

土中加温の熱利用に関する基礎的研究 II

—— 非定常法による土の熱伝導係数の測定 ——

岩 尾 俊 男*

Studies on the Under Ground Heating in Greenhouse
—Measuring of Thermal Conductivity of Soil by the
Non- Steady State Method—
Toshio IWAO

Succeeding to the previous report, this paper dealt with the experimental studies concerning the measuring of the thermal conductivity of soil by the non-steady state method.

For measurement of the thermal diffusivity, the soil samples in a cylinder were cyclically heated and cooled from the outside of the cylindrical container. And consequently the thermal diffusivities were obtained from the phase angles or the amplitudes in the cyclic temperature variations.

From the experimental studies, it was cleared that the value of real thermal conductivity was slightly increased with increasing of the volumetric water content.

And the measuring method by non-steady state was convenient to handle than that of steady state.

I. 緒 言

この研究は、前報の定常法による土の熱伝導率の測定¹⁾に続き、定常法に比べ比較的簡単に土の熱伝導率を測定する方法として、非定常法を用いて行ったものである。

定常法は、熱伝導率の測定において基準板との比較が必要とし、試験試料に温度差の生ずる場合が多く、それによって、水分移動が生ずる場合が多く正確な測定値が得られ難い上に、測定に長時間を要すること及び機構上から外気との熱の伝導を遮断するための装置が必要である上に、試料に均一に温度を加えることの困難性から、熱拡散係数の計算が近似的に行わざるを得ないなどの問題点がある。

一方、円筒による非定常法は必ずしも絶対的なものではないが、実験装置が定常法に比べ比較的簡単な上に、上述の問題点の多くは解決できる方法ではないかと考えられる。

これらのことから、この研究は、ブドウ園芸施設圃場

の土の粒度を分析し、これに類似する粒度の土として、豊浦標準砂を用い、円筒による非定常法により、円筒内土壌温度を周期的に変化させ、土の体積含水率と熱伝導率との関係について、土の熱伝導特性の研究の可能性を検討したものである。

この研究に当たり、ご協力をいただいた当研究室卒業生小田原浩二君に謝意を表す次第である。

II. 土中の熱移動²⁾

1. 真の熱伝導係数

土中における熱移動量は、一般に次式で示される。

$$q_h = q_{hc} + L \cdot q_v + C_v \cdot T \cdot q_0 + C_w \cdot T \cdot (q_l + q_o) \dots\dots (1)$$

ここに、 q_h : 熱移動量、 q_{hc} : 伝導による熱移動量、
ここに、 q_h : 熱移動量、 q_{hc} : 伝導による熱移動量、
 L : 水蒸気潜熱、 q_v : 水蒸気態での水分移動量、 C_v : 水蒸気の比熱、 T : 温度、 C_w : 水の比熱、 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。

また、伝導による熱移動量はフーリエの法則により、

$$q_{hc} = -\lambda_h \frac{dT}{dx} \dots\dots (2)$$

* 栽培管理制御工学

ここに λ_h : 真の熱伝導係数, $\frac{dT}{dx}$: 温度勾配である.

(1), (2)式より

$$q_h = -(\lambda_h + \beta \cdot L \cdot D_v \cdot \frac{dl_0}{dT}) \cdot \frac{dT}{dx} \quad \dots\dots(3)$$

ここに, β : 補正係数, D_v : 大気中での水蒸気拡散係数, ρ_0 : 飽和水蒸気量.

(3)式の()内を λ とおくと,

$$q_h = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \dots\dots(4)$$

ここに, λ は定常法により求まるみかけの熱伝導係数であり, 真の熱伝導係数と潜熱移動項との和である.

円筒法による真の熱伝導係数は, 次式により与えられる.

$$\lambda_h = K \cdot C \cdot \gamma \quad \dots\dots(5)$$

ここに, K : 熱拡散係数, C : 比熱, γ : 比重

III. 実験装置及び実験方法

第1図は供試実験装置の概略である. 実験装置は恒温槽(約0.1m³), 円筒試料試験装置(49φ×286mm), 恒温槽温度調節装置及びシステム制御装置(YEW PAC 制御システム)より成る.

第2図は, 円筒試料試験装置である. 円筒試料試験装置は, 円筒(厚さ 0.5mm, 銅)を電気温床線にて二重巻き構造とし, 円筒の両端にゴム栓をし, 内部に供試土壌を詰め込む共に, 熱電対と測温抵抗体の温度センサーを第2図に示すように埋設した. 温度センサーの左右の距離は約 24mm とし, 恒温槽内の温度は, 調節装置の性能により 5℃ に保持した.

供試土壌封入の円筒試験体は, 円筒に巻かれた電気温

床線により, 円筒表面に1062秒の周期でもって温度の周期変動が与えられる.

周期変動は, 電気温床線にかかる電圧をスライダックにより一定の 40V に調節し, YEW PAC の制御システムのオン, オフ制御により与えた.

したがって, 熱の伝導は, 円筒内壁面温度と中心部の温度の周期変動の位相差より求められる.

また, 定常状態は温度の周期変動において, 最高温度と最低温度が一定になった状態を目安とした. この実験では, 1062秒の周期で約5時間後に定常状態となった.

円筒への土壌の詰め固めは, 円筒内の供試土壌の硬さが均一になるために, 供試土壌を少量づつ入れながら, 13kg の鉄棒で圧力が一定になるように配慮しながら詰め固めた.

体積含水率の測定は, サンプルによりそれぞれの測温点近くの土壌について行った.

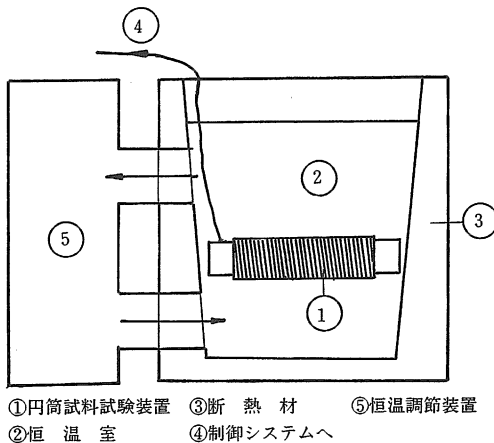
供試材料

供試材料は, 実際の施設園芸圃場の土を粒度分析し, その粒度に近い粒度のものとして豊浦標準砂を用いた.

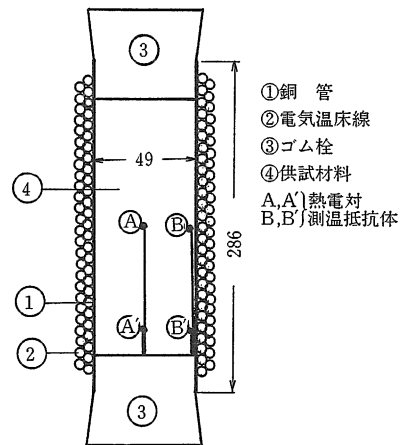
第3図は施設園芸圃場(ブドウ圃)における粒径加積曲線である. これから, 土壌の粒径は 10cm 深さで250μm, 40cm では 105μm が大部分を占めている.

これらのことから, 土壌の粒径が 250μm を基準と考え, この実験では, 粒径が 270~250μm に調節された豊浦標準砂を用いたものである.

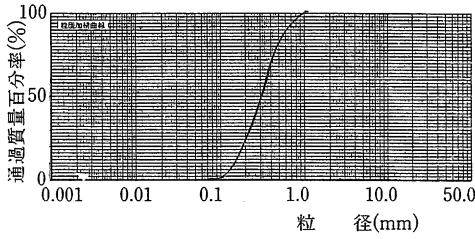
供試土壌の含水率の調整は, 約 60kg の土壌を水に浸し, 飽和状態に達した後排水を行った. したがって, 含水率の異なる試料は, 排水後の時間の経過に従い土壌の層の違いにより得られた.



第1図 実験装置



第2図 円筒試料試験装置



第3図 粒径加積曲線(ブドウ施設圃場)

IV. 実験結果及び考察

(1) 熱伝導係数及び熱拡散係数

非定常法により熱伝導係数を求めるには、供試体の一端に温度変化を与え、これより離れた位置における温度の経時変化を求め、熱伝導の方程式による係数を算定することができる。

したがって、熱拡散係数は表面に温度の周期的変動を与えて、一定の距離にある2点間の周期的温度変化を測定することから、その位相、または振幅の差より求められる。

熱拡散係数は、

$$K = \frac{\lambda}{C\gamma} \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 K ：熱拡散係数、 λ ：熱伝導係数、 C ：比熱、 γ ：比重。

そこで、熱の周期変動がある場合には、平面試片の一面の温度は時間 t に関して、

$$\begin{aligned} T &= T_1 \cos \omega t \\ &= T_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} t \left(\tau = \frac{2\pi}{\omega} \right) \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

この場合、面の厚さが十分に大きい、すなわち半無限体とすると、この温度波は面に垂直に内部へ進み、定常状態に達したのちには、通面から l の距離の点の温度 T は、

$$T = \eta T_0 \cos(\omega t - \phi) \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 η は振幅の減衰を表し、 ϕ は位相遅れである。

いま、 $F_0 = \frac{K\tau}{r^2} \quad \dots\dots(9)$

ここに r は半径とすると、 F_0 はフーリエ数と名付ける無次元である。

ここに、 η 、 ϕ は F_0 のみの関数であり、

$$\left. \begin{aligned} \eta &= e^{-\sqrt{\frac{\pi}{F_0}}} \\ \phi &= \sqrt{\frac{\pi}{F_0}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

ここに、試料を円柱とすると、

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{1}{\left(ber \sqrt{\frac{2\pi}{F_0}} + bei \sqrt{\frac{2\pi}{F_0}} \right)^{\frac{1}{2}}} \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{bei \sqrt{\frac{2\pi}{F_0}}}{ber \sqrt{\frac{2\pi}{F_0}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(11)$$

ber 、 bei はそれぞれ、

$$I_0 \left(e^{\pm i \frac{\pi}{4} x} \right) = ber x \pm i bei x \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 $ber x$ 、 $bei x$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} ber x &= 1 - \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{2} \right)^4 + \frac{1}{(4!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^8 - \frac{1}{(6!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^{12} + \dots\dots(13) \\ bei x &= \left(\frac{x}{2} \right)^2 - \frac{1}{(3!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^6 + \frac{1}{(5!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^{10} - \frac{1}{(7!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^{14} + \dots \end{aligned} \right\}$$

いま、円柱の表面温度が周期的に変動するとき、表面と中心との温度の位相差 $\Delta\phi_n$ は、

$$\tan(\Delta\phi_n) = \frac{bei K_*}{ber K_*} \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 K_* は、 $K_* = r_0 \sqrt{\frac{2\pi}{K \cdot \tau}} \quad \dots\dots(15)$

$\Delta\phi_n$ は、実験による温度の測定結果から得られる。したがって、熱拡散係数 K の値は、

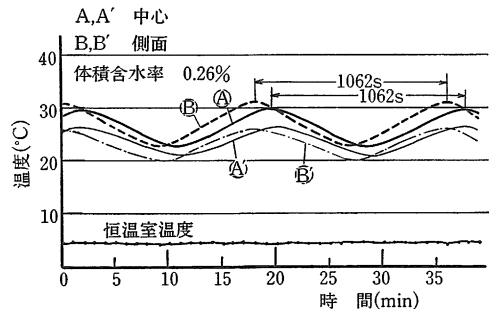
$$K = \frac{2\pi}{\tau} \cdot \frac{r_0^2}{K_*^2} \quad \dots\dots(16)$$

よって、熱伝導係数は、

$$\lambda = \frac{1}{2} K \cdot C \cdot \gamma \quad \dots\dots(17)$$

(2) 各部温度の経過時間による変動

第4図は、体積含水率が0.26%の場合の各部の温度と



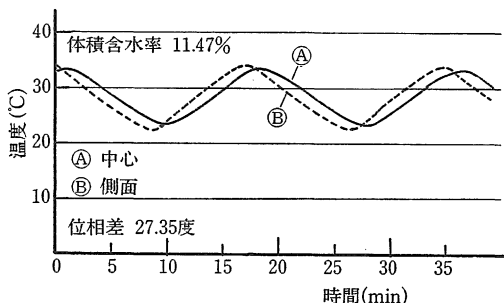
第4図 試験体内部温度と経過時間との関係

温度の周期変動との関係である。

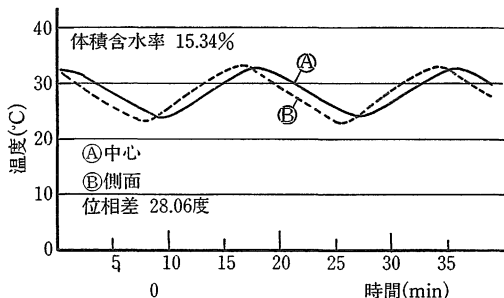
試料の中心部における A 点と A' 点の温度と側面の B と B' 点の温度の周期は、それぞれ同一の周期変動と見做せる。中心と側面との周期変動には、中心軸面は側面より100秒程度の遅れが生じた。

第5, 6, 7図は、体積含水率が11.47, 15.34, 21.20の場合のA点とB点における温度の周期変動の関係を示す。

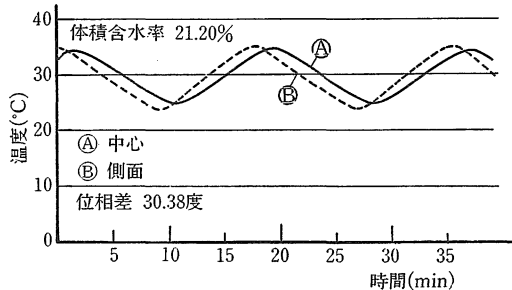
この場合の温度の位相差は、体積含水率が11.47, 15.34, 21.20%において、27.35, 28.06, 30.38度となり、体積含水率の増加に伴い位相差は増加の傾向となる。



第5図 A, B点の温度の周期変動



第6図 A, B点の温度の周期変動



第7図 A, B点の温度の周期変動

(3) 真の熱伝導係数と体積含水率

第8図は試料土の平均温度が27.9°Cの場合の真の熱伝導係数と体積含水率との関係である。

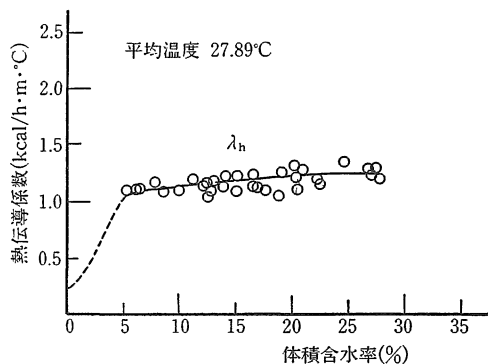
真の熱伝導係数は、体積含水率が約5%以上では体積含水率の増加と共に多少増加の傾向が見られる。

この傾向は、土の伝熱面積の増加によるものと考えられる。これらは水による土粒子接点の面積増加によるものと考えられる。すなわち、体積含水率が増加することにより、土粒子の接点周りに配向される水により伝熱面積が増大し、真の熱伝導係数も漸次増加するものと考えられる。

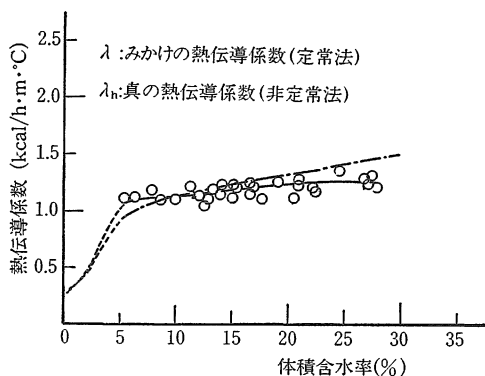
第9図は定常法によるみかけの熱伝導係数と非定常法による真の熱伝導係数との関係である。

熱伝導係数は、非定常法よりも定常法の方が体積含水率の増加に対し、増加の割合が大となる傾向がある。

これは、定常法の方が土中における水蒸気潜熱の移動に原因があるのではないかと考えられるから、体積含水率の増加と共にその傾向が顕著になったのではないだろうかと考えられる。



第8図 真の熱伝導係数と体積含水率との関係



第9図 熱伝導係数と体積含水率との関係

以上のことから、非定常法による熱の伝導係数の測定に当って、温度の周期的変化による温度の位相差より求める方法は、今後その精度を向上させることが課題であると考えられる。

V. 結 言

この研究は、定常法を用いて土の熱伝導率を測定した前報の測定上の問題点を解決すべく、非定常法により土の熱伝導率の測定を行ったものである。

この場合の土の温度の変動周期は、1060秒である。熱伝導率は、円柱状の試料土壌の側面温度と中心温度の温度の位相差より求めた。

供試土壌には豊浦標準砂を用い、熱伝導率に関する主な要因としての体積含水率と熱伝導係数との関係につき検討を行った。

実験結果の主なものは次の通りである。

- (1) 非定常法による円筒法は、定常法の平板法に比べ、試料と外気との熱絶縁が容易である。
- (2) 非定常法の温度の変動周期は、1060秒である。

(3) 非定常法は、定常法に比べ、基準板を必要とせず、かつ、測定時間の短縮が計られる上に測定装置が簡単である。

(4) 非定常法は、定常法に比べ試料の加熱による土の潜熱移動が少い。

以上、熱の伝導係数を求める方法として、非定常法の円筒法は、測定が容易であることの利点はあるが、温度の周期変動から位相差を求める方法であるから、測定の精度を向上させることが今後の課題である。

引 用 文 献

1. 岩尾俊男・竹山光一：島根大農研報 21：129-133, 1987
2. 白井清恒・新庄 彬・三井義則：三重大学農学術研報告 45：85-97, 1973
3. 日本機械学会：伝熱工学資料 東京 1975, p. 296-300