

浅層砂土の地温日変化の一表現法

武政 剛弘*・薦田 広章*

An Expression of Diurnal Change in Temperature
in Upper Layer of the Sandy Soil.

by

Takehiro TAKEMASA* and Hiroaki KOMODA*

The dry surface layer in sandy soil appears due to the amount of solar radiation in summer season.

The both of the soil temperature variation in the wet zone of lower layer located just below the dry surface layer and the atmospheric temperature variation of the near ground surface are remarkably affected by the soil temperature variation in the dry surface layer.

The application of the harmonic analysis is usual to evaluate the diurnal changing of the soil temperature near ground surface. As is well known, the diurnal changing of the soil temperature is sufficiently expressed with the diurnal term and semi-diurnal term in the harmonic terms.

In this paper, a simplified expression on the diurnal change in the soil temperature is derived from the solution of the heat flow equation with the consideration of the diurnal variation of the thermal diffusivity κ .

The obtained results are summarized as follows.

1) The diurnal changing of the soil temperature in the dry surface layer is sufficiently expressed with the only term of

$$\theta = \theta_0 + \bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1)$$

Where θ_0 is mean temperature, \bar{R}_1 , $\bar{\epsilon}_1$; amplitude and phase of the diurnal temperature variation, respectively, $\omega = 2\pi/P$; the angular frequency of the Earth's rotation, and γ ; constant.

2) The solution of the heat flow equation tells that the diurnal variation of the thermal diffusivity is characterized by the additional term of " $-\gamma \sin \omega t$ ".

1. まえがき

浅層砂土の地温日変化は、地表面のエネルギー収支で決まる。この場合、太陽からの日射量の変化が地表面の温度変化の主たる部分を占める。この日射量は、昼間は太陽の高度に応じて正弦曲線状に変化するが、日没後、夜間の日射量は零になる。

さらに夏季の日射量が大い条件のもとでは、表層部数cmの浅層砂土では地温勾配のための水分の移動、さらには水の相変換も行われその移動などが生じている。これらが熱伝導に大きく影響している。

上記に述べた気象条件によって大きく変動する浅層砂土の地温は、接地気層内の気温や下層部の地温に大きく影響をおよぼす。したがって、ここでは浅層砂土の表層部に形成される風乾域内の地温日変化についての解析を試みる。

従来、こうした状況下での複雑な周期性を有した地温日変化の表現手段として、調和分析を用いた級数表現がとられている。この調和分析の結果を用いて熱拡散係数などの砂土の熱特性値の算出を行っている。さらにはシミュレーションからの地温解析法も一般化

昭和62年9月30日受理

*土木工学科 (Department of Civil Engineering)

している。この場合、地温変動を左右する砂土の熱特性を野外測定から決定する際には、気象条件に起因した境界条件が複雑となるために、ある程度の仮定のもとに解析を進めなければならない。したがって正確には室内実験からの砂土の熱特性値の決定が必要となる。たとえば Jackson¹⁾らは、湿潤土壌内では、熱拡散係数の値が、与えられる温度変動の周期に依存すること、加えて含水比にも大きく左右されることを平面法によって示した。また新庄^{5,6)}は円筒法を用いて、砂の真の熱伝導係数と見かけの熱伝導係数の算出方法を示し、実際の水分移動に伴う見かけの熱伝導係数は地温および含水比に大きく依存することを示した。さらに松原²⁾らは、地温が大きく影響を与える接地気層内の気温日変化の表現法について、熱交換係数 (Austausch) が時間に対して周期的に変化すると仮定した場合の熱伝導方程式の解析解を示した。

これら一連の報告に示唆されている物理的な考察に基づいて、本論文では、砂土の表面温度が接地気層温度に対応して変化し、そして浅層砂土内の見かけの熱拡散係数が時間に対して周期変化すると仮定した場合の地温解析を行った。

さらに得られた解析解が上述の条件下での地温日変化を与えることを実測によって検証した。

2. 熱伝導方程式とその解

晴天日の続く夏季、表層部数cmには非常に乾燥した風乾域が出現しており、一方、下層部分では比較的湿潤な状態が保たれている。このような浅層砂土には含有水分分布に躍層部分が存在しており、この躍層が昼夜の消長の結果として、上下に変動を繰り返すものと推定される。このために浅層砂土では、含水比の変化に対応して砂土の熱伝導係数が変化する。さらに水分移動に伴う潜熱移動も生じる。この事態が砂土内の熱交換に大きく影響しており、見かけの熱拡散係数 $\kappa = \lambda / C$ (λ : 熱伝導係数, C : 体積熱容量) の値に変化をきたしていると考えられる。ここでは浅層砂土の表面に形成される風乾域の領域内で、見かけの熱拡散係数が時間の周期関数として変化する場合を考察する。

z 軸を地表面から下向きにとり、砂土の z 点で時刻 t の地温を θ 、熱拡散係数を κ とすれば次の熱伝導方程式が得られる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

κ を時間 t (午前零時を $t = 0$) の関数として次式で与える。

$$\kappa = \kappa_0 (1 - \gamma \cos \omega t) = \kappa_0 f(t) \quad (2)$$

ここで、 $\omega = 2\pi / P$ であり角速度を示す。P は一日変動周期 (24h)、 γ は定数である。 κ_0 は一般には深さの関数であるが表面より数cmの厚さの風乾域では定数とする。したがって $t = 0$ では κ は最小値 $\kappa_0(1 - \gamma)$ 、正午には最大値 $\kappa_0(1 + \gamma)$ となる。

$$\tau = \int_0^t f(t) dt = t - \frac{\gamma}{\omega} \sin \omega t \quad (3)$$

の変換により時間 t を τ で表現すれば(1)式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \kappa_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (4)$$

の定数係数の熱伝導方程式に変形される。

(3)式の変換に従って、 $z = 0$ (表面) での地温変動の境界条件も時間 τ の周期関数で与える (松原²⁾)。これに対して下層部では、上層風乾域と異なり水分含水量の日変化はそれほど顕著でなく比較的一定している。この様な理由から厳密には(1)式の熱拡散係数 κ は一定としなければならない。しかしここでは、下層部のこのような状況が上層の地温変動におよぼす影響は小さいと考え、さらに一日周期の地温変動の振幅は深さ方向に急速に減衰する事実を勘案して、簡単のために上層部の状態が半無限に続くとした。したがって境界条件は次式で与えられる。

$$\theta(0, \tau) = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n \sin(n\omega\tau + \epsilon_n) \quad (5)$$

$$\theta(\infty, \tau) = \theta_0 \quad (6)$$

(5)、(6)式の条件による(4)式の解は次式となる。

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ & a_n \exp(-z\sqrt{n\omega/2\kappa_0}) \\ & \times \cos(n\omega\tau - z\sqrt{n\omega/2\kappa_0}) + b_n \exp(-z\sqrt{n\omega/2\kappa_0}) \\ & \times \sin(n\omega\tau - z\sqrt{n\omega/2\kappa_0}) \} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに形を整えるために

$$y = \omega t \quad (8)$$

$$x = y - \gamma \sin y \quad (9)$$

$$\delta_n = (n\omega/2\kappa_0)^{1/2} \quad (10)$$

とおくと(7)式は

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ & a_n \exp(-\delta_n z) \cos(nx - \delta_n z) \\ & + b_n \exp(-\delta_n z) \sin(nx - \delta_n z) \} \end{aligned} \quad (11)$$

で表現される。

したがって各層での地温変化は(11)式から次式の形で示される。

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nx + B_n \sin nx) = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{R}_n \\ \times \sin(nx + \bar{\epsilon}_n) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに $\bar{R}_n = \theta_n \exp(-z\sqrt{n\omega/2\kappa_0})$ 、 $\bar{\epsilon}_n = \epsilon_n - z\sqrt{n\omega/2\kappa_0}$ である。

ここで地温測定値の日変化が(12)式の第一項 ($n = 1$) までで充分表現出来ると仮定した場合には、地温日変化の表現式は次式となる。

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 + \bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1) \\ &= \theta_0 + \theta_1 \exp(-z\sqrt{\omega/2\kappa_0}) \\ &\quad \times \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t - z\sqrt{\omega/2\kappa_0} + \epsilon_1) \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式は一日周期関数としての地温日変化を示すものである。深さ方向に振幅の減衰、位相の遅れが生じている。振幅の減衰については、従来の表示と同様であるが、位相の項が周期関数になっているのが特徴である。

3. 実測

長崎県大村市の長崎県建設大学校の校庭に、広さ $3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ で深さ 1 m の砂場を作り、そこでの野外地温測定を行った。Fig. 1 に砂場に使用した砂の粒径加積曲線を示す。

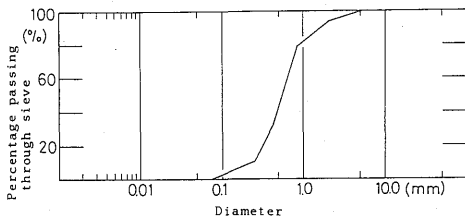


Fig. 1. Integrated granulometric composition curve of sand used for the test of Eq. 13.

今回計算に使用する資料は、長崎地方の梅雨明け後の晴天日の続く昭和60年7月23日14時より24日の14時までの24時間測定より得られたものである。

測定項目は、地温、気温、熱流量、含水比および日射量である。地温と気温については、砂土内の0, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 24, 30および40cmの各層の地温と百葉箱内での気温を、c-c熱電対を用いて2分間隔で記録した。この浅層部各層の地温変化と気温変化を Fig. 2 に示す。

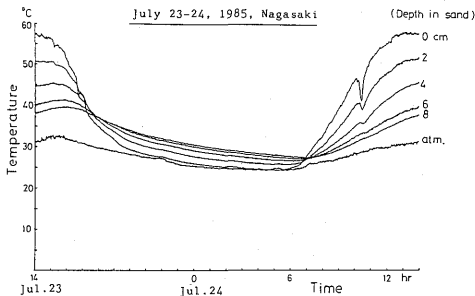


Fig. 2. Diurnal changes in the soil temperature and atmospheric temperature.

含水比は以下の方法で求めた。内径が、6.7cm、長さが3cm、5cmの塩ビパイプのユニットを継ぎ合せ、各ユニットに分解可能な長さ25cmの円筒を作り、円筒の底面は水分移動が可能な網状とし、この同筒内に現場の砂をつめ、前述のc-c熱電対、熱流板と同時に測定日の約2週間前に埋設した。この円筒を4時間毎に抜き出し、深さ1.5, 4.5, 7.5, 14.5および19.5cmの各層での含水比を採土法で測定した。Fig. 3 に4時間毎の測定値の一日の平均含水比の分布状況と熱電対および熱流板の埋設位置を示す。

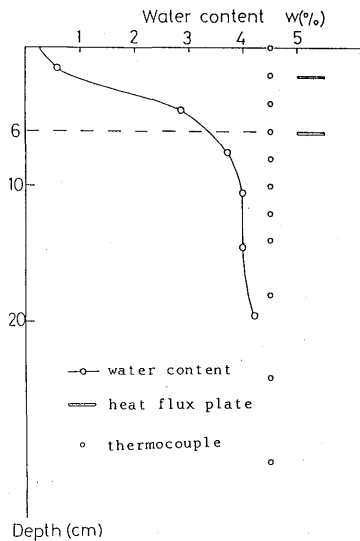


Fig. 3. Profile of the daily mean water content, arrangement of thermocouples and heat flux plates.

4. 結果および考察

4. 1. 新表現法とそれの実例への適用による検証

Fig. 3 によると浅層部6cm附近までは乾燥した風乾域を形成しているのが確認される。そこで各層での地温の最大、最小値から地温変動の振幅を求め、深さ方向での振幅の減衰状況をFig. 4 に示す。

これからも表面から6cm附近までの風乾域と、下層部の湿潤域では振幅の減衰状況が明瞭に異っている。したがって上層の風乾域での熱特性が昼夜の消長に対応して周期変動していると推定する。さらにこの風乾域の地温変動が下層部の地温に大きく影響すると思われる。それゆえ解析には0, 2, 4および6cmの層での測定値を用いた。前述のように、一日周期変動の熱特性値を用いた、砂土に関する熱伝導方程式の解として(12)式が得られた。この級数解は2項目以下が急速に減衰することに着目し、地温日変化の表現式として(13)式を得た。(13)式は調和解の中で一日項の ωt の代わりに $\omega t - \gamma \sin \omega t$ と置換えた式である。この(13)式の

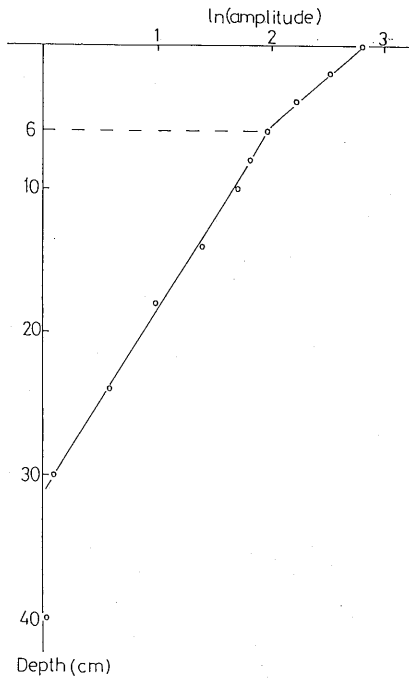


Fig. 4. Damping of temperature amplitude in the soil with depth.

精度を実測値によって次の様に確かめることにする。

いま各層での1時間毎の実測値が(3)式で表示されると仮定して Table 1 に示す方法によって測定値を処理し、各層での \bar{R}_1 , γ , $\bar{\epsilon}_1$ を算出する。但し $t = 0$ は午前零時とする。Table 1 は深さ 2 cm の地温についての計算例である。

結論として、Table 1 の VIII 欄の値が $\gamma \sin \omega t$ の形をとることが検証できれば、地温日変化の表現式としてこの解析解の妥当性が確認されることになる。他の各層についても Table 1 と同様の処理を行い、Table 1 の VIII 欄に相当する値を求めた。それらの結果を Fig. 5 に示す。

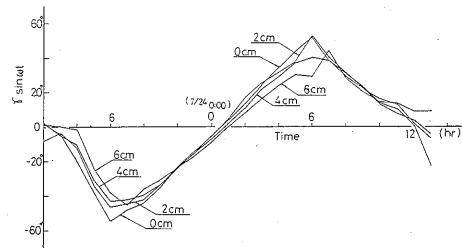


Fig. 5. Diurnal change in $\gamma \sin \omega t$ at depths of 0 (surface), 2, 4, 6 cm.

Table 1 Diurnal variation in the soil temperature at 2 cm depth

| time of day | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
|-------------|-----|-------|--------|--------|--------|------|---------|--------|
| 7/23. 14:00 | -10 | 50.70 | 12.55 | 1.000 | 90.00 | -150 | -240.00 | -8.20 |
| 15:00 | -9 | 50.50 | 12.35 | 0.984 | 100.26 | -135 | -235.26 | -3.46 |
| 16:00 | -8 | 48.50 | 10.35 | 0.825 | 124.41 | -120 | -244.41 | -12.61 |
| 17:00 | -7 | 42.30 | 4.15 | 0.331 | 160.67 | -105 | -265.67 | -33.87 |
| 18:00 | -6 | 36.40 | -1.75 | -0.139 | 187.99 | -99 | -277.99 | -46.19 |
| 19:00 | -5 | 33.60 | -4.55 | -0.363 | 201.28 | -75 | -276.28 | -44.48 |
| 20:00 | -4 | 31.20 | -6.95 | -0.554 | 213.64 | -60 | -273.64 | -41.84 |
| 21:00 | -3 | 30.00 | -8.15 | -0.649 | 220.47 | -45 | -265.47 | -33.67 |
| 22:00 | -2 | 29.30 | -8.85 | -0.705 | 224.83 | -30 | -254.83 | -23.03 |
| 23:00 | -1 | 28.40 | -9.75 | -0.777 | 230.99 | -15 | -245.99 | -14.19 |
| 7/24. 0:00 | 0 | 27.60 | -10.50 | -0.841 | 237.25 | 0 | -237.25 | -5.45 |
| 1:00 | 1 | 27.00 | -11.15 | -0.888 | 242.62 | 15 | -227.62 | 4.18 |
| 2:00 | 2 | 26.50 | -11.65 | -0.928 | 248.13 | 30 | -218.13 | 13.67 |
| 3:00 | 3 | 26.20 | -11.95 | -0.952 | 252.16 | 45 | -207.16 | 24.64 |
| 4:00 | 4 | 25.90 | -12.25 | -0.976 | 257.42 | 60 | -197.42 | 34.38 |
| 5:00 | 5 | 25.70 | -12.45 | -0.992 | 262.75 | 75 | -187.75 | 44.05 |
| 6:00 | 6 | 25.60 | -12.55 | -1.000 | 270.00 | 90 | -180.00 | 51.80 |
| 7:00 | 7 | 27.10 | -11.05 | -0.880 | 298.36 | 105 | -193.36 | 38.44 |
| 8:00 | 8 | 30.20 | -7.95 | -0.633 | 320.73 | 120 | -200.73 | 31.07 |
| 9:00 | 9 | 34.60 | -3.55 | -0.283 | 343.56 | 135 | -208.56 | 23.24 |
| 10:00 | 10 | 40.00 | 1.85 | 0.147 | 368.45 | 150 | -218.45 | 13.35 |
| 11:00 | 11 | 43.70 | 5.55 | 0.442 | 386.23 | 165 | -221.23 | 10.57 |
| 12:00 | 12 | 47.90 | 9.75 | 0.777 | 410.99 | 180 | -230.99 | 0.81 |
| 13:00 | 13 | 50.70 | 12.50 | 1.000 | 450.00 | 195 | -255.00 | -2.32 |

I = time

II = soil temperature at 2 cm depth.

$$= \theta_0 + \bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1)$$

$$\text{III} = \text{II} - [\text{II}(\text{Max}) + \text{II}(\text{Min})] / 2$$

$$= \bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1)$$

$$\text{IV} = \text{III} / \text{III}(\text{Max}) = \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1)$$

$$\text{V} = \sin^{-1}(\text{IV}) = \omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\epsilon}_1$$

$$\text{VI} = \text{I} \times 15 = \omega t$$

$$\text{VII} = \text{VI} - \text{V} = \gamma \sin \omega t - \bar{\epsilon}_1 \quad ; \quad -\bar{\epsilon}_1 = \text{VII}(\text{Mean})$$

$$\text{VIII} = \text{VI} - \text{VII}(\text{Mean}) = \text{VI} - (-231.80) = \gamma \sin \omega t$$

得られた結果は、各層共に周期は正弦曲線にはほぼ一致している。しかも $\omega t = 0$ は午前零時近くに出現しており、位相の一致を示している。

振幅についても、各層の $\gamma \sin \omega t$ の比較において類似性は充分存在しており、 $\gamma = 45^\circ$ 程度の共通の値を示している。解析の経過の中で算出される(13)式の各層での θ_0 , \bar{R}_1 , γ , $\bar{\epsilon}_1$ を Table 2 に示す。

Table 2 Values of coefficients in Eq.13 at each depth of the sand.

| depth z(cm) | θ_0 (°C) | \bar{R}_1 (°C) | γ (deg) | $\bar{\epsilon}_1$ (deg) |
|-------------|-----------------|------------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 41.10 | 16.50 | 45 | 241.63 |
| 2 | 38.15 | 12.55 | 45 | 231.80 |
| 4 | 35.85 | 9.35 | 45 | 219.85 |
| 6 | 34.20 | 7.10 | 45 | 208.55 |

Fig. 6 は $z = 2$ cm の測定値と Table 2 に示す値を用いての(13)式の計算結果との比較を行ったものである。Fig. 6 に示す結果は、振幅および位相共によく一致していることを示している。

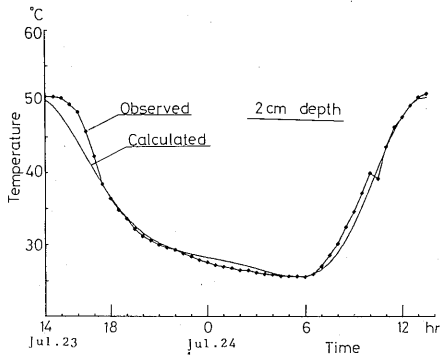


Fig. 6. Calculated and observed temperature variations in the sand at 2 cm depth.

2 cm 以外の層についても同様の検討を試みた。これによれば、0.4 cm の層では 2 cm の層と同様な結果となっている。しかし 6 cm の層については、測定値と計算値との間には振幅の大きさは一致するが、最大地温の出現時に約 1.5 時間程度の位相のずれを生じた。

4. 2. 調和解析項との関係

従来、地温日変化の観測値は、(1)式の κ を一定として取り扱った場合の一般解として、調和解析を行った結果が(14)式の形で表現される。この場合この級数の収斂性は良く一日 48 個の資料でも第 4 調和項(14)式では右辺第 9 項まででかなり正確に観測値を表現することが出来る。

$$\theta = a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t + a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (14)$$

通常は平均項、一日項および半日頃までで充分である。しかし(14)式の表現方法では一日項のみではどうしても現実の地温日変化の表現が出来ず、半日頃の追加を余儀なくされる。しかも(14)式によるこの調和級数による表現は全く数学的な処理からの結果である。

これに対して前述の砂土の熱特性を考慮した(12)式による表現式では、半日頃の追加を行わずとも一日頃のみで観測値良く表現し得ることが検証された。

ここでは、地温日変化の表現式として新たに提案した解(12)式と従来からの解(14)式との関係を論じ、地温日変化の表現式への半日頃の寄与率を定量的に説明する。(9)式の関係より Bessel 関数のよく知られた公式を利用すると次の関係が得られる(寺沢⁷⁾)。

$$\cos my = M_0 + M_1 \cos x + M_2 \cos 2x + M_3 \cos 3x + \dots \quad (15)$$

$$\sin my = N_1 \sin x + N_2 \sin 2x + N_3 \sin 3x + \dots \quad (16)$$

とおけばそれぞれの係数 M_i , N_i は以下に示される。

$$M_0 = 0 \quad (m \neq 1) \quad M_0 = -\gamma/2 \quad (m = 1) \quad (17)$$

$$M_n = \frac{m}{n} \{J_{n-m}(n\gamma) - J_{n+m}(n\gamma)\} \quad (18)$$

$$N_n = \frac{m}{n} \{J_{n-m}(n\gamma) + J_{n+m}(n\gamma)\} \quad (19)$$

(15), (16)式を(14)式に代入し、(12), (14)式での両者の θ を等しくおくと次の関係を得る。

$$A_0 = -(\gamma/2) a_1 \quad (20)$$

$$A_1 = a_1 \{J_0(\gamma) - J_2(\gamma)\} + 2 a_2 \{J_{-1}(\gamma) - J_3(\gamma)\} + 3 a_3 \{J_{-2}(\gamma) - J_4(\gamma)\} + 4 a_4 \{J_{-3}(\gamma) - J_5(\gamma)\} + \dots \quad (21)$$

$$B_1 = b_1 \{J_0(\gamma) + J_2(\gamma)\} + 2 b_2 \{J_{-1}(\gamma) + J_3(\gamma)\} + 3 b_3 \{J_{-2}(\gamma) + J_4(\gamma)\} + 4 b_4 \{J_{-3}(\gamma) - J_5(\gamma)\} + \dots \quad (22)$$

$$2 A_2 = a_1 \{J_1(2\gamma) - J_3(2\gamma)\} + 2 a_2 \{J_0(2\gamma) - J_4(2\gamma)\} + 3 a_3 \{J_{-1}(2\gamma) - J_5(2\gamma)\} + 4 a_4 \{J_{-2}(2\gamma) - J_6(2\gamma)\} + \dots \quad (23)$$

$$2 B_2 = b_1 \{J_1(2\gamma) + J_3(2\gamma)\} + 2 b_2 \{J_0(2\gamma) - J_4(2\gamma)\} + 3 b_3 \{J_{-1}(2\gamma) + J_5(2\gamma)\} + 4 b_4 \{J_{-2}(2\gamma) + J_6(2\gamma)\} + \dots \quad (24)$$

以上の関係式を用いて 2 cm の層での測定結果について論ずる。測定値が(14)式の形で示される Fourier 級数に調和解された結果は、

$$\begin{aligned} a_1 &= -10.10 \text{ (}^\circ\text{C)} & a_2 &= 3.06, \\ a_3 &= 0.11 & a_4 &= -0.48 \\ b_1 &= -6.37 \text{ (}^\circ\text{C)} & b_2 &= 3.12, \\ b_3 &= 0.64 & b_4 &= -0.34 \end{aligned}$$

となり、一日、半日項が他の項よりも卓越している。
さらに(14)式を正弦級数のみに変換すれば

$$\theta = a_0 + R_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1) + R_2 \sin(2\omega t + \varepsilon_2) + \dots \quad (25)$$

を得る。2 cmの測定結果を(25)式に当てはめれば

$$R_1 = 11.94, \quad R_2 = 4.37, \\ \varepsilon_1 = 237.76^\circ, \quad \varepsilon_2 = 404.44^\circ$$

となり半日項の R_2 の寄与率は30%を超えている。

これに対して新表現法の場合でも、一般的には地温日変化は(12)式で示す級数の形で表現されるものである。しかし前節の計算方法を用いたところ、実際には(13)式に示す一日項のみで充分地温日変動を表現し得る結果となった。

厳密には第一項のみでなく第二項以下も考慮に入れるべきであるが γ を適当に撰んで第二項以下を省略し得るようにすれば実用計算は簡便となる。なおこれは全く数学的な立場からの議論である。

次に地温日変化を(13)式で表現し得ると仮定し、 γ の値をFig. 5から $\gamma = 0.785$ (45°) ≈ 0.8 と決定する。そしてこの γ の値を用いて、地温が(12)式の級数で表現できたとして $\bar{R}_n, \bar{\varepsilon}_n$ を算出する。

ここでは調和解析結果との関係式(20)~(24)式を用い、(12)式の $A_n, B_n, \bar{R}_n, \bar{\varepsilon}_n$ を求めると2 cmの層では次の値を得る。

$A_0 = 38.97$ となりこの値は測定値の最大、最小値の平均値38.15に当る。

$$A_1 = -10.66, \quad A_2 = -1.50, \\ B_1 = -8.25, \quad B_2 = -0.21 \\ \bar{R}_1 = 13.00, \quad \bar{R}_2 = 1.51, \\ \bar{\varepsilon}_1 = 238.65, \quad \bar{\varepsilon}_2 = 266.03$$

これより地温日変化の表現式において、半日項の影響が調和解析結果の表現式である(14)式よりも大きく軽減されることが示される。もちろんこれは計算の簡素化のために近似値 $\gamma = 0.8$ として \bar{R}_2 を小さくしたもので γ をより正確にとると一層 \bar{R}_2 を小さくすることができる。

4 cmの層の場合は次の様になる。

$$a_1 = -6.24, \quad a_2 = 1.56, \\ a_3 = 0.10, \quad a_4 = 0.17 \\ b_1 = -5.91, \quad b_2 = 2.51, \\ b_3 = -0.38, \quad b_4 = -0.24 \\ R_1 = 8.60, \quad R_2 = 2.94, \\ \varepsilon_1 = 226.56, \quad \varepsilon_2 = 391.86$$

2 cmの場合と同様にして、 $A_0 = 36.26$ (測定値の最大、最小値の平均値35.85)

$$A_1 = -5.96, \quad A_2 = -1.04,$$

$$B_1 = -7.33, \quad B_2 = -0.96$$

$$\bar{R}_1 = 9.44, \quad \bar{R}_2 = 1.42,$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = 219.13, \quad \bar{\varepsilon}_2 = 227.2$$

となる。

5. 結 び

夏季、浅層砂土の表層部に形成される風乾域の地温変動は、下層部の湿潤域の地温変化、あるいは接地気層の気温変化にも大きな影響を与える。ここでは風乾域内の熱拡散係数 κ を一日の周期変動する量として与え、この仮定に基づく熱伝導方程式の解が風乾域内の地温日変化を良く表現出来ることを示した。以下要約すれば次のようである。

1) 表層部に形成される風乾域の地温日変化は

$$\theta = \theta_0 + \bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\varepsilon}_1)$$

なる単項で表現可能で実測値とよく一致する。

2) (13)式に示す追加項の $-\gamma \sin \omega t$ は熱拡散係数の日変化に起因する項であることが方程式の解から理解される。

以上の2項が得られた結論である。ここで示した地温日変化を $\bar{R}_1 \sin(\omega t - \gamma \sin \omega t + \bar{\varepsilon}_1)$ またはかかる項の級数として $\sum \bar{R}_n \sin[n(\omega t - \gamma \sin \omega t) + \bar{\varepsilon}_n]$ にて表現する方法に対比して、従来からの調和級数で表現して議論されている砂土の熱特性値の算出等の種々の研究を今一度検討する提案がなされてもよいのではないかと思われる。

終りにこの論文の作成に当り適切な助員を頂いた松原茂教授(九州共立大)に深謝の意を表す。

また観測に多大な協力を頂いている一ノ瀬和雄技官(長崎大学)および長崎県建設大学校に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Jackson, R.D. and D. Kirkham: Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 22 (6), pp. 479~482, 1958.
- 2) 松原茂・武政剛弘・薦田広章: 気温日変化の一表現法について、九州の農業気象, 18, pp. 12~17, 1981.
- 3) 松田昭美・神近牧男・安東登志広: 砂丘地の地面付近における温度の垂直分布について、砂丘研究, 16, pp. 9~13, 1977.
- 4) 野村安治・井上光弘: 散水後の乾砂層の発達とその特性, 砂丘研究, 18, pp. 27~33, 1979.
- 5) 新庄 彬: 温度コウ配下における土壌内の水蒸気移動について、農土論集, 69, pp. 8~12, 1977.

- 6) 新庄 彬・松田昭美・神近牧男：砂丘地（裸地）における土壌の水分及び温度分布に関する一考察, 砂丘研究, 27 (2), pp. 64~74, 1980.
- 7) 寺沢寛一：数学概論, 岩波書店, pp. 461~466, 1967版.
- 8) Tetsuo KOBAYASHI, Akiyoshi MATSUDA, Makio KAMITIKA, Tomoaki SATO : Studies of the Dry Surface Layer in a Sand Dune Field (1) Modeling of the Dry Surface Layer of Sand under isothermal Steady Conditions. Agric. Meteor., 42 (2), pp. 119~127, 1986.
- 9) Van Wijk, W. R. : Physics of Plant Environment. North Holland Publishing Company, Amsterdam, pp. 140~142, 1966.