9 時の地温プロフィールによる 月平均日最高最低地温の推定 (1) 正弦変動モデルに基づく簡易な数値的方法

小林哲夫*・神近牧男**・松田昭美**

(* 島根大学農学部
** 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設)

Estimation of Monthly Mean Maximum and Minimum Soil
Temperatures from Profiles Taken at 9:00 A.M.

(1) A Simple Numerical Method Based on the Sinusoidal
Variation Model

Tetsuo KOBAYASHI*, Makio KAMICHIKA** and
Akiyoshi MATSUDA**

(* Faculty of Agriculture, Shimane University, Matsue 690)
(** Sand Dune Research Institute, Faculty of Agriculture,
Tottori University, Tottori 680)

1. はじめに

現在、気象官署では地温の観測は行われていない。しかし、地温は農業生産と深いかかわりを持っており、地温の特徴を生かす栽培技術、最適な地温を得るための調節技術、あるいは農産物や熱エネルギーの地下貯蔵などは、農業気象の分野における古くて新しい問題である (Geiger, 1961; 大後, 1980)。したがって、農業気象関係の観測所では継続して測定しているところが多い。鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設においても、昭和28年以来、1日1回、朝9時に地温計の読み取りが行われている。観測方法は次第に自動化される傾向にあるが、簡易さと安定性に勝る「1日1回、朝9時」方式を採用している機関等は少なくない。

約50 cmより深い層では地温の日変化はほとんどないので、そのような深層での地温の実態は1日1回の観測によって明らかになる。しかしそれより浅い層、特に約20 cmより上の表層部では日変化が大きく、ある時刻における鉛直プロフィールを知っても地温環境を把握したことにはならない。少なくとも日平均値と日較差、あるいは日最高最低地温をおさえる必要がある。

そこで、1日1回、朝9時に行われている地温観測結

果の有効利用を図るために、朝9時の地温プロフィールを用いて日最高最低地温の月平均値を推定する2種類の方法を考案した。本報では、地温変動の簡単なモデル (正弦変動モデル) に基づいて朝9時の地温プロフィールから日最高最低地温を推定する方法、およびその推定精度について示すことにする。日照時間を併用する第2の方法については次報で報告する (神近ら, 1986)。

2. 資料とその処理方法

本法を実際の場合に適用し、その推定精度を確かめるために、次の2種類の地温観測資料を用いた。

(a) 島根大学農学部 (松江市西川津町) の露場 (赤土、裸地) において、1984年に、白金抵抗温度計を用いて得られた資料。

(b) 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設 (鳥取市浜坂) の露場 (砂、裸地) において、1978年に、サーミスター温度計を用いて得られた資料。

自記記録から深さ5, 10および20 cmにおける毎正時の地温と日最高最低地温を読み取った。30 cmより深い層では日較差は小さく、赤土の場合は約1℃以下、砂の場合も約2℃以下であることから、朝9時の地温によって各深さの地温の実態を把握できるものと判断した。

各月ごとに毎正時地温の平均値を求めて月平均日変化曲線を描き、それに基づいて日最高最低地温の月平均値を求めた (Fig. 1)。また、本法の推定精度を判断する一

昭和60年5月30日および昭和61年5月31日全国大会にて発表

昭和61年6月19日 受理

つの尺度とするために、各月ごとの日最高最低地温の標準偏差を各深さについて求めた。

なお、積雪のある12月と1～3月は考察の対象から外した。

3. 原理と手順

土壌は均質であり、熱の流れは1次元的に、すなわち鉛直方向にのみ起こると仮定する。その他に、単純化に必要ないくつかの仮定を行うと、深さ z (cm)、時刻 t (h)における地温 $\theta(z, t)$ (°C)は次式で与えられる(正弦変動モデル)(Wijk, 1966)。

$$\theta(z, t) = \theta_m + \theta_a \exp(-z/D) \times \sin(\omega(t - t_0) - z/D) \quad (1)$$

ここで θ_m は日平均地温で深さによらず一定と見なされている。 θ_a は地表面($z=0$)における地温の変動振幅、 D は制動深さ(cm)、 t_0 は地表面温度が上昇して θ_m と一致する時刻である。このように、正弦変動モデルは4個のパラメーターを含んでいる。 ω は角振動数で、日変化を対象とする場合は $\pi/12 \text{ h}^{-1}$ となる。

Fig. 1の実線は資料(a)の4月の平均日変化曲線、点線は正弦変動モデルによるその近似曲線を示す。月平均日変化曲線を対象とすれば正弦変動モデルによる近似は比較的良く、深さと共にその近似度は増すことが分かる。なお、この近似曲線は朝9時の地温(白丸)から本法によって推定した結果の一例である。

正弦変動モデル(1)によれば、朝9時の地温は

$$\theta(z, 9) = \theta_m + \theta_a f(z; t_0, D) \quad (2)$$

ただし

$$f(z; t_0, D) \equiv \exp(-z/D) \times \sin(3\pi/4 - \pi t_0/12 - z/D) \quad (3)$$

と表現できる。任意の深さにおける地温変動が厳密に正弦変動モデルに従うならば、深さの異なる4点での朝9時の地温観測結果から、4個の未知パラメーター θ_m 、 θ_a 、 t_0 および D が決定できる。しかし、Fig. 1に示したように、実際には近似的にこのモデルに従うにすぎないので、必ず誤差が伴う。しかも、これらの解はまったく自由度を持たないので、これは処理不能な誤差である。そこで、パラメーターの1個を別途定める方式にして、誤差処理に柔軟性を持たせることにする。

地表面温度が上昇して日平均値に達する時刻 t_0 の出現範囲は、中緯度地方では、1年を通して2～3時間以内にあると考えられる。各月ごとに平均値を求めるならば、土壌状態が平年と著しく違わない限り、暦の上での日の出時刻に基づいて約30分の精度で定められることが次の推定例より分かる。

Fig. 2は松江市と鳥取市における日の出時刻と、島根大学農学部(資料(a))と鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設(資料(b))における t_0 の推定値を示す。推定方法の説明は次節で行うが、これらの結果から、粘質土の裸地の場合は日の出時刻から約2時間15分後、砂質土の裸地の場合はそれより更に15～30分後と見なすことができる。ただしこれらの値は、実際に地表面温度が日平均値に達する時刻そのものとはやや異なる(神近ら、

Fig. 1. Monthly mean curves of diurnal soil temperature variations. The solid lines represent the measurements made at 5, 10 and 20 cm depth in the bare observation field of Shimane University during the month of April, 1984; the dotted lines the estimates made from the monthly mean temperatures taken at 9:00 A.M. (open circles), using the present model.

Fig. 2. Seasonal variations of t_0 for bare observation fields.

The solid and the open circles represent the estimates of t_0 for the fields of Shimane University (clay), Matsue and Sand Dune Research Institute, Tottori University (sand), Tottori, respectively; two curves in the lower part the times of sunrise at Matsue and Tottori. See text for explanation.

1986)。地温変動は正弦変動モデルに従うとする仮定に伴うひずみが、これらの値の中に吸収されていると考えなければならない。

残る3個のパラメーターは以下のようにして決定できる。

日平均地温 θ_m は深さによらず一定と仮定しているので、地温観測点の中からこの条件をできるだけ満たすと考えられる3点 z_1, z_2 および z_3 を選び、各深さにおける9時の地温 $\theta(z_1, 9)$, $\theta(z_2, 9)$ および $\theta(z_3, 9)$ の高低を比較する。

最も温度差が大きくなる組み合わせを z_i, z_j ($i, j = 1, 2, 3$) とし、その差を

$$\begin{aligned} \theta(z_i, 9) - \theta(z_j, 9) &= \theta_a \{f(z_i; t_0, D) \\ &\quad - f(z_j; t_0, D)\} = \theta_a \Phi(z_i, z_j; t_0, D) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Phi(z_i, z_j; t_0, D) &\equiv f(z_i; t_0, D) \\ &\quad - f(z_j; t_0, D) > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

とおく。温度差が2番目の大きさになる組み合わせを z_k, z_l ($k, l = 1, 2, 3$) とすると、

$$\theta(z_k, 9) - \theta(z_l, 9) = \theta_a \Phi(z_k, z_l; t_0, D) \quad (6)$$

となる。このとき関数 Ψ を

$$\begin{aligned} \Psi(z_1, z_2, z_3; t_0, D) &\equiv \frac{\theta(z_k, 9) - \theta(z_l, 9)}{\theta(z_i, 9) - \theta(z_j, 9)} \\ &= \frac{\Phi(z_k, z_l; t_0, D)}{\Phi(z_i, z_j; t_0, D)} \end{aligned} \quad (7)$$

のように定義すれば、次の関係を満たす。

$$0.5 \leq \Psi \leq 1.0 \quad (8)$$

関数 Ψ は2個のパラメーター t_0 と D を含む。上述のように、 t_0 は約30分の精度で決められるから、(8)式の関係から、それに対応する D の範囲も定まるはずである。これを実例によって見てみる。

Fig. 3 は $z_1 = 5$ cm, $z_2 = 10$ cm および $z_3 = 20$ cm とした場合の2例を示す。Fig. 3 (A) は $i = k = 3, j = 2, l = 1$ の場合、すなわち

$$\begin{aligned} \Psi(5, 10, 20; t_0, D) &= \frac{\theta(20, 9) - \theta(5, 9)}{\theta(20, 9) - \theta(10, 9)} \\ &= \frac{\Phi(20, 5; t_0, D)}{\Phi(20, 10; t_0, D)} \end{aligned}$$

となる場合である。これは初秋に観測される型であるので、 t_0 の範囲としては8時から8時30分までを示した。実線は Ψ の等値線を示す。 Ψ が(8)式の関係を満たす D の範囲は約6.5~10.5 cmと判断される。しかし Ψ の値が決まれば、たとえば $\Psi = 0.75$ であれば、その範囲は狭まって約7.9~9.2 cmとなる。

Fig. 3 (B) は $i = k = 1, j = 2, l = 3$ の場合、すなわち

$$\begin{aligned} \Psi(5, 10, 20; t_0, D) &= \frac{\theta(5, 9) - \theta(20, 9)}{\theta(5, 9) - \theta(10, 9)} = \frac{\Phi(5, 20; t_0, D)}{\Phi(5, 10; t_0, D)} \end{aligned}$$

の場合である。これは春から夏にかけて観測される型であるので、 t_0 の範囲としては7時から7時30分の間を示した。この場合は D が約9~12 cmの範囲内にあるとき Ψ は(8)式の関係を満たす。(A)の場合と同様に $\Psi = 0.75$ に注目すれば、 D の範囲は約9.8~11 cmとなる。

このようにして、 t_0 の値と朝9時の地温プロフィールから(7)式によって計算される Ψ の値に基づいて、制動深さ D の値を約1 cmの精度で推定できることが分かる。 t_0 と D の推定値 t_0^* と D^* が求まれば、(4)式の関係から地表面における振幅 θ_a が推定でき、その値 θ_a^* は

Fig. 3. Illustrative examples of estimating the damping depth. The solid, the dashed and the dotted lines represent the isopleths of function Ψ , Φ and $|f|$, respectively. See text for explanation.

$$\theta_a^* = \{ \theta(z_i, 9) - \theta(z_j, 9) \} / \Phi(z_i, z_j; t_0^*, D^*) \quad (9)$$

となる。したがって θ_a の推定精度は t_0 と D の推定精度に依存する。

Fig. 3 の破線は関数 $\Phi(z_i, z_j; t_0, D)$ の等値線である。(A) は $\Phi(20, 10; t_0, D)$ 、(B) は $\Phi(5, 10; t_0, D)$ の等値線を示す。(A) の場合は、破線群と関数 Ψ の等値線である実線群は平行に近い状態にあるので、 Ψ の値が実測値と一致するような t_0 と D の組み合わせを選べば、それらの推定誤差が θ_a の推定値に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかし、(B) の場合は、破線群と実線群の交角が大きいため、 θ_a の推定値に対する t_0 と D の推定誤差の影響は免れえないが、その程度は 10 数%以内と見なしてよい。

以上のようにして t_0 、 D および θ_a の推定値 t_0^* 、 D^* および θ_a^* が得られたならば、(2) 式の関係より θ_m^* の推定値 θ_m^* が得られる。すなわち

$$\theta_m^* = \theta(z, 9) - \theta_a^* f(z; t_0^*, D^*) \quad (10)$$

この場合も、 t_0 と D の推定誤差の影響が、 θ_a^* を通して間接的に、また $f(z; t_0^*, D^*)$ の形で直接的に θ_m の推定値に及んでいる。

Fig. 3 の点線は、朝 9 時の地温が 3 点のうちで中間の値をとる深さ、すなわち (A) では $z = 5$ cm、(B) では $z = 20$ cm における関数 $|f(z; t_0, D)|$ の等値線を示す。これらより、 t_0 と D の推定誤差が f の値に及ぼす影響も、やはり 10 数%になりうる事が分かる。

このようにして得られたパラメーターの推定値を次式に代入すれば、任意の深さ z における日最高最低地温

$\theta_{\max}(z)$ と $\theta_{\min}(z)$ が推定できることになる。

$$\begin{aligned} \theta_{\max}(z) &= \theta_m + \theta_a \exp(-z/D) \\ \theta_{\min}(z) &= \theta_m - \theta_a \exp(-z/D) \end{aligned} \quad (11)$$

以上の原理と手順を要約すれば次のようになる：

- (i) 日の出時刻に基づいて、パラメーター t_0 を推定する。
- (ii) 朝 9 時の地温プロファイルから計算した Ψ の値と t_0 の推定値に基づいて、数値的に D の最適値を探索する。
- (iii) t_0 と D の推定値に基づいて θ_m と θ_a を推定し、それらを用いて任意の深さにおける日最高最低地温を求める。

3. 適用結果と考察

3.1 パラメーターの推定

地表面温度が上昇して日平均値に達する時刻 t_0 の推定結果は既に前節で示したが(Fig. 2)、それらは次のようにして求められた。

深さ $z = 5, 10$ および 20 cm における朝 9 時の地温の月平均値から Ψ の値を求め、 t_0 を適当な範囲で変化させて D と θ_a を定め、各深さにおける地温の月平均日較差 $2\theta_a \exp(-z/D)$ を計算した。これらの値を実測値と比較し、各深さにおける両者の合致度を総合的に判断して t_0 の最適値を定めた。その結果が Fig. 2 の黒丸と白丸である。このようにして得られる最適値は、異なる年の資料を用いれば異なる結果になる(神近ら, 1986)。図上に重ねて描かれた曲線は、同図下部の日の出時刻曲線を参考にして推測した t_0 の平年期待値を示す。

Fig. 4 と Fig. 5 は上述の月平均日較差を示し、それぞれ資料(a)と(b)に関する結果である。点線は t_0 の最適値を用いて計算した推定値で、実線で示される実測値と比較すれば、較差が小さい深さ 20 cm の秋(9~11月)の結果を除いて、推定精度は 10 数%以内であることが分かる。一点鎖線は t_0 の平年期待値を用いて求めた推定値を示すが、特に Fig. 5 の資料(b)の場合は 20~30% の誤差が生じる月もある。これは砂地における t_0 の値が年によってかなり変動することを意味する。 t_0 は降水量や日照時間等にも依存していると考えられるので、一種の気候統計量(確率変数)としてとらえる必要がある(小林, 1982)。

次に、日平均地温 θ_m の月平均値を推定したが、 t_0 と

Fig. 4. Monthly mean diurnal ranges of soil temperatures.

The solid lines represent the measurements made at 5, 10 and 20 cm depth in the bare observation field of Shimane University (clay), 1984; the dotted and the dash-dotted lines the estimates made by using the optimum and the expected values of t_0 , respectively. See text for explanation.

Fig. 5. Same as Fig. 4 for the bare observation field of Sand Dune Research Institute, Tottori University (sand), 1978.

して最適値を用いるか平年期待値を用いるかによる違いは、上述の日較差の場合ほど大きくはなかった。正弦変動モデルでは θ_m は深さによらず一定と見なしているが、実際には深さと共に変化する。そこで、深さ 5, 10 および 20 cm における実測値の平均をとって推定値と比較してみた。春(4, 5月)は推定値がやや低く、夏(6~8月)も同様であるが、その差は更に広がって 1°C 程度にまでなる。しかし秋(9~11月)になると両者はほぼ等しくなり、逆に推定値がやや高い月もある。これらは双方の資料の場合に共通した特徴である。

3.2 月平均日最高最低地温の推定

Fig. 6 と Fig. 7 は深さ 5 cm と 20 cm における月平均日最高最低地温を示し、それぞれ資料(a)と(b)に関する結果である。実線は深さ 5 cm における実測値、破線は深さ 20 cm における実測値を示す。点線は t_0 の最適値を用いて計算した推定値であり、一点鎖線は、Fig. 4 および Fig. 5 の場合と同様、 t_0 の平年期待値を用いて推定した結果である。

Fig. 6. Monthly mean maximum and minimum soil temperatures.

The solid and the dashed lines represent the measurements made respectively at 5 and 20 cm depth in the bare observation field of Shimane University (clay), 1984; the dotted and the dash-dotted lines the estimates made by using the optimum and the expected values of t_0 , respectively. See text for explanation.

Fig. 7. Same as Fig. 6 for the bare observation field of Sand Dune Research Institute, Tottori University (sand), 1978.

資料(a)の赤土の場合、深さ 5 cm では推定値は実測値よりも低くなる傾向があり、特に春から夏にかけては 1~3°C 低い (Fig. 6)。しかし、秋になるとその差は 1°C より小さくなる。深さ 20 cm における推定精度は極めて良く、誤差は 1°C を越えない。深さ 10 cm での結果は図示していないが、両者の中間的な特徴が見られる。

資料(b)の砂の場合も、赤土のそれとほぼ同様な傾向を示す (Fig. 7)。砂は赤土などと比べて均質度の高い媒体のように思われるが、表層部に限れば逆である。砂地では極めて乾燥した表層(乾砂層)が形成されやすく、明確な 2 層構造を成すことになるからである (Kobayashi et al., 1986)。したがって、乾砂層の発達程度によって条件が著しく変化するために、深さ 5 cm における推定精度、特に日最高地温に関する精度は安定しないと考えられる。

4. 結 論

表層部の地温の月平均日変化曲線を単純な正弦変動モデルで近似し、朝 9 時の地温プロファイルから任意の深さにおける日最高最低地温の月平均値を推定する方法を考案した。また、本法を裸地露場(赤土と砂)における地

温観測結果に適用し、その推定精度を検討した。得られた主な結論は次の通りである：

(i) モデルのパラメーターである t_0 は暦の上での日の出時刻に基づいて約 30 分の精度で推定できる。粘質土の裸地の場合は日の出時刻の 2 時間 15 分後、砂質土の裸地の場合はその 15~30 分後が一つの目安となる。

(ii) 本法によって推定した深さ 5 cm における日最高最低地温の月平均値は、実測値よりも低くなる傾向がある。しかし、4 月から 8 月までの推定値に 2°C を加えると、4 月から 11 月までの推定誤差はほぼ 1°C 以内に入る。これを 1 か月間の日最高最低地温の標準偏差と比較すると、散らばりが最も小さい 8 月の標準偏差よりも更に小さい。

(iii) 深さ 20 cm に関する推定精度は良く、特に日最低地温についての誤差は 0.3°C 以内である。日最高地温についても、誤差が 1°C に達することはまれである。

本法は近似的な正弦変動モデルに基づいていること、また必要な資料は暦の上での日の出時刻と朝 9 時における地温観測結果だけであることを考慮すれば、ここで得られた推定精度は十分に高いものと考えられる。

謝 辞

資料の整理を行うに際しては、島根大学農学部の中三保秀文氏(現・広島県)と鳥取大学農学部の糸谷勝仁氏(現・西谷技術コンサルタント)のご協力をいただいた。記して深謝の意を表する。

引用文献

- 大後美保, 1980: 新編農業気象学通論, 養賢堂, 33-48.
- Geiger, R., 1961: *The climate near the ground*. Oxford University Press, London, 1-611.
- 神近牧男・小林哲夫・松田昭美, 1986: 9 時の地温プロファイルによる月平均日最高最低地温の推定(2) 日照時間を併用する方法, 農業気象, **42**, 231-237.
- 小林哲夫, 1982: 小気候の定義と表現について, 農業気象, **38**, 303-306.
- Kobayashi, T., Matsuda, A., Kamichika, M. and Sato, T., 1986: Studies of the dry surface layer in a sand dune field (1) Modeling of the dry surface layer of sand under isothermal steady conditions. *J. Agr. Met.*, **42**, 113-118.
- Wijk, W. R. van (ed.), 1966: *Physics of plant environment*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 102-112.

Summary

At many agricultural meteorological stations, soil temperatures are observed once a day at 9:00 A.M. In the upper soil layers, however, the temperature fluctuates widely during the course of a day, and the vertical profile taken at a time of day is not sufficient for an understanding of the soil temperature regime. Thus, it is desired to evolve a method for utilizing the observations made at 9:00 A.M. as fully as possible.

We constructed a simple numerical method for the purpose of estimating the monthly mean maximum and minimum temperatures in the upper soil layers from the monthly mean profile taken at 9:00 A.M., and examined the accuracy of the estimation, using the data obtained in the bare observation fields of Shimane University (clay) and Sand Dune Research Institute, Tottori University (sand).

In the present method, monthly mean curves of diurnal temperature variations at all depths are approximated by pure sinusoidal functions of time around a mean which is constant throughout the layers. The approximation becomes better with increasing depth. The function has four parameters, that is, the daily mean, the amplitude at the surface, the damping depth and the instant at which the surface temperature is at its mean and increasing. The last one averaged over a month can be estimated within half an hour from the time of sunrise; the instant comes about 2 hours and 15 minutes after sunrise in bare clay fields and 15 to 30 minutes further behind it in bare sand fields. The other three parameters are estimated numerically from the instant and the monthly mean temperatures observed at three depths at 9:00 A.M.; then the maximum and minimum temperatures are calculated by using the estimates of the parameters.

Results obtained by the analyses of the two sets of data above are similar in trend. The estimated values of monthly mean maximum and minimum temperatures at a depth of 5 cm are about 1 to 3°C lower than the observed ones in the spring and summer months, but are in fair agreement with the observations in the autumn months. The accuracy of the estimated values at 20 cm depth is about $\pm 1^\circ\text{C}$ for the maximum and about $\pm 0.3^\circ\text{C}$ for the minimum. The accuracy is quite satisfactory in view of the approximated character of the present method and the fact that only the time of sunrise and the soil temperature profile taken at 9:00 A.M. are needed to utilize the method.