

熱的に層化した土壌での熱的特性値の評価

1) まえがき

長崎大学工学部

正〇武政剛弘

学 井上 剛

武田知行

浅層土壌内の地温変動の解析あるいは予測を行うことは、工学的にも農学的にも重要な事柄である。これには野外において土壌の熱的特性値を決定することが必要となる。しかし浅層土壌内の土は、一般に表面は外気に接しており、加えて植生や人工構造物が存在するために境界条件としての熱収支は複雑である。しかもこれに対応して、土壌のもつ熱的特性値も変化するために、浅層土壌内での温度挙動の解明には複雑・多岐にわたる多くの問題点が現在でも取りざたされている。

ここでは、これらの問題解決の一端として、解析解による地温変動の説明を試みたので報告する。

2) 熱的に層化した土壌内の熱伝導方程式の解析解への展開

浅層土壌内の地温解析に関しては、次のような問題が挙げられる、夏季の日射量が大きい条件下では、材質が均質な土壌でも表層部と下層部とに急激な含水比の変化がみられる。しかも上層部では、地温勾配に伴う水分の移動や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する。さらに接地気層内の風の影響などの多く外的要因も考慮されなければならない。しかしながらすべての要因を加味した解析は複雑であり、かつ実用には即さない。したがって問題の簡素化のために、熱伝導に大きく影響をおよぼす土壌の含水比の分布に着目し、これに対応して変化する土壌の熱伝導率： λ (W/m・K)、体積熱容量： C (J/m³・K)、より得られる熱拡散係数： α (cm²/s) = λ / C を場所の関数として取り扱った解析を行う。したがって熱伝導方程式は次式となる。

$$\partial \theta / \partial t = \partial \theta / \partial z (\alpha \cdot \partial \theta / \partial z) \cdots (1)$$

(1)式の差分による数値解の結果を図-1に示す。境界条件としては、表面が一日周期変動するとして

$$\theta(0, t) = 40 + 15 \sin(\omega t) \cdots (2) \quad \text{で与えている。}$$

計算に用いた土壌内部の熱拡散係数は、図中に示すように3通りの分布を仮定した。結果、含水比分布の躍層部で急激な変化をする現実に近い α の計算例に比した場合、他の2つの分布は、温度勾配が大きい場合には多少の差が生じている。この差については、仮定する熱拡散係数値に地温変動が大きく依存することを考えれば、適切な α を得ることで差を少なくすることは可能と考えられる。しかしこの時の上層部の α の決定については問題が残る。したがって、上層部の熱拡散係数を一定とすることが可能であれば、(1)式は線形となり、解析解が得られることになる。この解からは、土壌が層状化するために生じる表面の温度振幅への影響、地温の深さ方向への減衰状況あるいは土壌の保温効果等の温度挙動に関する現象を定量的にかつ式でもって表現可能にならしめる有利な面が生じる。

3) 二層状態で解析解および考察

上下層の土壌の熱的特性値にサフィックス 1、2 を付けて区別する。熱流は z 方向のみの一次元流と仮定する、この場合の式は上層部の厚さ d を境に2つの式に表現される。

$$\partial \theta_1 / \partial t = \alpha_1 \cdot \partial^2 \theta_1 / \partial z^2 \quad (0 < z < d) \cdots (2) \quad \partial \theta_2 / \partial t = \alpha_2 \cdot \partial^2 \theta_2 / \partial z^2 \quad (d < z < \infty) \cdots (3)$$

(2)式を境界面にて地温、熱流束が連続、表面温度 $\theta_1(0, t) = \theta_2 \sin \omega t \cdots (4)$ の境界条件のもとでの解は、

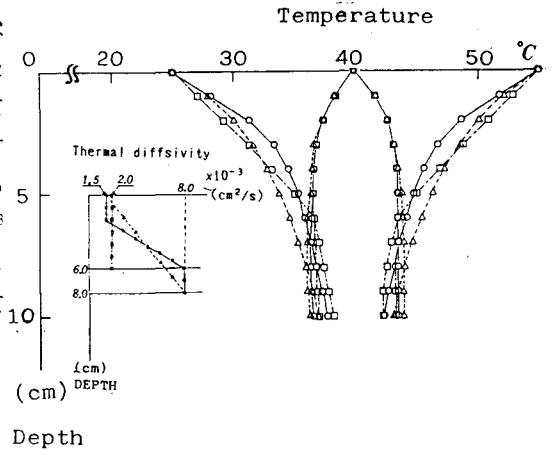


図-1 モデル別の数値計算例

$$\theta_1(z,t) = {}^A\theta'_1 \exp(-z/D_1) \cdot \sin(\omega t - z/D_1 + \phi_1) + {}^A\theta''_1 \exp(z/D_1) \cdot \sin(\omega t + z/D_1 + \phi_1) \quad \dots\dots(5)$$

$$\theta_2(z,t) = {}^A\theta_a \exp\{-(z-d)/D_2\} \cdot \sin[\omega t - \{(z-d)/D_2\} + \phi_2] \quad \dots\dots(6)$$

となる。ここに $D_1 = (2\lambda_1/C_1 \cdot \omega)^{1/2} = (2\alpha_1/\omega)^{1/2}$ であり減衰深(Damping depth)をしめす。

上層部の解は、進行波と境界面にて生じる後退波の和となっている。下層部は、座標原点を $Z = d$ にずらせば、均質な物質での一般的な熱伝導の解となる。そこで上層部の解を複雑にしている後退波の存在について述べる。

後退波を生じている境界面での熱流束の反射率については、次式で表される。

$$\gamma_f = (1+\eta)/(1-\eta) \quad , \quad \eta = \{(\lambda_2 \cdot C_2)/(\lambda_1 \cdot C_1)\}^{1/2} \quad \dots\dots(7)$$

この値は、前述の減衰深と同様に解析解に含まれる重要なパラメーターとなっている。図-2 に γ_f の変化を示す。 $\eta=1$ の場合は均質な土壌となり $\gamma_f = 0$ で後退波は存在しないことを示す。 $\eta>0$ の場合は $\gamma_f < 0$ となり、上層の熱を下層に伝導させる様な後退波の存在を示す。 $\eta=0$ の場合は下層部は完全な断熱材であり $\gamma_f = 1$ の完全反射となっている。

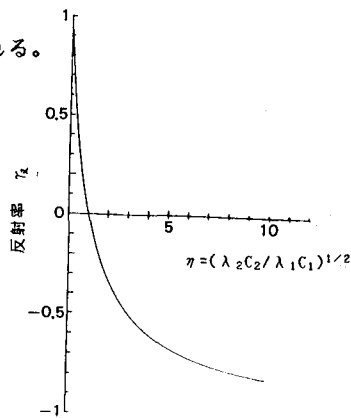


図-2 境界面における反射率 γ_f の変化

$$\frac{{}^A\theta'_1(z) \exp(-z/D_1) \{1 + \gamma_f^{-2} \exp(4d/D_1) + 2\gamma_f^{-1} \exp(2d/D_1) \cos(2d/D_1)\}^{1/2}}{{}^A\theta''_1(z) \exp(z/D_1) \{1 + \gamma_f^2 \exp(-4d/D_1) + 2\gamma_f \exp(-2d/D_1) \cos(2d/D_1)\}^{1/2}} \quad \dots\dots(8)$$

図-3 に上層部の表面、中央の層、境界層での変化を示す。上下層の物質としては、 $\eta=2$ として下層部に熱伝導性の良好な物質が存在する場合を考えている。図から上層部の厚さ d が D_1 の2倍以上になると中央層でも進行波の振幅が約6倍くらいになっており、進行波自身の振幅を考えると後退波の影響はほぼ消滅すると考えられる。したがって $d/D_1=3$ 以上となると、均質な土壌として取り扱っても良い厚さと考えられる。次に上層部の厚さ d が表面温度振幅にどの程度影響しているのかを図-4 に示す。この関係式は次式である。

$$\frac{{}^A\theta_s}{{}^A\theta_h} = \frac{\{\exp(4d/D_1) + 2\gamma_f \exp(2d/D_1) \cdot \cos(2d/D_1) + \gamma_f^2\}^{1/2}}{\{\exp(4d/D_1) - 2\gamma_f \exp(2d/D_1) \cdot \cos(2d/D_1) + \gamma_f^2\}^{1/2}} \quad \dots\dots(9)$$

$\eta < 1$ の場合は、図-1 に示す様に境界面で熱流束の反射が大きくなり d の厚さが小さいほど温度変化が大きくなっている。しかも、 $d/D_1 = \pi/4$ の厚さでは上下層の物質に関係なく二層化の影響が消え、それ以上の厚さになると、現象が逆転している。さらに図は、上層部が $d/D_1=2$ 以上の厚さになると前述の様に二層の影響も消滅することも示している。

今回は理論解による考察の域を脱していないが、今後は現場への適用を図り土壌の複雑な熱挙動の解明に努めたい。(参考文献) 1] Van Wijk W.R.: Physics of Environment. PP.172-174. Amsterdam 2] 武政, 他 浅層土壌内の熱的特性値の算出方法について. PP.434-444. 土木西部支部講演. 1986

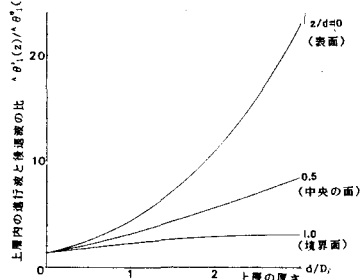


図-3 上層部の各層での進行波と後退波の温度振幅の比

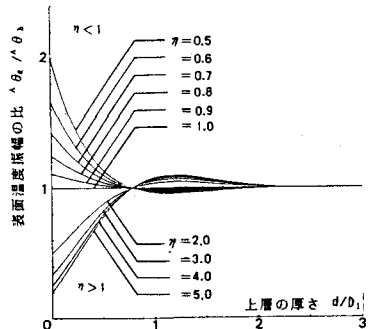


図-4 二層(${}^A\theta_s$)、単層(${}^A\theta_h$)の表面温度振幅の比