件を変えることによつても大きく変つてくる[11]。

第13図は外部抵抗を変えて脈動の振巾を変えたときの脈動の変位の最大時，最少時の値における B と η_T との関係を求めたものである。外部抵抗によつて脈動の振巾が変りそれにより送話器能率 η_T も等価コンプライアンス B も変る。この場合も両者の関係より炭素粉のマイクロホン能率の加荷特性を求めることは (26) 式より容易であつて G は一定であるから η_T より B を差引

いた値の変化分が変動である。脈動現象で可動電極の変位はおおむね1～2ミクロン程度の僅少値[11]である。したがつて脈動の振巾が大きくなるにつれ加荷によつて η_V はやや増加することは第13図に示すごとき η_C 一定線との傾斜角の比較より容易にうかがい知れるものである（たとえば図の $R_e=10\,\Omega$ の傾斜の差 a db が η_V の増加に相当する）。

以上のごとく本節において閉路，脈動現象においても加荷によつて機械インピーダンスが急激に増大し，数 db の差が生じ同時にマイクロホン能率もわずかであるが増加する性質を有することを知り得た。

（2） マイクロホン能率の加荷特性

前節に得られたマイクロホン能率の加荷特性をさらに実験的に明確にするため可動電極の熱膨張に等価な加荷変位と，音響振動の振巾 ξ_a とを変数にして次のごとき実験を行つた。まず変位，振巾を与える方法を簡単に述べる。第14図において可動電極を附したバイブロメータ全体を加熱膨張棒に連結し，その棒を加熱することにより炭素粉に衝撃を与えることなく序序に任意の変位を与える。変位量は光挺子により読取る。光挺子は図であきらかなように（島津製エキステンソメータを改造したもの）2個の反射鏡にして倍率は約 4,600 倍にとつた。

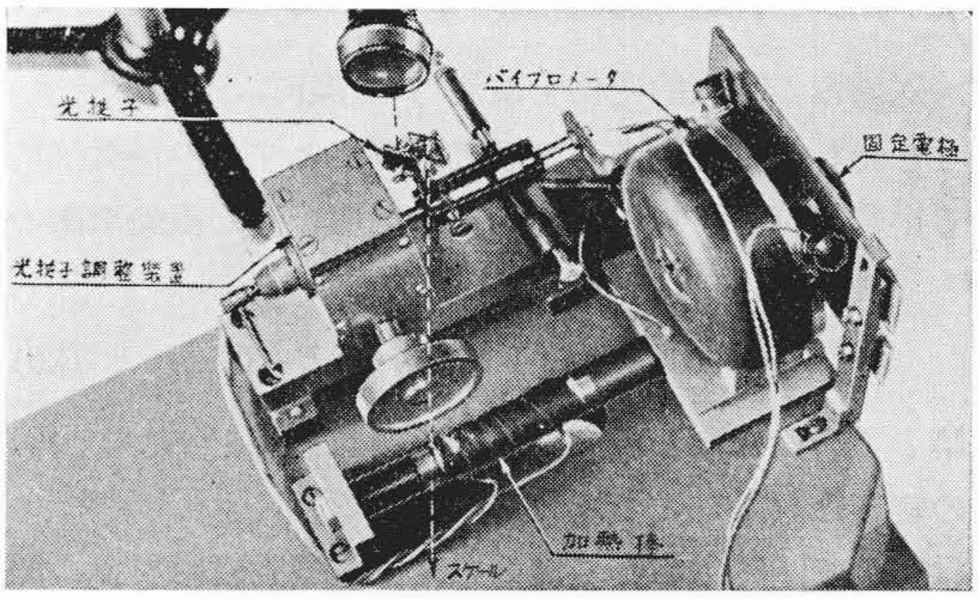
第15図はその測定結果でバイブロメータで与える音響振動の振巾をパラメータにしている。ここに顕著なことは加荷によつて接触圧力がわずかに大きくなつたときはマイクロホン能率は高くなる。この傾向は振巾の大なるほど明瞭にあらわれる。加荷変位が 1.5×10^{-3}mm 程度以上では大体一定値となる。

第16図はマイクロホン能率の履歴現象である。マイクロホン能率も加荷，減荷によつて 10 db 近くの履歴特性を有する。このことはわずかな衝撃によつて電極が変位して後ただちに復源しても特性が非常に違つてくることを意味するもので，常時経験している。かように電極が変位して接触圧力がわずかに変つても特性が非常に変つたり履歴現象を示したりすることは粒体振動を工業的に取扱う上の大なる欠点となつているものである。

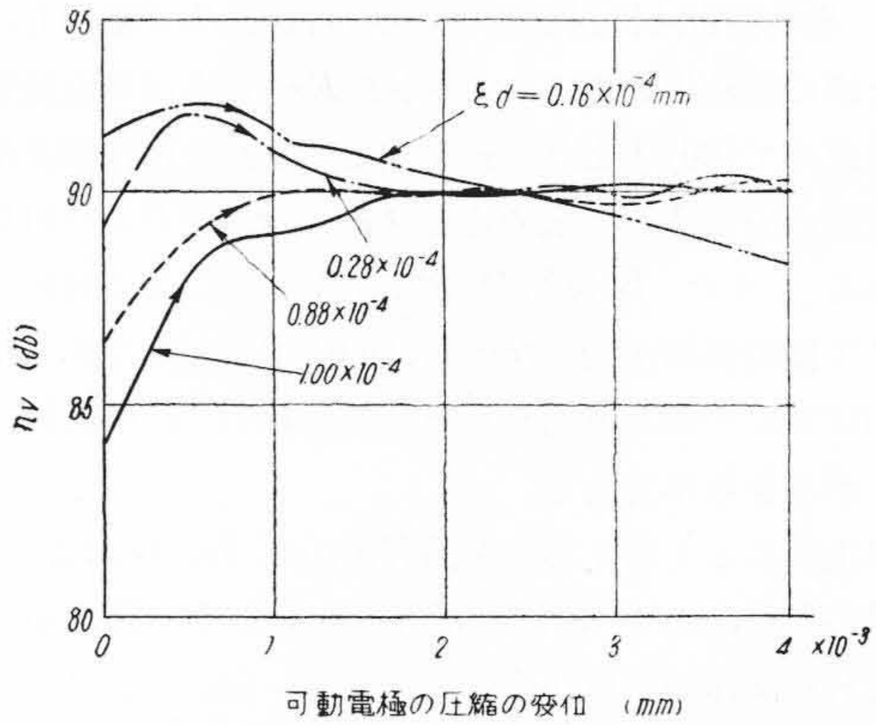
（3） 機械インピーダンスの加荷特性

機械等価コンプライアンス B の加荷特性を前節同様第15図の装置を用いて求めた。B の算出法は改良型第8図 (b) の振動板を用いて上述の方法で行つたもので振動板の機械インピーダンスを除き炭素粉のみを分離したものである（これの吸湿率との関係についてはすでに前章第3節で記述した）。

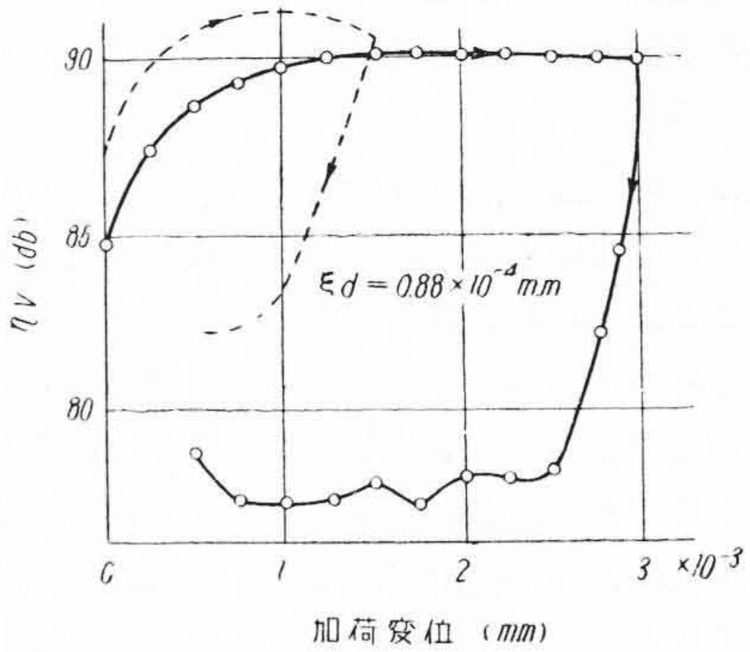
本章に掲げる測定値は加荷変位と振動振巾をパラメータにしたものであるが機械インピーダンスの虚部の周波数特性を求めると十分低い周波数においては上述のごとくに質量分を無視して等価スティフネス s_{ce} を算出することができる。第17図はその s_{ce} 算出の例で，200 c/s より 800 c/s の間はほとんど w に比例する。これより s_{ce} を求めると任意の加荷変位と振動振巾についてそれぞれ一測定点が求められる。かくして $(1,3,5)\times10^{-15}$mm の振動振巾について等価スティフネスの加荷変位との関係を整理すると第18図のごとくである。振巾の少いほ



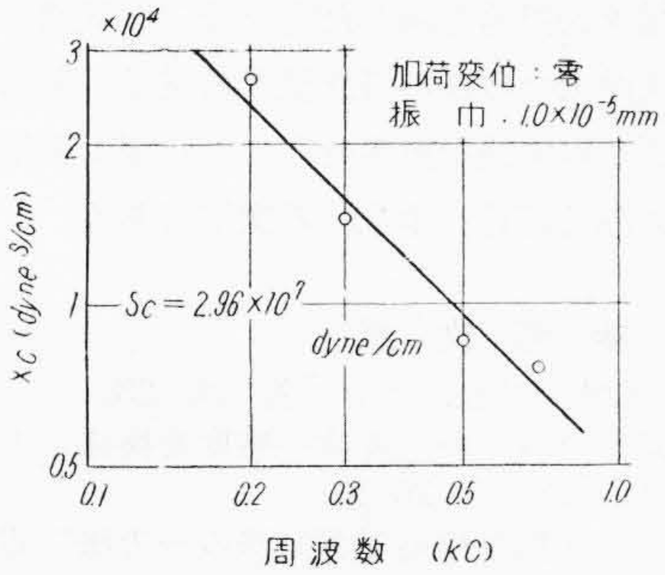
第14図 装 置 の 概 観
Fig. 14. The General View of Measuring Apparatus



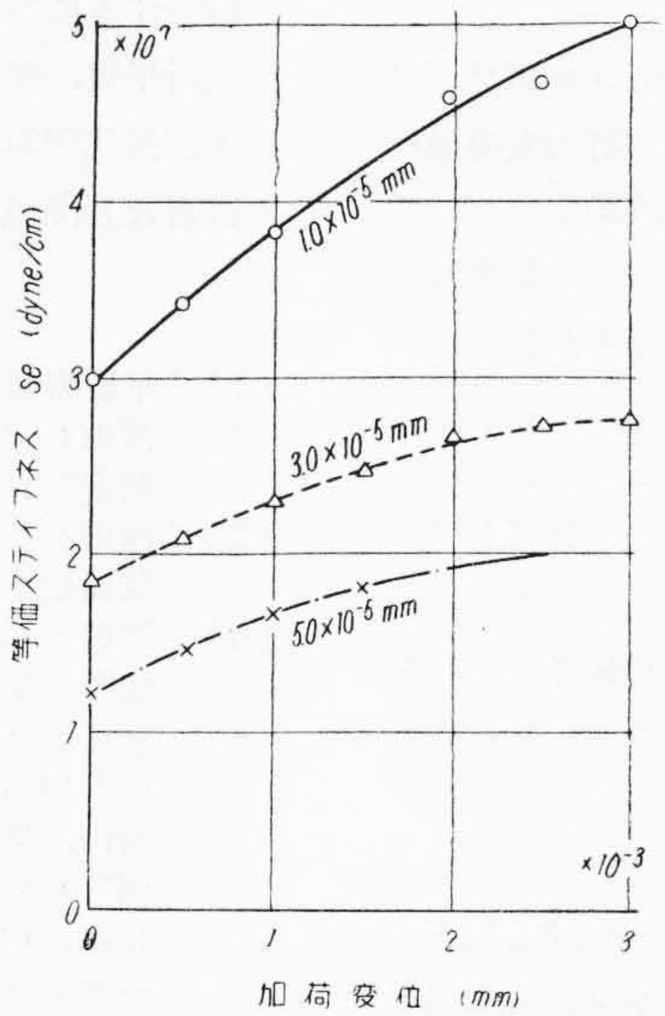
第15図 η_V の 加 荷 特 性
Fig. 15. Loaded Characteristics of η_V



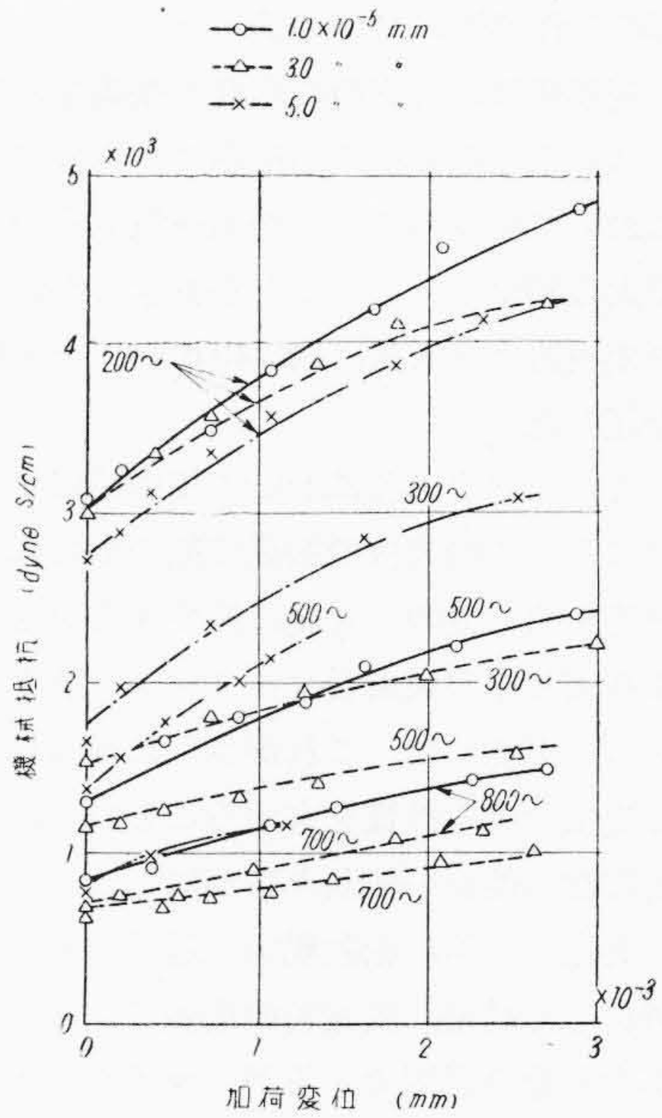
第16図 η_V の 履 歴 現 象
Fig. 16. Hysteresis of η_V



第17図　X_C の周波数特性
Fig. 17. Frequency Characteristic of X_C



第18図　等価スティフネスの加荷特性
Fig. 18. Loaded Characteristic of the Equivalent Stiffness



第19図　機械抵抗の加荷特性
Fig. 19. Loaded Characteristic of Mechanical Resistance

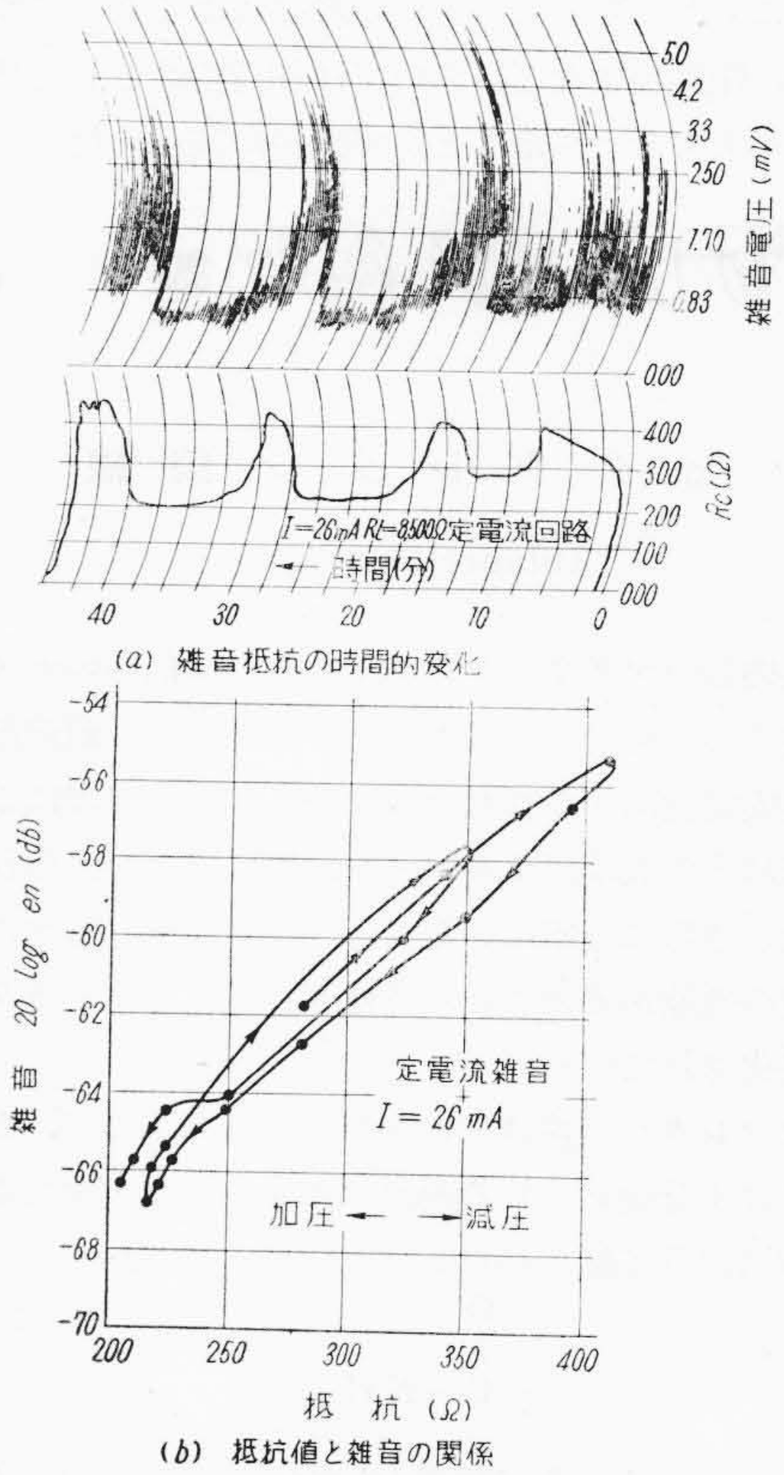
ど加荷による影響は大きく，振巾の大きくなるほど等価スティフネスの絶対値も小さく加荷による影響も小さい。かように等価スティフネスに関しては非常に明瞭にその性質が把握される。これに反して第19図のごとく機械抵抗分は加荷性が明瞭ではない。その加荷変位と振巾，周波数の関係が大きさ，傾斜などにおいて一様でない。一般的には加荷によつて機械抵抗は増し，かつ周波数の高いほど絶対値は減少する。しかし機械インピーダンス中でその虚部に対して値は非常に小さく，したがつて炭素粉の機械イスピーダンスは大部分 s_{ce} によつて決まるものである。

(4)　雑音の加荷特性

雑音の加荷特性としてとくに問題となることは熱膨張によつて電極が変位し，脈動あるいは閉路現象を起している時はその接触面が通電中常に動揺して雑音が倍加せられることである。

第20図(a)は4号送話器の脈動現象中における雑音電圧を自動記録したものである。抵抗の変化は電極の変位に基くもので，さらに抵抗と雑音の間には図(b)のような履歴現象を有することから電極の熱膨張による変位によつて接触面の動揺が雑音発生の最大の原因であることが容易に了解される。

送話器の雑音を消去するためにはまず接触面の動揺をきたすような現象を防止することがもつとも緊要である。すなわち加荷現象が発生しないように設計することがもつとも重要であつてこれも炭素粉の加荷特性ということができ，安定した炭素送話器を作ることは換言すれば接触圧力が音響振動以外から加わらないようにすることが緊要である。



第20図　脈動現象中の雑音
Fig. 20. Noise Characteristic during the Microphone Oscillation

〔VI〕 結　　言

接触抵抗型変換器として主として炭素粉を用いた送話

器の動作特性について論じた。

変換係数は炭素粉の感度と振動系の等価コンプライアンスおよび振動板の面積率より構成され，勢力変換過程において炭素粉による機械→電気系の変換動作において莫大な利得が生じることをあきらかにし，その結果ほかの変換器よりも常に約 40 db 以上変換能率が良いことを証した。

またこの変換器において集中機械インピーダンスの附加によつて振動板の振動姿態の影響について解析しその影響を約三分の一程度に減少する方法を提案した。これより実装中の炭素粉マイクロホン能率，機械インピーダンスを実測した。これがさらに加荷特性において複雑なる変化をする性質を有することの一端として変位特性，周波数特性を一部あきらかにした。

実際の閉路，脈動現象で送話器感度が変化する原因を解析した結果，炭素粉の機械インピーダンスの加荷特性が大部分の原因であるが，マイクロホン能率もわずかながら変化することを確かめた。

またマイクロホン能率は微少な加圧によつてわずかに上昇する一般的傾向を有し，履歴現象は非常に顕著である。等価スティフネスも加圧によつて増加することをあきらかにした。雑音も接触面の動揺によるものが多いので脈動，閉路現象などにおいては加荷特性として発生するものが大部分であることを実験的に確かめた。

擱筆するに当り種々御指導を賜つた電々公社電気通信研究所早坂，伊藤両博士ならびに日立製作所電子工業部三木部長代理およびこの実験を担当せられた戸塚工場猪瀬武君など関係者に厚く御礼を申上げる次第である。

参 考 文 献

(1) 早坂寿雄： 音響振動論，コロナ社 (昭 23)
(2) 西山： "送話器用炭素粉の変位—感度変換係数の測定" 日立評論 33 (昭 26-10)
(3) 西山： "微少音響振動の絶対測定法の一方法" 電気通信学会誌，37 (昭29 -6)
(4) 増沢： "低い周波数における電気音響変成器の性能" 通研成果報告，530 (昭 29-6)
(5) 早坂： "対称振動殻の特性" 電気通信学会誌，22 (昭 14-1)
(6) 西山，猪瀬： "微少音響振動の絶対測定法と応用例" 日立評論，36 (昭 29-6)
(7) 伊藤，山崎： "送話器用炭素粉の入力機械インピーダンス" 通研月報，5 (昭27-10)
(8) 西山，上田： "電話用炭素粉の動特性" 電気三学会連合大会，No. 189 (昭 29-5)
(9) 西山，上田： "炭素送話器の経時変化について" 電気三学会連合大会，No. 220 (昭 31-4)
(10) 西山： "送話器用炭素粉の重畳特性" 電気三学会連合大会，No, 222 (昭 30-5)
(11) 西山，猪瀬： "電話用炭素粉の脈動現象の解析" 日立評論，39 (昭 30-3)
(12) 西山： "炭素送話器の脈動現象の解析" 電気通信学会誌，No. 38 (昭 30-2)

製　品　紹　介

ヒタウレタン銅線

"Hitaurethane" Wire

電気機器のマグネットワイヤとしては油性エナメル銅線が古くから使用されてきたが，耐磨耗性，耐溶剤性および熱安定性にすぐれたホルマール銅線の出現により，現在ではその大半がホルマール銅線に置きかえられるに至つた。さらに近年にいたり，マグネットワイヤに対する高度の性能が要求され，各種改良型マグネットワイヤが製品化されている。

ヒタウレタン銅線はそのうちの一つであつて，B種の使用には十分耐えられる耐熱マグネットワイヤであり，その構造は分子結合がウレタン結合

$$\left(-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-NH-\right)$$

で重合している高分子物質を油性エナメル銅線やホルマール銅線と同様導体上に塗布焼付したものである。

ヒタウレタン銅線の種類としては，皮膜厚さによつて0種，1種，2種があり，油性エナメル銅線およびホルマール銅線と同様のサイズ範囲のものを製造することができる。

ヒタウレタン銅線はホルマール銅線に比較して次のような特長をもつている。

(1) 皮膜の可撓性，電気的性能および耐アルカリ性は同程度である。
(2) 耐熱軟化性，耐熱劣化性，耐湿特性がすぐれている。
(3) 耐酸性がすぐれている。
(4) 鑞接性がすぐれている。すなわち皮膜を剥離することなく半田揚げすることができるので電工作業における工数を低減することができる。
(5) 耐磨耗性はやや劣るが油性エナメル線よりははるかにすぐれており，実際作業上支障となるほどではない。また耐アルコール性が悪いので，アルコール系の溶剤の使用はできるだけ避けた方が安全である。