

長崎大学工学部 正員 ○深田三夫
武政剛弘

1. まえがき 地表面付近の温度は、地中の土壌の熱的特性 および表面における熱収支によって定まると考えられる。たとえば、道路においては、路体材料、舗装材料などの熱的特性が路体中の温度変化に大きく影響し、道路の施工、および維持の点において、路体中の温度を時間的、場所的に予測することが重要な課題の一つにあげられている。路体中の温度変化は、その物質の熱的特性、たとえば熱拡散係数 $\alpha = k/\rho c$ (k : 熱伝導係数, c : 熱容量, ρ : 密度) に大きく左右される。今、熱拡散係数 α の値を、 $\alpha = 10.3 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ から 25% 減じた α の値をもつ物質に置き換えると、凍結深さは 13% 減じ、また $\alpha = 7.7 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ から 33% 減じた α の値をもつ物質に置き換えると、凍結深さは 19% 減少することが理論的に予測されている。そこで筆者らは屋外に設定した単層、及び二層（砂、及び砂-砕石）のモデルで供試体中の温度を測定することによって、路体中の温度の挙動に対する、基礎的資料を得ようと試みたものである。

2. 解析方法と測定結果 座標軸は地表面より鉛直下方に x 軸をとリ、地表面を $x=0$ とする。熱流は x 方向のみに生ずると仮定できるので、任意の深さ x 点での熱流の連続の式を考えると、 $\partial T/\partial x = \alpha \partial^2 T/\partial x^2 \dots (1)$ を得る。ここで境界条件として、表面における温度を、実際はいろいろな熱的要素が加わっているので、フーリエ級数で与え、又、無限の深さにおける温度は、表面での平均温度とする。そうすれば、充分時間が経過した後の定常解は、フーリエ級数の形として与えられるが、実際の観測においては主要な熱源は、一日周期による太陽熱と考えられるので、一日項のみに着目して解を書き出すと、 $T(x,t) = T_m + T_1 \exp(-\frac{x}{D_1}) \sin(\omega t - \frac{x}{D_1} + \epsilon_1) \dots (2)$ を得る次に任意の深さ x のところの温度の測定値を調和解析にかけ、一日項のみを採ると、 $T(x,t) = T_m + R_1 \sin(\omega t + \epsilon_1) \dots (3)$ となる。故に (2), (3) は同一でなくてはならないことより $\alpha = (x_1 - x_2)^2 / (\ln R_{1x_1} - \ln R_{1x_2}) \times \frac{\pi}{P} \dots (4)$ を得て α を決定できる。二層の場合も、上下層で、(1) 式が成立する。境界条件としては、表面も、無限の深さにおいても単層と同様の条件を満足し、上下境界面では、温度及び熱流が連続であるとして前述と同様の解を求めると、

$$T_1(x,t) = T_m + A_1 \exp(-\frac{x}{D_1}) \sin(\omega t - \frac{x}{D_1} + \epsilon_1) + A_1' \exp(\frac{x}{D_1}) \sin(\omega t + \frac{x}{D_1} + \epsilon_1') \dots (5) \quad (0 \leq x \leq d)$$

$$T_2(x,t) = T_m + A_2 \exp\{-\frac{(x-d)}{D_2}\} \sin\{\omega t - \frac{(x-d)}{D_2} + \epsilon_2\} \dots (6) \quad d \leq x$$

になる。(5), (6) 式中の A_d は境界層における温度の振中であり、(6) 式は $x=d$ を原点に考えると、均一物質における (2) 式と同じ形をとっている。 $D = \sqrt{2k/\rho c \omega} = \sqrt{2\alpha/\omega} = \sqrt{T_0/\pi} \dots (7)$ で与えられる量は damping depth と呼ばれ、 D だけ深くなると振中は元の $1/e$ に減衰することを示す量である。又、 ω は角速度で、 T_0 は周期である。

次に測定結果について考えてみる。まず各層の温度変化をみてみると、図 1, 2 に示されているように、砂、及び、砂-砕石のモデルにおいて、温度に顕著な差があらわれている。特に、二層モデルにおいては、6 cm の境界層において顕著な温度飛躍が見られ、これは砂-層の場合には見られない現象であるから二層による影響のためと考えられる。又、前述の (4) 式を用いて、図 (1), (2) の直線の勾配より、 α を決定すると、表 1 のようになっている。

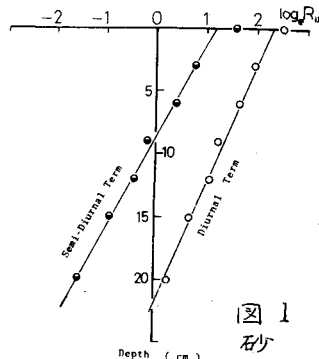


図 1
砂

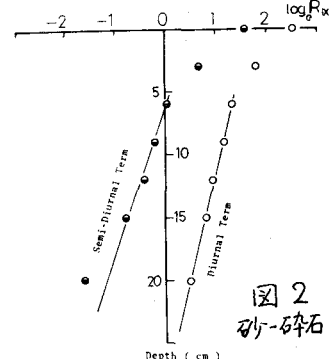


図 2
砂-砕石

なお、二層の場合の上層の α の決定は、式が複雑なため、上、下層の K, C, ρ の正確な値が得られないため、に除外した。

表 1

	碎石(二層)	砂(一層)
8/23	$\alpha_2 = 9.85 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ $V = 104.9 \text{ (cm/day)}$ $\lambda = 104.9 \text{ (cm)}$	$\alpha_1 = 3.58 \times 10^{-3}$ $V = 62.2$ $\lambda = 62.2$
10/30	$\alpha_2 = 5.99 \times 10^{-3}$ $V = 80.7$ $\lambda = 80.7$	$\alpha_1 = 4.95 \times 10^{-3}$ $V = 73.3$ $\lambda = 73.3$

次に、温度振中の減衰について二つのモデルを比較するために、一日項、及び半日項に関して、平均温度を中心とした、深さ方向の温度振中を図3に示した。これによると、各層の平均温度は、石層が、二層の場合に較べて、常に高い値を示している。そして振中に対しては境界層までの深さについて、一層と二層の場合を比較してみると、同一の砂でありながら、二層の方がはるかに大きく減衰している。しかし境界層以下になると、二層の方の振中の減衰は一層の方より緩慢になっている。今、二層の場合の表面と、境界面の、温度振中の比は、 $(A_d/T_1)_2 = (1+r_2)e^{-\frac{D_2}{\lambda_2}} / \{1+r_2e^{-4\frac{D_2}{\lambda_2}} + 2r_2e^{-2\frac{D_2}{\lambda_2}} \cos(2\frac{D_2}{D_1})\}^{\frac{1}{2}}$ (8) ここで $r_2 = (\sqrt{K_1C_1\rho_1} - \sqrt{K_2C_2\rho_2}) / (\sqrt{K_1C_1\rho_1} + \sqrt{K_2C_2\rho_2})$ で与えられる。一層の場合には、同じ深さの温度振中の減衰の比は $(A_d/T_1)_1 = e^{-\frac{D_1}{\lambda_1}}$ (9) である。そして前述の値を代入すると、 $(A_d/T_1)_2 = 0.42$ $(A_d/T_1)_1 = 0.55$ が得られる。すなわち、減衰率は二層の場合が大きく出ている。この値は観測値とほぼ一致している。次に、6

cm以下の層についての温度の減衰は、両者共 $e^{-\frac{D_1}{\lambda_1}}$ 、 $e^{-\frac{D_2}{\lambda_2}}$ によっている。この事は、前述のように、 $\sin \pi \text{ depth} : D$ の大小によって、振中の減衰割合が決定されることを示している。すなわち、前述と同様な値を用いると、 $D_1 = 9.9 \text{ cm}$ 、 $D_2 = 16.7 \text{ cm}$ となり、当然砂の方の減衰が大きくなることがわかる。以上の事により、上層の温度減衰は r_2 の値に左右され、又、境界層以下ではその物質の熱伝導係数が左右されている事がわかる。このことから、実際の場合、表面からの低温の浸入防止という点で、一層の方より、二層の場合が、かつ、上下層の熱的特性の差を大きくつけることが効果的であることを示している。次に温度の伝達速度について考えると解の形からわかるように、温度は振中を減衰しながら波動のように伝播している。そこで、伝播速度 $V \text{ (cm/sec)}$ 温度波長 $(\lambda \text{ cm})$ をとると $V = 2\sqrt{\alpha\pi\rho} = 2\pi D \text{ (cm/day)}$ 、 $\lambda = V \times P = 2\pi DP \text{ (cm)}$ となる。(Pは一日周期で24時間である。) 同様にして、前述の D_1, D_2 を使用して、 V, λ を求めた値を表1に示す。以上の事柄を、図4のような harmonic dial にあらわしてみると、深さ方向による温度振中の減衰と、最高温度の伝わり方が具体的にわかる。

3. 引用文献 i) 武政、深田; 砂及び碎石の熱伝導係数について、(長大工学部研究報告オ5号)

ii) 武政、深田; 砂及び碎石による二層の熱伝導について、(長大工学部研究報告オ6号)

iii) Van Wijk, W.R. and Dierken, W.J. Physics of Plant Environment, 1963, p 172-176

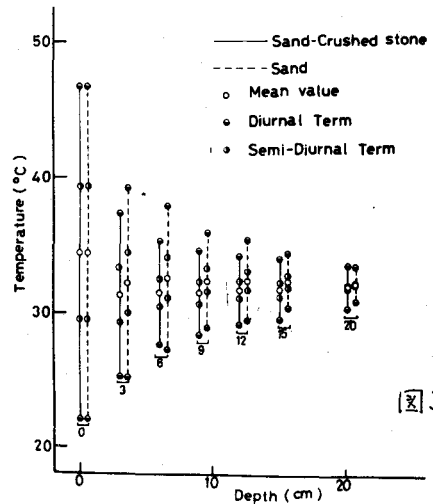


図 3

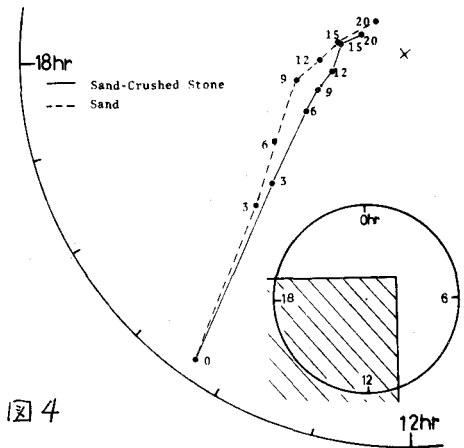


図 4