

## 砂丘地の微気象特性 ( I )

熱収支特性について

神 近 牧 男\*・松 田 昭 美\*・早 川 誠 而\*\*

## Micrometeorological Characteristics in a Sand Dune ( I )

On the Heat Balance Properties

Makio KAMICHIKA\*, Akiyoshi MATSUDA\* and Seiji HAYAKAWA\*\*

### Summary

The micrometeorological environment in which plants and animals live changes drastically within a few centimeters from the surface into the soil or into the air. The properties of this phenomena are conspicuous in a sand dune.

In this paper, we present the observation results of heat balance properties in a sand dune, and compared these results with the numerical experiments results. Numerical experiments for obtaining the diurnal changes in soil temperature were made by giving values to the boundary conditions, that is, the wind velocity, the air temperature and vapor pressure at a height of 100 meters, as well as the conductivity of the soil and the soil temperature at a depth of 1 meter.

The results obtained in this study can be summarized as follows;

( 1 ) When the heat capacity and heat conductivity are small, the soil temperature near the surface rises higher during the day and lower at night, compared with a large heat capacity and heat conductivity. These theoretical results coincide with the observation results.

( 2 ) In the case of a wet surface, latent heat flux increases, but energy storage in the soil is very complicated by the thermal properties of the soil.

As mentioned above, fairly reasonable agreement can be obtained between simulation experiments and observation results, but to predict more accurately the heat flux budget in a sand dune, we need to properly specify the degree of soil moisture and thermal property.

---

\* 砂丘利用研究施設砂丘環境部門

\*\* 九州大学農学部

\* Division of Meteorological Environment, Sand Dune Research Institute

\*\* Faculty of Agriculture, Kyusyu University

まえがき

砂丘地の気候学的あるいは気象学的調査については最近活発に行われるようになってきたが、砂丘地の微気象特性に関する資料はいまだ非常に少ないのが現状である。砂丘地における顕著な微気象特性の1つは松田ら(1977)の観測に見られるように、乾燥時に地面近くの温度変化が非常に大きくなることである。これは砂の保水力が小さいためと、これにともなう土壌の物理的性質の変化に起因した放射バランスの変化等が主な原因であると考えられる。

今回、我々はわが国の代表的な砂丘地の一つである鳥取砂丘で微気象の観測を行った。ここでは、これらの観測で得られた資料をもとに、簡単なシミュレーションを行い実測の結果と比較し、砂丘地の熱収支特性について若干の考察を行ったので報告する。

観測方法

観測は鳥取市浜坂の鳥取大学農学部砂丘利用研究施設構内で行われた。期間は昭和53年12月5日～9日までの4日間であるが、解析に使用したのは7日～8日の観測結果についてである。今回の観測に使用した測器および観測の方法は次のごとくである。

気温と地温の測定にはサーミスター温度計を用い、気温の場合は23, 73, 146cmの3高度、地温については深さ0, 5, 10, 20, 30, 50cmの6地点で測定を行った。乾湿球温度は55, 136cmの2高度にアスマン通風乾湿計を取り付け30分毎に読み取った。また、風速計は205cmの高度に発電式風速計を取り付け記録した。この他にゴルチンスキー日射計、示差輻射計により日射および純放射量の測定を行い、さらに、地面下0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100cmの9地点について採土法により土壌水分の測定を行った。

解析方法およびモデルの概略

1. 計算方法

実測のデータについてはポウエン比法を用いて解析を行った。すなわち、地面における受熱・放熱の関係はエネルギー保存則が適用され、一般に熱収支式と呼ばれる(1)式が適用されている。

$$S_0 + B_0 + lE_0 + H_0 = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $S_0$ ：純放射量、 $E_0$ ：蒸発速度、 $B_0$ ：地中熱伝導量、 $l$ ：蒸発の潜熱、 $H_0$ ：顕熱伝達量である。

ここで顕熱と潜熱の比であるポウエン比  $\beta (= H_0 / lE_0)$  を用いると顕熱伝達量と潜熱伝達量は(2)、(3)式のように表わされ、純放射量と地中熱伝導量および2高度で温度と湿度の測定をすれば求めることが出来る。

$$lE_0 = (S_0 - B_0) / (1 + \beta) \dots\dots\dots(2)$$

$$H_0 = \beta(S_0 - B_0) / (1 + \beta) \dots\dots\dots(3)$$

一方、シミュレーションについては次のような考え方に基づいて行った。すなわち、地表面の温度はそこに入り出る熱の収支によって決まる。そこで地表面での熱収支を考慮に入れ、地中の熱伝導方程式を解くことにより求めた。この考えによるモデルはHALSTEAD et al (1957)により始められたものでMYRUP (1969)はこれを都市のヒートアイランドの解析に応用し、大気と地表面とのエネルギーのやりとりの具体例を示した。今回、我々の使用した計算式もほぼこれと同じで以下に示す通りである。

地表面での熱の収支は(1)式のように表わされ、風速の垂直分布が対数プロファイルをなしているものとする、潜熱と顕熱は(4)、(5)式によって与えられる。

$$H_0 = \left\{ \frac{-\rho c_p k^2 u}{\ln \{ (z-d)/z_0 \}} \right\} \frac{\partial \theta}{\partial \ln z} = \left\{ \frac{-\rho c_p k^2 u_2}{\ln \{ (z_2-d)/z_0 \}^2} \right\} (T_2 + \Gamma_a z_2 - T_0) \dots\dots\dots(4)$$

$$lE_0 = \left\{ \frac{-\rho l k^2 u}{\ln \{ (z-d)/z_0 \}} \right\} \frac{\partial q}{\partial \ln z} = \left\{ \frac{-\rho l k^2 u_2}{\ln \{ (z_2-d)/z_0 \}^2} \right\} (q_2 - q_0) \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $k$  : カルマン常数,  $u$  : 風速,  $\theta$  : 温位,  $T$  : 気温,  $q$  : 比湿  $\rho$  : 空気の密度,  $c_p$  : 空気の定圧比熱,  $\Gamma_a$  : 空気の乾燥断熱減率である。

一方, 地中熱フラックスは (6) 式の様にと与えられる。

$$B = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad z < 0, t > 0 \quad \dots\dots(6)$$

ただし,  $\lambda_s$  : 熱伝導係数,  $T$  : 地温である。

また, 地中の熱伝導の微分方程式は良く知られているように(7)式のように表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{c_s \rho_s} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし,  $c_s$  : 土の比熱,  $\rho_s$  : 土の密度である。

ここで, 土壌各層の熱フラックスの流れを  $Flow(N)$  で表わすと, 地表面での熱の流れは(1)と(6)式を組み合わせ

$$FLOW(1) = S_0 - I E_0 - H_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。また,  $N \geq 2$  の深さでの各土層のエネルギーの流れは, (6)式を変形した次式から求まる。

$$FLOW(N) = -\lambda_s(N) \{ T(N-1) - T(N) \} / D_N \quad \dots\dots\dots(9)$$

したがって, 各土層の  $\Delta t$  時間後の温度変化は(6), (7), (9)式から次式のように与えられる。

$$\Delta T(N) = [ FLOW(N) - FLOW(N+1) ] \cdot \Delta t / H_N \cdot c_v \quad \dots\dots\dots(10)$$

ただし,  $c_v$  : 土の体積熱容量,  $D_N$  :  $N$  と  $N-1$  番目の土層の中心距離,  $N_N$  :  $N$  番目の土層の厚さである。

2. 計算モデルの概略と境界条件

今回設定したモデルは考える系を土と大気の2つに分け, この2つの系の接触する地表面は, 早川ら(1978)のモデルにおける裸地と同じように取り扱った。

(4), (5)式および(8)~(10)式からわかるように, 地表面における熱のinputとしての純放射量と上下の層に適当に境界条件を与えてやることにより  $\Delta t$  時間後の地中の温度, 潜熱, 顕熱伝達量および地中熱伝達量を逐次求めることができる。

今回用いた境界条件は早川ら(1979)と同じで次のごとくである。入力エネルギーとしての放射量は, 考える系に正確に与える必要があり, Fig. 3 に見られるように, 12月7日~8日の実測地にほぼ近い分布を与えた。また, 上限(100m)の気象条件としての風速, 湿度は Fig. 1 のように与え下限(100cm)での地中温度は実測地をもとに一定の12°Cとした。

結果および考察

Fig. 2 は実測で得られた各熱収支項の時間変化を示す。顕熱および潜熱伝達量は(2), (3)式より求めたもので, 観測の前日6日には降雨があり, 観測の初期の段階は土壌が十分湿っていたものと考えられる。純放射量は純放射計で得られた値を読みとり, 地中熱伝達量は温度積分法によって求めた。観測期間中完全なる晴天が得られなかった。このため, 純放射量の値を見ても (Fig. 3) 午前と午後2つのピークが見られる。Fig. 2 の各熱収支項を比較すると, 午前中のある時刻までは地中熱伝達量が純放射量をうまわる大きな値を示し, 14時過ぎからは逆に潜熱伝達量が多くなり, 純放射量の7~8割近くに達している。一方, 顕熱伝達量は他の熱収支項の変化にくらべ非常に小さい。

松田ら(1978)の観測結果によれば, 砂丘地における砂は保水力が小さいため「乾砂層」が容易に形成され, これが地表面の温度変化に大きく影響を与える事を明らかにしている。このような乾砂層の発達にともなって熱収支特性も非常に異なるであろうことが容易に想像される。以上の事を考慮に入れ, 今回は乾砂層の厚さを15cmとし, 湿っている状態(case-1), 地表面の蒸発能をケース-1と同じにとり, 土壌の物理的性質を変化させた場合(case-2)および土壌の物理的性質がケース-2と同じで, 地表面の蒸発能を変化させた時(case-3)の3通りについて考え, 計算に用いた各ケースの土壌の物理的性質は Table-1 に示す通りである。

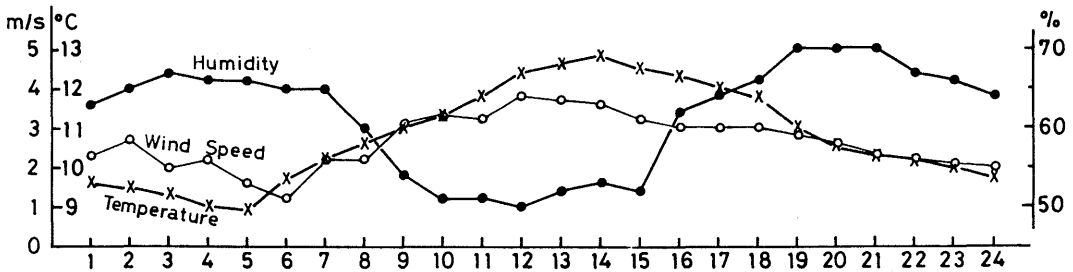


Fig. 1 Hourly variation of the input meteorological data at upper boundary (100 m height) used in simulation experiments.

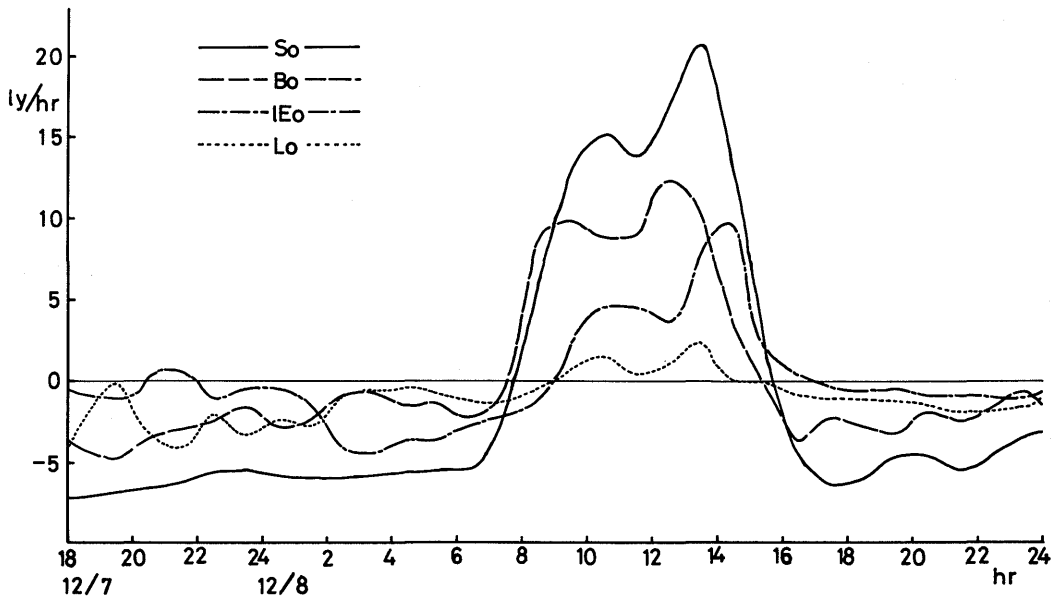


Fig. 2 Hourly distributions of the energy balance components over the sand dune at Tottori obtained from observation experiments.

Table 1. Thermal conductivity( $\lambda$ ), volumetric heat capacity( $c_v$ ) and surface relative humidity(R) used in simulation experiments

	volumetric heat capacity ( $c_v$ ) cal/cm <sup>3</sup> ·°C		thermal conductivity ( $\lambda$ ) cm <sup>2</sup> /sec (10 <sup>3</sup> )		surface relative humidity (R) %
	0-15cm	15-100cm	0-15cm	15-100cm	
case 1	0.65	0.65	5.0	5.0	100
case 2	0.30	0.65	0.7	5.0	100
case 3	0.30	0.65	0.7	5.0	20

Fig. 3~Fig. 5 は、上述した境界条件を与えて計算を行った時の各ケースの熱収支各項の時間変化を示す。図示した結果は、ほぼ同じ状態がくり返され始めた48時間後~72時間後までについてである。

まず、実測の結果と比較すると、夜間の地中熱伝導量は、地表面近くの容積熱容量や温度伝導率を小さくとったケース2やケース3と良く一致している。また、午前中の8時頃まではケース2とケース3は地中熱伝導量が純放射量をうわまわる値となり、実測の結果と似かよった傾向を示している。しかし、日中は逆に地表面近くの温度伝導率や容積熱容量を大きくとったケース1やケース2と土壤の物理的性質が同じで蒸発能を小さくしたケース3が実測に似かよった分布を再現している。一方、顕熱や潜熱伝達量の時間変化は、ほぼ実測に近い変化を呈し、このモデルを用いて砂丘地上の熱収支特性についてあ

る程度明らかにすることが出来そうである。ただし、今回得られたシミュレーションの結果は早川(1980)の結果にくらべ実測との対応は良くない。この原因としてまず考えられることは、シミュレーションのモデルは横方向の移流を無視出来る程度に十分なフェッチを持つと考える場での表現式であるが観測で得られたデータはガラスハウスのすぐそばの測定結果であり、温度や湿度、特に風はガラス室の影響を受けたであろう事は十分考えられ必ずしも十分な拡がりのある場所での観測結果でなかったからであろう。さらに、時間の経過とともに乾砂層が次第に発達し、土壤の物理的特性もそれにつれて複雑に変化したはずであり、モデルの中にこれらの状態を十分に取り入れることが出来なかったことも実測との不一致を大きくした原因の一つであろう。

つぎに、土壤の物理的性質の違いが熱収支各項に

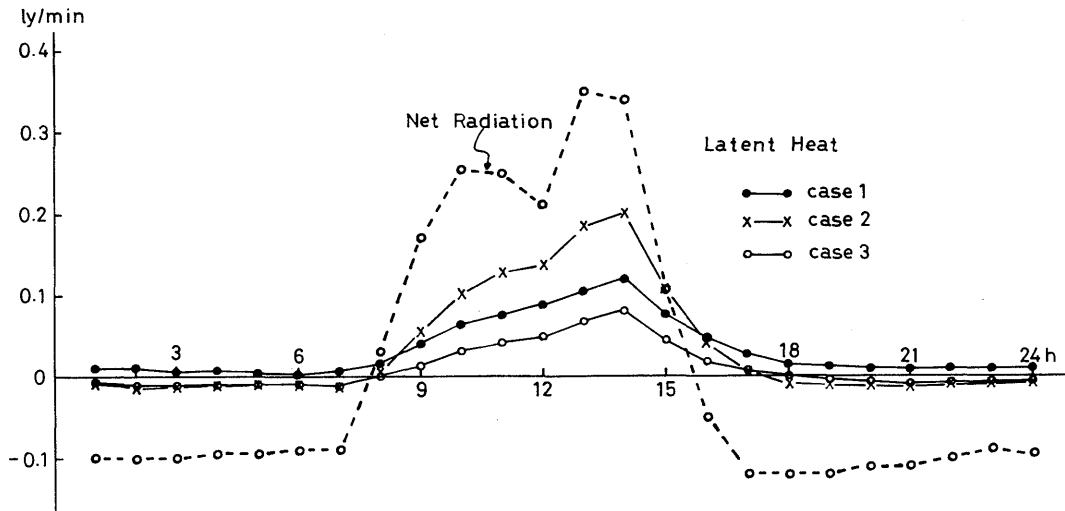


Fig. 3 Hourly distribution of latent heat flux components for three cases obtained from simulation experiments.

どのように影響を及ぼしているかについて考えてみよう。Fig. 3 は潜熱伝達量の分布図であるが、土壤の表面が十分湿っていると考えた場合(case 1と case 2)、表面近くの熱容量や伝導率を小さくとったケース2は熱容量や伝導率の大きなケース1にくらべより多くの蒸発量を生じている。また、夜間においてケース1の場合は潜熱伝達量は正、すなわち蒸発の状態のまま経過しているが、ケース2やケース3

の場合は負、すなわち凝結を生じる結果となっている。

Fig. 4 は顕熱伝達量の分布図であるが、土壤表面の蒸発能の程度や土壤の物理的性質の差違が顕熱伝達量に大きく影響を及ぼしていることがわかる。すなわち、熱容量や伝導率を大きくとったケース1は日中でも顕熱伝達量は小さく、他の2つのケースとは非常に異っている。

Fig. 5 は地中熱伝導量についての分布図である。

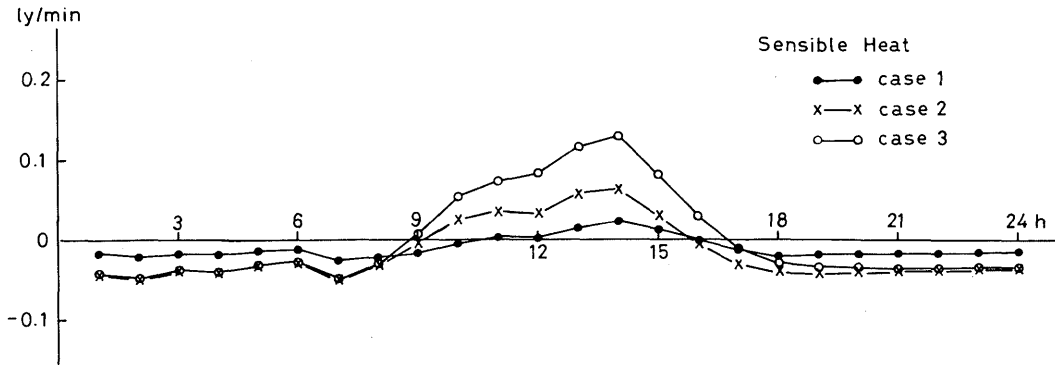


Fig. 4 Same as Fig. 3, for sensible heat flux.

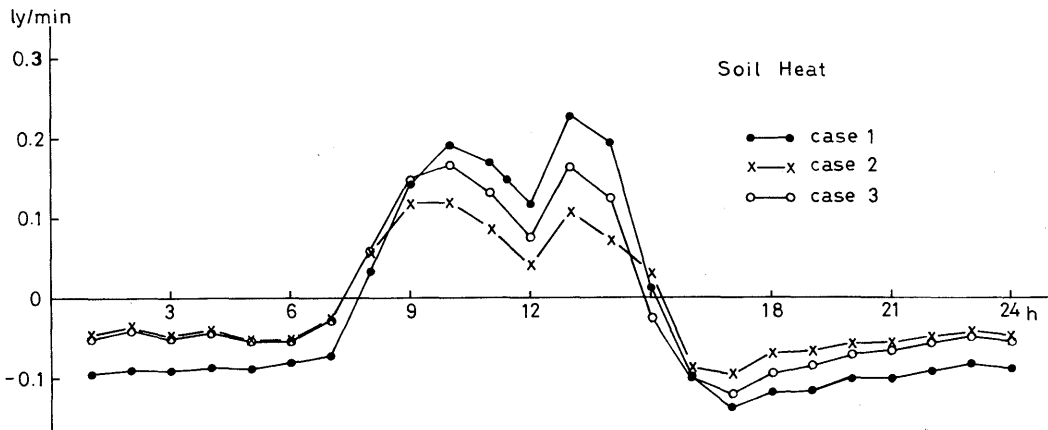


Fig. 5 Same as Fig. 3, for soil heat flux.

ケース 1 の場合が最も大きな変化を示し、ケース 2 の場合が最も小さい。

以上のように、土の熱容量や伝導率の大きい場合は地中へ流れる熱フラックスは大きくなるが、逆に蒸発量や顕熱輸送量は小さくなる。さらに地表面の蒸発能が変化すると、それに伴って熱収支各項も複雑に変化しており、砂丘地における熱収支特性を明らかにするには土壤の物理的特性や地表面の状態を十分に表現してやる必要がある。

つぎに地中温度の日変化を示したのが Fig. 6~Fig. 9 である。Fig. 6 は実測によって得られた観測結果であり、Fig. 7~Fig. 9 は Table-1 に示す 3 つのケースの計算結果である。地表面の蒸発能を小さくしたケース 3 は、日中地温が最も高くなり、夜間はケース 2 が最も低い値となっている。すなわち、

最高温度はともに 14 時頃に生じ、その値はケース 1 で  $16.0^{\circ}\text{C}$ 、ケース 2 で  $21.4^{\circ}\text{C}$ 、ケース 3 で  $30.4^{\circ}\text{C}$  となっている。一方、最低温度は 6 時頃に生じ、その値はケース 1 で  $4.8^{\circ}\text{C}$ 、ケース 2 で  $-2.0^{\circ}\text{C}$ 、ケース 3 で  $-1.5^{\circ}\text{C}$  となっている。

また、体積熱容量や伝導率の大きい場合（ケース 1）は地中熱フラックスの変化が大きい（Fig. 5）にもかかわらず、温度の日変動の振幅はケース 2 にくらべ小さくなっている。このような地表面温度の日変化の特徴について松田 (1978) は、乾砂層の発達につれて複雑に変化することを実測ならびに熱伝導理論から明らかにしている。即ち、乾砂層が発達し熱容量や伝導率が小さくなるほど日中の地表面温度は高くなり、今回のシミュレーションから得られた特徴も、これらの結果と現象的によく対応している。

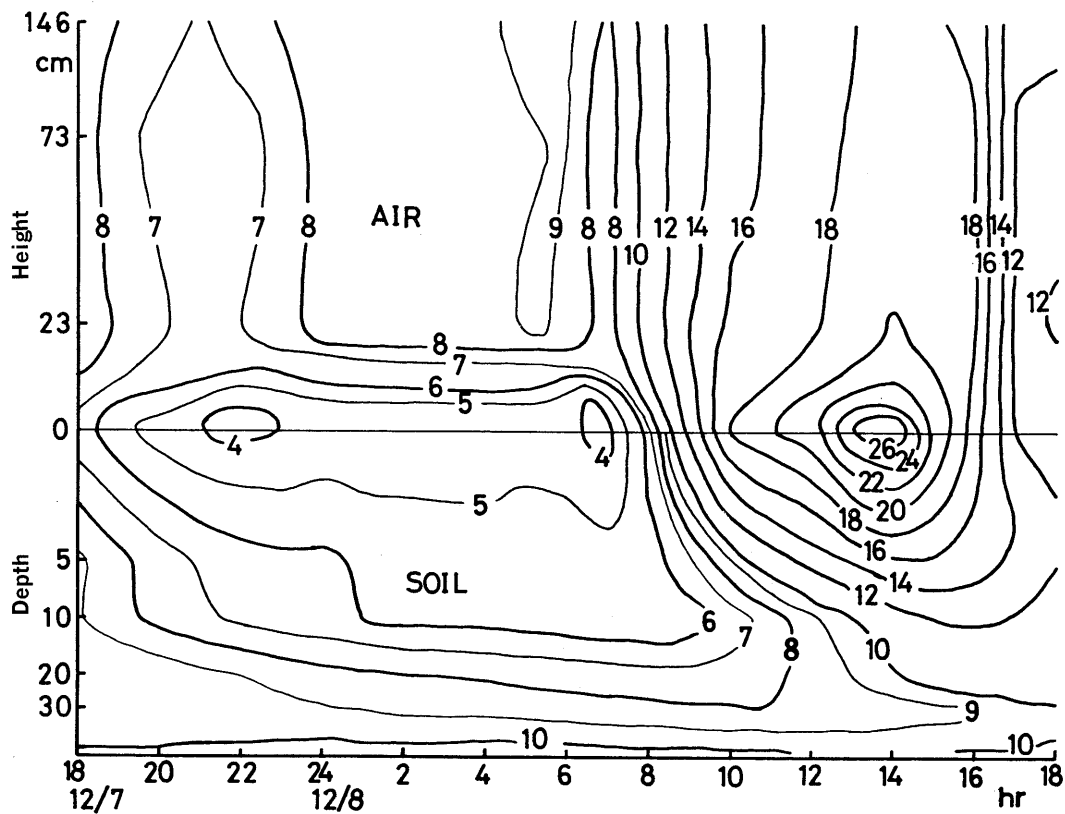


Fig. 6 Atmosphere(upper) and soil(lower) temperature variations(°C) obtained from observation.

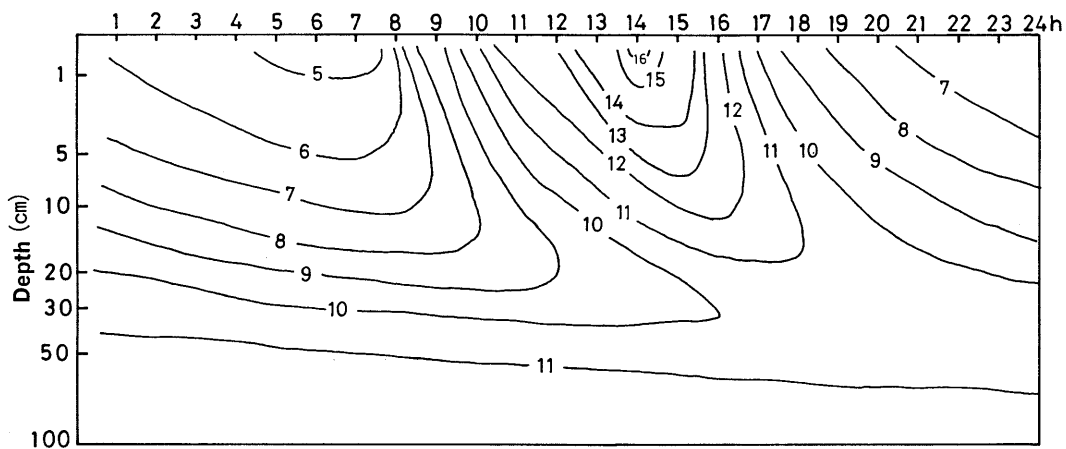


Fig. 7 Soil temperature variations(°C)calculated for case 1.

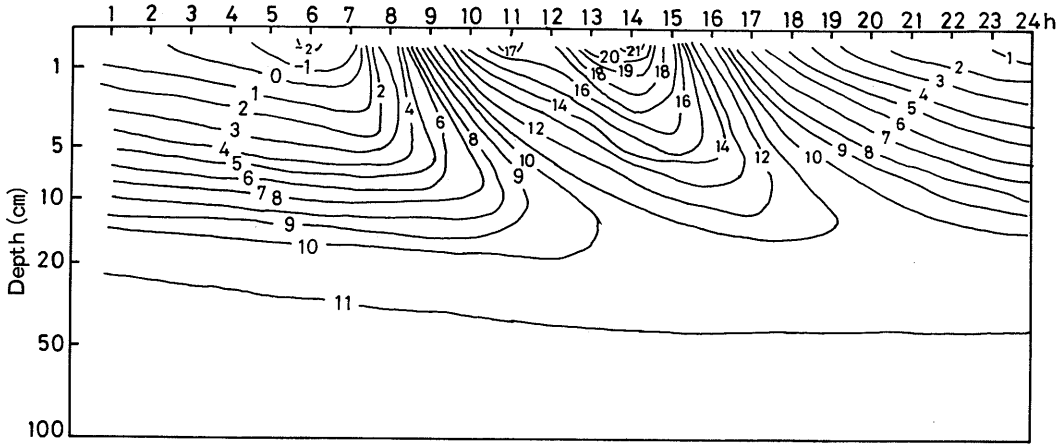


Fig. 8 Same as Fig. 7, for case 2.

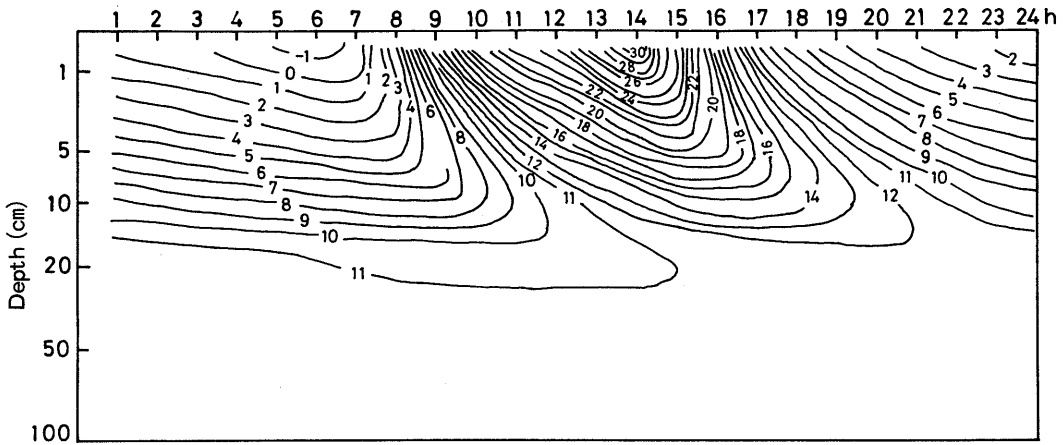


Fig. 9 Same as Fig. 7, for case 3.

ま と め

今回の観測結果およびシミュレーションの結果からつぎのような事が得られた。

(1)熱容量や伝導率が小さい場合、日中の地表面温度は高くなるが地中の貯熱量は必ずしも地表面温度の変化とは対応せず、熱容量や伝導率を大きくとった場合の方が地表面の温度の振巾は小さくなるが貯熱量の変化は大きくなるという結果が得られた。

(2) 土壌の物理的性質の違いにより、夜間の地温降下率も異なる。このため、夜間潜熱伝達量が正、すなわち蒸発の状態を呈したり、負すなわち凝結の

状態を呈したりする。

(3) 熱容量や伝導率を小さくすると地温の日変化の振巾は大きくなり、これは乾砂層が発達するほど地温の日変化の振巾が大きくなるという観測事実と一致する。

以上のように、今回使用したモデルを用いて砂丘地上の熱収支持性をかなり正確に把握出来そうなのがわかった。ただし、乾砂層の発達にともなって土壌面の蒸発能、物理的特性、アルベド等が変化するはずであり、今回の結果だけで砂丘地の熱収支持性を論ずることは出来ない。今後更に、解析ならびに観測を進展させて、砂丘地上の微気象特性について明らかにしていきたい。



## 文 献

1. HALSTEAD, M. H., ROBERT L. RICHMAN, WINTON COVEY and JERRY D. MERRYMAN. 1957. A Preliminary Report on the Design of a Computer for Micrometeorology. *J. Meteor.* 14 : 308-325.
2. 早川誠而, 1980. 大気中の熱および物質輸送に関する農業気象学的研究. 九州大学博士論文.
3. 早川誠而, 坂上 務, 元田雄四郎, 北野雅治, 田中康美, 1978. 色々な植被上の熱収支特性. 昭和53年度日本農業気象学会全国大会講演要旨 : 71.
4. 早川誠而, 坂上 務, 松田昭美, 元田雄四郎, 神近牧男, 1979. 砂丘地の微気象特性——土壤の物理的性質の差違が熱収支および地中温度に与える影響——. 九州の農業気象. 16 : 36-39.
5. 松田昭美, 1978. 砂丘地の地温特性—乾砂層と地温の日変化—昭和53年度日本農業気象学会講演要旨 : 67.
6. 松田昭美, 神近牧男, 安東登志広, 1977. 砂丘地の地表面付近における温度の垂直分布について. 鳥取大学砂丘研究所報告. 16 : 9-13.
7. MYRUP, L. O. 1969. A Numerical Model of the Urban Heat Island *J. Appl. Meteor.* 8 : 908-918.
8. de WIT C. T. and van KEULEN H. 1975. Simulation of transport process in soils. pp. 1-31. Center for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen.