

熱誘電直接発電に関する研究 (そのⅡ)

熱誘電直接発電による交流発生について

藤本三治*

松本忠**

Studies on the Thermoelectric Generator Part (III)

On the Direct Generation of Alternating Electric Power with Thermoelectric Generator.

Sanji FUJIMOTO

Tadashi MATSUMOTO

In the present paper, the thermoelectric A. C. generator is dealt with, which converts directly the thermal energy to the electrical energy through the thermoelectric effect of ferroelectric materials such as barium titanates and their solid solutions. Now, three types for such A. C. generators are presented as follows ; (1) the charge-discharge type, (2) the feedbacked charge-discharge type and (3) the residual charge type.

The charge-discharge type and the residual charge type out of the three are picked up, produced trially and experimented. The sample (thermoelectric element) used in this experiment is the ceramic plate made of BaTiO_3 (89%) + CaSnO_3 (10%) + others (1.0%) and its area is $2.6 \times 2.6 \text{ cm}^2$, thickness is 0.2 mm and its Curie point is 287°K .

These samples of $2n$ in number (namely, n in pair) are put on each surface of a $2n$ -polyhedron and heated periodically by the rotation of the polyhedron which is located between a 500W infrared lamp used as a heating source and an electric fan as a cooler. Let f be the frequency of rotation, then the frequency of output voltage is generally given by the relation $F = n \times f$ (c/s) (n equals arbitrary integer in type (1) or (2), but odd integer in type (3)).

Two for n is chosen in the charge-discharge type and three in the residual charge type. The maximum frequency of output voltage is about $F=3$ (c/s) in these experiments, because the maximum value of thermal response of this element shown above is about $1 \sim 2$ (c/s). The waveforms of output voltage due to load resistances and heat cycles are observed by a synchroscope.

According to these results, it is clarified that the higher resistance is suitable for load in the charge-discharge type and the lower resistance in the residual charge type. Moreover, the residual charge type has the following merit ; it is possible to generate the electric A C power with the only one-touch-charging on a ferroelectric capacitor before the operation.

Therefore, choosing 60 for n and 1 (c/s) for f , with these samples, the electric power of 60 cycles which will be adapted in future as a new kind of electric source is easily realized.

As, in the thermoelectric generator, the higher insulating resistance of both the thermoelectric elements and the circuits is demanded in order to avoid the leakage of charge given at the bottom temperature, the influence of volume resistance of element on the leakage is calculated numerically.

Finally, in the residual charge type which is cooled naturally without fan, the anomalous phenomenon which the amplitude of output voltage grows up gradually with time is reported.

* 前 福井大学教授
現 大阪大学工教教授

** 福井大学講師

1 緒 言

筆者らはさきに熱誘電直接発電に関して直流発電の実験および本器の出力を最大ならしめる最適動作条件についての論文を発表した^{(1)~(8)}。

今回は熱誘電発電器によって交流発電を行なう種々の方法とその実験結果を報告する。すなわち2個の熱誘電素子 ($\text{BaTiO}_3 + \text{CaSnO}_3$) を対にして用いて交流を発生する新しい発電機構を紹介するとともに、この場合の実験結果を報告して検討を加えることにしたい。

2 熱誘電直接発電の原理および熱サイクルに伴う素子の諸量の変化^{(4)~(8)}

まず、熱誘電直接発電の原理および熱サイクルに伴う素子温度および静電容量などの変化を本文に必要な程度で簡単にのべることにする。

2.1 原理 いまキュリー点よりわずかに高い温度 T_1 に保たれた熱誘電素子 (たとえば強誘電体材料) C_1 (そのときの静電容量を C_1) を Fig. 1 実線のように接続してスイッチ S_1 を閉じ、直流電源 V_1 で充電し、電荷 $Q_1 = C_1 \cdot V_1$ を与える。その後、 S_1 を開放し、 C_1 を T_1 より高い温度 T_2 まで上昇させると素子の静電容量は周知のようにキュリー・ワイスの法則にしたがって減少するから、その間、電荷漏れがないものとする素子の端子電圧 V_2 は

$$V_2 = (C_1/C_2) \cdot V_1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

に上昇する。ここで C_2 は素子温度が最高 T_2 のときの静電容量である。また、この際、熱より電気に変換された変換エネルギー ΔW は

$$\Delta W = \frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) C_1 V_1^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。つぎにスイッチ S_2 を閉じて負荷抵抗 R_L に電荷を放電させ、このとき素子もっていたエネルギー $W_2 (= \frac{1}{2} C_2 V_2^2)$ のうち(2)式で与えられるエネルギーの増加分だけ負荷にとりだすとともに残りのエネルギー $W_1 (= \frac{1}{2} C_1 V_1^2)$ 、充電時のエネルギーに相当)をふたたび電源に帰還しておけば充電電源の消耗はない。

ここで素子の温度をふたたび最低温度 T_1 まで冷却すればこれで一サイクル完了する。以後、このような熱サイクルを繰り返せば負荷に継続して出力を与えることができる。

また、Fig. 1 点線で示す接続は加熱後素子の有する全エネルギー $W_2 = W_1 + \Delta W$ を負荷に与える場合であって、熱サイクルが繰り返されるごとに電源のエネルギーを消耗することになる。

2.2 熱サイクルに伴う素子の諸量の変化 本発電には(1)式および(2)式からわかるように最低温度 T_1 と最高温度 T_2 に対する素子の静電容量変化が大きいことが必要であり、またこれらの量が熱サイクル数によってどのように変わるかがわからないといけない。前報^{(4)~(8)}によれば、平均温度 T_a ($^{\circ}\text{K}$)、振幅 ΔT_0 ($^{\circ}\text{K}$) および熱サイクル数 f (c/s) なる正弦波状熱

$$T_s(t) = T_a (1 + M_{T0} \cos \omega t) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$M_{T0} = \Delta T_0 / T_a : \text{熱源の温度変化率}$$

$$\omega = 2\pi f$$

を厚さ d (m)、面積 S (m^2) なる熱誘電素子の表面より加え、裏面から吸熱を行なうものとするれば、素子の温度 $T(t)$ は近似的に

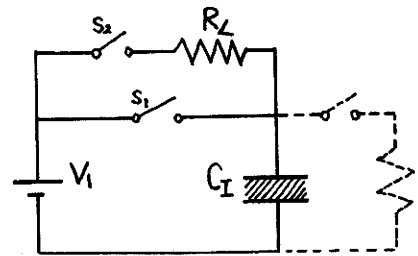


Fig. 1 Principle of thermodielectric generator

$$T(t) = T_a \{ 1 + m_r \cos(\omega t - \phi) \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで, } m_r &= \Delta T / T_a & \phi &= r\sqrt{f} \\ \Delta T &= \Delta T_0 e^{-r\sqrt{f}} & K &= \frac{k}{\rho s} \\ r &= \xi \sqrt{\frac{\pi d^2}{4K}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

として表わされ、 $k \left(\frac{J}{s \cdot m \cdot ^\circ k} \right)$ は素子の熱伝導率、 $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ は密度、 $s \left(\frac{J}{Kg \cdot ^\circ k} \right)$ は比熱および ξ は熱的遅延が一元的でないための補正係数である。

素子温度が(4)式のように変化するときの静電容量はキュリー・ワイスの法則にしたがって変化するとみなしてよいから(ただし、素子の静電容量が印加電圧に対してほとんど一定とみなせる場合を考えて静電容量の電圧依存性は無視する)

$$C(t) = C_a \{ 1 - m_c \cos(\omega t - \phi) \} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} C_a &= \left(\frac{\epsilon_0 S}{d} \right) \frac{C^*}{T_a - T_c} \\ \Delta C &= \left(\frac{\epsilon_0 S}{d} \right) \frac{C^* \Delta T}{(T_a - T_c)^2} = \Delta C_0 e^{-r\sqrt{f}} \\ \Delta C_0 &= \left(\frac{\epsilon_0 S}{d} \right) \frac{C^* \Delta T_0}{(T_a - T_c)^2} \\ m_c &= \frac{\Delta C}{C_a} = \frac{\Delta T}{T_a - T_c} = M_{c0} e^{-r\sqrt{f}} \\ M_{c0} &= \frac{\Delta T_0}{T_a - T_c} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

のようになり、 C^* はキュリー定数、 T_c はキュリー温度および ϵ_0 は自由空間の誘電率である。

また、素子の比誘電率は(6)式を $d/(\epsilon_0 S)$ 倍して求められ、任意の熱サイクル数 f における比誘電率の変化率は、 $m_{\epsilon r} = \Delta \epsilon_r / \epsilon_{r0} = m_c (M_{\epsilon r0} = M_{c0})$ となる。

以上より、素子温度は熱源より ϕ なる位相遅れをもって変化し、静電容量および比誘電率はこの素子温度に対して逆相となっている。

3 交流発電方式

次に可能な種々の交流発電方式についてのべる。

3・1 帰還充放電方式 この方式は一熱サイクルごとに一回の充放電を繰り返し、かつ、放電のさいにはエネルギーの一部を電源へ帰還する Fig. 1 実線で示した原理図を二つ使い負荷に対しこれらを互に逆の極性となるよう組合わせて接続したものであることから帰還充放電方式と呼ぶ。Fig. 2 はこの方式を示し、 C_I および C_{II} は同特性の熱誘電素子、 V_I は充電用電圧源および R_L は負荷抵抗である。

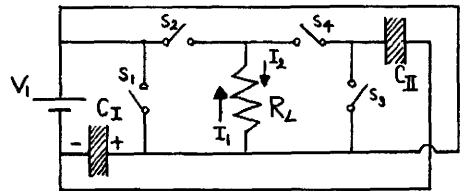


Fig. 2 Basic circuit of the feedbacked charge-discharge type of thermodielectric AC generator

発電を行なうにはスイッチ $S_1 \sim S_4$ を用い $2 \cdot 1$ のべたと同様の操作を C_I 、 C_{II} に対し半周期づつずらせて行なえばよく、負荷抵抗にある半周期は C_I の放電に基づく電流 I_1 が、また次の半周期には C_{II} の放電に基づく電流 I_2 がたがいに逆方向に流れるようにする。このように一対の熱誘電素子を用いれば一熱サイクルに対して一サイクルの交流を負荷に得ることができる。

3・2 充放電方式⁽⁹⁾ この方式は Fig. 1 点線で示すような回路を用いて帰還充放電方式のとき

と同様な原理で発電させるものであって、この接続図をFig. 3に示す。この場合も一熱サイクルごとに一回の充放電を行なうが、放電のさい（このときの素子の温度は T_2 ）素子もっていた全エネルギー W_2 を負荷に放出してしまつて電源へ帰還しないから、これを充放電方式と呼ぶ。

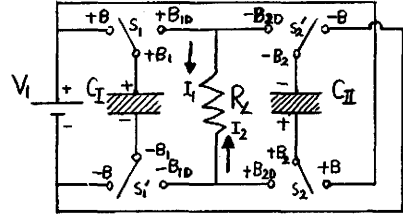


Fig. 3 Basic circuit of the charge-discharge type of thermoelectric AC generator

この操作も 帰還充放電方式のときと同様で、 C_I , C_{II} には半周期あてずらせて熱サイクルを与えるので一対の素子を用いたときにはやはり一熱サイクルに対して一サイクルの交流が得られる。ただ前者では加熱をしなければ出力端に電圧があらわれないのに対し、後者では加熱しないときでも初期充電電圧 V_1 があらわれる違いがある。

3・3 残留電荷方式⁽¹⁰⁾ Fig. 4は本方式の基本回路であつて、同特性の素子 C_I と C_{IV} を一対にして

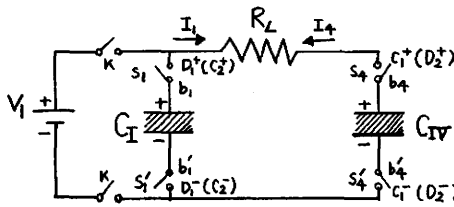


Fig. 4 Basic circuit of the residual charge type of thermoelectric AC generator

構成されている点は前2方式と同様であるが、充電は唯一回各素子（または対の一方）に行なつておくだけでよい。すなわち、素子 C_I , C_{IV} が最低温度 T_1 にあるときスイッチ K を閉じ $S_1-S'_1$, $S_4-S'_4$ を投入し電源 V_1 によって C_I , C_{IV} に電荷 $Q_1=C_1 \cdot V_1$ (ただし、 C_1 は C_I , C_{IV} が温度 T_1 のときの静電容量) を与えた後、 K , $S_1-S'_1$, $S_4-S'_4$ を開放し、以後この電源は取り去ってしまう。

その後、素子 C_I の温度を最高温度 T_2 まで高め（そのとき C_{IV} の温度は T_1 、静電容量は C_1 である）スイッチ $S_1-S'_1$, $S_4-S'_4$ をともに閉じる。このようにすれば負荷抵抗 R_L を通して図の矢印のように電流 I_1 が流れ、その間 C_I の電荷は C_{IV} に移る。その後、 $S_1-S'_1$, $S_4-S'_4$ を開放して C_{IV} の温度を T_1 から T_2 に、 C_I の温度を T_2 から T_1 に変化させ、ふたたび $S_1-S'_1$, $S_4-S'_4$ を閉じれば今度は I_1 と逆方向の電流 I_2 が負荷を矢印のように流れ、その間に C_{IV} の電荷は素子 C_I に移つてこれを充電する。

以後このように半周期ごとに各素子を繰り返して加熱、冷却すれば電気エネルギーが負荷抵抗を通して $C_I \rightleftharpoons C_{IV}$ と交互に授受され、負荷端には一熱サイクルに対して一サイクルの交流が得られる。

この方式は以上のように熱誘電素子に残留電荷を与えて発電させていることから残留電荷方式と呼ぶ。また、本方式は帰還方式に属し帰還充放電方式と同様、熱サイクルを与えない限り負荷に出力があらわれない。

4 熱誘電交流発電器^{(4),(5),(9),(10)}

本器から連続的に交流電力を取り出すには熱誘電素子に継続的な熱サイクルを与える必要がありそのためにはつぎの二通りの方法が考えられる。その一つは固定された熱誘電素子に(3)式で示すような温度の周期波を連続して与える方法、他の一つはこれとは逆に加熱源と冷却源を固定し、その間に素子を置いて、これを所定のサイクルで回転させる方法である。

このうち前者のような周期的熱源を実現することは事実上困難であるので、本実験では後者の方法によることにした。そのさい、素子が時計方向に回転するものとし、素子の位置 θ を示すのに、たとえば、Fig. 5を例にとると、素子 C_{II} のように加熱前の状態で面の法線方向が熱照射の方向と直角のときを $\theta=0$ 、これより回転して熱照射の方向と一致するとき 90° 、 C_{IV} のように加熱後ふたたび熱照射の方向と直角のとき 180° 、また、冷却側のときを 270° と決める。

4・1 充放電方式

Fig. 5はFig. 3の充放電方式により二対の素子を用いて構成した発電器である。

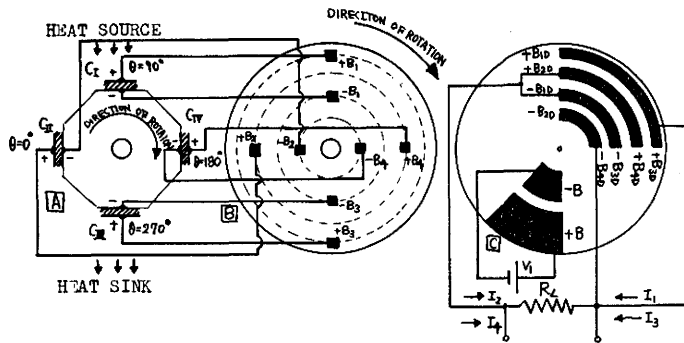


Fig. 5 Drawing of the charge-discharge type of thermoelectric AC generator with 4 elements. $F=2f(c/s)$

図中の[A]は八面体柱で素子 $C_I \sim C_{IV}$ はその柱面に一面おきに貼りつけられ (したがって、各素子は 90° あてづらせて配置されている) その柱軸を毎秒 f 回で回転させる。[B]はアクリル系樹脂絶縁円板でその中心に[A]の軸が貫いており、円板はこの軸と一体にとりつけられているので[A]と同一の速度で回転する。また

[B]上には接点があり、外側より $[+B_1, +B_3], [+B_2, +B_4], [-B_1, -B_3], [-B_2, -B_4]$ となっている。[B]に相対向して同直径の絶縁円板[C]が固定されており、板上には前記の接点に対応して外側よりリング状銅箔帯 $[+B_{1D}, +B_{3D}], [+B_{2D}, +B_{4D}], [-B_{1D}, -B_{3D}], [-B_{2D}, -B_{4D}]$ と充電用銅箔リング $+B$ (外側二種の接点に対応), $-B$ (内側二種の接点に対応) が設けられている。[B]および[C]はFig. 3のスイッチ機構でFig. 5の各符号はそれぞれFig. 3の符号に対応させてある。

たとえば、素子 C_I が冷却期間 ($\theta = 305 \sim 360^\circ$) にあるときは[B]上の $+B_1, -B_1$ がそれぞれ[C]上の $+B, -B$ に接触し、

$$+V_1 \rightarrow +B \rightarrow +B_1 \rightarrow +C_I \rightarrow -C_I \rightarrow -B_1 \rightarrow -B \rightarrow -V_1$$

のループで C_I が充電され、これより $\theta = 0^\circ$ から 180° まで加熱をうけるが、 $\theta = 115^\circ$ (素子温度の位相遅れを考慮して $\theta = 90^\circ$ よりおくらせる) からは[B]上の $+B_1, -B_1$ がそれぞれ[C]上の $+B_{1D}, -B_{1D}$ に接触するため

$$+C_I \rightarrow +B_1 \rightarrow +B_{1D} \rightarrow R_L \rightarrow -B_{1D} \rightarrow -B_1 \rightarrow -C_I$$

のループで負荷電流 I_1 が R_L の中を矢印の方向に流れて交流の半サイクルを作る。

同様に C_{II} による負荷電流 I_2 は R_L 中を I_1 とは反対方向に図の矢印方向に流れ、あとの半サイクルを作るので C_I, C_{II} の負荷電流 I_1, I_2 を合せれば一サイクルができる。 C_{III}, C_{IV} についても同様に負荷電流 I_3, I_4 の一サイクルができるので、このように四素子 (二対) を用いた交流発電器では回転体の1回転 (すなわち、一熱サイクル) に対して負荷端には二サイクルの交流が得られることになる。

一般に熱誘電素子数 $2n$ 個 (n 対) を $2n$ 多面体柱の各面に貼りつけて構成した充放電方式熱誘電交流発電器で、この多面体柱を f (c/s) の速さで回転して (すなわち f (c/s) の熱サイクルを与えて) 得られる交流電圧、電流の周波数 F (c/s) は

$$F = n \cdot f \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。ここで n は任意の正の整数である (帰還充放電方式熱誘電交流発電器においても(8)式は成立する)。Fig. 5の場合には $n=2$ であるから $F=2f(c/s)$ となる。

4・2 残留電荷方式

Fig. 6はFig. 4に示したような $C_I \sim C_{IV}, C_{II} \sim C_V$ および $C_{III} \sim C_{VI}$ の3組の基本回路を空間的に $2\pi/3$ づつずらせて配置して構成した発電器である。充放電方式および帰還充放電方式においては各素子が独立して動作し、相隣れる素子が鎖連結式に対をなして交流の一サイクルを形成するが、この方式では、たとえば、 C_I が最高温度 T_2 にあるとき、最低温度 T_1 にある相手の素子を通して放電させる必要があるので必ず空間的に 180° ずれた C_{IV} と対をなすよう接続されなければならない。

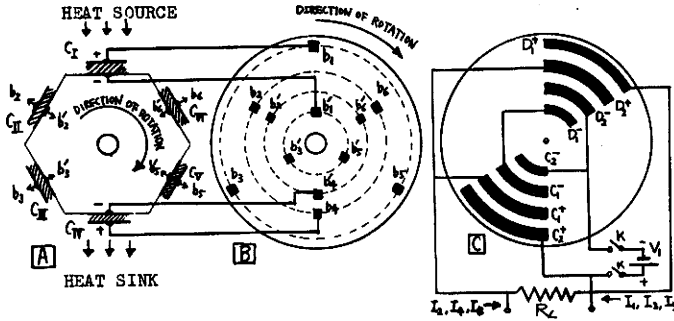


Fig. 6 Drawing of the residual charge type of thermoelectric AC generator with 6 elements. $F = 3f(c/s)$

Fig.6の構成は大体Fig.5のそれと同じであるが、この制約があるためスイッチ機構において多少の異なりがある。すなわち、 Δ は正六面体柱の回転体で各面には素子 $C_I \sim C_{VI}$ が貼りつけられている。回転絶縁円板 \square は外方より接点 $[b_1, b_3, b_5], [b_2, b_4, b_6], [b'_1, b'_3, b'_5]$ を、また固定絶縁円板 \square

には \square の接点に対応して外方よりリング状銅箔帯 $[C_2^+, D_1^+], [C_1^+, D_2^+], [C_1^-, D_2^-], [C_2^-, D_1^-]$ をもっている。図では $C_I - C_{IV}$ の一対のみについて接続してあるが、他の対についてもそれぞれ同じように接続すればよい（各符号はFig.4のそれに対応させてある）。

この残留電荷方式では前述のようにあらかじめ運転前の状態（最低温度 T_1 ）のときスイッチ K を投入してまず各素子 $C_I \sim C_{VI}$ に電荷を与えておかなければならない。 $C_I - C_{IV}$ の対を例にとり発電を考えることにする。まず K を閉じて

$$+V_1 \rightarrow K \begin{cases} \rightarrow C_2^+ \rightarrow b_1 \rightarrow +C_I \rightarrow -C_I \rightarrow b'_1 \rightarrow C_2^- \rightarrow K \rightarrow -V_1 \\ \rightarrow R_L \rightarrow D_2^+ \rightarrow b_4 \rightarrow +C_{IV} \rightarrow -C_{IV} \rightarrow b'_4 \rightarrow D_2^- \end{cases} \uparrow$$

のループで C_I, C_{IV} を直流電圧源 V_1 で充電したのち K を開放し、以後 V_1 をとり去ってしまう。 C_I はいま蓄えられた電荷をそのまま保って回転体 Δ の回転とともに加熱を受け、 $\theta = 100^\circ$ の位置で接点 $[b_1, b'_1]$ は $[D_1^+, D_1^-]$ に接し（素子温度の位相遅れを考慮して $\theta = 90^\circ$ よりおくらせる）空間的に反対の位置にある冷却中の素子 C_{IV} に

$$+C_I \rightarrow b_1 \rightarrow D_1^+ \rightarrow R_L \rightarrow C_1^+ \rightarrow b_4 \rightarrow +C_{IV} \rightarrow -C_{IV} \rightarrow b'_4 \rightarrow C_1^- \rightarrow D_1^- \rightarrow b'_1 \rightarrow -C_I$$

のループで、その電荷を C_{IV} に移して負荷 R_L 中に負荷電流 I_1 を流す。さらに多面体が回転して素子 C_{IV} が加熱を受け、 C_I が冷却される位置に移ると C_{IV} の電荷は

$$+C_{IV} \rightarrow b_4 \rightarrow D_2^+ \rightarrow R_L \rightarrow C_2^+ \rightarrow b_1 \rightarrow +C_I \rightarrow -C_I \rightarrow b'_1 \rightarrow C_2^- \rightarrow D_2^- \rightarrow b'_4 \rightarrow -C_{IV}$$

のループで、ふたたび C_I に戻され、 R_L 中に負荷電流 I_4 を I_1 と逆方向に流すとともに C_I を充電する。

$C_{II} - C_V, C_{III} - C_{VI}$ の対についても同様であって、たとえば $C_{III} - C_{VI}$ の対の最初の充電ループは

$$+V_1 \rightarrow K \begin{cases} \rightarrow C_2^+ \rightarrow b_3 \rightarrow +C_{III} \rightarrow -C_{III} \rightarrow b'_3 \rightarrow C_2^- \\ \rightarrow R_L \rightarrow D_2^+ \rightarrow b_6 \rightarrow +C_{VI} \rightarrow -C_{VI} \rightarrow b'_6 \rightarrow D_2^- \end{cases} \rightarrow K \rightarrow -V_1$$

である。

残留電荷方式においても負荷端の電圧、電流の周波数 F (c/s) は前述の(8)式で与えられるが、この場合の n は奇数でなければならないので

$$F = nf = (1 + 2p) f \quad \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 $p = 0, 1, 2 \dots\dots\dots$

となる。なんとならば、第一個目の素子（すなわち、第一対目の一方の素子で、Fig.6では C_I ）の出力波形の極性が第 $2n$ 個目の素子（すなわち、第 n 対目の他方の素子、Fig.6では C_{VI} ）のそれと反対となることを要するからである。したがって、Fig.6の場合は $p = 1$ （すなわち $n = 3$ ）であるから $F = 3 \cdot f$ (c/s) である。

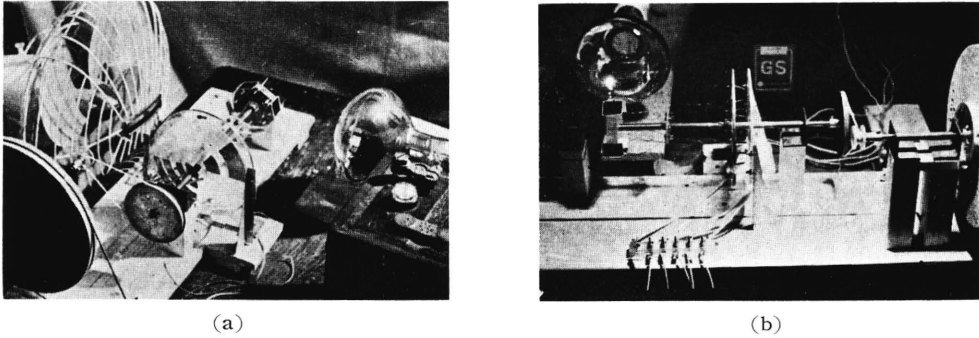


Fig. 7 Views of the thermodielectric AC generator.

Fig.7は装置の外観写真で(a)の中央軸右上端が回転多面体柱に貼りつけられた熱誘電素子、同軸中央部が円板、円板、左下端が電動機の回転減速用のプーリ、右方が加熱用500W赤外線電球および左方上部が冷却用送風機である。また、同図(b)はこれらを冷却用送風機側より見たものである。

5 実験結果

5・1 熱誘電素子の特性 熱誘電素子として用いた試料はBaTiO₃(89%)+CaSnO₃(10%)+その他(1%)の薄板状正方形磁器で、その寸法は面積2.6×2.6×10⁻⁴(m²), 厚さ2×10⁻⁴(m)のものである。

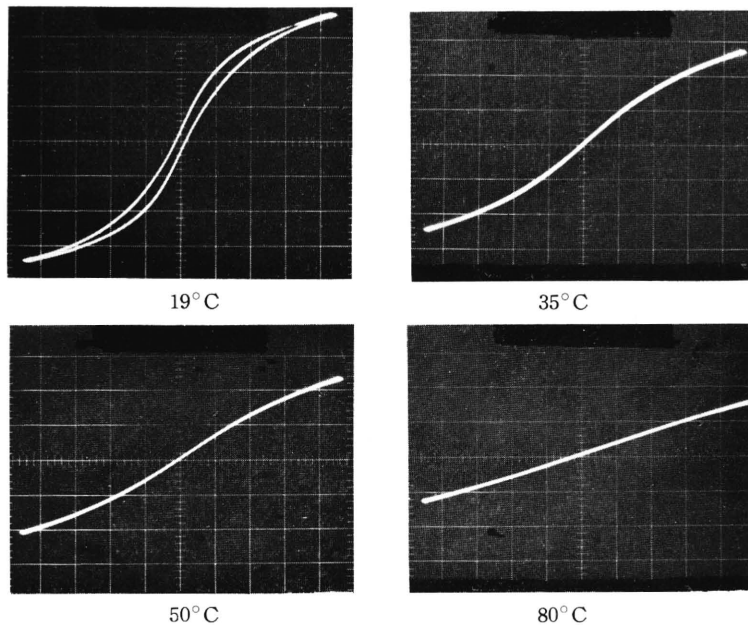


Fig. 8 Hysteresis loops of the thermodielectric element (ferro-electrics) under various temperature. Horizontal scale ; 82 v (peak value)/cm, Vertical scale ; 1.6μC/cm.

Fig.8は素子に60c/s, 270V(実効値)の交流を加え、Sawyerの回路を用い、温度を19, 35, 50, 80°Cに変えたときのヒステリシス・ループである。この関係を

$$E = \alpha D + \beta D^3 \tag{10}$$

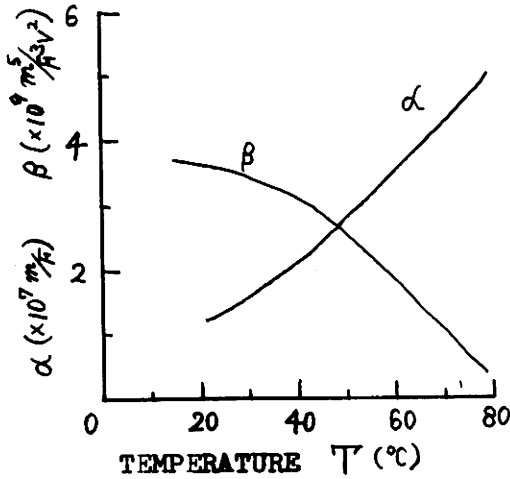


Fig. 9 Coefficients α and β of the formula $E = \alpha D + \beta D^3$ as a function of temperature.

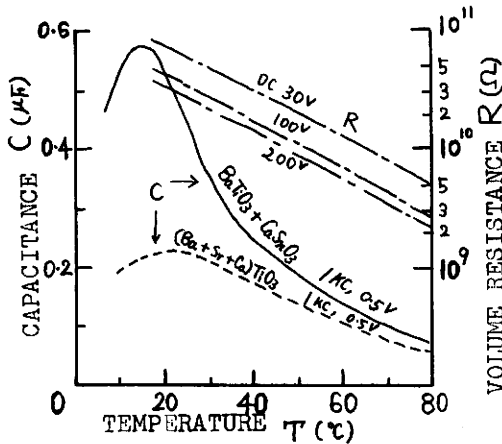


Fig. 10 Capacitance and volume resistance as a function of temperature.

定の速度で回転させて熱サイクルを与えれば、動作時の素子の温度および静電容量は(4)および(6)式の形で変化する。

いま、Fig. 5 に示した充放電方式の場合、回転軸より送風機および赤外線電球までの垂直距離をそれぞれ25mm, 16mmを選んで種々の熱サイクルを与えた。このときの素子の温度および静電容量の素子位置 θ に対する変化を測定するため、素子に直列抵抗 $r = 20\Omega$ を挿入しそれに $f_0 = 200$ c/s, $V_0 = 15$ V (実効値) の定電圧を加えて直列抵抗 r 端の電圧 V_r を測定すれば、その回路を流れる電流は素子のインピーダンス (すなわち静電容量) 変化にのみよるゆえ、 V_r は静電容量および温度の変化を示すことになる (ただし、素子インピーダンスより十分小さい r を挿入するとする) ^{(1) (3), (6)} したがって、この V_r を恒温槽などの既知温度のもとで同素子を用いて較正すればよい。

Fig. 12 は上記のごとくして求めた各熱サイクル数 f のときの V_r である。これを Fig. 13 点線の較正曲線を用いて整理すれば結局 Fig. 14 を得る。これより $T(t)$ は $C(t)$ に対して(4), (6)式に示したように逆相であり、ほぼ正弦波状変化をなしていることがわかる。このとき平均温度 $T_a = 308^\circ\text{K}$, 平均静電容量 $C_a = 0.35\mu\text{F}$ であり、熱サイクル数 f に対する素子の温度変化率 m_T , 静電容量変化率 m_C およ

で近似させてあらわし (ただし E は印加電界, D は電束密度である) 同図より係数 α , β を求め温度に対する変化を示すと Fig. 9 のようになる。これより α は温度に対して直線的に増加し、 β は次第に減少することがわかる。

また、1,000 c/s, 0.5V の交流で万能ブリッジを用いて測定した素子の静電容量の温度変化は Fig. 10 のとおりであって、キュリー点は $T_c \approx 14^\circ\text{C}$ であることがわかる。同図点線は前論文 ^{(1) (3)} で用いた $(\text{Ba} + \text{Ca} + \text{Sr}) \cdot \text{TiO}_3$ 系平行平板磁器の特性を示したものであるが前者の温度に対する静電容量変化が格段に大きいことがわかる。また、同図一点鎖線は一定直流電圧印加のもとで素子の体積抵抗の温度依存性を衝撃検流計法で測定したもので、これより素子の絶縁抵抗を通しての電荷漏れが推定できる ^{(1), (3)} (6・1参照)。

Fig. 11 は一定温度のもとで印加電界 E (v/m) を変化させたときの静電容量を示す。この関係は周知のように

$$C = \frac{C_0}{\{1 + (pE)^2\}^{1/2}} \dots\dots\dots(11)$$

であらわされ、たとえば 20°C のとき $C_0 = 0.66$ (μF), $p = 3.3 \times 10^{-6}$ (m/v) となる。

5・2 熱サイクルに伴う素子の温度および静電容量 前述の特性をもった熱誘電素子を Fig. 5, Fig. 6 のように構成し、加熱源としての 500W 赤外線電球と冷却用送風機間で所

び位相遅れ ϕ を求めると Fig 15 (a) となる。これより補正係数 k を求めると $k=11.5$ となる (ただし, $k=0.965 \text{ J}/(\text{s}-\text{m}-^\circ\text{K})$, $s=0.42 \times 10^3 \text{ J}/(\text{Kg}-^\circ\text{K})$, $\rho=5.5 \times 10^3 \text{ (Kg}/\text{m}^3)$ 。)

Fig. 6 の残留電荷方式の場合は回転軸より送風機および赤外線電球までの距離を 25 m, 20 m に選んだ。このときの V_r を Fig.16 に示す。同図(a)~(e)は送風機による強制空冷を行なった場合であり, (f)~(j)は自然空冷の場合である (ただし, この場合の $f_0=60 \text{ c/s}$ $v_0=15\text{v}$ (実効値) $r=200\Omega$ である)。これらを Fig.13 実線の較正曲線を用いて整理すればそれぞれ Fig.17(a), (b) を得る。強制空冷の場合の素子の平均温度 $T_a=296^\circ\text{k}$, 平均静電容量 $C_a=0.45\mu\text{F}$, また m_r , m_c および ϕ は Fig.15 (b)

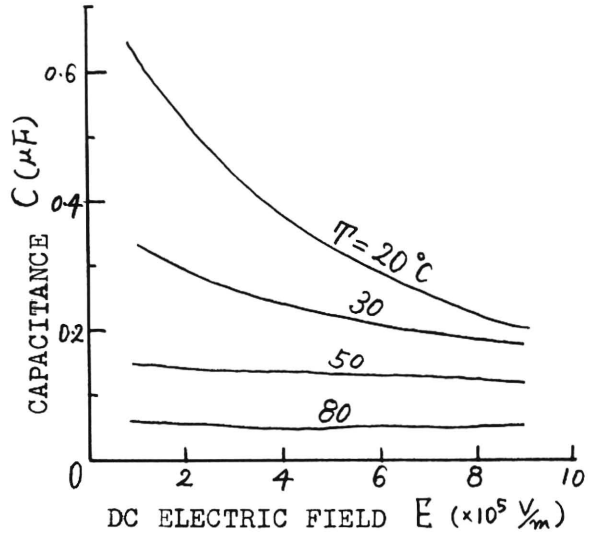


Fig. 11 Capacitance as a function of impressed DC electric field under various temperature.

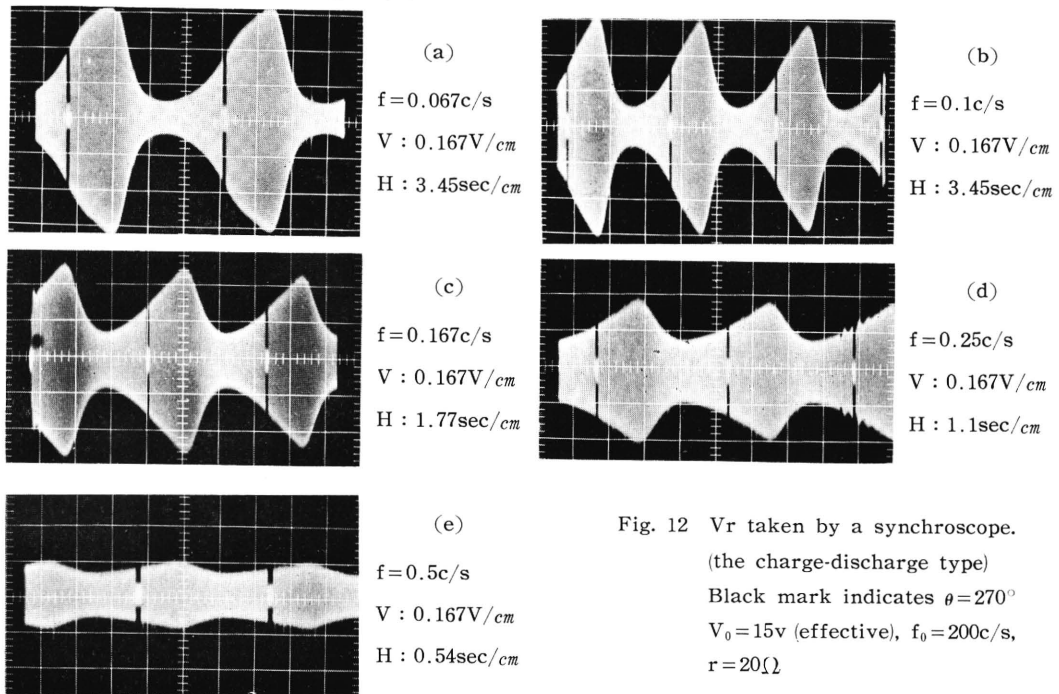


Fig. 12 V_r taken by a synchroscope. (the charge-discharge type) Black mark indicates $\theta=270^\circ$ $V_0=15\text{v}$ (effective), $f_0=200\text{c/s}$, $r=20\Omega$

のようである。これより $\xi=9$ である。この場合の温度変化は前述の充放電方式の場合より多少歪が大きい。また, 自然空冷の場合は平均温度 $T_a=330.3^\circ\text{k}$ と高くなっており, 平均静電容量 $C_a=0.17\mu\text{F}$ である。したがって, この場合の温度変化に対する容量変化は Fig.10 よりわかるようになり小さくなる。

5・3 出力波形 (i) 充放電方式 Fig.5 の装置を用い初期充電電圧をすべて $V_1=10\text{V}$ に選

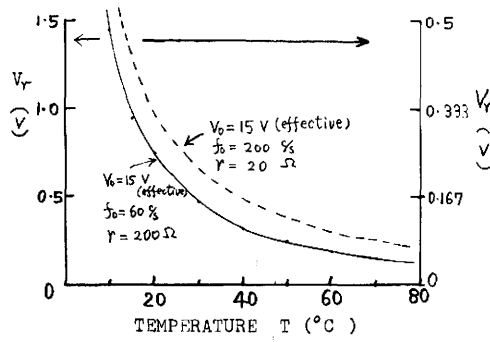


Fig. 13 Calibration curve of temperature

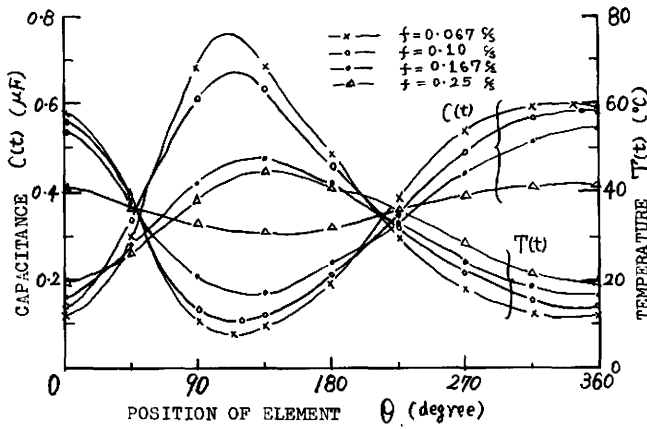
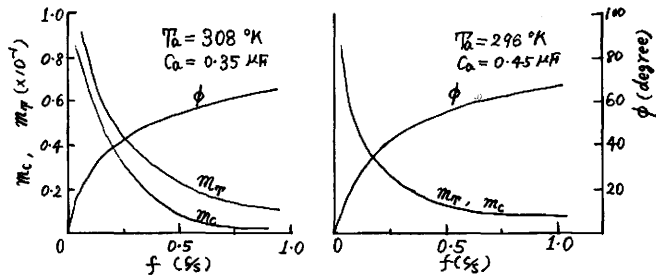


Fig. 14 Change of capacitance and temperature due to the rotation of the thermodielectric element (the charge-discharge type)



(a) The charge-discharge type (calculated from Fig. 14) (b) The residual charge type (calculated from Fig. 17 (a))

Fig. 15 Heat cycle dependences of temperature, static capacitance and thermal lag of thermodielectric element.

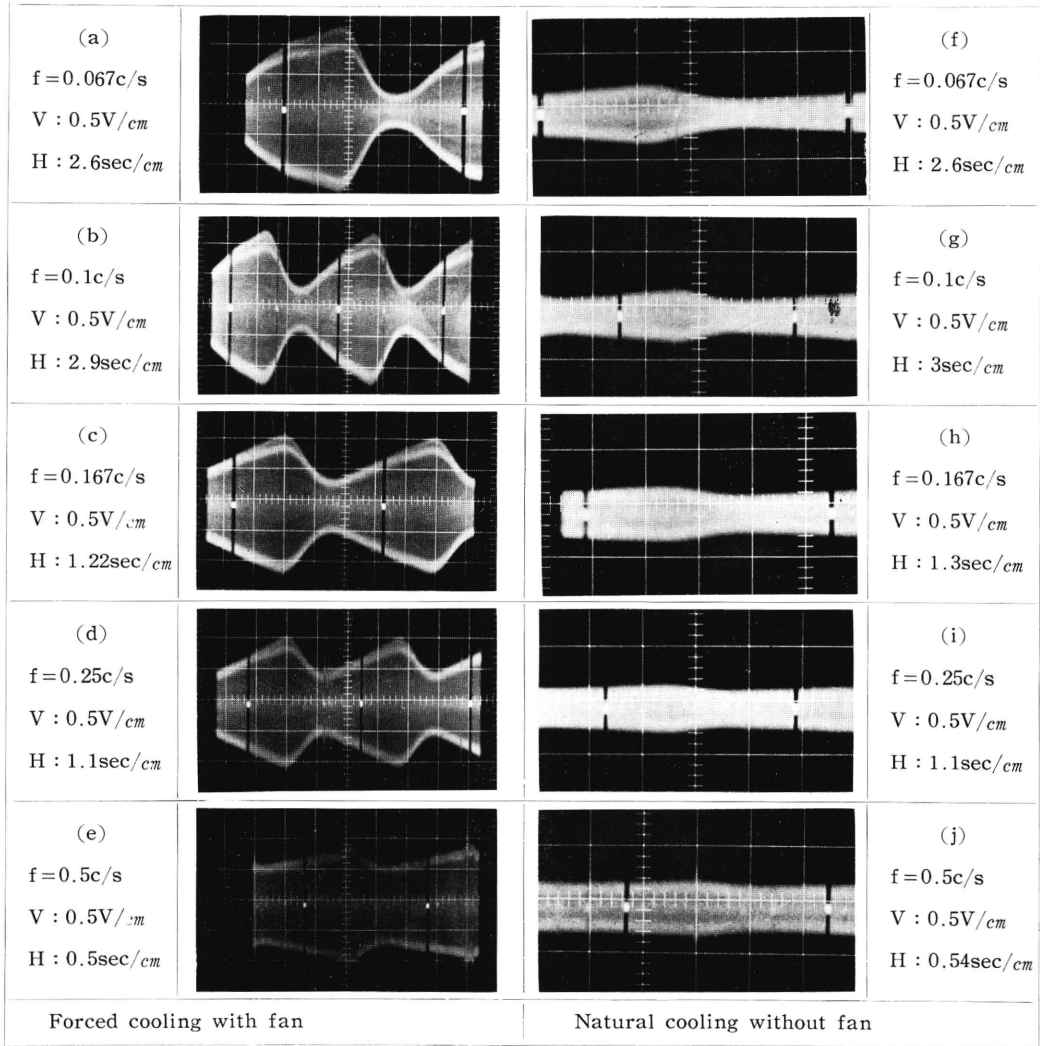
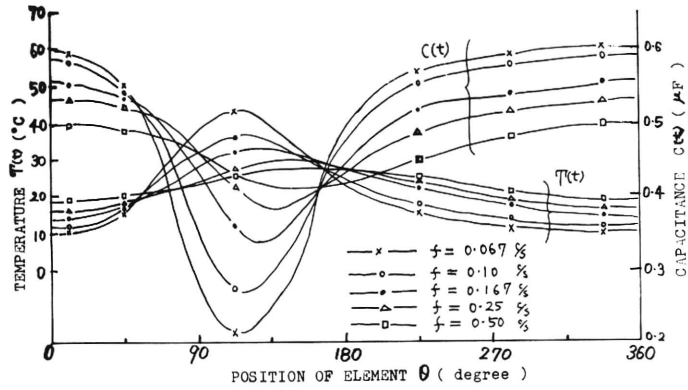
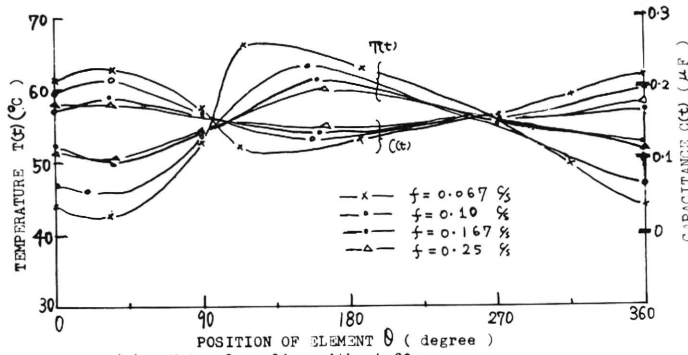


Fig. 16 V_r taken by a synchroscope (the residual charge type). Black mark indicates $\theta = 270^\circ$. $V_0 = 15\text{V}$ (effective), $f_0 = 60\text{c/s}$, $r = 200\Omega$



(a) Forced cooling with fan.



(b) Natural cooling without fan.

Fig. 17 Change of capacitance and temperature due to the rotation of the thermodielectric element (the residual charge type)

び、波形矯正のため負荷に直列にインダクタンス $L=80H$ を入れ、素子の温度および静電容量の位相遅れ ϕ および $\pi+\phi$ を考慮して $\theta=115^\circ$ の位置で負荷が入るように設定した。

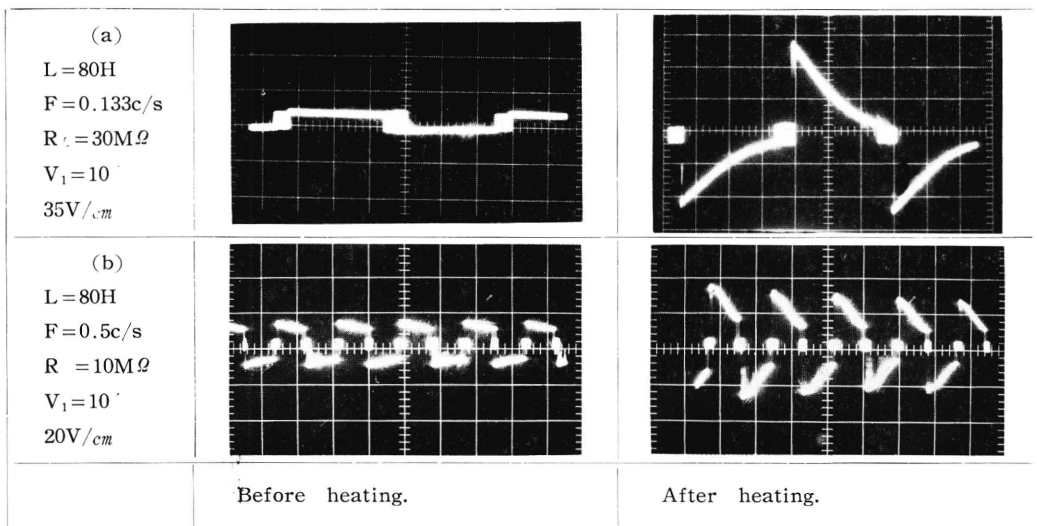


Fig. 18 Comparisons of output voltage before heating and after heating.

Fig.18は加熱前と加熱時の出力波形を示す。すなわち(a)左は $R_L=30M\Omega$ 、回転体の回転速度 $f=0.067c/s$ （したがって、出力周波数 $F=0.133c/s$ ）にし、加熱を行わないときの出力電圧波形であって、同じ状態で加熱を行なったときの波形(a)右と比較すれば熱エネルギーが電気に変換されることが明らかにわかる。また,(a)左は前述の充電のとき与えたエネルギーがそのまま負荷に与えられることも示している。(b)左,右は $R_L=10M\Omega, f=0.25c/s(F=0.5c/s)$ の場合を示すものである。

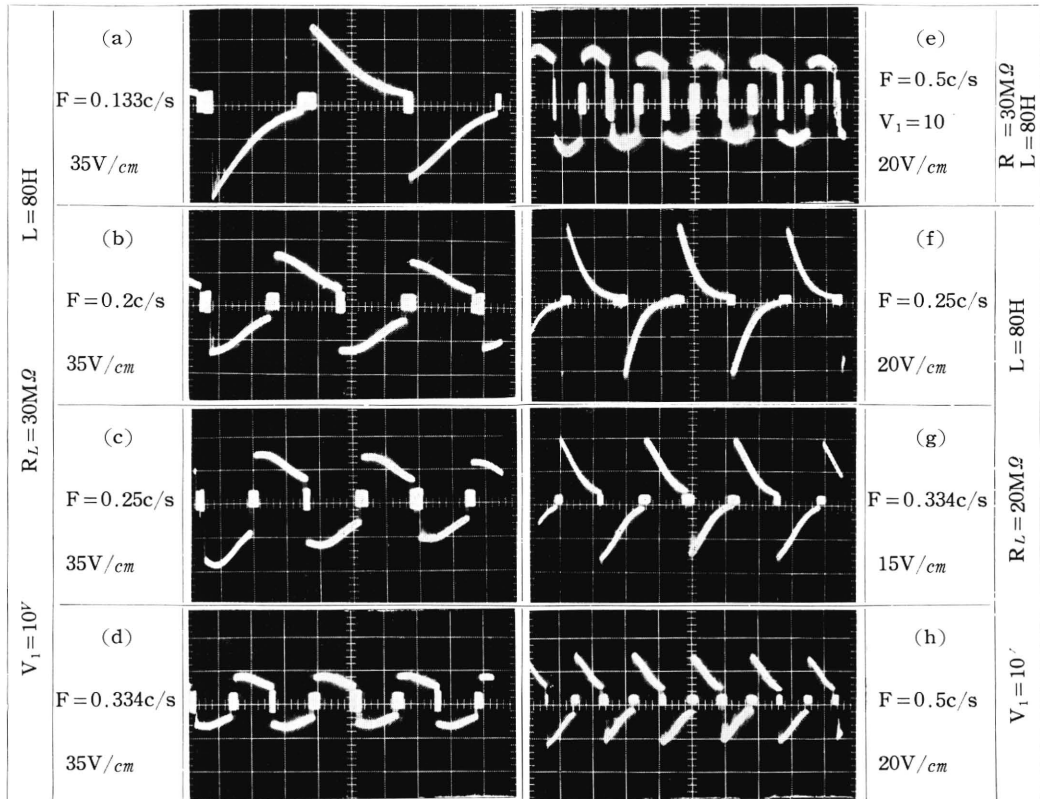


Fig. 19 Waveforms of output voltage in various conditions. (The charge-discharge type)

Fig.19 (a)~(e)は $R_L=30M\Omega$ 、回転体の回転速度、すなわち、熱サイクル数 f をそれぞれ0.067, 0.1, 0.125, 0.167, 0.25 c/s（そのときの出力周波数はそれぞれ $F=0.133, 0.2, 0.25, 0.334, 0.5 c/s$ ）で動作させたときの出力電圧波形を示したものであり、 f が大になるほど放電期間が短くなるとともに静電容量変化率 m_e も(7)式で減少するため(1)式で与えられる V_2 も低下することになる。その結果、出力波形の一サイクルに対する減衰が少なくなっている。また、(f)~(h)は負荷抵抗を減じて $R_L=20M\Omega$ とし、 $f=0.125, 0.167, 0.25 c/s$ ($F=0.25, 0.334, 0.5 c/s$)のときのそれぞれの波形であって、(c)と(f)、(d)と(g)、(e)と(h)を比較すると波形に与える負荷の影響が大きいことがわかる。

なお、Fig.15よりわかるように、この素子の熱に対する応答は最高約1 c/sであるので、出力電圧の周波数は(8)式より2 c/s位が最高であることがわかる。

(ii) 残留電荷方式 Fig.20は素子三対を用いたFig.6の残留電荷方式による出力電圧波形であって、この場合も最初各素子に $V_1=10V$ を与え、 $\theta=100^\circ$ の位置で負荷 R_L がかかるようにした。

Fig.20の(a)~(e)は熱サイクル数が $f=0.167 c/s$ （出力周波数 $F=0.5c/s$ ）のときの負荷によ

る波形の変化を示し、(f)~(j)は負荷を $R_L=3.5M\Omega$ と一定にし、熱サイクル数 f を 0.1, 0.127, 0.167, 0.5, 1 c/s ($F=0.3, 0.38, 0.5, 1.5, 3$ c/s)と変化させたときの波形である。

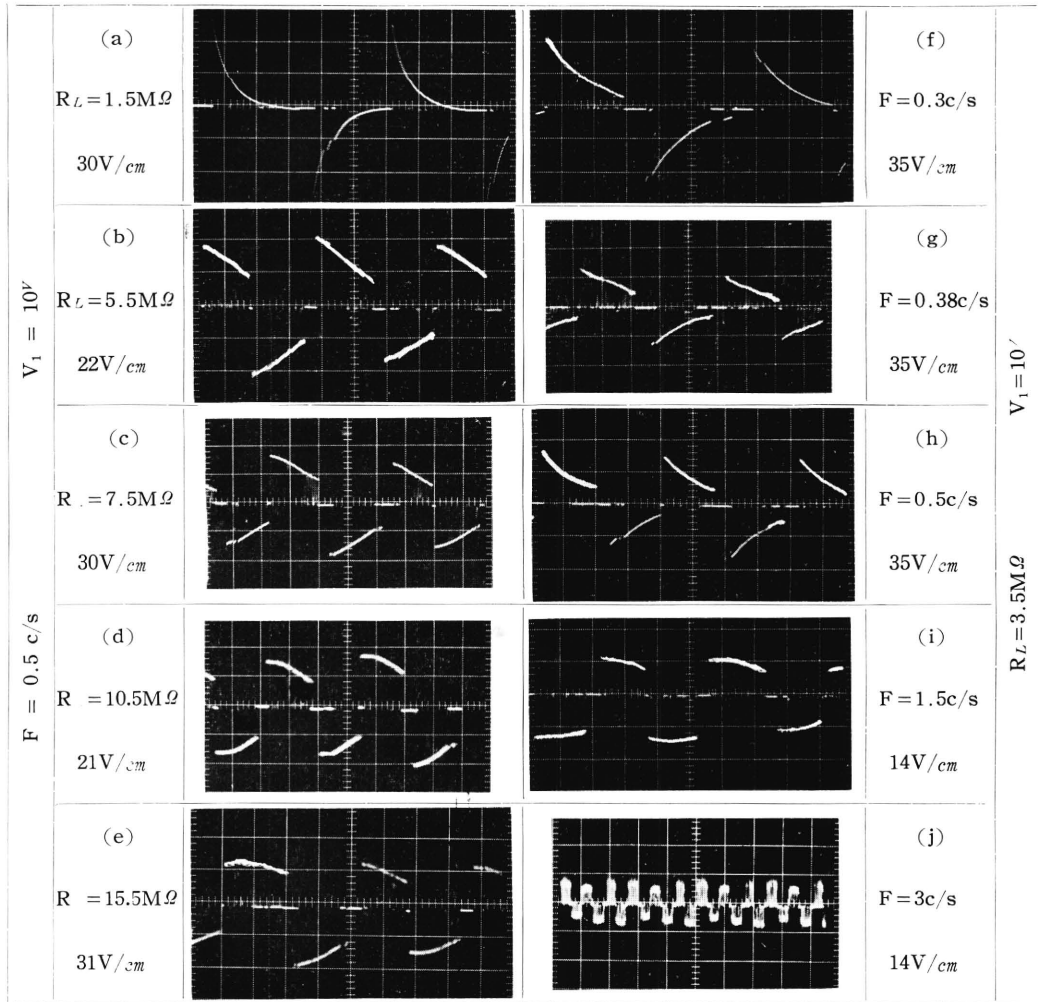


Fig. 20 Waveforms of output voltage in various conditions. (The residual charge type)

これらより、波形におよぼす熱サイクル数増大の効果も負荷増大の効果も同様で、充放電方式の傾向と一致するが、ただ、充放電方式において熱サイクル一定の場合は負荷の大きさにかかわらずその最高電圧は常にはほぼ同じ大きさであったのに反し、本方式では(a)~(e)にみられるごとくその最高電圧の大きさが負荷の増大とともに減少している。これは充放電方式および帰還充放電方式では熱サイクルごとに充電用電圧源 V_1 で充電されたのちは、負荷回路に関係なく温度 T_2 で決める電圧値 V_2 になるのに対し、残留電荷方式ではこの各熱サイクルごとの充電が、対になった相手の素子の放電という形で負荷抵抗を通して行なわれ、負荷の大きさがその電荷の移動度に直接影響を与える結果、負荷抵抗値が大きくなれば電荷の移動量も減少し、したがって、素子の最高端子電圧は減少する。

6 検 討

6・1 漏れ電荷 熱誘電直接発電, 特に残留電荷方式においては, 回路および素子の絶縁抵抗が高いことが要求される。もし素子を充電し電荷 Q_1 を与えても時間が経つにしたがって電荷が漏れ Q_2 となった場合, 素子の端子電圧は(1)式で示す値より小さくなることになる。

いま, 素子の静電容量および並列等価抵抗を

$$C_e = \frac{m}{T - T_c}, \quad R_e = R'_0 \exp(-\zeta T)$$

とあらわすと Q_2/Q_1 は (ただし $m = \epsilon_0 C^* S/d$)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \exp\left[-\{f(T_2) - f(T_1)\} / (mR'_0 \lambda \zeta)\right] \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで

$$f(T) = \left\{ T - \left(\frac{1}{\zeta} + T_c \right) \right\} \exp(\zeta T), \quad \lambda = \frac{dT}{dt}, \quad T = \lambda t + T_1$$

とあらわされる^{(2), (3)}。

さて, Fig.10から $R'_0 = 1.78 \sim 4.9 \times 10^{16} (\Omega)$, $\zeta = 3.8 \sim 4.1 \times 10^{-2} (1/^\circ K)$ が得られ, また, たとえば Fig.14より各熱サイクルについて λ が求められるので ($\theta = 0^\circ$ は $t = 0$ に, $\theta = 360^\circ$ は回転周期 $\tau = 1/f$ に対応するので Fig.14は T 対 t におきかえられる), (12)式を用いて種々の R'_0 に対する Q_2/Q_1 を求めることができ, それらの結果は Table 1 のようになる。

f (c/s)	Q_2/Q_1		
	0.067	0.1	0.25
$R'_0 = 3.18 \times 10^{16} (\Omega)$ $\zeta = 3.8 \times 10^{-2} (1/^\circ K)$	0.998	0.999	0.999
$R'_0 = 3.18 \times 10^{14} (\Omega)$ $\zeta = 3.8 \times 10^{-2} (1/^\circ K)$	0.774	0.984	0.997

Table. 1 Leaked charge due to volume resistance of thermodielectric element.

6・2 出力電力 Fig. 19および Fig.20の出力電圧 $v(t)$ を用いて出力電力は

$$P_a = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \frac{v(t)^2}{R_L} dt \quad \dots\dots\dots(13)$$

のように求められる。ここで τ_0 は出力電圧波の周期で $1/F$ に等しい。ただし, 充放電方式においては電源より供給される電力 V^2/R_L を差引いたものを示す。

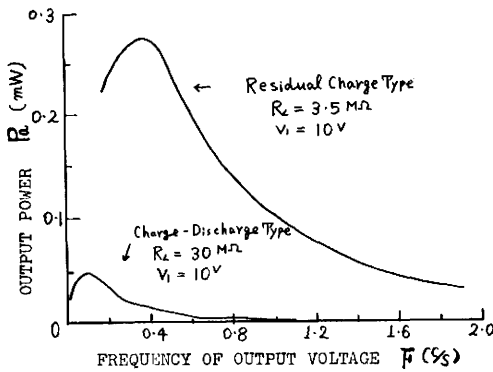


Fig. 21 Frequency characteristics of output power. (experimented value)

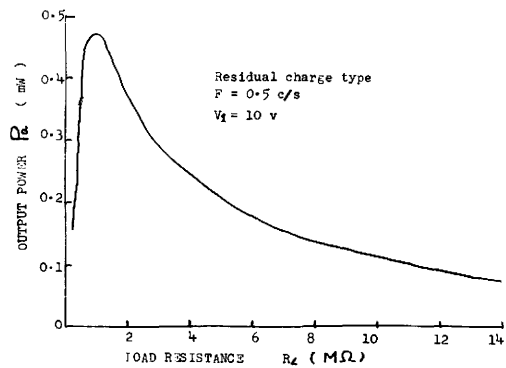


Fig. 22 Load resistance characteristic of output power. (experimented value)

Fig.21 は充放電方式では $R_L = 30 M\Omega$, $V_1 = 10^V$ のもとでまた残留電荷方式では $R_L = 3.5 M\Omega$,

$V_1=10^V$ のもとで出力電圧の周波数 F （したがって、熱サイクル数 f ）を変化した場合の出力電力を示す。また、Fig.22は $F=0.5\text{ c/s}$ 、 $V_1=10^V$ のもとで負荷抵抗 R_L を変化したときの残留電荷方式の出力電力を示す。

充放電方式および帰還充放電方式では最適負荷および最適熱サイクル数の存在することはすでに発表した^{(4)~(9)}、残留電荷方式においても同様なことがいえることがこれら結果よりわかる。

6・3 各種交流発電方式の比較 充放電方式と帰還充放電方式の動作原理は全く同じであるがただ発生した電気エネルギーの一部を電源側に帰還するか、しないかだけの相違にすぎない。そのため前者はFig.18, (a), (b)左に示したごとく熱サイクルが与えられなくとも充電々圧による電圧が負荷にあらわれるのに対し、後者は熱サイクルが与えられない限り負荷端に電圧はあらわれない。さらにこれらの特徴をあげれば、(i)各熱サイクルごとに充電を必要とするため、たとえばFig.19(c)と(f), (d)と(g)および(e)と(h)をそれぞれ比較してわかるように出力電圧の最大値は負荷に無関係に定まり、ただ熱サイクル数（すなわち素子温度）によってのみ決まる。(ii)たとえばFig.19の(f), (g)のように負荷が小さいときに出力電圧は指数関数的に早く減衰するので、平均電力の点より負荷抵抗値をある程度大きくすることが必要である。(iii)出力電圧、電流の周波数は(8)式で与えられ、「対」数 n は任意の正整数でよい。

残留電荷方式の特徴をあげれば、(i)素子の充電は各素子（または対の一方のみ）に対し運転に入る前にあらかじめただ一回だけ行なっておけばよいから操作は簡単である。(ii)放電は対をなす相手の素子を通して行なわれるため、前述二方式に比し負荷抵抗値が小さい場合に適する。本方式では負荷抵抗値を余り大きくすると電荷の移動量が減じ、出力電圧が減少することになる。(iii)連続動作に入ったのちの素子の充電は対の相手をなす素子の放電という形においてなされるため、前述二方式とことなり、出力電圧の最大値は熱サイクル数はもちろん、負荷の大きさによっても大きな影響を受ける、(iv)出力電圧、電流の周波数は(9)式で与えられ、「対」数 n は奇数でなければ構成不可能である、などである。

6・4 残留電荷方式における異常現象 残留電荷方式において、500 W 赤外線電球を加熱源、送風機を冷却源とし、その間に素子をおいて所定の回転数で回転させて熱サイクルを与え、そのとき得られた交流波形がFig.20のようであった(そのときの静電容量変化はFig.17(a)である)。しかしながら、ここで送風機による強制空冷をやめ、自然空冷にしたがって熱サイクルを与えると発生電圧の振幅が時間とともに次第に増大してゆくことが認められた。



(a) Forced cooling with fan

(b) Natural cooling without fan

Fig. 23 Anormalous phenomenon at the residual charge type.

$$R_L=3.5M\Omega, \quad V_1=10v, \quad F=0.5c/s, \quad \text{Vertical scale}; 35V/cm.$$

Fig.23 (a)は $V_1=10^V$ 、 $R_L=3.5M\Omega$ 、 $F=0.5\text{ c/s}$ ($f=0.167\text{ c/s}$)で強制空冷を行なったときの出力電圧波形であって、その振幅は素子特性の不均一に基づく多少のばらつきはあるが、ほぼ50V一定である。同図(b)は同じ電気的条件下のもとに自然空冷をしたときの出力波形であり、これをみると振幅は次第に増大、最高105Vにもなっている。この振幅はその後ますます増大し、素子の絶縁破壊を起すまで続くことを確認している。

なお、このときの(a)における素子の温度および静電容量は Fig.17(a)より $T_a=296^\circ\text{K}$, $\Delta T=10.3^\circ\text{K}$ ($m_T=0.035$), $C_a=0.45\mu\text{F}$, $\Delta C=0.157\mu\text{F}$ ($m_c=0.35$)であり、(b)においては Fig.17(b)より $T_a=330.3^\circ\text{K}$, $\Delta T=6.3^\circ\text{K}$ ($m_T=0.019$), $C_a=0.17\mu\text{F}$, $\Delta C=0.032\mu\text{F}$ ($m_c=0.19$)であった。

この原因、解析等についての詳細はあらためて別の機会に報告する予定である。

7 結 言

以上に強誘電体の熱誘電現象を利用して実際に交流発電を行なう種々の方式をのべ、各方式の特徴を比較し、そのうちの充放電方式および残留電荷方式について試作、実験を行なって負荷および熱サイクル数の特性におよぼす影響を明らかにした。

その結果、現素子の熱に対する応答は最高約1(c/s)であるので60(c/s)の商用周波数を生ずる交流発電器を得るには素子「対」数を60にすればよいことがわかる*。また、その出力電力は各面の受熱面積を増せば大きくなり、たとえ効率が低くとも電力の絶対量が容易に確保できるので広い分野への応用が期待される。

最後に、本研究に随時御指導をいただいている阪大熊谷教授、素子の製作にあたられた村田製作所佐佐利部長、千田部長、脇野次長および終始実験に協力いただいた米田忠生の諸氏に謝意を表す。また、本研究は昭和38年度文部省科学試験研究費によったことを付記する。

〔付記〕 本論文は電気学会雑誌、第85巻に掲載予定(印刷中)の論文に加筆補充したものである。

文 献

- 1) 藤 本 : 電気学会雑誌, **83**, 2080~2088 (1963-12)
- 2) 藤 本, 松 本, 松 原 : 福井大学工学部研究報告, **12**, No. 1・2, 129~150 (1964)
- 3) 藤 本, 松 本, 松 原 他 : 第24回応物学会講演予稿集, 4p-II-8 (1963-10)
- 4) 藤 本, 松 本 : 明日のエネルギーと直接発電, **2**, No. 1, 426~436 (1964-4)
- 5) 藤 本, 松 本 : 電気学会直接発電専門委員会講演資料 (1964-4)
- 6) 藤 本, 松 本 : 第11回応物連合講演, 3p-E-6 (1964-4)
- 7) 藤 本, 松 本 : 昭39年電気四学会連合大会, 9 (1964-4)
- 8) 藤 本, 松 本 : 福井大学工学部研究報告, **13**, No. 1・2, 86~104 (1965)
- 9) 藤 本, 松 本 : 電気学会雑誌, **84**, 1836~1845 (1964-11)
- 10) 藤 本, 松 本, 米 田 : 第11回応物連合講演 3p-E-7 (1964-4)
- 11) 藤本, 松本 : 昭39年電気関係学会関西支部連合大会, 7-30 (1964-11)

(昭和39年9月26日受理)

* その後、 $n=15$ として $F=30\sim 40$ (c/s) の交流を得ている。

(熊谷, 藤本, 松本, 安井 : 昭40年電気四学会連合大会予稿, 1000, (1965-4))