

# 土中加温の熱利用に関する基礎的研究

— 定常法による土の熱伝導率の測定 —

岩尾 俊男\*・竹山 光一\*

## Studies on the Under Ground Heating in Greenhouse Measuring of Thermal Conductivity of Soil

Toshio IWAO and Koichi TAKEYAMA

The under ground heating system by warming water was one of the modern, most approved system of heating in a greenhouse, because the under ground heating was directly controlled the temperature of soil for many greenhouse crops.

This study was the objective to the materials in order to design the systems of under ground heating units.

Accordingly, this study dealt with the relationship between thermal conductivity and temperature, water content of soil. For measurement of thermal conductivity of soil, the stationnal method was used.

As the experimental result, it was cleared that the temperature had no influence over the apparent thermal conductivity ( $\lambda$ ), and the correction figure ( $\beta$ ) in relation to the soil characteristic increased in about 5% of volume water content, and the value of apparent thermal conductivity ( $\lambda$ ) was slightly larger than the value of real thermal conductivity ( $\lambda_h$ ).

### I. 緒 言

グリーンハウスにおける地中加温は、土中の根の付近における温度を直接制御するので、有効な加温方法の1つと考えられている。

1) これについて、<sup>2)</sup> 抜山は温水輸送における温度効果を、板木、金目は温湯地中加温のパイプ埋設深さに関して研究を行っている。

ところで、土中の熱移動は、一般的な熱移動と同様に、伝導・対流・輻射によって生じるが、土中においては以上の3形態の中で輻射は極めて微小であるので無視できる。<sup>3)</sup> 基本的な熱物性値としては、熱伝導率・熱容量・熱拡散係数があげられるが、熱容量は土の密度・比熱より計算ができる。熱拡散係数は熱伝導率がわかれば計算ができ、したがって、熱伝導率を知ることにより熱の利用特性を明らかにすることができる。

本研究は、地中加温の設計資料に用いるみかけの熱伝導率を測定する必要から定常法を用いた。また土の熱伝

導率は、乾燥密度・粒土分布などの土自身の性質と、含水量・温度などの土の状態の要因に関係するものと考えられるので、含水量と温度との関係について検討を行った。

### II. 土中の熱移動

4) 土中における熱移動は次のように表わされる。

$$q_n = q_{nc} + Lq_o + C_w T q_i + C_w T (q_l + q_o) \quad (1)$$

ここに、 $q_n$  : 熱移動量、 $q_{nc}$  : 伝導による熱移動量、 $q_o$  : 水蒸気態での水分移動量、 $q_l$  : 液状態での水分移動量、 $q_o$  : 熱浸透による水分移動量、 $L$  : 水蒸気潜熱、 $C_w$  : 水蒸気の比熱、 $C_w$  : 水の比熱、 $T$  : 温度

#### 1. 伝導による熱移動

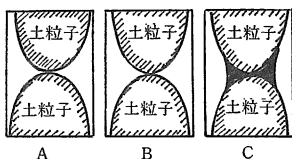
伝導による熱移動量は(2)式により表される。

$$q_{nc} = -\lambda_h \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

ここに、 $\lambda_h$  : 真の熱伝導率、 $\frac{dT}{dx}$  : 温度勾配

$\lambda_h$  は、温度による変化が無視し得るほど小さく、変化は主に土の三相状態によって決まる<sup>5)</sup> (第1図)。

\* 栽培管理制御工学



第1図 土粒子の接触点のモデル

空気<sup>6)</sup>の熱伝導率は、土粒子の熱伝導率及び水の熱伝導率に比べ小さい。従って絶乾状態における熱伝導率は、熱が土粒子の接点のみにより伝達されるので小さい値となる。また、含水量の非常に低い状態では、水は土粒子の周りに吸着水となる。この状態における熱伝導率の傾きは、含水量の増加に対する伝熱面積の増加が小さいため緩やかになる。更に含水量が増加し吸着水膜が十分に成長すると、水は土粒子の接触部に集中し水のリングを形成する。この状態では熱伝導率の傾きは、伝導面積が急激に増加するため著しく大となる。

水のリングが十分に発達した後から、飽和状態に至るまでは、熱伝導率は伝熱面積が漸次増加するため次第に上昇する。

2. 水蒸気状態での水分移動量

多孔質物質内に適用するための修正水蒸気拡散方程式は次のように表わされる。

$$q_v = -D_v \cdot v \cdot \alpha \cdot a \cdot \frac{d\rho}{dx} \quad (3)$$

$$= -\beta \cdot D_v \cdot \frac{d\rho}{dx} \quad (4)$$

ここに  $D_v$ : 空気中で水蒸気拡散係数,  $v$ : 物質移動係数,  $\alpha$ : 曲折係数,  $a$ : 間隙率,  $\rho$ : 水蒸気圧,  $\beta$ : 補正係数,

$$\rho = \rho_0 \cdot h \quad (5)$$

ここに、 $\rho_0$ : 飽和水蒸気密度,  $h$ : 相対湿度

飽和水蒸気密度は温度のみの関数であり、相対湿度は温度の影響が小さく水分量 ( $w$ ) だけの関数であるから、

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{d(\rho_0 h)}{dx} = h \frac{d\rho_0}{dT} \frac{dT}{dx} + \rho_0 \frac{dh}{dw} \frac{dw}{dx} \quad (6)$$

$$\therefore q_v = -\beta D_v \left( h \frac{d\rho_0}{dT} \frac{dT}{dx} + \rho_0 \frac{dh}{dw} \cdot \frac{dw}{dx} \right) \quad (7)$$

この研究で取り扱う範囲では、 $h \approx 1$  なので(7)式は次のようになる。

$$q_v = -\beta D_v \frac{d\rho_0}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

3. 液状態での水分移動量

土壌内における水の移動は Darcy の法則により次式で表される。

$$q_l = -\beta_w k_w \frac{d\phi}{dx} \quad (9)$$

ここに、 $\rho_w$ : 水の単位体積重量,  $K_w$ : 不飽和透水係数,  $\phi$ : 総ポテンシャル

$$\phi = \psi + z \quad (10)$$

ここに  $z$ : 鉛直座標値,  $\psi$ : 水分張力

水の移動は毛管内より多い水分量で生じると考えられているので、この研究の場合は無視できる。

4. 熱浸透による水分移動量

熱浸透現象とは径の十分に小さい毛管の両端に温度差があると、表面張力等により温度の低い方から高い方へ向って水が移動する現象である。いま、この移動量を温度勾配に比例するとおくと、熱浸透による水分移動量は次式で表される。

$$q_0 = \rho_w k_0 \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

ここに  $K_0$ : 熱浸透係数

熱浸透による水分移動量は、長時間にわたり暖房を行う地中加温システムでは、大きな要素になると考えられるが、この研究では土の基礎的な伝熱特性を扱い、この項は除外する。

5. 土中の熱移動

上述の関係から、土中の熱移動量は

$$Q_h = - \left( \lambda_h + L \cdot D_v \cdot \beta \cdot b_1 \frac{d\rho_0}{dT} + C_v \cdot T \cdot D_v \cdot \beta \cdot b_1 \frac{d\rho_0}{dT} + C_w \cdot T \cdot \rho_w \cdot k_w \cdot b_2 \frac{\phi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} - b_2 k_0 \right) \frac{dT}{dx} + C_w \cdot T \cdot \rho_w \frac{\partial \phi}{\partial w} \frac{dw}{dx} + C_w \cdot T \cdot \rho_w \cdot k_w \vec{i} \quad (12)$$

ここに  $\vec{i}$ :  $x$  方向の単位ベクトル,  $b_1 b_2$ : 空気間隙、液相内の土全体の温度勾配の違いによる係数

右辺第2項は極小の含水率の場合であり、第3項は大量の水分が過剰に含まれる場合であり、ともに無視できる。また第3項以下は、1, 2項に比べ小さいので無視すると、

$$q_h = -\lambda_h \frac{dT}{dx} - \beta \cdot L \cdot D_v \frac{d\rho_0}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (13)$$

$$= - \left( \lambda_h + \beta \cdot L \cdot D_v \frac{d\rho_0}{dT} \right) \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

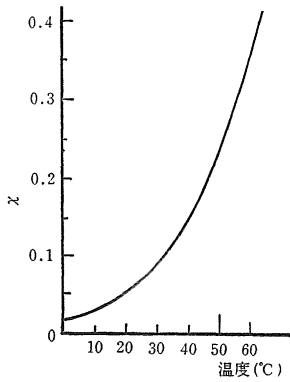
ただし、 $\lambda = \lambda_h + \beta \cdot L \cdot D_v \frac{d\rho_0}{dT}$

ここに、 $\lambda$  はみかけの熱伝導率と呼ばれ、真の熱伝導率と区別する。

6. みかけの熱伝導率  $\lambda$  の温度による変化

真の熱伝導率  $\lambda_h$  と補正係数  $\beta$  は温度による影響を受けないが、気化熱  $L$ , 水蒸気拡散係数  $D_v$ , 飽和水蒸気密度勾配  $d\rho_0/dT$  は温度の関数として次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} L &= 751.97(1 - 0.000753T) \\ D_v &= 0.078(T/273)^{1.80} \\ \frac{d\rho_0}{dT} &= \frac{1.775}{T} \left( \frac{1113}{T} - 1 \right) \exp \left( 55.32 - 5.133 \ln(T) - \frac{6829}{T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$



第2図 温度とX

ここで、 $X = LD_0 \frac{d\theta_0}{dT}$  とすると、Xは温度のみの関数となり、従って、みかけの熱伝導率  $\lambda$  は、Xの一次式となつて次のように表わされる。

$$\lambda = \lambda_n + \beta X \quad (16)$$

温度とXとの関係は、第2図における曲線の関係として表される。

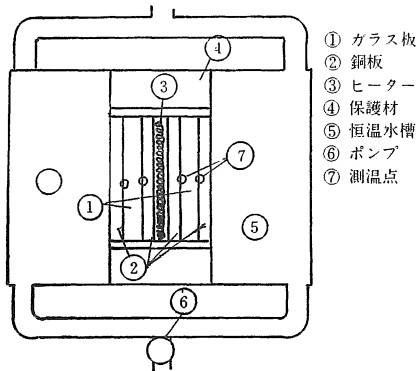
### III. 実験方法

この実験は、土の熱伝導率の測定に当って、定常法により基準板の熱伝導率を測定し、これを基準にして定常比較法により土の熱伝導率の測定を行うものである。

#### 1. 定常法による基準板の熱伝導率の測定

第3図は、定常法による熱伝導率の測定装置の概略である。この装置はヒータを中央に、その両側に同一寸法の試片と更に銅板と恒温槽が密着する。

この場合、熱の散逸をできるだけ防止するため、上下の側壁を断熱材で覆った。なお試片①ガラスは直径150mm、厚さ20mm、銅板②は直径150mm、厚さ10mmである。試片の温度分布が定常状態に達する時間は、約10時間である。試片の温度差は、試片の両端3点の温度より求め、それにより各試片の温度勾配を求めた。



第3図 定常法の測定装置

#### 2. 定常比較法による土の熱伝導率の測定

比較法による熱伝導率の測定は、第4図に示すように①と②の平板を重ね、これを銅板③ではさみ、これを電気ヒーターと冷却槽により定常熱流を生ぜしめ、中央部の3点の温度  $T_1, T_2, T_3$  を測定することにより  $\lambda$  が得られる。

従って、基準板①の  $\lambda_1$  をあらかじめ定常法により求めておけば、比較法により試片②の  $\lambda$  を求めることができる。

供試材料は、粒度を0.210~0.250mmに調整した豊浦標準砂である。試料は両ふた付きのケース(内径144mm、外径165mm、厚さ20mm)に一定回数突き固めた後、熱電対を取り付けたふたを高温側に取りつけた。

試験条件は体積含水率0~32%、試料温度10~50°C、乾燥密度1.55~1.60g/cm<sup>3</sup>の場合である。

### IV. 実験結果及び考察

#### 1. 定常法による基準ガラス板の熱伝導率

一般に定常状態における熱の移動量は、フーリエの法則により、

$$q = \frac{\lambda_1}{l} (T_1 - T_2) A \quad (17)$$

ここに、q:熱の移動量、 $\lambda_1$ :試片の熱伝導率、l:試片の厚さ、A:試片の断面積、 $T_1, T_2$ :温度

いま、ヒーターにより発生した熱量が、両側に均等に配分されないものとする。ここに、ガラス板の熱伝導率は、温度の1次式として表されるものとする、

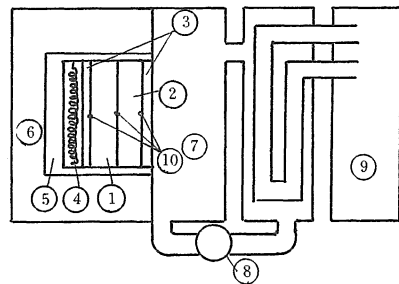
$$\lambda_1 = a(1 + bt) \quad (18)$$

ここに、a, b:定数:ガラス板の温度、(17)(18)式より、

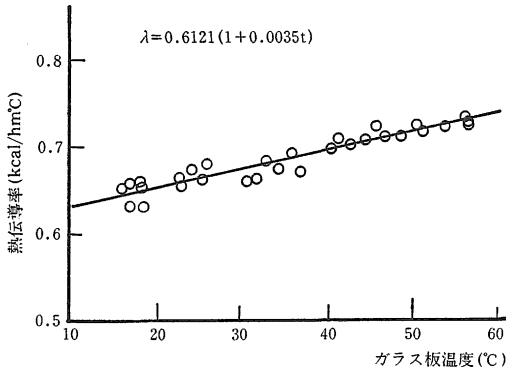
$$q = \frac{A}{l} a \left\{ 1 + \frac{1}{2} b (T_H + T_L) \right\} \Delta T \quad (19)$$

ここに、ヒーターの発生熱量は

$$Q_H = q_1 + q_2 \quad (20)$$



第4図 定常比較法の実験装置



第5図 ガラス板の温度と熱伝導率

ここに、 $q_1, q_2$  を左右の熱量とすると、(19), (20)式より

$$q_1 = \frac{Q_H}{\frac{1 + \frac{1}{2}b(T_{L2} + T_{H2})\Delta T_2}{1 + \frac{1}{2}b(T_{L1} + T_{H1})\Delta T_1} + 1} \quad (21)$$

ここに、 $T_{H1}, T_{H2}$  : ヒーター側ガラス板温度,  $T_{L1}, T_{L2}$  : 恒等水槽側ガラス板温度

(18)式より(21)式を用いて、得られたガラス板の熱伝導率を表す式は、 $\lambda_1 = 0.6121(1 + 0.0035)t$  (22)

第5図はガラス板の温度と熱伝導率の関係である。

## 2. 定常比較法による土の熱伝導率

2枚の平板が密着の状態、一方より熱が伝わる場合には、表面温度、熱伝導率をそれぞれ  $T_1, \lambda_1, T_2, \lambda$ 、接触面の温度を  $T_3$ 、伝熱面積を  $A$ 、試片厚さを  $l_1, l_2$

とすると、そのときの熱移動量  $q$  は、

$$q = -\lambda_1 \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_3}{l} \quad (23)$$

ここに  $\lambda_1$  が既知の場合には、

$$\lambda = \lambda_1 \frac{l_2}{l_1} \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \quad (24)$$

となる。

### 1) みかけの熱伝導率 $\lambda$ と温度

第6図は温度とみかけの熱伝導率との関係である。みかけの熱伝導率は温度に影響されることが少ないものと見做される。

第7図は、温度のみによる関数  $\lambda$  とみかけの熱伝導率との関係である。みかけの熱伝導率は温度に影響されることが少なく、主として体積含水率によって左右される。しかし、体積含水率の高い場合には、みかけの熱伝導率は温度の上昇と共に増加する傾向がある。

### 2) みかけの熱伝導率と体積含水率

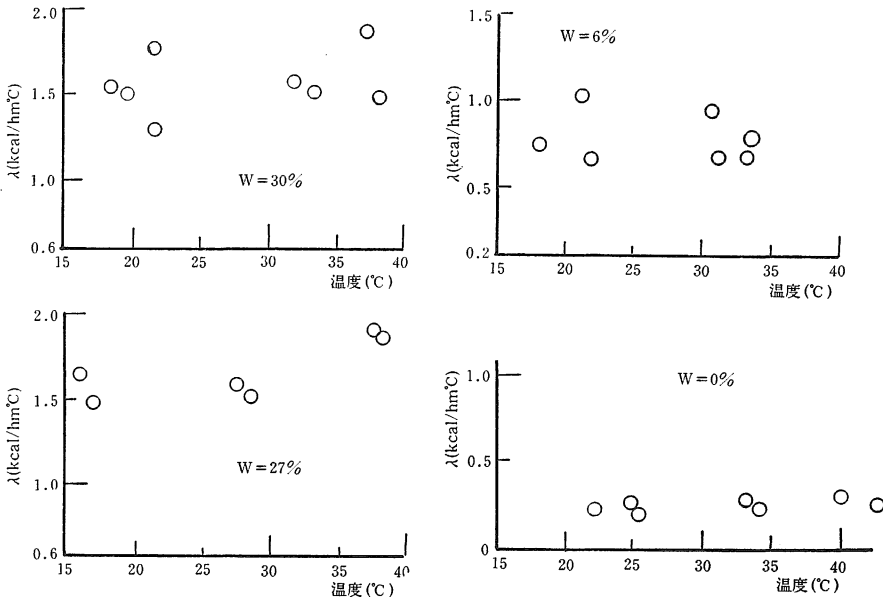
第8図は、補正係数  $\beta$  と体積含水率との関係である。土自身の性質である  $\beta$  は、間隙内における水蒸気の移動が活発になる体積含水率5~6%の前後で急増し、その後は一定の値となる傾向がある。

第9図は、体積含水率とみかけの熱伝導率との関係である。みかけの熱伝導率は体積含水率の増加とともに増加の傾向となる。

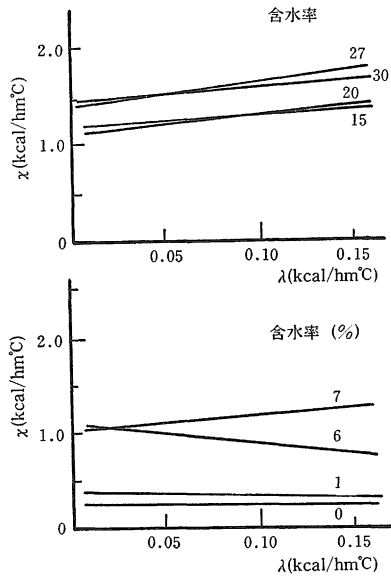
### 3) みかけの熱伝導率と真の熱伝導率との関係

第10図は、25°Cにおける体積含水率に対するみかけの熱伝導率と真の熱伝導率との関係である。みかけの熱伝導率が真の熱伝導率より大きい値であることは、土中における水蒸気潜熱移動によるものであると考えられる。

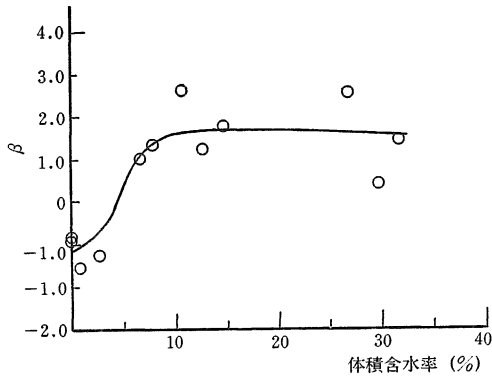
従って、水のリンクが形成される体積含水率が約6%



第6図 温度とみかけの熱伝導率



第7図 λ と χ



第8図 補正係数と体積含水率

までは、潜熱による影響はほとんどないものと見なすことができる。

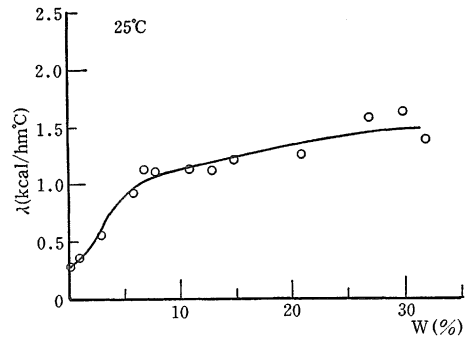
一方、体積含水率が約6%以上における熱伝導率は、真の熱伝導率より大きい値を示す。これは、低含水率では水蒸気の移動に伴う潜熱移動が主な要因と考えられ、高含水率になるに従い液状水の移動に伴う顕熱移動が次第に大きな要因となったものと考えられる。<sup>6)</sup>

また、体積含水率が5%以下では、みかけの熱伝導率と真の熱伝導率の間の差は認められなかった。

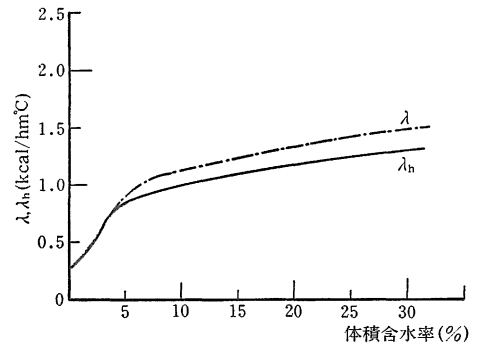
### V. 結 言

グリーンハウスにおいて、地中加温は根圏の温度を直接制御できるので有効な加温方法の1つとして考えられている。

この研究は、定常法を用いて土の熱伝導率を測定し、土壤中の熱移動特性を明らかにし、地中加温システムの



第9図 体積含水率とみかけの熱伝導率



第10図 体積含水率と λ, λ<sub>h</sub>

計設資料としたものである。この研究の結果として、基準板となるガラスの熱伝導率と温度との関係が明らかになると共に、この関係を用いた測定により、みかけの熱伝導率は、体積含水率により影響されることが明らかとなった。

また、みかけの熱伝導率と真の熱伝導率との差は、土中における水蒸気の移動に伴う潜熱移動が主な要因であるだろうことが明らかになり、今後高含水率領域では液状水の移動に伴う顕熱移動の影響も含めて検討する必要がある。

### 引用文献

1. 抜山四郎：熱(抜山四郎論文集)：92-95, 1969.
2. 板木利隆・金目武男：神奈川県農試報告 16：57-66, 1968.
3. 松本順一郎・大久保俊治：土木学会論文集 257：53-60, 1977.
4. 白井清恒・新庄 彬・三井義則：三重大農学術研報告 45：85-97, 1973.
5. DE VRIES, D. A.: Heat and Mass Transfer in the Biosphere, Scripta Book Company, 1975, p. 5-28
6. 日本機械学会：伝熱工学資料 東京 1975, P. 296-300
7. PHILIP, J. R. and DE VRIES, D. A.: Trans. American Geophysical Union 38(2)：222-232, 1957.