

熱 誘 電 発 電

大阪大学工業教員養成所 藤 本 三 治

1. 緒 言

熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する方法として、従来から、(1)熱電発電、(2)熱電子発電、(3)MHD発電、(4)超導電発電、(5)熱磁気発電などがよく知られてきた。しかしながら(1)では数百℃の温度差を、(2)、(3)では二千℃前後の超高温を、また(4)では逆に、絶対零度付近の超低温を必要とし、特に(2)~(5)は装置が非常に大がかりになる。(5)は効率が $10^{-5}\%$ 程度と極めて低く実用に供し難い。ここに紹介する熱誘電発電も上と同じエネルギー変換を行なって発電するものであるが、本発電は熱誘電素子(もっぱら強誘電体)の静電容量が温度によって変化することを利用した新しい方法といえる。

熱誘電発電器は室温付近の温度において、数十℃の温度変化を熱誘電素子に与えるだけで容易に交・直流(特に高電圧)が得られ、本質的には回転部をもたず、構造簡単・堅固・軽量・長寿命・低廉などの長所をもっているが、効率があまり高くなく(理想状態でカルノー機関のそれと同じ)、また持続的な電気出力を得るには連続的な熱サイクルを必要とする。

2. 原 理

一般に強誘電体磁器蓄電器の静電容量 C は温度 T に対して、図1のように変化し、Curie点 T_c 以上の温度ではCurie-Weissの式

$$C = (\epsilon_0 \Lambda C^* / d) / (T - T_c) \quad (1)$$

にしたがう。ここに Λ と d はそれぞれ蓄電器の面積と厚さ、 C^* はキュリー定数、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。

いまこのような C を図2のような回路で、 T_c より僅かに高い温度 T_1 において、 S_1 を閉じ充電する。充電電圧を V_1 とすると、 C に与えられた電荷 Q_1 は

$$Q_1 = C_1 V_1 \quad (2)$$

つぎに S_1 を開いて C を加熱、その温度を T_2 まであげる。この途中の電荷漏れはないものとする、この間に C の値は C_2 になっているので(図1)、 C の端子電圧 V_2 は

$$Q_1 = C_2 V_2 \quad (3)$$

を満足する値となる筈である。(2)、(3)より

$$G_v \equiv V_2 / V_1 = C_1 / C_2 \quad (4)$$

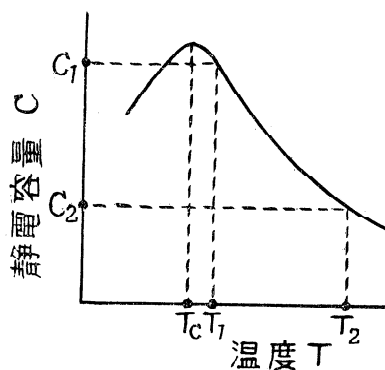


図1 強誘電体の静電容量の温度特性

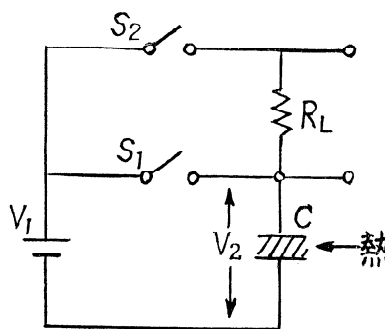


図2 発電基本回路

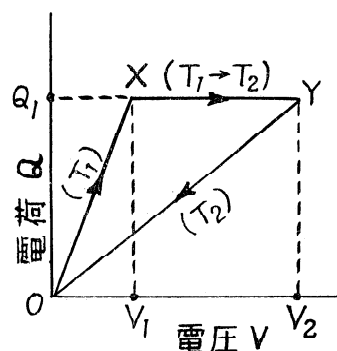


図3 熱サイクル図

すなわち V_2 は V_1 の G_v 倍または C_1/C_2 倍になる。この G_v のことを電圧利得という。

一方、温度 T_1 、 T_2 のとき蓄えられた C の静電エネルギー W_1 、 W_2 はそれぞれ

$$W_1 = C_1 V_1^2 / 2 = Q_1 V_1 / 2 \quad (5)$$

$$W_2 = C_2 V_2^2 / 2 = Q_1 V_2 / 2 = G_V W_1 \quad (6)$$

したがって、加熱に伴う電気エネルギーの増加 ΔW は

$$\Delta W = W_2 - W_1 = (G_V - 1) W_1 \quad (7)$$

これより G_V が大きいほど ΔW も大きくなることがわかる。図2のような回路にすると、加熱によって生じたエネルギー W_2 のうち、増加分 ΔW のみを負荷 R_L に取り出し、残りの W_1 は電源側にかえされているので、電池の消耗はない。

以上の操作を図3の熱サイクル図で示そう。原点 O (O, O, T_1) は温度 T_1 の C がまだ充電されていない状態に相当している。ここで C を電圧 V_1 によって充電すると $X(V_1, Q_1, T_1)$ の状態になり、さらに加熱して温度を T_2 まで上昇させると $Y(V_2, Q_1, T_2)$ に移る。ここで電荷を放電させると原点の $O(O, O, T_2)$ 状態になり、冷却して C の温度を T_1 まで下げるともとの状態 $O(O, O, T_1)$ にかえり、熱サイクルが一循して仕事を終える。図の ΔOXQ_1 、 ΔOYQ_1 はそれぞれ W_1 、 W_2 を表わし、また熱路に囲まれた ΔOXY は ΔW を表わしている。

図4は $T_0 = 22^\circ\text{C}$ 、 $C^* = 1.1 \times 10^5 \text{K}$ 、 $A = 2.5 \times 2.5 \text{cm}^2$ 、 $d = 0.2 \text{mm}$ の ($B_a + C_a + S_r$) T_1 O_3 磁器蓄電器 (試料 I) を $T_1 = 23^\circ\text{C}$ のとき $V_1 = 10 \text{V}$ で充電し、温度 T を 96°C まで上昇したときの電圧利得を示したものであって、温度差 73°C に対する G_V の値は約7.5となっていることがわかる。素子の温度が余り高くなると電荷漏れが生じて G_V は若干低下、また V_1 があまり大きくなっても T 対 C の非直線性が減ずるため、 G_V は低下する。

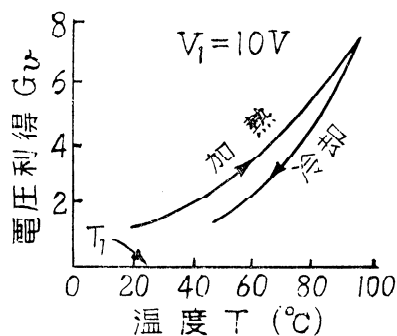


図4 温度に伴う熱誘電起電力

2.1. 直流の発生

図2の熱誘電素子 C に連続的な熱サイクルを与えるのに、つぎの二とおりの方法がある。

- (1) C を固定したまま、これを加熱、ついで冷却、この操作を交互に繰り返す。
- (2) 図5のように C を適当なわくの上に取り付け、これを熱源と冷却器の間において回転する。

いま熱源を 500W 赤外線電球、冷却器を扇風機とし、試料 I を周期 8.6 秒 (熱サイクル数 0.12 c/s) で回転させて熱サイクル f を与え、そのときの温度 T 、静電容量 C 、電圧利得 G_V を時間 t または試料の位置 θ に対して測定すると図6のようになる⁽¹⁾。これによると T が最高となるのは試料が丁度熱源の方向と一致した瞬間 (図では $t=0$ または $\theta=0$) より ϕ だけ遅れている。したがって任意の時間における試料の温度は

$$T = T_a + \Delta T \cos(\omega t - \phi) \quad (8)$$

ここに

$$T_2 - T_1 = 2\Delta T, \quad T_2 + T_1 = 2T_a \quad (9)$$

で表わすことができ、熱的遅れ角 ϕ は

$$\phi = (d/2) \sqrt{\pi f \sigma s / k} \quad (10)$$

で与えられる。 ϕ が大きくなると加熱・冷却の繰り返しが難しくなり、熱サイクル数を制限するようになるがその限度は $\phi \leq \pi/2$ 、したがって許容される熱サイクル数 f_a としては

$$f_a = \pi K / (\sigma s d^2) \quad (11)$$

のようになる。これより熱サイクル特性をよくするには試料の密度 σ 、比熱 s 厚さ d を小さくしなければならないことがわかる。

温度に伴う静電容量の変化は(1)を用いて

$$C = C_a - \Delta C \cos(\omega t - \phi) \quad (12)$$

また試料の端子電圧は

$$V = V_a + \Delta V \cos(\omega t - \phi) \quad (13)$$

$$V_a = (1 + m_c) V_1 \quad (14)$$

$$m_c = \Delta C / C_a = \Delta V / V_a \quad (15)$$

の形で表わされ、 C_a 、 V_a はそれぞれ平均静電容量、平均電端子電圧、 ΔC_a 、 ΔV_a はそれぞれ温度変化 ΔT に対する C_a 、 V_a の変化分である。 m_c を用いると、(4) はまた

$$G_V = (1 + m_c) / (1 - m_c) \quad (4')$$

で表わされる。熱サイクル数を変えたときの G_V 、 m_c 、 ϕ は図7のようである。

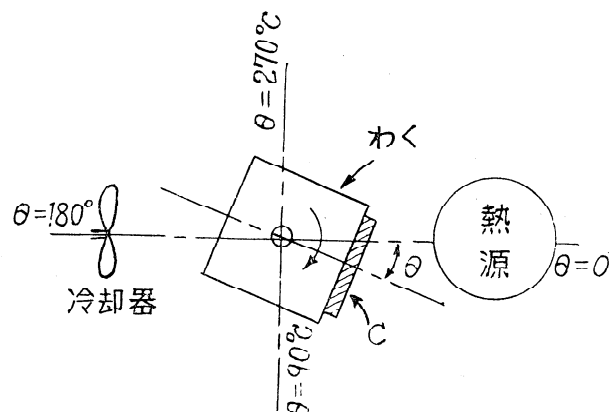


図5 試料 C に熱サイクルを与える方法

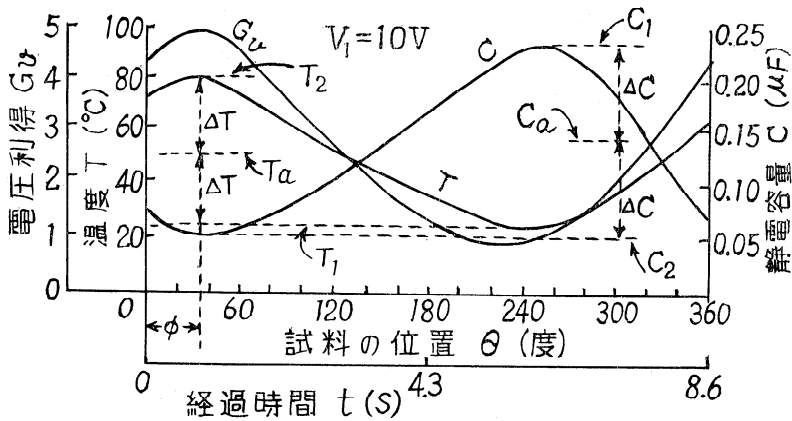


図6 試料回転に伴う温度、静電容量および電圧利用

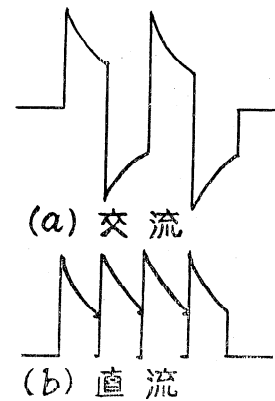


図9 出力波形

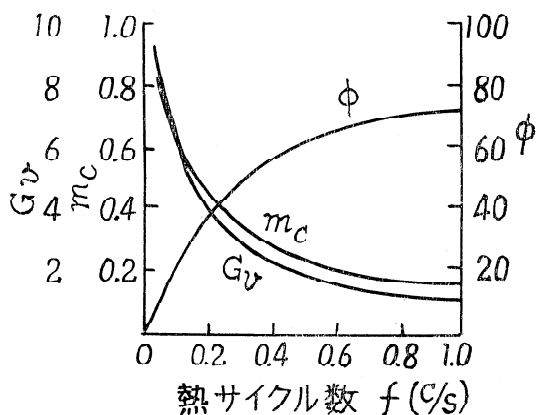
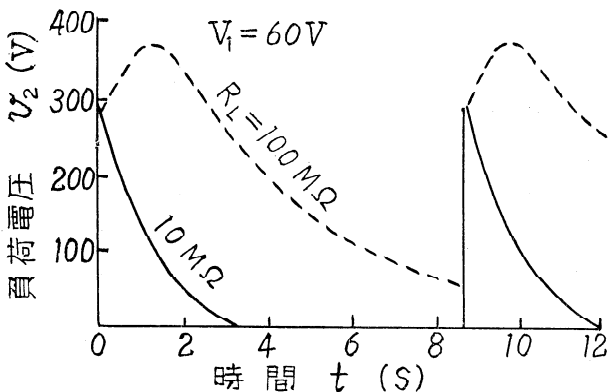
図7 G_v , m_c , ϕ の熱サイクル数依存性

図8 出力波形

さて、負荷特性を求めるため、図6のように発生した電圧 V_2 (図では $G_v \equiv V_2/V_1$ で表わされている) を、 $t=0$ の時刻に負荷 R_L に印加し、半周期間 $\tau/2$ だけ放電させたときの負荷電圧の波形は図8のようになる。図から負荷の時定数が大きいきほどよい直流波形となることがわかる。また図9(b)は素子を増して、隣り合った波形の中にも数個の波形が入るように工夫した発電器の出力波形であって、負荷の時定数が小さいときでもよい

直流波形が得られる。

2.2. 高電圧の発生

図10は直流の高電圧を発生する縦続接続の基本回路であって、図の C_I , C_{II} (ただし $C_I > C_{II}$) は強誘電体素子を表わす。温度 T_1 においてまず S_1 , S_2 を閉じ、両素子を V_1 で充電、電荷を与えておく。つぎに S_1 , S_2 を開き C_I のみを温度 T_2 まで加熱して、その端子電圧を V_I に上昇させたのち、 S_2 を閉じて C_I の電荷を温度 T_1 の C_{II} に移す。ここで今度は C_{II} のみを加熱すると、その端子電圧 V_{II} は

$$V_{II} = (C_I + C_{II}) / (C'_I + C_{II}) \cdot (C_{II} / C'_{II}) \cdot V_I \quad (16)$$

となる。ここに C_I , C_{II} は T_1 におけるそれぞれの静電容量、 C'_I , C'_{II} は T_2 におけるそれぞれの静電容量を示す。

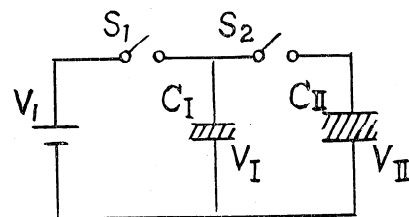


図10 縦続接続

一般に $C_I > C_{II} > \dots > C_I > \dots > C_n$ のような n 個の素子が縦続接続され、これらがつぎつぎと加熱されたときの C_n 端の電圧 V_n は

$$V_n = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_1 \cdot \dots \cdot m_n \quad (17)$$

ただし

$$m = (C_I + C_{I+1} + \dots + C_n) / (C'_I + C_{I+1} + \dots + C_n) \quad (18)$$

で求められる。ここに C'_I は加熱時の C_I の静電容量

を表わす。

図10の回路で C_I に試料 I, C_{II} に厚さ 0.6 mm の試料を用い, 初期電圧を $V_1=300V$ として温度を $23^\circ C$ から $94^\circ C$ まで上げたときの V_{II} の値は約 1550 V である。

2.3. 交流の発生

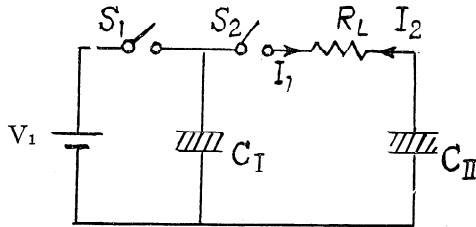


図11 交流発電基本回路

図11はこの基本回路で, $C_I=C_{II}$ とする。最初 S_1, S_2 を閉じて, 温度 T_1 において両素子を充電しておいてから S_1, S_2 を開き, 以後電源は取り除いてしまう。交流を得るにはまず, C_I を T_2 まで加熱して, S_2 を閉じ C_I の電荷を, 負荷 R_L を通して C_{II} (温度 T_1) に移す。これが交流の正の半サイクル I_1 である。つぎに S_2 を開け, C_I の温度を T_1 にもどすとともに, C_{II} の温度が T_2 になるまで加熱, これが終るとふたたび S_2 を閉じて C_{II} の電荷を C_I にかえし, 温度を T_1 まで下げておく。このときの電流 I_2 は I_1 と方向が逆で負の半サイクルになる。

このように一対の素子 C_I, C_{II} を交互に加熱・冷却することによって, 負荷に交流が取り出させるが, その周波数 f は各素子が1秒間に加熱・冷却される回数すなわち熱サイクル数と同じになる。また C_I から C_{II} への電荷の移動量を $4Q$ とすると $I_1=I_2=f4Q$ の関係がある。

一般に $2n$ 個の強誘電体蓄電器(素子)を, 図5と同様のわくの上に取り付け, i 番目の素子と $i+n$ 番目の素子とが互いに 180° の位置間隔におかれているものとし, わくを1秒間に f 回転させたとき発生する交流の周波数は

$$F = nf \quad (19)$$

となる。図9(a)は交流の出力波形で R_L 直列にインダクタンスを入れると正弦波に近づく。

3. 設計式

3.1. 負荷電圧と負荷電力

温度 T_1 の強誘電体試料が V_1 なる電圧で充電され, これに熱サイクル f の周期的熱照射を与えたとき, 温度が $24T$ 上昇して T_2 になった場合, 負荷 R_L 端に現われる電圧(最大値)は

$$V_L = \omega C_a R_L M_c V_1 / \sqrt{1 + (\omega C_a R_L)^2} \quad (20)$$

ここに

$$M_c = m_c(1 + m_e) \quad (21)$$

また負荷に取り出し得る平均電力は

$$P_a = (1/4)(M_c \omega C_a V_1)^2 R_L / \{1 + (\omega C_a R_L)^2\} \quad (22)$$

となる。いま R_L の値を

$$R_L = 1/(\omega C_a) \quad (23)$$

に選ぶと P_a は最大となり, その値は $P_{a,m}$

$$P_{a,m} = M_c^2 \omega C_a V_1^2 / 8 \quad (24)$$

になる。これより $P_{a,m}$ を大きくするには, (i) ωM_c^2 を大きくする。(図7を参照), (ii) 平均静電容量 C_a を大きくする。(iii) 充電電圧 V_1 を大きくする。これは2乗に比例するのでこの効果は大きい。

(24)を用いて負荷抵抗を変えたときと熱サイクル数 f すなわち $\omega/(2\pi)$ を変えたときについて平均電力を求めると図12, 図13のようになる。

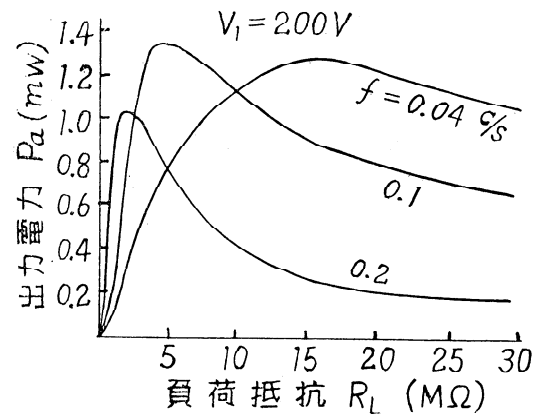


図12 出力電力の負荷特性 $V_1=200V$

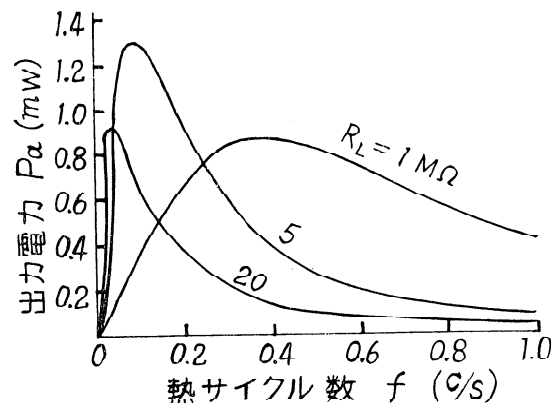


図13 出力電力の熱サイクル数特性 $V_1=200V$

3.2. 効率

(1). 変換効率: 熱誘電素子に熱エネルギーを加えたとき, 入力熱エネルギーに対し実際に変換された電気エネルギーはどれだけかという割合を変換効率という。

いま熱入力のうち, 素子そのものの温度上昇に費され

たエネルギーを W_F とすると

$$W_F = 4.2 s \sigma A d (T_2 - T_1) \quad \dots$$

であるから、変換効率

$$\eta_c = \Delta W / (W_F + \Delta W) \quad \dots$$

で表わされる。

またこのような素子を、はじめ電界 E_1 (電束密度 D_1) で充電したときの効率を熱力学の立場に基づいて計算すると、

$$\eta_c = (T_2 - T_1) / \{T_2 + 2\epsilon_0 C^* \sigma s (T_2 - T_1) / D_1^2\} \quad (27)$$

になり⁽³⁾、素子に加える電界 E_1 を無限大にするか、または素子の単位面積当りの電荷の量を無限大とすると

$$(\eta_c)_{E_1, D_1 \rightarrow \infty} = 1 - T_1 / T_2 = 2\Delta T / (T_a + \Delta T) \\ = \eta_{\text{calnot}} \quad (28)$$

となつて、本発電機の効率はカルノー機関の効率に達することを表わしている。

(2) 実効効率：素子に熱を加えたとき、入力熱エネルギーに対し実際に負荷にどれだけの電気エネルギーが取り出せるかという割合を実効効率という。

1 c/s あたり負荷に取り出し得る電氣的エネルギーは P_a/f であるので、これを熱入力で割ると実効効率は

$$\eta_a = \pi^2 f C_a^2 M_c^2 V_1^2 R_L / \{A d (1 + m^2 C_a^2 R_L^2) B_1\} \quad (29)$$

として求められる。ここに

$$B_1 = 2\sigma s \Delta T + T_a \epsilon_{ra}^2 E_1^2 (1 + m_T) (1 + m_c)^2 / (2C^*) \\ m_T = \Delta T / T_a \quad (30)$$

で、 ϵ_{ra} は温度 T_a に対する素子の誘電率である。

最高負荷のときには(29)が成立するので

$$\mu_c, m = \pi C_a M_c^2 V_1^2 / (4A d B_1) \quad (31)$$

になり、素子の平均静電容量 C_a と初期充電電圧 V_1 が大きいほど、また素子の厚さが薄いほど効率が高く、殊に V_1 は2乗できているので、その効果は大きい。

$A = 3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$, $d = 0.4 \text{ mm}$ の試料を $V_1 = 250 \text{ V}$ で充電し $f = 0.065, 0.12, 0.37 \text{ c/s}$ の熱サイクルを加えた場合について、 μ_c , μ_e , P_a および単位重量当りの出力電力 P_{a1} を実測して求めると表1のようになる。

4. 発 電 器

図14は試作した熱誘電発電器である。図の Λ は直径60 cm の絶縁円板 (エポキシ樹脂とガラス繊維の混体) の上に30個の強誘電体蓄電器 (試料I) $C_1, C_2, \dots, C_{30}$ をはりつけ、その表面に煤を塗って黒くしたものである。B を 500 W 赤外線電球と送風機との間において周期 τ で回転させる。ここで素子 C_1 と C_{16} , C_2 と C_{17} , $\dots$, C_{15} と C_{30} などはそれぞれ円板周辺上に 180° の位置間

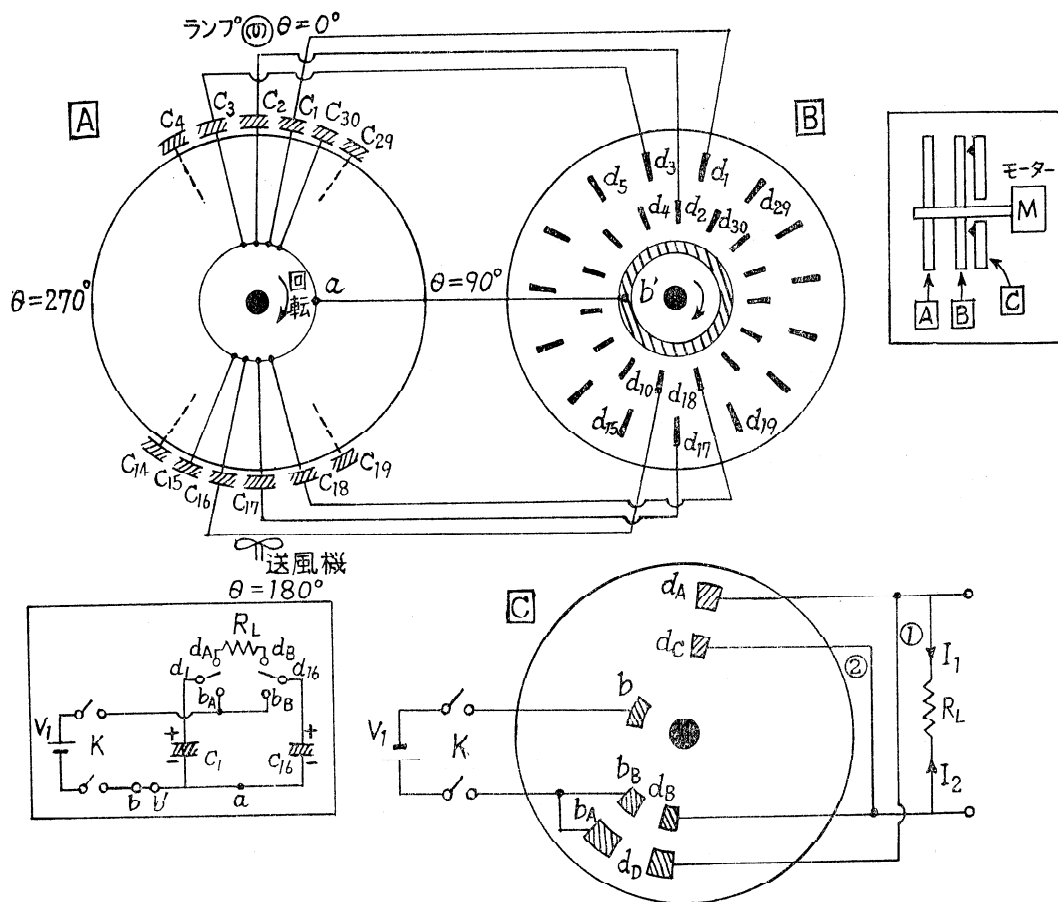


図14 熱誘電発電器

隔に取りつけある。B は同じ直径をもつアクリル樹脂の絶縁板で、この上に30個の導体棒 $d_1, d_2, \dots, d_{30}$ を二段にわたって千鳥型に配列させて取り付け、さらに中央三段目には導体箔の円環 b' をはりつけている。B は A から 10 cm の距離をして、同軸に結ばれ、同じ周期で回転させられる。C も B と同種かつ同直径の絶縁円板で B のとなりに固定され、外側から一段目に約 12° にわたって導電帯 $[d_A, d_D, b_A]$ 、二段目に $[d_C, d_B, b_B]$ 、三段目に $[b]$ をもち、これらの導電帯は B の回転に応じてある時期だけ $[d_1, d_3, d_5, \dots, d_{29}]$, $[d_2, d_4, \dots, d_{30}]$ および $[b']$ にそれぞれ軽く接触するようになっており、B と C とは図2、図10、図11などのスイッチ S_1, S_2 の役目をもっている。

さて、最初電球を点灯しないで図14に示すスイッチKを閉じ、A、B を時計の方向に回転したとしよう。A 板上の C_1 が送風機の位置 ($\theta=180^\circ$) を ϕ だけ過ぎた所(図6の温度Tが最小となる θ の値に選ぶ)にくると、B 中の d_1 も同じ位置まで回転しているので b_A に接触する。一方、B の b' は C の b に常に接触しているから、

$$+V_1 \rightarrow K \rightarrow b_A \rightarrow d_1 \rightarrow +C_1 \rightarrow -C_1 \rightarrow a \rightarrow b' \rightarrow b \rightarrow K \rightarrow -V_1$$

の回路で C_1 は V_1 によって充電され、さらに約 12° 回転すると、B 上の d_2 が C の b_B と接触するので C_2 も

$$+V_1 \rightarrow K \rightarrow b_B \rightarrow d_2 \rightarrow +C_2 \rightarrow -C_2 \rightarrow a \rightarrow b' \rightarrow b \rightarrow K \rightarrow -V_1 \rightarrow +V_1$$

の回路で充電される。 $C_3 \sim C_{30}$ についても同様で、奇数番目の素子は前者の回路、偶数番目の素子は後者の回路で、冷却状態の位置でつぎつぎに充電される。

素子の充電が終わったらKを開き電源 V_1 を取り除いてしまい、電球を点灯して A、B を回転する。いま C_1 が $(180^\circ + \phi)$ の位置から出発すると、回転するにしたがって加熱の位置(電球の位置)に近付くので、温度は T_1 から T_2 に上り、その端子電圧は次第に上昇する。一方このとき、 C_1 と反対の位置にある C_{16} は冷却の位置(送風機の位置)に近付き、その端子電圧はほぼ充電電圧と等しい。ここでは $[d_1$ と $d_A]$, $[d_{16}$ と $d_D]$ とが接触しているので

$$+C_1 \rightarrow d_1 \rightarrow d_A \rightarrow R_L \rightarrow d_{16} \rightarrow +C_{16} \rightarrow -C_{16} \rightarrow a \rightarrow -C_1 \rightarrow +C_1$$

の回路ができて、加熱中の C_1 の電荷は冷却中の C_{16} に移され、負荷 R_L の中に電流 I_1 を流すことになる。

さらに A、B が約 12° 回転すると、 $[d_2$ と $d_C]$, $[d_{17}$ と $d_D]$ が接触するので、

$$+C_2 \rightarrow d_2 \rightarrow d_C \rightarrow R_L \rightarrow d_{17} \rightarrow C_{17} - C_{17} \rightarrow a - C_2 \rightarrow +C_2$$

の回路ができて、加熱中の C_2 の電荷は、冷却中の C_{17} に移され、負荷の中には I_1 と反対方向の電流 I_2 が生ずる。

このような順に素子が回転して C_{16} が加熱の位置に、また C_1 が冷却の位置にきたときには、 $[d_{16}, d_C]$, $[d_1, d_D]$ が接触して、

$$+C_{16} \rightarrow d_{16} \rightarrow d_C \rightarrow R_L \rightarrow d_D \rightarrow d_1 \rightarrow +C_1 \rightarrow -C_1 \rightarrow a \rightarrow -C_{16} \rightarrow +C_{16}$$

の回路で C_{16} の電荷はふたたび C_1 に送りかえされ、電流 I_{16} が最初の電流 I_1 と反対方向に流れる。

一般に $2n$ 個の素子をもつ A の回転数を 1 秒間に f 回とすると、発生する交流の周波数は(19)より nf となるので、この場合 A を 1 秒間に 2 回転すると交流の周波数 F は 30 c/s に、4 回転すると $F=60$ c/s になる。 R_L 端の出力波形は図9(a)のようであるが、 R_L と直列にインダクタンスを挿入することによって波形が矯正できる。

図14の装置を用いた結果は図15に示すとおりである。

なお、この際図14の線①、②を切り、 d_A と d_C , d_B と d_D を接続すると直流発電機になり、その出力波形は図9(b)のようになる。

試作した直流発電機は、回転12面体 A の各面上に $A=2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$, $d=0.4 \text{ mm}$ の素子を並列にして15個はりつけたもので、初期電圧 $V_1=160 \text{ V}$ で充電、 $f=0.05$

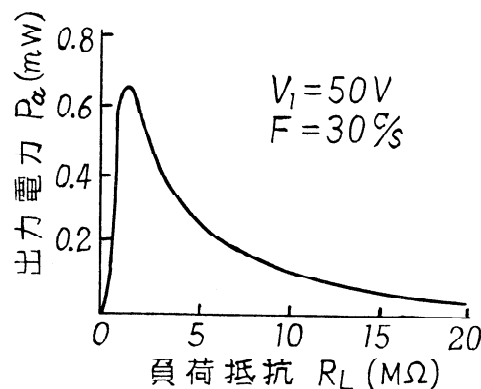
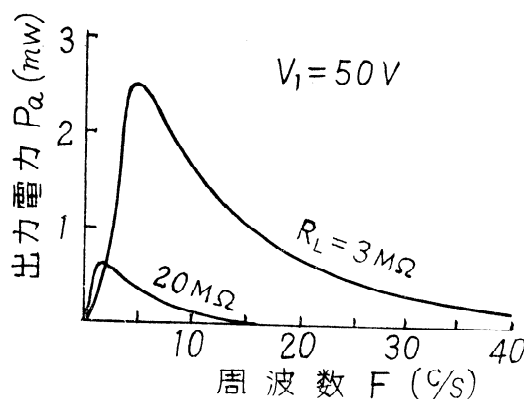


図15 出力電力

0.1 c/s で A を回転したときの出力電力は、温度振幅 $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ に対し、約 100~50 mw 程度であった。

5. 人工衛星船の電源としての検討

人工衛星船“Telstar”は打ち上げ当時 3 c/s のスピン運動をしながら地球の回りを回転し、日数とともに低下、120日目にはスピン運動が 0 になると報ぜられている⁽⁴⁾。人工衛星船がスピン運動を行なっている場合、それ自体がこの割合いで太陽熱にさらされることになるので、その表面は加熱・冷却を受け、冷却時には温度 T_1 、加熱時には温度 T_2 と、 $(T_2 - T_1)$ の温度差を伴うことになる。

いま面積 A、厚さ d なる強誘電体蓄電器（素子） $C_1, C_2, \dots$ を図14の A のように配列し、これが衛星船とともに太陽熱を受けて、それ自身が回転しているものとしよう。

任意の素子の法線が太陽熱の入射方向と φ なる角をなすものとし、単位時間に対する太陽熱の放射エネルギーを単位面積当り S、素子の熱吸収率を α とすると、単位時間に素子 1 個が吸収した熱エネルギーは $\alpha AS \cos \varphi$ 一方蓄電器群 A が角速度 $\omega (= 2\pi f)$ で回転するものと仮定すると $\varphi = \omega t$ であるから、この間の入力熱エネルギーは上の値を時間について半周期間積分して

$$W_i = \alpha AS / (\pi f) \quad (32)$$

この熱エネルギーの吸収によって素子の温度が $2\Delta T$ だけ上昇するわけであるから、(32)は $Ad\sigma_s 2\Delta T$ に等しくなる筈である。したがって

$$2\Delta T \cdot f = \alpha S / (\pi d \sigma_s) \quad (33)$$

また実際に熱から電気エネルギーに変換される効率を η_e とすると、変換電気エネルギーは(32)の η_e 倍となり

$$W_e = \eta_e \alpha AS / (\pi f) \quad (34)$$

したがって、出力電力 $P_e = W_e f$ 、単位重量当りの電力 $P_{ei} = P_e / (Ad\sigma)$ および単位面積当りの電力 $P_{eA} = P_e / A$ はそれぞれ

$$P_e = \eta_e \alpha AS / \pi \quad (35)$$

$$P_{ei} = \eta_e \alpha S / (\pi d \sigma), \quad P_{eA} = \eta_e \alpha S / \pi \quad (36)$$

となる。

本発電器の素子平均温度 T_a はその吸収熱量と放射熱量とが平衡したときの温度として求められ、素子表面の熱放散率を δ 、宇宙外気の温度を T_0 とすると、Stefan-Boltzmann の法則を用いて

$$\alpha AS / (2\pi) = \delta A \kappa (T_a - T_0)^4$$

$$T_a = T_0 + \{\alpha S / (2\pi \delta \kappa)\}^{1/4} \quad (37)$$

ここに κ は Stefan-Boltzmann の定数でその値は $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}^4)$ である⁽⁵⁾。

さてここで現在の試料を人工衛星船の電源として用いる場合を吟味してみよう。試料 I を用いたとして $A = 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$, $d = 0.2 \text{ mm}$, その物理定数は表 1 に与えられたものを用いる。いま $\alpha \approx \delta = 0.9$, $S = 1400 \text{ w}/\text{m}^2$, かつ外気の温度は簡単のために絶対零度と仮定すると, $T_0 = 0$ となって(37)は

$$T_a = S / (2\pi \kappa)^{1/4} = 250^\circ\text{K} \quad (37')$$

$2\Delta T f$ は (33)より

$$2\Delta T f = 0.7^\circ\text{K}/\text{s} \quad (33')$$

したがって、 $f = 1 \text{ c/s}$ としたときの理想状態における効率は(28)より、0.28%, このときの P_{ei} は(36)より $1.0 \text{ w}/\text{kg}$, P_{eA} は $1.1 \text{ w}/\text{m}^2$ となり、 $f = 0.1 \text{ c/s}$ の場合のそれらはそれぞれ $\eta_e = 2.8 (\%)$ $P_{ei} = 10 \text{ w}/\text{kg}$, $P_{eA} = 11 \text{ w}/\text{m}^2$ となる。

さらに強誘電体薄膜では厚さを $d = 0.02 \text{ mm}$ の程度にすることができるので $f = 1 \text{ c/s}$ に対して効率 η_e は 2.7%, 単位重量当りの電力 P_{ei} は $9.7 \text{ w}/\text{kg}$, 単位面積当りの電力 P_{eA} は $1.05 \text{ w}/\text{m}^2$ と高性能になる。

6. 熱誘電素子の吟味

熱誘電素子として用いる強誘電体は静電容量の温度変化率が大きいものほどよく、そのキュリー点は使用する

表1 熱誘電発電器の効率と出力電力

負 荷 抵 抗 R_L (MΩ)		100			10			0		
熱サイクル数	f (c/s)	0.065	0.12	0.37	0.065	0.12	0.37	0.065	0.12	0.37
変換効率	η_e (%)	0.037	0.086	0.063	0.098	0.061	0.061	0.022	0.022	0.21
実効効率	η^i (%)	0.034	0.055	0.057	0.083	0.073	0.056	0	0	0
出力電力	P_a (mw)	1.77	3.94	2.22	4.45	5.34	7.23	0	0	0
単位重量当り出力電力	P_{ai} (w/kg)	0.72	1.61	0.91	1.82	2.18	2.99	0	0	0

面積 $A = 3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$, 厚さ $d = 0.4 \text{ mm}$, 密度 $\sigma = 5.5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 比熱 $s = 0.12 \times 10^3 \text{ (cal/kg} \cdot ^\circ\text{K)}$ または $0.52 \times 10^3 \text{ joule}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K})$, 熱伝導度 $K = 0.23 \text{ cal}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K})$, 初期充電圧 $V_1 = 250 \text{ V}$, 温度差 $2\Delta T = 72^\circ\text{K}$

周囲温度より僅かに低くなるように決められなければならない。このため固溶体の種類が決まればその成分も自らきまってしまうことになる。

素子に必要な事項をあげると

(1) 電荷漏れ：抵抗 R 、静電容量 C なる素子に与えられた最初の電荷を Q_1 とすると、 $t(s)$ 時間経ったのち電荷 Q は

$$Q = Q_1 e^{-t/(CR)} \quad (38)$$

に減少するので、加熱後の素子の端子電圧は

$$V = (C_1 V_1 / C_2) e^{-t/(CR)}$$

に低下し、(4)で与えられた電圧 V_2 よりも小さくなる。端子電圧が低下しないためには時定数 CR の大きな材料を選ぶべきである。

いま強誘電体の固有抵抗を ρ 、誘電率を ϵ とし、 Q が Q_1/e になる時間を t_0 とすると、時定数は

$$t_0 = CR = \rho \epsilon \quad (39)$$

より求めることができる。

$BaTiO_3$ に種々の添加物 α を入れた熱誘電発電器の有用な材料について t_0 を各温度に対して測定すると図16に示すとおりである。これより、 $BaTiO_3$ の中に僅かのウラン酸化物や Ce_2O_3 などを入れたものの時定数が大きいことがわかる。

(2) 破壊電圧：効率を上げるには印加電界が大きいほどよいことが(27)よりわかっているが、このためには強誘電体の破壊電圧が大きいことが必要である。

$BaTiO_3$ の厚さ (d mm) に対する破壊電圧 $V_B(kv)$

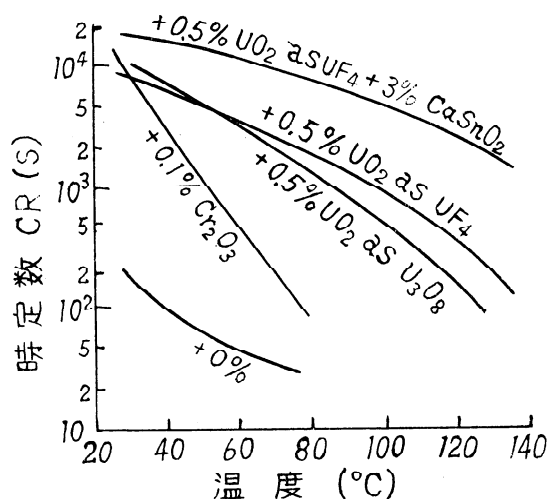


図16 $BaTiO_3 + \alpha$ の時定数の温度特性

は

$$V_B = 9d^{0.726} \quad (40)$$

として与えられる⁽⁷⁾。また温度を変えたときの破壊電界と厚さを変えたときの破壊電界の変化を図17に示している。これより破壊電界は温度の上昇とともに低下し、厚

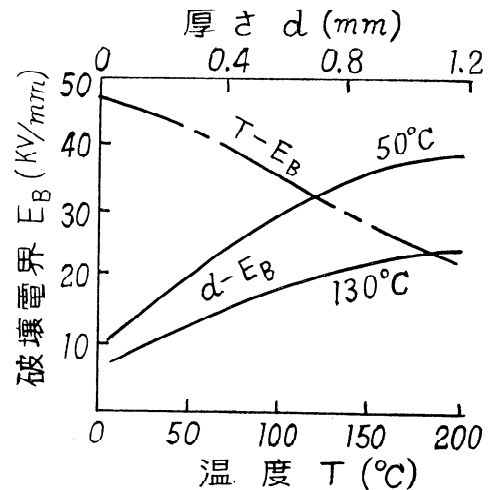


図17 強誘電体蓄電器の破壊電圧

さが増すほど大きくなること、したがって薄膜状の素子では絶縁耐力は可成り低くなることがわかる。

7. 結 言

厚さ $0.2 \sim 0.4$ mm 程度の現在の強誘電体試料を室温で用い、これに温度差 $70^\circ C$ を与えたときの本発電器の電力は 1 mw/cm^2 、効率は 0.1% 程度となっている。

熱誘電発電器に似た電源として太陽電池があって、本器はこれと比較される立場にあるが、そもそも太陽電池は光の照射によって電気エネルギーを取り出すのに対し、本器は本質的には熱照射によって電気エネルギーを取り出すもので、光を照射してもこれが熱エネルギーに変われば、太陽電池と同様、光照射によっても電気エネルギーが得られるのである。また太陽電池は放射能の影響が大きく、僅かな放射能の照射によっても発電機能を失うようであるが、本器はこの影響が比較的少なく、 $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 以上の中性子束の照射によってはじめて発電不能となる。このほか素子の価格も太陽電池のその $1/200 \sim 1/500$ の程度である利点もある。

最後に本発電器の試作は昭和39年度文部省科学試験研究費によって行なわれたこと、および全体を通じて阪大工学部長熊谷教授の御助力を賜わったことを付記して感謝の意を表わす次第である。

文 献

- (1) 藤本：電学誌 **83**, 2080, NO. 903 (1963-12)
- (2) 藤本, 松本：電学誌 **84**, 1836 NO. 914 (1964-11)
- (3) W. H. Clingman & R. G. Moore: J. appl. Phys. **32**, 675 (1961-4)
- (4) "the Telstar Experiment": B. S. T. J. **17**, 1, NO.4, part 3 (1963-7)
- (5) S. R. Hoh: Proc. IEEE **51**, 838 (1963-5)
- (6) S. R. Hoh & F. E. Pirigyi: J. Ameri. Cera. Socie. **46**, 516 NO. 11 (1963 11)
- (7) 岡崎, 藤本：電学誌 **79**, 181 NO. 845 (1959-2)