土壌温度伝導率を簡単な装置で測定する新方式

伊 藤 實・易 佑 林*

岩手大学農学部・* 現在、愛媛大学農学部

The New Method of Determining the Soil Thermal Diffusivity
by Using a Simple Apparatus

Minoru Ito and Yulin Yi*

Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020, Japan

*The same above (Ehime University now)

In this paper, it was described that the determination of soil thermal diffusivity could be obtained by using a simple apparatus.

The simple apparatus was consisted of a cylindrical container, a incandescent lamp and a measuring system. The test soil was packed into the container and the soil surface was heated by the incandescent lamp from above. The temperatures in the soil were measured by using the thermocouples. On the other hand, the theoretical solution of the problem in conduction of heat of this case was given using four parameters. One of these parameters was the thermal diffusivity of the soil.

The parameters could be estimated by the coincidence of the calculated soil temperatures from the theoretical solution with the measured ones. The method is based on the least-squares estimation of non-linear parameters.

For the purpose of the widest utilization of this method, Fortran program was shown to obtain four parameters above described.

(Received August 31, 1988)

1988年8月31日受付

緒 言

作物生育を支える土壌の物理環境要因として水分、空気および温度などが挙げられる。これらの要因は互いに作用してそれぞれの特徴的な挙動を展開している。その1つである、土壌のもつ温度特性を求めるには、土壌をサンプリングして、その試料を温度とそれに関連する他の要因を含めて測定するのが一般的である。

その測定法として、古くから非定常迅速測定に適した、サーマルプループ法で熱伝導率を求める方式がある。筆者の一人も以前その方式を土壌に適用した例を報告した¹⁾。熱伝導率測定法は、国際的には非定常プループ法が定着し、国内でも広く用いられているという報告がある²⁾。しかし測定精度を上げるためには、装置そのものが高価になっていくマイナス面をもっている。このため

に、土壌のもつ温度特性を明らかにしようとする研究者がすべてこの装置を求めることは可能とはいえない。

一般に土壌の温度環境を明らかにするためには、土壌の熱伝導率よりも温度伝導率が必要になってくる。筆者の一人は、すでに、施設栽培ハウス規模での土壌温度の日変化を算出するために必要な深さ別土層の温度伝導率を求める方式を発表した³⁾。

ここでは、サンプリングした土壌の温度伝導率測定の新しい方式を開発した⁴⁾。

新しい方式は、

1. 断熱などの測定条件には厳しい条件を課さない。
2. 伝熱方程式に上述の条件をパラメータとして含める。
3. 含まれたパラメータの1つが温度伝導率で、その数値を最小二乗法⁵⁾で算出する。

を基本にしている。

本論文では、測定装置、実験手順、土壌温度の理論式とそこに含まれる温度伝導率をはじめとするパラメータ数値算出のフォートランプログラムなどを発表し、広く本測定法を活用できるようにした。

測定装置と実験の手順

温度伝導率を測定するための装置は次の部分から成り立っている。

1. 供試土壌を詰める測定円筒容器とそれを包む断熱材
2. 測定容器上部に供給熱源としての白熱電球
3. 容器内土壌温度測定の温度センサーとその記録部

測定円筒容器：内径 10.7 cm, 外径 11.5 cm, 高さ 10 cm の塩ビパイプで、側面に 2 cm 間隔に熱電対を円筒中央部まで水平に挿入できる小孔を設けてある。

断熱材：縦 25 cm × 横 25 cm × 深さ 20 cm の直方体の発泡スチロールに、直径 11.5 cm, 深さ 15 cm の円筒をくりぬき、上の測定容器が入れられるようになっている。

供給熱源：測定容器上端から 50～60 cm の位置にビーム型白熱電球 100 W (散光形) を置き、容器内土壌表面を照射する。なお、断熱材上部に当たる光はなるべく多く反射するよう表面にアルミ箔を張った。

測定センサー等：銅-コンスタンタン線熱電対で、冷接点はゼロコン(小松製)を、記録は 0～3 mV 打点計(大倉製)を用いた。

実験の手順は次のようにした。

測定容器に対象とする土壌試料を詰め、容器側面にあけた 2 cm 間隔の小孔から測温用熱電対を挿入する。また、上部は加温による土壌水分の蒸発を防止するためビニルフィルムでおおった。これを直方体状の断熱材内に収納し、測定容器内土壌温度が周辺空気の温度と同一になるまで放置した。同一温度になった後は、白熱電球で土壌表面を加温し、同時に深さごとの土壌温度の変化を打点計で記録した。記録時間は本実験の場合、すべて 12 時間とした。なお、温度伝導率を求めるための必要なデータは 1 時間ごとの深さ別土壌温度の値を用いることにした。

土壌温度の理論式とそこに含まれる パラメータ数値の算出法

土壌試料を充填した円筒(直径 D) の中心部で、深さ方向に X 軸をとり、加温する土壌表面を $X=0$ 、下端を $X=L$ ($=0.1$ m) とする。深さ X における円筒断面(面積 $S=\pi/4 \cdot D^2$) 内では温度は一定で U 、円筒の周囲

Fig. 1 Schematic diagram of a simple apparatus for measuring the thermal diffusivity of a soil.

の長さ πD から熱が放散しているのでその係数を E 、土壌の温度伝導率を K 、比熱を C および密度を ρ とする。これらを用いて、非定常での熱伝導方程式は次のようになる⁹⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - IU$$

$$\text{ただし, } I = \frac{\pi DE}{C\rho S}$$

なお、初期条件は、測定容器内土壌温度が周辺空気の温度と同一で 0 とすると、次のように表せる。

$$[U]_{t=0}=0$$

また、土壌表面を白熱電球で照射しているとき、土壌表面上の空気温度 F 、Newton の放射の法則の係数 h を用いての境界条件および土壌下端部が断熱と仮定しての境界条件はそれぞれ次のように表せる。

$$\left[\frac{\partial U}{\partial X} - h(U-F) \right]_{X=0} = 0, \text{ および } \left[\frac{\partial U}{\partial X} \right]_{X=L} = 0$$

この初期および境界条件を用いて、上述の熱伝導方程式を解くと次式が得られる⁹⁾。

$$U = \frac{2}{L} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{KhF \cos \beta s (1 - e^{-(K\beta s^2/L^2 + I)t})}{\left(1 + \frac{hL}{\beta s^2 + (hL)^2}\right) \left(K \frac{\beta s^2}{L^2} + I\right)} \cdot \cos \frac{\beta s}{L} (L-X)$$

この式が求める土壌温度の理論式である。ただし βs は $hL = \beta \tan \beta$ を満たす正根を大きさの順序に並べた場合

の s 番目の根である。

対象の土壌の温度伝導率 K は理論式から求めた深さごとの土壌温度の計算値 U とその測定値 U とを一致させることによって得られる。この計算値と測定値とを一致させるには、理論式に含まれるパラメータ数値を推定する必要があり、その方式には最小二乗法による微分補正法⁵⁾がある。これを利用して K, h, F, I の4つのパラ

メータ数値を求める。すなわち、パラメータ数値の初期推定値（近似値）を用いて得られる土壌温度の計算値が測定値と適合するように、この近似値の変化量 ($\delta K, \delta h, \delta F, \delta I$) を求める。そしてこの変化量を先の近似値に加え、再び上と同じことを繰り返し、得られた変化量が所期の収束範囲に達したとき、この変化量を加えて、理論式の求めるパラメータ数値とする。この変化量 $\delta K, \delta h, \delta F, \delta I$ を求める方程式が次の正規方程式である。

$$\begin{pmatrix} \sum \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right)^2 & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \\ \sum \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right)^2 & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \\ \sum \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right)^2 & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \\ \sum \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) & \sum \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta K \\ \delta h \\ \delta F \\ \delta I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum \left(\frac{\partial U}{\partial K} \right) R \\ -\sum \left(\frac{\partial U}{\partial h} \right) R \\ -\sum \left(\frac{\partial U}{\partial F} \right) R \\ -\sum \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right) R \end{pmatrix}$$

ただし

$$\frac{\partial U}{\partial h} = \frac{\partial U}{\partial \beta} \cdot \frac{d\beta}{dh} = \frac{\cos^2 \beta}{\beta + \sin \beta \cos \beta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \beta}$$

$$R = U(\text{計算値}) - U(\text{実測値})$$

これを実行するフォートランプログラムが Fig. 2 に示してある。プログラム1行文は72桁までであるが、この図に収めるために44桁になっている。そのため、継続行であることの表示は桁6が&になっている。また、行番号 10520, 10530 の式は計算機での指数式が定義域を超え、エラーとなるのを避けるために設けたものである。

入力データとして深度別測定土壌温度(AA)を、出力データは土壌温度理論式のパラメータ数値の温度伝導率(K)、Newtonの放射の法則の係数(h)、白熱電球照射時の土壌表面上での空気温度(F)、測定円筒容器から外部へ熱が放散するときの係数と関係する数値(I)である。ただし、プログラム内では K は TK に、 h は H に、 I は SI にそれぞれ表されている。

パラメータ数値を理論式に代入し、 s に関して加算(計算開始時は0としてある)するとき、加算1回増加させて求まる土壌温度の計算値とその増分との比が一定値(=EPSI)以下になったら、そこで加算を終了することにしてある。そして、この加算回数で正規方程式の各項を算出する。これによって得られた正規方程式の解はサブルーチン GJSUB から求める。理論式に代入する初期パラメータ数値については次節で詳述する。

パラメータ数値推定のための初期代入数値と

その結果および考察

供試土壌は岩手大学農学部付属牧場の表土を水中でフ

ルイ分けして得た 0.5~1 mm の団粒 (0.5 mm 団粒) と 4~8 mm の団粒 (4 mm 団粒) を用いた。適当な湿潤状態の団粒を先述の実験の手順に従って測定し、データを得た。このデータを用いて、供試土壌の温度伝導率 K を、前述の微分補正法で求めるためには、この K をはじめ、 h, F, I の近似値、すなわち初期パラメータ数値が必要となる。その初期パラメータ数値は以下のようにして得た。

K (単位 m^2/hr) は土壌の温度伝導率であることから、 1×10^{-3} ないし 0.5×10^{-3} ^{3),7)} を、 I (単位 $1/\text{hr}$) は測定円筒容器周辺からの熱の放散の係数と関係する数値であるが、断熱材を用いていることから0を、 F (単位 $^{\circ}\text{C}$) は供給熱源の白熱電球照射後の土壌表面上の空気温度であるが、測定終了時での土壌表面温度の1ないし2倍の数値を用いることにした。 h (単位 $1/\text{m}$) は Newton の放射の法則の係数であるが、その数値は被測定物や方法、装置によっていろいろとりうるので、前3者のように簡単に求められない。そこで、測定を開始し、ある時間経過した時刻での土壌表面温度を、 βs を仮に $\pi/4$ のみとして、計算で求め、その値が実測値と同一であるための h を算出する (Fig. 2 のプログラムでのサブルーチン VALOFH がこれにあたる)。この値を先の K, F, I に対応する h の初期数値として用いることにした。

この初期パラメータ数値を用いて、時間とともに変化する深度ごとの土壌温度の計算値を求める。しかし、このパラメータ数値は概数であることから、計算値は測定値とはずれており、誤差が生ずる。この誤差を最小になるようそれぞれのパラメータ数値 K, h, F, I の変化量

```

10010 C
10020 COMMON AA(13,7),BB(4,5)
10030 READ(5,1501)((AA(I,J),J=1,6),I=1,13)
10040 LASTN=0
10050 EPSI=5.E-4
10060 XL=.1
10070 PAI=3.1415926
10080 TK=5.00E-4
10090 F=AA(13,1)
10100 CALL VALOFH(TK,H,F,XL,PAI)
10110 SI=0.0
10120 WRITE(10,1500)TK,H,F,SI,LASTN
10130 3000 DO 5000 I=1,4
10140 DO 5001 J=1,5
10150 BB(I,J)=0.0
10160 5001 CONTINUE
10170 5000 CONTINUE
10180 XNL=FLOAT(LASTN)
10190 NLKAI=1
10200 DO 11000 KX=1,6
10210 X=FLOAT(KX-1)*0.02
10220 DO 10000 ITIME=1,12
10230 UU=0.
10240 DK=0.
10250 DH=0.
10260 DF=0.
10270 DI=0.
10280 T=FLOAT(ITIME)
10290 XN=0.
10300 1000 P1=XN*PAI
10310 P2=(XN+.5)*PAI
10320 60 P3=(P2-P1)/2.*P1
10330 U1=H*XL/P3
10340 U2=TAN(P3)
10350 G1=U1-U2
10360 IF (ABS(G1).LT.1.E-4) GO TO 160
10370 IF (G1.GT.0.) GO TO 140
10380 P2=P3
10390 GO TO 60
10400 140 P1=P3
10410 GO TO 60
10420 160 XN=XN+1.
10430 BETA=P3
10440 BETA2=BETA**2
10450 BYL=BETA/XL
10460 BYL2=BYL**2
10470 XMH=XL*H
10480 XMH2=XMH**2
10490 EXSIS=TK*BYL2*SI
10500 EXMTT=EXSIS*T
10510 IF(EXMTT-100.) 9999,9999,9990
10520 9990 EXMTT=100.
10530 9999 EXPVL=1.-EXP(-EXMTT)
10540 HOEXV=1.-EXPVL
10550 BNBOO=XMH2*BETA2
10560 BNBO1=1.+XMH/BNBOO
10570 BETAX=BETA*(XL-X)/XL
10580 BNBOA=BNBO1*EXSIS
10590 COSCO=COS(BETA)*COS(BETAX)
10600 SINCO=SIN(BETA)*COS(BETAX)
10610 SINSI=SIN(BETA)*SIN(BETAX)
10620 BTSC=BETA+SIN(BETA)*COS(BETA)
10630 UUAD=COSCO*EXPVL/BNBOA
10640 DKA0=EXPVL*TK*BYL2*T*HOEXV-TK*EXPVL
10650 &*BYL2/EXSIS
10660 DKAD=COSCO*DKA0/BNBOA
10670 DHS01=2.*BETA*SINCO*BETA2*COSCO
10680 DHS02=(XL-X)/XL*BETA2*SINSI
10690 DHSIO=(DHS01-DHS02)*EXPVL
10700 DHSI1=BETA2*SINCO*2.*T*TK*BETA/(XL**2)
10710 &*HOEXV
10720 DHSI=DHSIO+DHSI1
10730 DHBOO=(COS(BETA)**2)*EXSIS
10740 DHBO1=TK*BYL2/BNETA*BTSC
10750 DHBO=2.*(DHBOO+DHBO1)
10760 DHBD1=DHSI/(BTSC*EXSIS)
10770 DHBD2=(BETA2*SINCO*EXPVL)*DHBO/((BTSC*
10780 &EXSIS)**2)
10790 DHAD=(DHBD1-DHBD2)*(COS(BETA)**2)/BTSC
10800 DFAD=UUAD
10810 DIAD=COSCO*(T*HOEXV-EXPVL/EXSIS)/BNBOA
10820 UU=UU+UUAD
10830 DK=DK+DKAD
10840 DH=DH+DHAD
10850 DF=DF+DFAD
10860 DI=DI+DIAD
10870 IF(NLKAI.GT.1) GO TO 1001

10880 IF (ABS(UUAD/UU).GT.EPSI) GO TO 1000
10890 XNL=XN
10900 LASTN=IFIX(XNL)
10910 NLKAI=NLKAI+1
1001 IF(XN.LE.XNL) GO TO 1000
10930 ITIMP1=ITIME+1
10940 UU=UU*2.*TK*F*H/XL
10950 DK=DK*2.*H*F/XL
10960 DH=DH*2.*TK*F/XL
10970 DF=DF*2.*TK*H/XL
10980 DI=DI*2.*TK*F*H/XL
10990 RERR=AA(ITIMP1,KX)-UU
11000 BB(1,1)=BB(1,1)+DK**2
11010 BB(1,2)=BB(1,2)+DK*DH
11020 BB(1,3)=BB(1,3)+DK*DF
11030 BB(1,4)=BB(1,4)+DK*DI
11040 BB(2,2)=BB(2,2)+DH**2
11050 BB(2,3)=BB(2,3)+DH*DF
11060 BB(2,4)=BB(2,4)+DH*DI
11070 BB(3,3)=BB(3,3)+DF**2
11080 BB(3,4)=BB(3,4)+DF*DI
11090 BB(4,4)=BB(4,4)+DI**2
11100 BB(1,5)=BB(1,5)+DK*RERR
11110 BB(2,5)=BB(2,5)+DH*RERR
11120 BB(3,5)=BB(3,5)+DF*RERR
11130 BB(4,5)=BB(4,5)+DI*RERR
11140 10000 CONTINUE
11150 11000 CONTINUE
11160 DO 12000 I=1,3
11170 DO 13000 J=1+1,4
11180 BB(J,I)=BB(I,J)
11190 13000 CONTINUE
11200 12000 CONTINUE
11210 CALL GJSUB
11220 DETAK=BB(1,5)
11230 DETAH=BB(2,5)
11240 DETAF=BB(3,5)
11250 DETAI=BB(4,5)
11260 TK=TK+DETAH
11270 H=H+DETAH
11280 F=F+DETAH
11290 SI=SI+DETAI
11300 WRITE(10,1500)TK,H,F,SI,LASTN
11310 IF(ABS(DETAH/TK).GT.EPSI)GO TO 3000
11320 IF(ABS(DETAH/H).GT.EPSI)GO TO 3000
11330 IF(ABS(DETAH/F).GT.EPSI)GO TO 3000
11340 IF(ABS(DETAI/SI).GT.EPSI)GO TO 3000
11350 WRITE(10,1500)TK,H,F,SI,LASTN
1500 FORMAT(1H,'K=',E9.3,2X,'H=',E9.3,2X,
&'F=',E9.3,2X,'I=',E9.3,2X,
&'XNL=',14)
1501 FORMAT(6F6.2)
STOP
END
SUBROUTINE GJSUB
COMMON AA(13,7),BB(4,5)
DO 40 K=1,4
P=BB(K,K)
DO 10 J=K,5
BB(K,J)=BB(K,J)/P
10 CONTINUE
DO 20 I=1,4
IF(I-K) 21,20,21
21 BBIK=BB(I,K)
DO 30 J=K,5
BB(I,J)=BB(I,J)-BBIK*BB(K,J)
30 CONTINUE
20 CONTINUE
40 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE VALOFH(TK,H,F,XL,PAI)
COMMON AA(13,7),BB(4,5)
X=0.
T=3.
BETA=PAI/4.
BYL=BETA/XL
BYL2=BYL**2
EXSIS=TK*BYL2
EXMTT=EXSIS*T
EXPVL=1.-EXP(-EXMTT)
BETAX=BETA*(XL-X)/XL
COSCO=COS(BETA)*COS(BETAX)
UUAD=COSCO*EXPVL/EXSIS
UU=UUAD*2.*TK*F/XL
H=AA(4,1)/UU
RETURN
END

```

Fig. 2 Fortran program for the least-squares estimation of the parameter values which were included in the theoretical solution of soil temperature deduced from the equation of thermal conduction.

(a) 0.5 mm aggregate soil.

(a) 0.5 mm aggregate soil.

(b) 4 mm aggregate soil.

(b) 4 mm aggregate soil.

Fig. 3 The comparison between the calculated and the measured soil temperature—the fitting case.

Marks, measured ones. □, 0 cm; △, 2 cm; ○, 4 cm; ⋈, 6 cm; ×, 8 cm; +, 10 cm below soil surface. Curves: calculated ones which were obtained by using the last estimated value of parameters.

Fig. 4 The comparison between the calculated and the measured soil temperature—the partially unfitting case.

Marks, measured ones. □, 0 cm; △, 2 cm; ○, 4 cm; ⋈, 6 cm; ×, 8 cm; +, 10 cm below soil surface. Curves: calculated ones which were obtained by using the last estimated value of parameters.

を求め、新たなパラメータ数値とする。パラメータ数値の変化量がそれぞれの数値の 5/10,000 (=EPSI) 以下になった時点で、そのパラメータ数値が求めたと判定した。この初期パラメータ数値から最終パラメータ数値までの計算の推移を、 s についての加算回数を含めて、Table 1 に示してある。

上のようにして得られた最終パラメータ数値と、同時に求めた、 s についての加算回数で、深度ごとの土壌温度の時間変化を、付録のプログラムを用いて計算し、曲

線で表したのが Fig. 3 および Fig. 4 である。なお、計算値の曲線表示を X - Y プロッターで行うと、表面の土壌温度の初期変化が急激なため、等時間間隔では、オーバーシュートして不自然な曲線になってしまう。これを避けるために土壌温度の変化を求める時間間隔は、始めは細かく、時間が経つにつれて粗い、経過時間の自乗間隔とした。また、実測値は図中ではマーク印で表されている。この Fig. 3 は計算値と実測値とがよく適合しているが、Fig. 4 は深度によって適合しない場合である。

Table 1 The change from the initial values to the last of estimated parameters (K , h , F , I) included in the theoretical solution of soil temperature with the summation times of s .
Example of 0.5 mm aggregate soil.

Conditions	Parameters				Summation times of s
	K (m^2/hr)	h ($1/\text{m}$)	F (deg)	I ($1/\text{hr}$)	
Initial values	0.500×10^{-3}	0.589×10^2	0.388×10^2	0.0	0
Values after 1st repeated calc.	0.721×10^{-3}	0.261×10^2	0.471×10^2	0.613×10^{-1}	63
Values after 2nd repeated calc.	0.746×10^{-3}	0.359×10^2	0.468×10^2	0.579×10^{-1}	50
Values after 3rd repeated calc.	0.742×10^{-3}	0.362×10^2	0.479×10^2	0.575×10^{-1}	53
Values after 4th repeated calc.	0.742×10^{-3}	0.362×10^2	0.479×10^2	0.576×10^{-1}	53
Last values	0.742×10^{-3}	0.362×10^2	0.479×10^2	0.576×10^{-1}	53

この理由の1つは測温用熱電対の位置がいくぶんずれて挿入されたことによると考えられるが、さらに今後検討する予定にしている。

ま と め

土壌の温度特性の1つの指標である温度伝導率を簡単な装置で求められる方式を研究した。その方式の基本は、土壌温度の理論式に含まれる、温度伝導率をはじめとした、パラメータ数値を最小二乗法で求めることであった。このことから、本論文は、実験装置、土壌温度理論式とそこに含まれるパラメータ数値の算出法、そのフォートランプログラムおよび実験からの具体例を示してある。

終わりに実験に昭和62年本学卒業生 菅原立也君の協

力を得た。また、計算には DS-600 および HITAC M-260K を用いた。関係各位に感謝します。

文 献

- 1) 伊藤 実・舟山道夫. 1973. 土壌水分と熱伝導率との関係について. 昭和48年度農業土木学会講演要旨集 224-225.
- 2) 粕淵辰昭. 1984. 熱移動と温度. 土壌の物理性 50: 68-70.
- 3) 伊藤 実. 1986. ハウス内土壌温度の日変化から温度伝導率を求める方法について. 生物環境調節 24: 1-8, 77.
- 4) 伊藤 実・易 佑林. 1985. 土壌の温度伝導率を求める新しい方法について. 日本生物環境調節学会第23回大会講演要旨集 10-11.
- 5) T. R. マッカーラ著, 三浦 功・田尾陽一共訳. 1974. 「計算機のための数値計算法概論」225-231, サイエンス社, 東京.
- 6) 小平吉男. 1971. 「物理数学 第二巻」261-263, 338-345, 631-633, 文献社, 東京.
- 7) 内田秀雄編. 1974. 「伝熱工学」377, 裳華房, 東京.

```

20010 C
20020     DIMENSION CC(99,7)
20030     DO 4000 I=1,6
20040     DO 4001 J=1,1
20050     CC(J,I)=0.
20060 4001 CONTINUE
20070 4000 CONTINUE
20080     READ(5,1502)TK,H,F,SI,LASTN
20090     XNL=FLOAT(LASTN)
20100     XL=.1
20110     PAI=3.1415926
20120     DO 11000 KX=1,6
20130     X=FLOAT(KX-1)*0.02
20140     DO 10100 ITIME=1,36
20150     UU=0.
20160     T=FLOAT(ITIME**2)/108.
20170     XN=0.
20180 1000 P1=XN*PAI
20190     P2=(XN+.5)*PAI
20200     60 P3=(P2-P1)/2.+P1
20210     U1=H*XL/P3
20220     U2=TAN(P3)
20230     G1=U1-U2
20240     IF (ABS(G1).LT.1.E-4) GO TO 160
20250     IF (G1.GT.0.) GO TO 140
20260     P2=P3
20270     GO TO 60
20280 140 P1=P3
20290     GO TO 60
20300 160 XN=XN+1.
20310     BETA=P3
20320     BETA2=BETA**2

```

```

20330     BYL=BETA/XL
20340     BYL2=BYL**2
20350     XMH=XL*H
20360     XMH2=XMH**2
20370     EXSIS=TK*BYL2+SI
20380     EXMTT=EXSIS*T
20390     IF(EXMTT-100.) 9999,9999,9990
20400 9990 EXMTT=100.
20410 9999 EXPVL=1.-EXP(-EXMTT)
20420     HOEXV=1.-EXPVL
20430     BNBOO=XMH2+BETA2
20440     BNBO1=1.+XMH/BNBOO
20450     BETAX=BETA*(XL-X)/XL
20460     BNBOA=BNBO1*EXSIS
20470     COSCO=COS(BETA)*COS(BETAX)
20480     UUAD=COSCO*EXPVL/BNBOA
20490     UU=UU+UUAD
20500     IF (XN.LE.XNL) GO TO 1000
20510     UU=UU*2.*TK*F*H/XL
20520     ITIMP1=ITIME+1
20530     CC(ITIMP1,KX)=UU
20540 10100 CONTINUE
20550 11000 CONTINUE
20560     WRITE(8,1501)((CC(I,J),J=1,6),I=1,37)
20570     WRITE(8,1500)TK,H,F,SI,LASTN
20580 1500 FORMAT(1H,'K=',E9.3,2X,'H=',E9.3,2X,
20590     &'F=',E9.3,2X,'I=',E9.3,2X,
20600     &'XNL=',I4)
20610 1501 FORMAT(6F6.2)
20620 1502 FORMAT(4E10.3,I3)
20630     STOP
20640     END

```

Appendix Fortran program using the obtained value of parameters for the calculation of soil temperature changing with time at the various depth.