

直接加熱式箱型殺菌器による土壤殺菌

二ノ方 兼武・宮 里 満

Soil Sterilization with the Direct-Heating Type of Cabinet Pasteurizer

Kanetake NINOKATA & Mitsuru MIYAZATO
(*Laboratory of Agricultural Electricity*)

I. 緒 言

一般に温度、熱量の直接間接に農業分野に関連する面は極めて密接で広範囲に渡っている。筆者等は“電気的装置による土壤殺菌”なる研究題目の一環としてまず最も一般的な加熱による土壤殺菌を取扱うこととした。従来電熱による加熱は経済的見地と保安的見地より困難があるとされていた。しかし電熱は内部加熱が可能である、熱効率が大きい、加熱器内温度を均一に保ち得る、温度調節が容易である、加熱器内圧力等の制御が容易である、操作が容易である（遠方操作等）、安全性が大きい、衛生的であるなど幾多の他の追随を許さぬ特質をもつており、又数量的に熱の収支を計算し実験するにも最も正確であり便利である。近来自動制御の発展は目覚しく、小型自動遮断器なども優秀なものが出てきた。従つて適当な方法を用いれば保安に対しても何等危惧を要しなくなつた。電気的土壤殺菌装置は1932年頃より主として間接加熱方式が用いられ Newhall¹⁾ その他の人々によつて埋込パイプ型、格子誘導型、伏せ皿型、蒸気発生装置付伏せ皿型、連続送り式など種々のものが考案されて来たが何れも電力消費量が大きかつた。以上の見地より筆者等は熱効率の大きい電気加熱法の中でも最も効率のよい極板による直接加熱方式を取り上げて再検討し、併せて幾つかの数理的解析を加えることにした。

土壤殺菌のばあい菌の死滅の条件を各温度、湿度、時間、圧力等の要素を変えて試験栽培、菌の培養等によつて求むべきであるが、ここでは Newhall の“120 以上の植物病原微生物の熱的死滅点を実験的に土壤試験を行なつて考えて見ると、終極の土壤温度は 65 [°C] が多くの雑草とすべての重要な植物病原菌に対して殺菌をなすに充分な温度である”という推論に立つて 65 [°C] を温度の最低基準にとることにした。なお所要温度到達後は或一定時間必要温度以上に保つことは容易である。

II. 理 論 的 考 察

1. 定電力のばあい 箱型直熱式土壤加熱装置で極板間に供給する電力を一定にして、極板間隔、極板面積を変えたとき同一温度上昇を生ずるに要する時間を見るに Table 1 のようになる。ただしこれは外界条件は同じで熱の損失はなく、比熱は温度に無関係に一定であり、更に抵抗も温度に無関係に一定で単位容積当たりの積算供給電力量を常に一定にしたばあいである。このばあいは極板間隔を m 倍にし極板面積を n 倍にすれば所要電力量は mn 倍になり時間も mn 倍になることを示す。

実際は抵抗は一定でなく温度の関数で温度 θ により大きく変化し、しかも温度に対して負特性を示す。今これを

$$r = r_0 + \frac{k_1}{\theta - \theta_0} \quad (r_0, \theta_0, k_1 \text{ は一定}) \quad (1)$$

Table 1. Effect of magnitude of d and S on the other factors, under constant power supply.

	fundamental value	multiplied value
Distance between electrodes	d	md
Surface area of electrode	S	nS
Volume of soil	V	mnV
Voltage	E	$\sqrt{m/n} E$
Electric resistance	R	$(m/n) R$
Current	I	$\sqrt{n/m} I$
Power (constant)	P	P
Electric energy	W	mnW
Time	t	mnt

とすれば電圧、電流は次のようになる。

$$e = \frac{\sqrt{k_1 P}}{\sqrt{\theta - \theta_0}} \sqrt{1 + \frac{r_0}{k_1} (\theta - \theta_0)} \quad (2)$$

$$i = \sqrt{\frac{P}{k_1}} \frac{\sqrt{\theta - \theta_0}}{\sqrt{1 + \frac{r_0}{k_1} (\theta - \theta_0)}} \quad (3)$$

熱損失がないものと仮定すれば温度上昇は供給電力量に比例し $Pdt = dW = k_2 d\theta$ となる。 k_2 は一定で熱容量に当る。従つて温度を θ_1 より θ_2 に上昇するに要する供給総電力量、および所要時間は次のようになる。

$$W = k_2 (\theta_2 - \theta_1) \quad (4)$$

$$t = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{k_2}{P} d\theta = \frac{k_2}{P} (\theta_2 - \theta_1) \quad (5)$$

又温度は

$$\theta = \theta_1 + \frac{P}{k_2} t \quad (6)$$

このように温度が時間に比例して直線的に上昇するのは熱損失がないと仮定したからで、実際には温度上昇が大きくなれば漏洩する熱量も多くなり、終には加える電力（熱流）の全部が外に漏洩するようになつて温度は最早これ以上には昇らなくなり飽和温度に達する。

今土壤の熱容量を C_1 、熱抵抗を R_1 、保温壁の熱容量を C_2 、熱抵抗を R_2 、供給する熱流（電力）を I 、土壤を温めるための熱流を i_1 、保温壁を温めるための熱流を i_2 、外部に逃げる熱流を i_3 、土壤の温度を θ_1' 、保温壁の温度を θ_2' とすれば²⁾

$$\theta_1' = R_1 (i_2 + i_3) + R_2 i_3 \quad (7)$$

$$\theta_2' = R_2 i_3 = R_2 I \left(1 - e^{-\alpha t} (\cosh \gamma t + \frac{\alpha}{\gamma} \sinh \gamma t) \right) \quad (8)$$

ただし

$$\alpha = \frac{C_1(R_1 + R_2) + C_2 R_2}{2 C_1 C_2 R_1 R_2}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{C_1^2 (R_1 + R_2)^2 + C_2^2 R_2^2 + 2 C_1 C_2 R_2 (R_2 - R_1)}{2 C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (9)$$

しかるにこのばあいは直接式抵抗加熱で内部加熱であるから $R_1 \rightarrow 0$ とおいてよい。 $R_1 \rightarrow 0$ のときの温度の極限値は

$$\begin{aligned} \theta &= \lim_{R_1 \rightarrow 0} \theta_1' = \lim_{R_1 \rightarrow 0} \theta_2' = \lim_{R_1 \rightarrow 0} R_2 i_3 \\ &= \lim_{R_1 \rightarrow 0} R_2 I \left\{ 1 - \frac{R_1 + R_2 + \frac{1}{2r}}{C_2 R_2} \left(e^{(-\alpha+r)t} - e^{(-\alpha-r)t} \right) - \frac{1}{2} \left(e^{(-\alpha+r)t} + e^{(-\alpha-r)t} \right) \right\} \\ &= R_2 I \left(1 - e^{-R_2(C_1+C_2)t} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

となり一般に用いられる式が得られる。直接加熱のばあいは R_1 が零とみなすことができる。 $C_2 \rightarrow 0$ とすれば

$$\theta = R_2 I \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} \right) \quad (11)$$

となり時定数は $R_2 C_1$ で前のばあいの時定数より小さくなつて温度は速やかに上昇する。以上は初期条件 $t=0$ のとき $\theta=0$ のばあいであるが、初期条件 $t=0$ のとき $\theta=\theta_1$ とすれば

$$\theta = R_2 I \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} \right) + \theta_1 e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} \quad (12)$$

熱損失のないときの温度の式 (6) は k_2 が C_1 に当り P が I と同じで次のようになる。

$$\theta = \theta_1 + \frac{I}{C_1} t \quad (13)$$

(12), (13) 両式の $t=0$ における曲線の傾きはそれぞれ次式で示される。

$$\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{t=0} = \frac{I}{C_1} - \frac{\theta_1}{R_2 C_1} \quad (14)$$

$$\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{t=0} = \frac{I}{C_1} \quad (15)$$

2. 定電圧のばあい 箱型直熱式土壤抵抗加熱装置で極板に加える電圧は一定にして極板間隔、極板面積を変えるとき同一の温度上昇を生ずるに要する時間を見るに Table 2 のようになる。ただしこれも外界条件は同じで熱の損失はなく、比熱は温度に無関係に一定であり、更に電気抵抗も温度に無関係に一定とする。すなわち極板間隔を m 倍にし極板面積を n 倍にすれば、電力は n/m 倍、電力

Table 2. Effect of magnitude of d and S on the other factors, under constant voltage supply.

	fundamental value	multiplied value
Distance between electrodes	d	md
Surface area of electrode	S	nS
Volume of soil	V	mnV
Voltage (constant)	E	E
Electric resistance	R	$(m/n) R$
Current	I	$(n/m) I$
Power	P	$(n/m) P$
Electric energy	W	mnW
Time	t	$m^2 t$

量は mn 倍、時間は m^2 倍となる。

以上一定と仮定した定数の中、比熱は温度による相違は少なく、熱損失も熱絶縁物により少なくて済むが、被熱体の電気抵抗は温度の影響が大きくて他の電気定数にも大きく響き、これを無視することができない。今これを前と同じく $r=r_0 + \frac{k_1}{\theta-\theta_0} = \frac{k_1}{\theta-\theta_0} \left\{ 1 + \frac{r_0}{k_1} (\theta-\theta_0) \right\}$ とすれば電流、電力は温度 θ の関数としてそれぞれ次のように表わされる。

$$i = \frac{E(\theta-\theta_0)}{r_0(\theta-\theta_0)+k_1} = \frac{E(\theta-\theta_0)}{k_1 \left\{ 1 + \frac{r_0}{k_1} (\theta-\theta_0) \right\}} \quad (16)$$

$$p = \frac{E^2(\theta-\theta_0)}{r_0(\theta-\theta_0)+k_1} = \frac{E^2(\theta-\theta_0)}{k_1 \left\{ 1 + \frac{r_0}{k_1} (\theta-\theta_0) \right\}} \quad (17)$$

熱損失がないときは前同様 $p dt = dW = k_2 d\theta$ と置けるから

$$W = k_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = k_2 (\theta_2 - \theta_1) \quad (18)$$

$$t = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{k_2}{p} d\theta = \frac{k_2}{E^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(r_0 + \frac{k_1}{\theta-\theta_0} \right) d\theta = \frac{k_2}{E^2} \left\{ r_0 (\theta_2 - \theta_1) + k_1 \log \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right\} \quad (19)$$

一般に後の温度を θ とすれば

$$t = \frac{k_2}{E^2} \left\{ r_0 (\theta - \theta_1) + k_1 \log \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right\} \quad (20)$$

今

$$t' = \frac{k_2}{E^2} r_0 (\theta - \theta_1) \quad (21)$$

$$t'' = \frac{k_2}{E^2} k_1 \log \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (22)$$

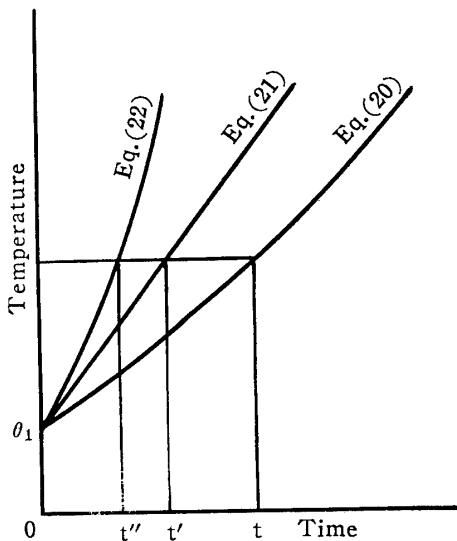


Fig. 1. Typical temperature-time curve given by Equation (20).

とすれば式(21)は電気抵抗が一定の r_0 だけのときの温度の式、又式(22)は電気抵抗が $\frac{k_1}{\theta-\theta_0}$ (θ_0, k_1 一定) で表わされるときの温度の変化を示す式、式(20)は電気抵抗が両者の和 $r_0 + \frac{k_1}{\theta-\theta_0}$ となるときの温度の変化を示す式で $t = t' + t''$ となる。

(18), (19)両式より平均電力を求むれば次のようになる

$$Pa = \frac{W}{t} = \frac{E^2(\theta_2 - \theta_1)}{r_0(\theta_2 - \theta_1) + k_1 \log \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}} \quad (23)$$

以上は定電圧で電力を供給したとき熱損失のないばあいの温度上昇であつたが、次に熱損失のあるばあいについて考えてみる。供給電力 $p = \frac{E^2}{r} = \frac{E^2(\theta-\theta_0)}{r_0(\theta-\theta_0)+k_1}$ を時間の関数として表わすことは困難であるので、実験的結果より $p = i_0 e^{kt}$ (i_0, k 一定) とおく。しかるときは

$$i_0 e^{kt} = i_1 + i_2 \quad (24)$$

$$\theta = \frac{\int i_1 dt}{C} = i_2 R \quad (25)$$

これを解いて、初期条件 $t=0$ のとき $\theta=0$ とすれば

$$\theta = \frac{Ri_0}{1+kCR} (\varepsilon^{kt} - \varepsilon^{-\frac{1}{CR}t}) \quad (26)$$

が得られ、又初期条件 $t=0$ のとき $\theta=\theta_1$ とすれば次式が得られる。

$$\theta = \theta_1 \varepsilon^{-\frac{1}{CR}t} + \frac{Ri_0}{1+kCR} (\varepsilon^{kt} - \varepsilon^{-\frac{1}{CR}t}) \quad (27)$$

(27) 式を図示すれば Fig. 2 のようになる。式中の θ_1 は初めの温度で $\theta=\theta_1 \varepsilon^{-\frac{1}{CR}t}$ はその時間的変化を表わしている。 $\theta=Ri_0 \varepsilon^{kt}$ は熱容量 $C=0$ で供給電力の総てが初めから熱抵抗 R を通して漏洩するときの温度上昇である。式(27)で t が十分大きくなると $\theta=\frac{Ri_0}{1+kCR} \varepsilon^{kt}$ となる。

これは式(27)が十分時間が経過した後には $C=0$ のときの温度上昇の $\frac{1}{1+kCR}$ (<1) 倍となることを示す。 $\theta=$

$\frac{Ri_0}{1+kCR} (\varepsilon^{kt} - \varepsilon^{-\frac{1}{CR}t}) = Ri_0 \varepsilon^{kt} \left\{ \frac{1 - \varepsilon^{-(k+\frac{1}{CR}t)}}{1+kCR} \right\}$ は初温零のときの温度上昇であるが、この中の項 $\frac{1 - \varepsilon^{-(k+\frac{1}{CR}t)}}{1+kCR}$ は熱容量があるためこれに熱流が吸収されることにより熱容量がないときの温度上昇よ

り小さくなることを示す乗数で、この値は初め零で時間と共に増大し時間が十分大となれば $\frac{1}{1+kCR}$ (<1) になる。

直接式抵抗加熱で内部加熱のばあいは上の式で C には C_1 、 R には R_2 を置きかえたものとなる。

III. 実験的考察

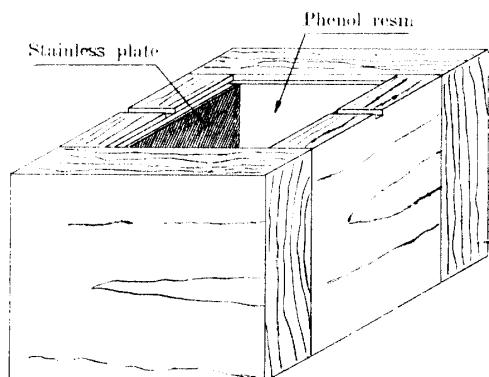


Fig. 3. Outward show of the cabinet body used in the experiment.

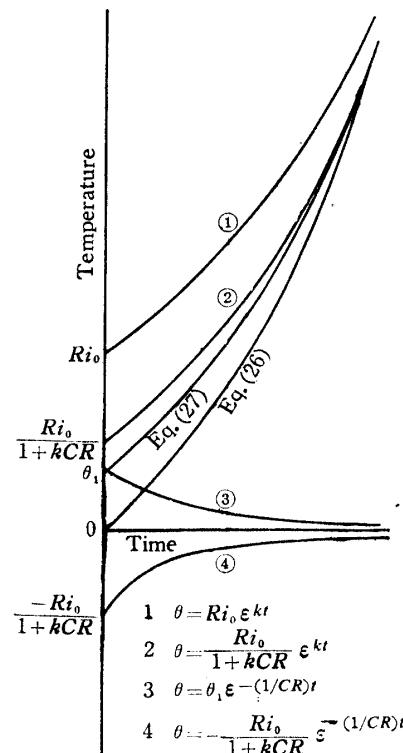


Fig. 2. Typical temperature-time curve given by Equation (27).

1. 実験装置 加熱装置の箱は乾燥杉材を用い、Fig. 3 のように内側にフェノール樹脂の積層板を合成ゴム系接着剤で気密に張り、寸法を正しく Fig. 4 のようにした。極板は厚さ 0.5 [mm] の非磁性不銹鋼を用い、リード線にはビニール被覆燃線を用いた。土壤は壤土で、水分含有量は本文ではすべて湿量基準によるものをとつて、普通の水分で湿したばあい約 17~19 [%]、電解質液を加えたばあい約 15~16 [%] にとつてある。土壤を箱に入れるとき土壤の孔隙がなるべく少なくなり連続した水分のフィルムが

できるように固く突き固め土壤抵抗を可及的に少なくする。

結線は定電力では Fig. 5 のようにし、自動定電圧安定装置 *AVR* を通した後単巻変圧器 *AT* によって手動で電圧を調整して電力計 *W* の指針を一定にする。電圧計 *V*、電流計 *A* は可動鉄片型 0.5 級計器を用いたがこの読みは電流計、電力計の内部損失による補正を加えた。

定電圧では電力計 *W* を除いた結線とし、このときの負荷に消費される電力は電流計の内部損失を差引いた補正值をとる。

なお、熱容量は普通の熱量計で、熱伝導率は円板法によつて測定したが、このばあいの温度測定は電位差計式熱電対温度計で零位法によつた。

2. 土壤の電気抵抗³⁾ 温度に対する土壤の電気抵抗を電圧、電流の値より計算したものと曲線に描いたものが Fig. 6 で、破線で表わされた上の群は普通の水、実線で表わされた下の群は NH_4Cl の 1 [%] 液で湿したもので、何れも定電圧で実験した時の値より求めた。圧縮の度合いと水分含有率とが相互に電気抵抗に如何に影響するかはこれだけの実験結果からは分らないが、水分含有率が少ないほど強く突き固めた方が抵抗は少くなることは推定される。

土壤電気抵抗——温度曲線は双曲線関数 $r = r_0 + \frac{k_1}{\theta - \theta_0}$ (r_0, θ_0, k_1 は一定) の形に表わされる。例えば曲線 4' は

$$r = 25 + \frac{13700}{\theta + 20.7}$$

曲線 1 は

$$r = -11.6 + \frac{6063.75}{\theta + 32.5}$$

となる。

3. 諸熱定数 箱の保温壁としての幾何学的抵抗を計算するには、便宜上 Fig. 4 のような形のもとのとして各片 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ が 6 個並列にあるものと考える。一つの片の幾何学的熱抵抗は内側の面積を S_1 、外側の面積を S_2 、厚さを l とすれば

$$\int_0^l \frac{dx}{S_1 + \frac{S_2 - S_1}{l} x} = \frac{l}{S_2 - S_1} \log \left(1 + \frac{S_2 - S_1}{S_1} \right)$$

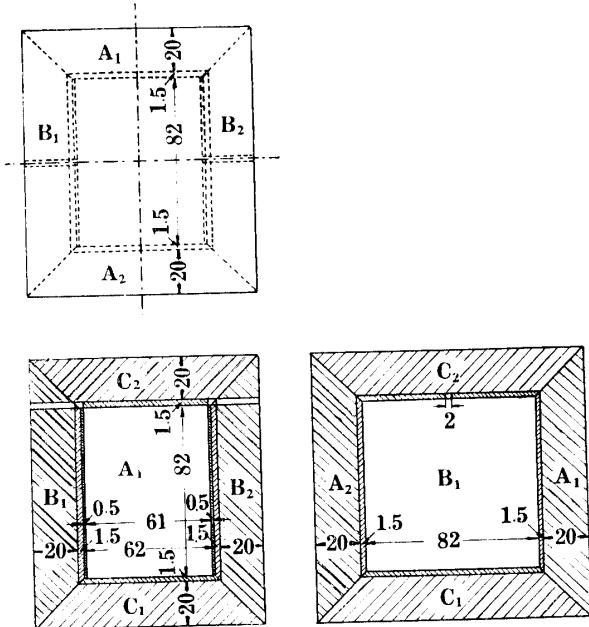
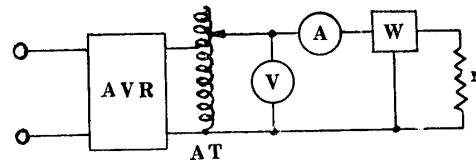


Fig. 4. Expedient shape devised for calculation of thermal resistance, and actual size of the cabinet.



AVR : Automatic voltage regulator

AT : Autotransformer

V : Voltmeter

A : Ammeter

W : Wattmeter

Fig. 5. Connection diagram of the experimental apparatus.

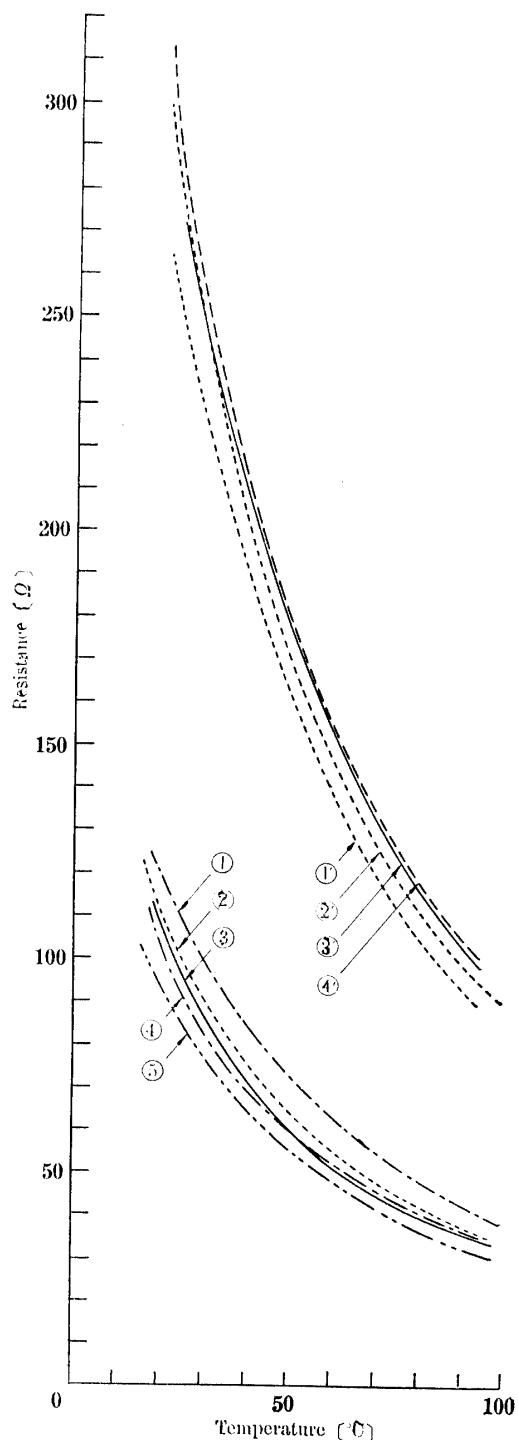


Fig. 6. Graphs of soil resistance vs. temperature.

No. of curves	Soil condition	Applied constant voltage or power	Initial temperature [°C]	Wet basis moisture [%]	No. of curves	Soil condition	Applied constant voltage or power	Initial temperature [°C]	Wet basis moisture [%]
1	Electro-	40 [V]	15.6	15.1	1'		40 [W]	18.3	19.15
2	lytic	60 [V]	14.8	15.1	2'		60 [V]	21.4	18.8
3		80 [V]	18.2	15.0	3'		80 [V]	25.5	19.15
4	wet soil	70 [V]	17.0	15.0	4'		100 [V]	24.4	19.2
5		50 [V]	15.3	15.4					

である。箱の各片 $C_1, C_2, B_1, B_2, A_1, A_2$ の幾何学的抵抗を R_{GC}, R_{GB}, R_{GA} , 箱の内側の寸法を a, b, c , 厚さを l とすれば、全体の幾何学的抵抗 R_G は次の関係を満足する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_G} &= \frac{2}{R_{GC}} + \frac{2}{R_{GB}} + \frac{2}{R_{GA}} \\ &= \frac{4(a+b)+8l}{\log\left(1+2l\frac{a+b}{ab}+4l^2\frac{1}{ab}\right)} + \frac{4(b+c)+8l}{\log\left(1+2l\frac{b+c}{bc}+4l^2\frac{1}{bc}\right)} + \frac{4(c+a)+8l}{\log\left(1+2l\frac{c+a}{ca}+4l^2\frac{1}{ca}\right)} \end{aligned}$$

$a=8.5\text{[cm]}$, $b=6.5\text{[cm]}$, $c=8.5\text{[cm]}$, $l=2.0\text{[cm]}$ を入れて箱の幾何学的抵抗は $R_G=284.7\text{[1/cm]}$ となる。杉材の熱伝導率測定値 $\lambda=1.13\times10^{-3}\text{[W/cm}^{\circ}\text{C]}$ で熱比抵抗は $\rho=10^3/1.13\text{[cm}^{\circ}\text{C/W]}$ となるから杉材の部分の熱抵抗は $R=3.1\text{[}^{\circ}\text{C/W]}$ となる。同様合成樹脂板の熱抵抗は約 $0.7\text{[}^{\circ}\text{C/W]}$ で保温箱全体の熱抵抗 R_2 は $R_2=3.8\text{[}^{\circ}\text{C/W]}$ となる。

乾燥した土壤、保温材等の比熱は普通の熱量計で測定したが、細心の注意を払い色々の手段を講じたのにかかわらず確定した値は得られなかつたため他の種々の常数表を参照して決めた。

4. 定電力加熱 土壤を水分で湿したときと電解液で湿したときとの実験結果が Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示されている。これらの曲線はプロットした座標の点を密にして正しく連ねたもので、すべて曲線上にあるので座標の点は省いてある。

式(12)にそれぞれの定数を入れて計算により得られる曲線と実験値による曲線とを示せばFig.10の実線と破線に示すようになる。例えは実線3は式(12)に $I = 40[W]$, $\theta_1 = 18.3[^{\circ}\text{C}]$, $C_1 = 820 [J/\text{°C}]$, $R_2 = 3.8 [^{\circ}\text{C}/W]$ を入れたときの曲線で、破線3'は水分湿土、定電力40[W]、初温18.3[°C]、含水率19.15[%]のときの実測による曲線である。これを見るに実測値は初めのうちは計算値とよく一致するが、時間が経過し温度が上るにつれ離れて行き100[°C]附近で飽和してこれ以上は温度

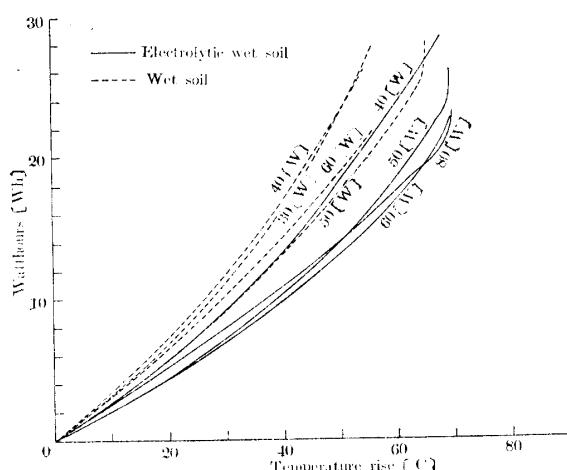


Fig. 7. Graphs of integrated watthours vs. temperature rise obtained under the constant power supply.

Applied constat power [W]	30	40	50	60	40	50	60	80
Soil condition			Wet soil			Electrolytic	wet soil	
Initial temperature [°C]			34.5				29.6	
Wet basis moisture [%]	18.47	19.15	17.8	17.0	16.25	15.875	15.74	14.28

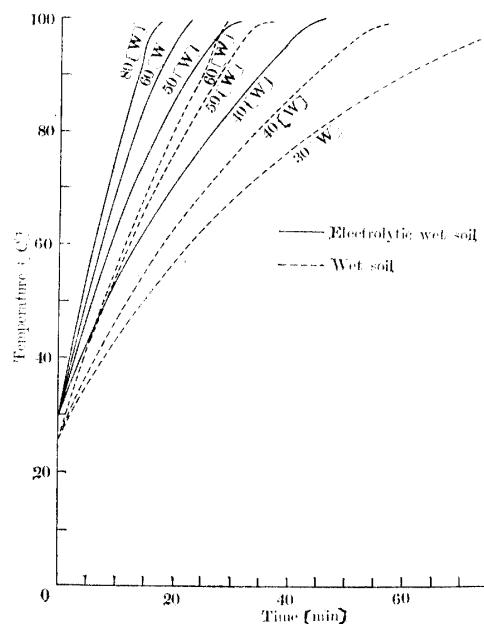


Fig. 8. Graphs of soil temperature vs. time obtained under the constant power supply.

Applied constant power [W]	30	40	50	60	40	50	60	80
Soil condition	Wet soil				Electrolytic wet soil			
Initial temperature [°C]	25.0				29.6			
Wet basis moisture [%]	18.47	19.15	17.8	17.0	16.25	15.875	15.74	14.28

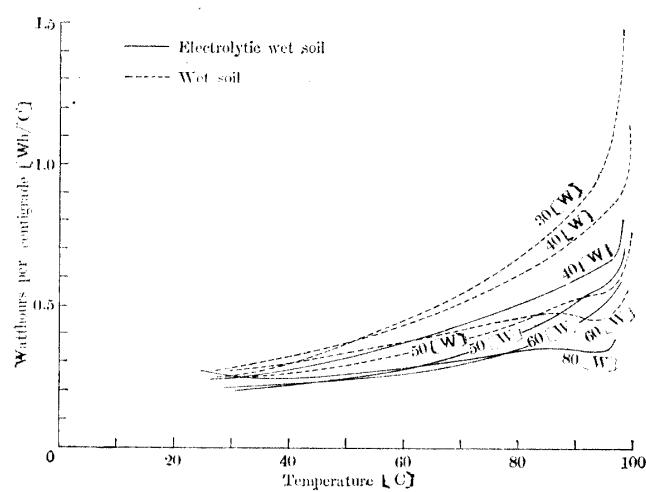


Fig. 9. Graphs of watthours per centigrade vs. temperature obtained under the constant power supply.

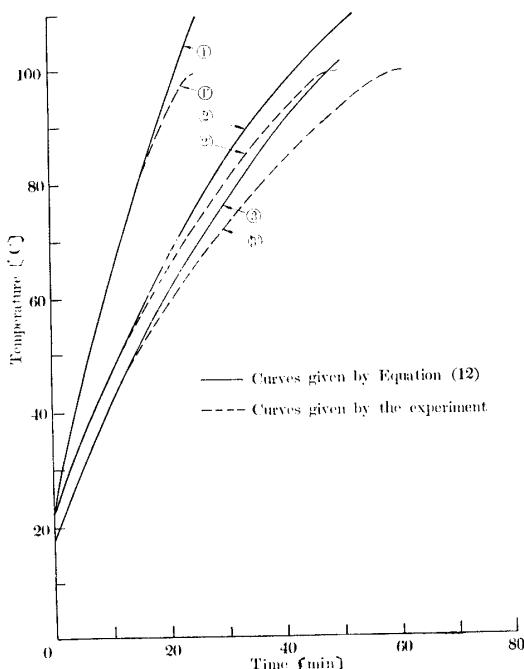


Fig. 10. Solid line, calculated by putting various constants in Equation (12). Broken line, plotted by the experiment.

No. of curves	Soil condition	Applied constant power [W]	Initial temperature [°C]	Wet basis moisture [%]	Heat capacity of soil [J/°C]	Thermal resistance of cabinet [°C/W]
1		$I = 60$	$\theta_1 = 22.8$		$C_1 = 730$	$R_2 = 3.8$
2		$I = 40$	$\theta_1 = 22.5$		$C_1 = 740$	
3		$I = 40$	$\theta_1 = 18.3$		$C_1 = 820$	
1'	Electrolytic wet soil	60	22.8	15.75		
2'		40	22.5	16.25		
3'	Wet soil	40	18.3	19.15		

は上らない。これは土壤中の水分の蒸発のために温度上昇にあずからない余分の潜熱が費やされるが、理論値ではこの蒸発を考慮に入れてないためである。土壤の水分含有率は熱容量に大きな影響を与える、水分が多く C_1 が大きくなれば時定数も大きくなつて温度上昇の速さは鈍つてくる。そして同じ容量の土壤に同じ電力を供給するとき温度上昇の遅速は土壤の熱抵抗と保温箱の熱容量とには無関係にただ土壤の熱容量 C_1 と保温箱の熱抵抗 R_2 とだけに支配されること、又同じ時定数 $R_2 C_1$ でも供給電力を大きくして温度上昇を速めるときは熱損失は少ないとことは実験的にも明らかにされた。

5. 定電圧加熱 最も一般的な方法である定電圧加熱では Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 のような実験結果が得られる。これ等を見るに電力量の経済的電圧は、種々の要素によつて幾分相違しても大体この 6 [cm] の極板間隔では 70 [V] であることが分る。定電圧のばあいも土壤電気抵抗は小さくして、しかも水分含有量を少なくすることが最も望まれる。従つて使用目的に妨げとならない適当の電解質（硝酸塩等）を加える。定電圧のときには温度上昇の速さは加速度的に増加する

ので熱損失は少なくなつてくる。

今式(27)によつて得る値と実測値を比較したもの2例をあげるとFig. 15のようになる。例えば曲線1は式(27)において $i_0=28[W]$, $k=0.96/1000[1/sec]$, $\theta_1=14.8[^{\circ}C]$, $R_2=3.8[^{\circ}C/W]$, $C_1=710[J/^{\circ}C]$ のばあいで $1'$ は定電圧 $60[V]$, (電解液湿土), 初温 $14.8[^{\circ}C]$, 含水率 $15.1[\%]$ のときの実験測定値である。このときも定電力のときと同様初めのうちはほとんど両者一致する。

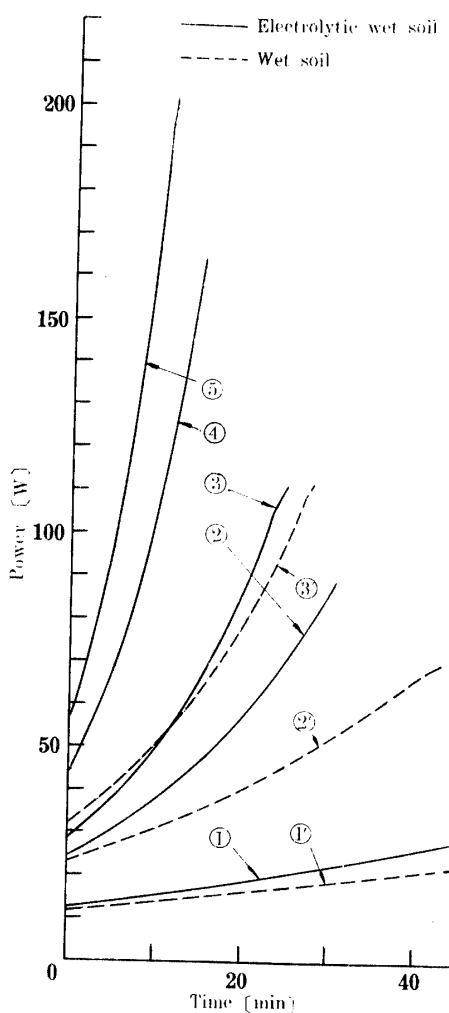


Fig. 11. Curves of power-time characteristic given by the experiment.

No. of curves	1	2	3	4	5	1'	2'	3'
Soil condition	Electrolytic wet soil					Wet soil		
Applied constant voltage [V]	40	50	60	70	80	60	80	100
Initial temperature [^{\circ}C]	15.6	15.3	14.8	17.0	18.2	21.4	25.5	24.4
Wet basis moisture [%]	15.1	15.4	15.1	15.0	15.0	18.8	19.15	19.2

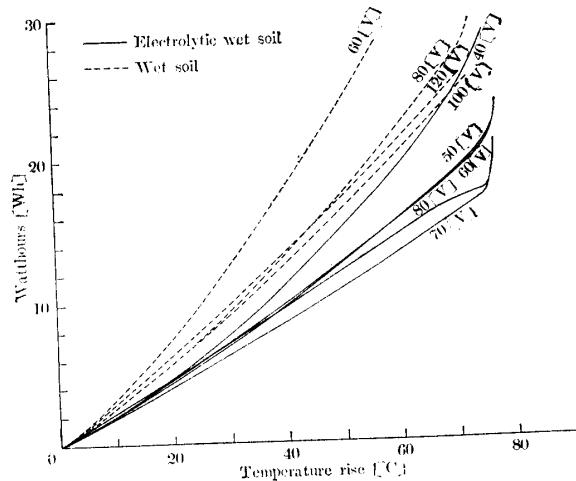


Fig. 12. Graphs of integrated watthours vs. temperature obtained under the constant voltage supply.

Applied constant voltage [V]	60	80	100	120	40	50	60	70	80	
Soil condition	Wet soil					Electrolytic wet soil				
Initial temperature [°C]	27.0					22.4				
Wet basis moisture [%]	18.8	19.15	19.2	—	15.1	15.4	15.1	15.0	15.0	

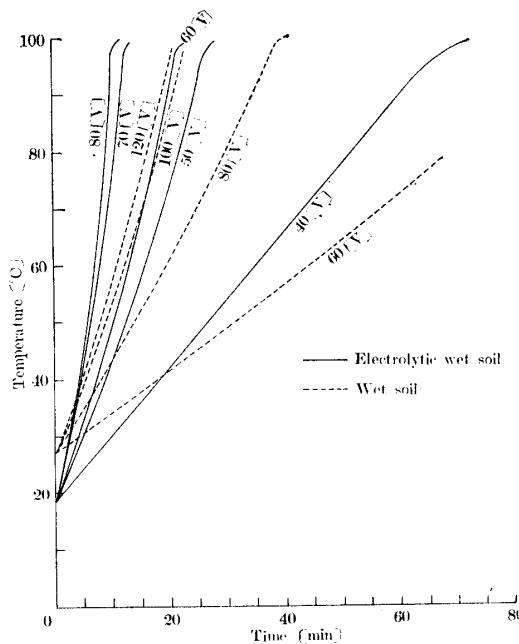


Fig. 13. Graphs of soil temperature vs. time obtained under the constant voltage supply.

Applied constant voltage [V]	60	80	100	120	40	50	60	70	80	
Soil condition	Wet soil					Electrolytic wet soil				
Initial temperature [°C]	27.0					18.5				
Wet basis moisture [%]	18.8	19.15	19.2	—	15.1	15.4	15.1	15.0	15.0	

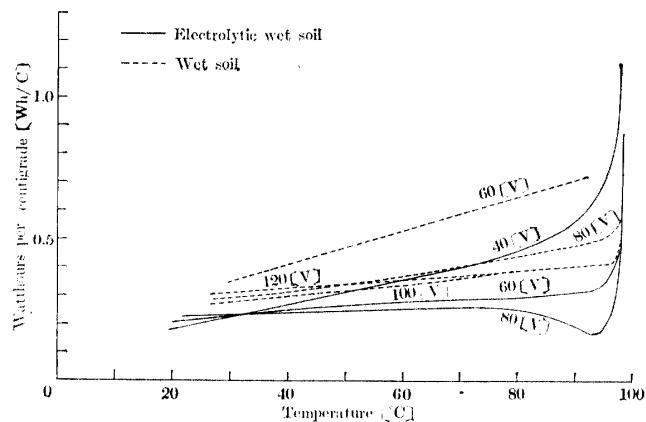


Fig. 14. Graphs of watt-hours per centigrade vs. temperature obtained under the constant voltage supply.

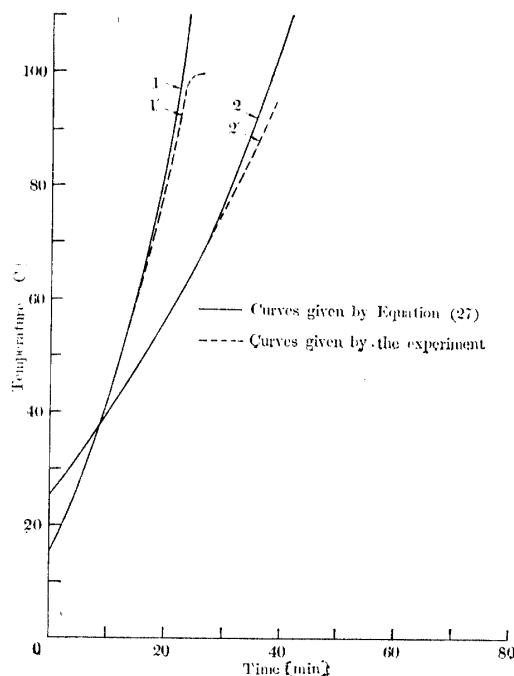


Fig. 15. Solid line, calculated by putting various constants in Equation (27). Broken line, plotted by the experiment.

No. of curves	Soil condition	Applied constant voltage [V]	Initial temperature [°C]	Wet basis moisture [%]	Heat capacity of soil [J/°C]	Thermal resistance of cabinet [°C/W]	Initial power [W]	Constant <i>k</i> [1/sec]
1		60	$\theta_1=14.8$		$C_1=710$		$i_0=28$	$k=0.96/1000$
2		80	$\theta_1=25.5$		$C_1=820$	$R_2=3.8$	$i_0=23.5$	$k=0.46/1000$
1'	Electrolytic wet soil	60	14.8	15.1				
2'	Wet soil	80	25.5	19.15				

IV. 結 言

土壤加熱はその目的によつて手段方法に種々制約を受けるが、本質的には一様に加熱すること、熱効率の大きいこと、経済的なこと、設備費が安いこと、安全なこと、操作が簡単なこと、保守が容易なことなどの要求は変わらない。直接加熱方式はほとんどこのすべてを満足することができる。そのうち最も大きな特色は、高周波誘電加熱と同様土壤の熱抵抗は大きいにかかわらず一様な内部加熱ができる、しかも熱効率は他の何れの加熱法より卓抜して高いことである。土壤の熱抵抗は大きくても温度の不均一を生じたり、温度上昇の速さを遅らしたりすることがない。飽和温度に達する早さは土壤の熱抵抗と保温箱の熱容量には無関係に土壤の熱容量 C_1 と保温箱の熱抵抗 R_2 との積すなわち時定数 $C_1 R_2$ に関係し、これが小さいほど早く温度が上昇することは実験的にも明らかにされた。このうち R_2 は供給電力と共に最高到達温度に関係する故小さくすることはできない。従つて C_1 を小さくする。これには土壤の水分含有率が電気抵抗を小さくできる範囲でできるだけ小さいことが望まれる。

この直接加熱法の電源装置には定電力、定電流、定電圧方式等があるが、最も一般的なのは定電圧方式である。これは装置、操作が簡単で、特別の機器を要せず、電圧に応じて距離を定めればよい。また温度が上るにつれて土壤の電気抵抗は減少するので所要電力は増大し温度上昇は早くなる。実験の結果最も効率のよい電圧は電解液を加えた 6 [cm] の極板間隔に対して 70 [V] 附近の電圧であることが知られる。

従来土壤の直接加熱方式は取扱い上危険であるという理由で顧みられなかつたが、熱線を有する間接加熱方式やその他の方式に比べて上述の大きな特色をもつて再考するに値すると考えられる。保安の為の安全装置は最も簡単には開閉器を箱の蓋と連動するようにすればよい。又別に入れた電磁開閉器を負荷に並列に入れたバイメタルによつて働かせ温度を制御することができる。

積算消費電力量は初温、到達温度等によつても異なるが初温 17 [$^{\circ}\text{C}$] の電解液湿土に極板間隔約 6 [cm] のとき 70 [V] の定電圧の電力を供給するばあいについて、単位容積当たりに換算した消費電力量を示せば Table 3 のようになる。この土壤容積はできるだけ固く密にしたもので、土壤を粗にし

Tabel 3. Kilowatthours per unit volume in several cases of temperature rise.

Final temperature (Initial temperature, 17 [$^{\circ}\text{C}$])	[$^{\circ}\text{C}$]	65	70	80	90	98
Consumed electric energy per cubic foot	[$\frac{k\text{W}\cdot\text{h}}{\text{ft}^3}$]	0.725	0.808	0.973	1.138	1.297
Consumed electric energy per cubic meter	[$\frac{k\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^3}$]	25.6	28.35	34.4	40.25	45.65

た普通の状態では消費電力量は上の値よりもつと少なくなる。水の重量比熱は土壤のそれの 4~5 倍の値をもつ故水分含有率は温度上昇に大きな影響を与える。この実験では消費電力量に対する電解質、水分、圧縮等の定量的な影響は吟味しなかつたが、これ等を詳しく検討すれば消費電力量はまだ少なくなると思われる。従来の消費電力量は上の値より小さいものもある⁴⁾が、これは供給電圧をそのまま使用せず特殊な大容量の変圧器等を使用するもので、普通のばあいではここに得られた値は最も少ないものである。又熱線を用いる間接加熱方式の約 1.3~1.5 [$k\text{W}\cdot\text{h}/\text{ft}^3$] に比べると極めて小さいものである。又非常に無駄の多くなり易い熱効率の小さな他の燃料による加熱法に比べても、温度上昇を適当にし、労力費、設備費等を総合して考えると却つて経済的に有利なばあいも考えられ

る。特に比較的小容量の土壤を手軽に速やかに加熱する必要があるばあい等はその特色を發揮できる。なお電源さえあれば装置は小型で可搬であるため土壤を運ぶ手間は省かれることになる。

大量の土壤を処理するには連続送り式にすれば、定電圧を加えたとき電力従つて負荷電流が変化することなく、定電力にすることができる。従つて前のばあいと異なつて供給電力量の多い割りに小容量の機器ですみ、電力は小さくともその連続使用により小型装置で大量の連続加熱が可能となる。これについての検討実用化は引続いて行ないつつある。又実際の栽培に対する効果、例えば電解質の影響等も今後の実験にまつこととする。

この研究は文部省科学研究費による研究の一部である。

V. 摘要

1. 直接加熱法は内部加熱という特長をもつために、熱ポンプ方式を除いてあらゆる加熱法中最も高い効率をもつている。
2. 直接加熱法によれば土壤の熱抵抗および保温箱の熱容量には無関係に速やかに温度を上げることができる。
3. 热効率をよくするために保温材料の熱伝導率の小さいものを選ぶことはもちろんであるが、少量の電解液を加えて水分含有率をできるだけ少なくし、又土壤をち密にすることが必要である。
4. このようにして温度上昇に対する最小の消費電力量は極板間隔 6 [cm] に対して約 70 [V] のときに得られた。そして密な単位容積の土壤に対する消費電力量は、17 [°C] から 65 [°C] 迄の温度上昇には約 $25.6 [kW \cdot h/m^3]$, $0.73 [kW \cdot h/ft^3]$, 17 [°C] から 98 [°C] 迄の温度上昇には約 $45.65 [kW \cdot h/m^3]$, $1.3 [kW \cdot h/ft^3]$ である。
5. この定電圧直接加熱法によれば土壤を手軽に安全に速やかにしかも効率よく加熱することができ、比較的小量の土壤を取扱うばあい小型殺菌装置は最も適当な経済的方法である。

又連続送り装置を用いれば、定電圧を加えてしかも定電力で連続加熱が可能となり、大量の土壤を処理できることが推定される。

文獻

- 1) A. G. NEWEHALL : *Experiments with new electric devices for pasteurizing.* Cornell Univ. Agr. Exp. Stat. Bull. No. 731, 1~38 (1940)
- 2) 二ノ方兼武：鹿大農學術報告, 10, 14~22 (1961)
- 3) H. M. TOWNE : G. E. Rev. 35, 173, 215, 280 (1932)
- 4) DIX, W. & RAUTERBERG, E. : Arch. Pflanzenbau, 10, (1933~34) 172~190 (1933)

Résumé

- (1) Owing to the characteristic of mass heating, the direct-heating system is the most efficient method of all, with the exception of heating by the heatpump.
- (2) Temperature will rise rapidly, regardless of the thermal resistance of soil and the heat capacity of a cabinet, when a cabinet of the direct-heating-type is used.
- (3) In order to increase the heat efficiency, it is necessary for us to limit the moisture of the soil to which a small quantity of electrolyte is added. In this case the soil must be dense. As a matter of course, the thermal conductivity of insulated material should be as small

as possible.

(4) On condition that the temperature rises favorably, the minimum consumed watthours proved to be obtained under the constant voltage, 70[V] power supply, providing 6[cm] interval of electrodes. Kilowatthours per unit volume of dense soil were 25.6 [$kW\cdot h/m^3$] or 0.73 [$kW\cdot h/ft^3$] when the temperature rose from 17[°C] to 65[°C]; they were 45.65 [$kW\cdot h/m^3$] or 1.3 [$kW\cdot h/ft^3$] when the temperature rose from 17[°C] to 98[°C].

(5) By this direct-heating method, soil will be able to be heated easily, safely, quickly, and efficiently. For this reason the-small-box-type pasteurizer is the most suitable and economical apparatus for one who deals with a comparatively small quantity of soil. And if we use a continuous feeding device, we will be able to treat a larger quantity of soil under constant voltage and power supply.