

中国毛烏素砂漠の砂丘砂の蒸発特性

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	李, 千紅 小林, 哲夫 元田, 雄四郎 松田, 昭美 神近, 牧男
巻/号	44巻4号
掲載ページ	p. 301-304
発行年月	1989年3月

中国毛烏素砂漠の砂丘砂の蒸発特性

李 千紅*・小林哲夫*・元田雄四郎*・松田昭美**・神近牧男**

(*九州大学農学部
**鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設)

Evaporation Characteristics of the Dune Sand
in the Mu Us Shamo Desert, China

Qian Hong Li*, Tetsuo KOBAYASHI*, Yushiro MOTODA*,
Akiyoshi MATSUDA** and Makio KAMICHIKA**

(* Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812)
(** Sand Dune Research Institute, Faculty of Agriculture,
Tottori University, Tottori 680, Japan)

1. はしがき

毛烏素砂漠は北緯 37~39 度, 東経 107~111 度の間に分布し, 中国砂漠地帯の東端に位置する。面積は約 400 万 ha であるが, 砂漠化が年間約 10 万 ha の割合で進行している (神近・山本, 1986)。砂漠化の機構を解明するためには水収支の実態を明らかにしなければならないが, 乾燥地あるいは半乾燥地における蒸発量測定法は, その原理に関する研究は数多くなされているが (例えば, Budogovsky, 1964; Toya and Yasuda, 1988), 実用的な技術としてはいまだ確立されているとは言えない。

Kobayashi ら (1986, 1987) は鳥取砂丘砂を用いて, 発達中の乾砂層 (水分移動が水蒸気態のみ行われる乾燥表層) 内における水蒸気の移動機構及びそれに対する温度勾配の影響などを明らかにし, 乾燥砂面からの蒸発速度を推定する方法 (乾燥表層法) を提案した (Kobayashi ら, 1989)。この方法の原理は, 熱フラックスを測定するための熱流板のそれと似ており, 乾燥表層内の水蒸気上昇フラックスを蒸発速度と見なすことにより, 地表面の温度, 含水量及び乾燥表層厚によって乾燥砂面からの蒸発速度を推定しようとするものである。

本報告では, 乾燥表層法を毛烏素砂漠の砂丘砂に適用

し, 砂漠化地域の砂丘砂の蒸発特性を明らかにするが, 同時に, 本推定法を実際に適用する際の手順を詳しく示す。

2. 適用手順

2.1 土壌水分特性曲線の決定

内径 5 cm, 長さ 5 cm の円筒形の容器を 4 個使って, それに毛烏素砂丘砂を水締めによって均質に詰めて供試体とした。容器底部を水に浸して 1 日間養生した後, 遠心機で 90 分間脱水した。遠心機の回転数を順次 2088, 5248, 8318 rpm (pF 値 3.0, 3.8, 4.2 に相当する) に増やして脱水した後, その都度, 供試体の重量を測定し, それに基づいて含水量を計算した。体積含水率を θ (%) とすると, 毛烏素砂丘砂の土壌水分特性曲線は近似的に次式で表すことができた (試料数 12 個, 相関係数 -0.97)。ただし, 絶乾状態の pF 値は 7.0 とした。

$$pF = -1.041\theta + 7.0 \quad (pF \geq 3, 0 \leq \theta \leq 4.28) \quad (1)$$

(1) 式から, 体積含水率とマトリックポテンシャル ψ の関係は

$$\psi = -\exp(-2.397\theta + 16.1) \quad (2)$$

となる。

また, 毛烏素砂丘砂の粒径分布は 1~0.25 mm に約 75%, 0.25~0.05 mm に約 20% (鳥取砂丘砂の場合はそれぞれ約 84% と 15%) 含まれ (神近・山本, 1986), 真比重は 2.65, 仮比重と間隙率はそれぞれ 1.64 と 0.383 であ

った。

2.2 乾砂層と湿潤下層の境界における体積含水率 θ_δ の決定

内径 5 cm, 厚さ 1 cm の透明アクリルリングを積み重ねて長さ 10 cm の容器を作成し, 毛烏素砂丘砂を水締めによって均質に詰めて供試体とした。3 個の供試体を自然条件下で蒸発させ, 乾砂層の厚さが 3 cm 程度まで発達したとき, 容器を分解し, 厚さ 1 cm 毎の含水量を測定した。その結果から得られた含水量プロファイル曲線を図 1 に示す。曲線の変曲点が乾砂層と湿潤層の境界と考えられるので, 求める θ_δ は図 1 から 2.0~2.5% の範囲にあることが読み取れる。

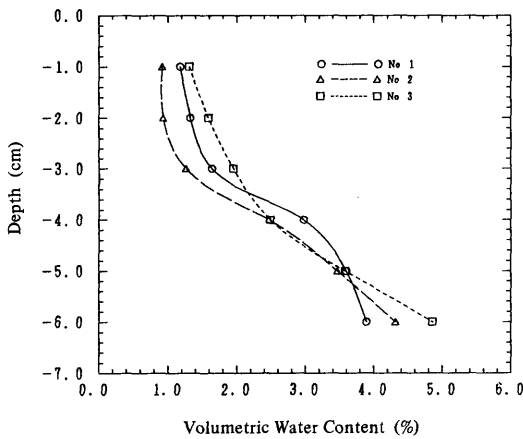


図 1 砂柱表層の含水量プロファイル

2.3 蒸発速度推定式の決定

発達過程にある乾砂層内では水蒸気上昇フラックス, すなわち地表面からの蒸発速度 q (cm s^{-1}) は次式のように表すことができる (Kobayashi ら, 1987)。

$$q = D(\theta, T) d\theta / dz \quad (3)$$

ここで,

$$D(\theta, T) = \frac{D_{\text{atm}} \alpha a \nu g \rho_v}{R_w T \rho_l} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (4)$$

また, z は深さ (cm), D_{atm} は空気中の水蒸気の分子拡散係数 ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), α は拡散経路が曲折している点を考慮するための曲折係数 (= 2/3), a は空気含有率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), g は重力加速度 (cm s^{-2}), ρ_l と ρ_v は液態水と水蒸気の密度 (g cm^{-3}), ν は mass-flow factor で

$$\nu = \frac{p}{p - e} \quad (5)$$

ここで e は水蒸気圧, と表すことができる。 R_w は水蒸気の気体定数 ($= 4.615 \times 10^6 \text{ erg g}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T は絶対温度 (K) である。ただし, (3) 式と (4) 式に限り θ の単位

は $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ である。

Krischer and Rohnalter の式

$$D_{\text{atm}} = 4.42 \times 10^{-4} T^{2.3} / p \quad (6)$$

ただし p は mmHg で表した大気圧 (= 760 mmHg), を用い (Philip and de Vries, 1957), (2) 式と共に (4) 式に代入すれば, $D(\theta, T)$ の値を求めることができる。

$D(\theta, T)$ の関数形は極めて複雑なので, 近似式

$$D(\theta, T) = \exp(aT + b) \theta^2 (\theta - c)^6 \quad (7)$$

が提案された (Kobayashi ら, 1986)。毛烏素砂丘砂の場合は, $283 \text{ K} \leq T \leq 323 \text{ K}$ に対して次式が得られた。

$$D(\theta, T) = \exp(0.0629T - 36.92) \theta^2 (\theta - 3.16)^6 \quad (0 < \theta \leq \theta_\delta) \quad (8)$$

図 2 の実線は (4) 式による理論値, 破線は (8) 式による近似値を示す。

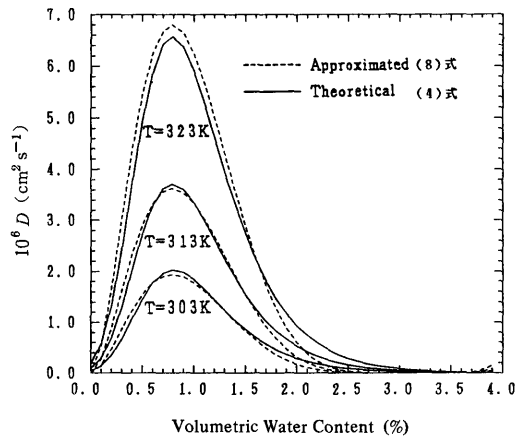


図 2 水蒸気の拡散係数と体積含水率の関係

乾砂層内の温度プロファイルが

$$T(z) = T_0 + \alpha z \quad (9)$$

で表されるものと仮定すれば, (8) 式と (9) 式を (3) 式に代入し, 表面 $z=0$ から乾砂層と湿潤下層の境界 $z=\delta$ まで積分することによって, 次式が得られる。

$$q = 0.0629 \alpha \exp(0.0629T_0 - 36.92) \{f(\theta_\delta) - f(\theta_0)\} / \{1 - \exp(-0.0629\alpha\delta)\} \quad (10)$$

ここで,

$$f(\theta) \equiv (1/9) \theta^9 - (18.9/8) \theta^8 + 21.40 \theta^7 - 105.18 \theta^6 + 299.14 \theta^5 - 472.64 \theta^4 + 331.90 \theta^3 \quad (11)$$

ただし, θ_0 と θ_δ はそれぞれ地表面及び乾湿層界面における体積含水率である。 $|0.0629\alpha\delta| \ll 1$, すなわち $| \alpha \delta | \ll 16 \text{ K}$ の場合には, (10) 式は近似的に

$$q = \exp(0.0629T_0 - 36.92) \{f(\theta_\delta) - f(\theta_0)\} / \delta \quad (12)$$

となる。

θ_0 は土壌の特性値と見なすことができ、毛烏素砂丘砂の場合は 2.0~2.5% であるから、 $f(\theta_0) \approx 130$ となる。したがって、乾砂層の厚さ δ 、地表面の温度 T_0 及び体積含水率 θ_0 から蒸発速度が推定できることになる。

3. 蒸発実験

3.1 実験方法

内径 5 cm の透明アクリルパイプから長さ 5, 7.5, 10 cm の容器を作製し、毛烏素砂漠の砂丘砂を水締めによって均質に詰め、重力水を容器底の小孔から排除して供試体とした。それらをチャンバー(気温 303 K, 相対湿度 60%, 風速 0.5 ms^{-1}) 内に設置し、陽光灯 (30,000 lx) により表面を照射した。その後 1 時間毎に供試体の表面と底面の温度を測り、重量を測定して蒸発速度を求めた。実験方法の詳細については Kobayashi ら(1989) を参照されたい。

3.2 実測値と推定値の比較

長さ 5 cm 及び 7.5 cm の供試体からの蒸発速度の実測値と (12) 式によって計算した推定値の比較例を図 3 に示す。実測値と推定値は大体においてよく一致するが、

層厚が小さい乾砂層形成初期の段階では合わない場合もある。本実験においては、この段階において層内の温度勾配が大きいくこと (3 K cm^{-1} 程度)、層厚を測定する際の誤差の影響も大きくなること、また本法の前提である定常状態の近似度が悪くなること、などがその原因と考えられる。

3.3 鳥取砂丘砂との比較

毛烏素砂丘砂と鳥取砂丘砂の蒸発現象にかかわる物理的特性値を比較して表 1 に示す。風成砂である毛烏素砂

表 1 毛烏素と鳥取の砂丘砂の物理的特性値

	毛 烏 素			鳥 取		
仮比重 (g cm^{-3})	1.64			1.50		
ρF 値	3.0	3.8	4.2	3.0	3.8	4.2
体積含水率 (%)	4.28	2.67	2.35	2.82	2.26	1.97
間隙率 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.383			0.434		
拡散係数 ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) ($T=313 \text{ K}$)	3.7×10^{-6} ($\theta=0.79$)			5.8×10^{-6} ($\theta=0.60$)		
乾湿境界面 θ_0 (%)	2.0~2.5			1.5~2.0		

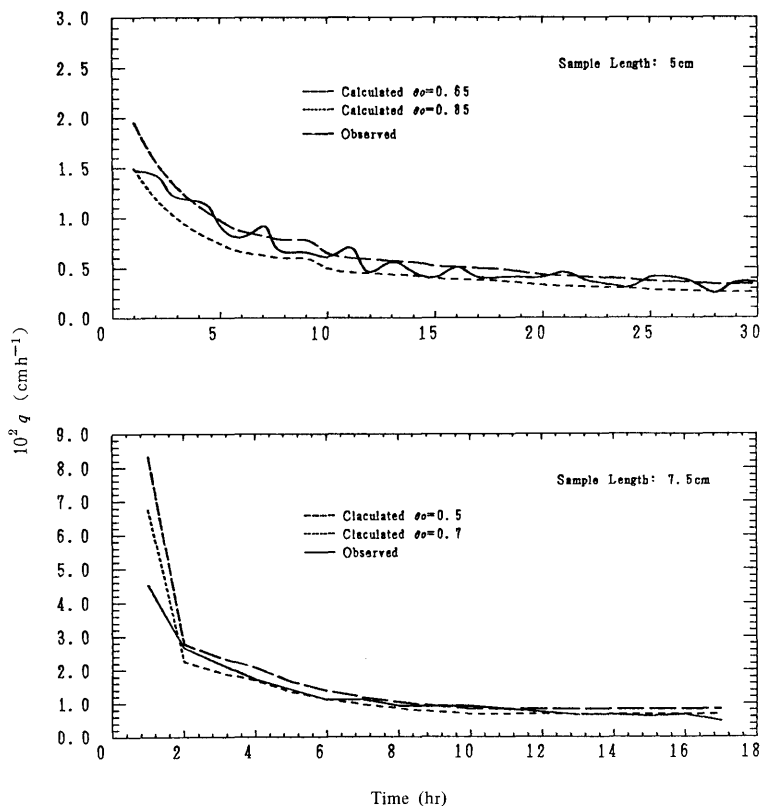


図 3 蒸発速度の推定値と実測値の比較

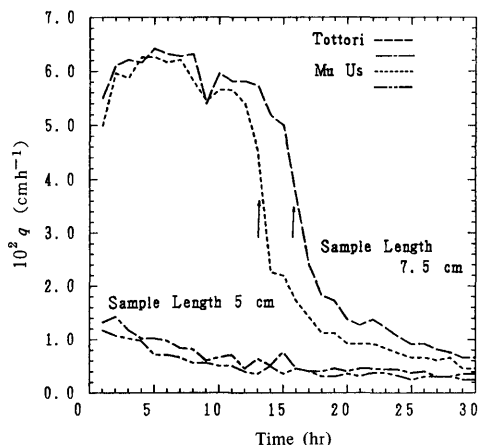


図4 毛烏素と鳥取の砂丘砂の蒸発速度の時間的推移に関する実測値の比較 (図中の矢印は乾砂層の形成が目視によって確認された時刻を示す。)

丘砂は粒子が細かく、間隙率も小さいために、砂中の水蒸気拡散係数も水成砂である鳥取砂丘砂のそれより小さいことが分かる。このような特徴は同一条件下で得られた両砂丘砂からの蒸発速度に関する実測値からもうかがうことができる(図4)。毛烏素砂丘砂の場合は、鳥取砂丘砂と比較して蒸発速度が小さいにもかかわらず、乾砂層は速やかに発達する。

4. む す び

砂漠化が進む中国毛烏素砂漠の砂丘砂の物理的特性値によって乾燥砂面からの蒸発速度推定式を定め、実測値と比較してその推定精度を確かめた。その結果、毛烏素

砂丘砂に対しても、乾燥表層法は十分適用可能なことが確認された。

また、水成砂である鳥取砂丘砂と比較することにより、風成砂である毛烏素砂漠の砂丘砂の蒸発特性が明らかになった。

引用文献

- Budogovsky, A. I., 1964: 耕地の蒸発散 (内嶋善兵衛訳, 1968), 畑地農業研究会, 38~50.
- 神近牧男, 山本太平, 1986: 中国毛烏素砂漠における自然環境について — 二, 三の気象・土壌特性 —, 鳥取大砂丘研報, **25**, 27~35.
- 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.
- Kobayashi, T., Matsuda, A. and Kamichika, M., 1987: Studies of the dry surface layer in a sand dune field (2) Effects of soil temperature gradients on the water content profiles in the dry surface layer, *J. Agr. Met.*, **43**, 121-126.
- Kobayashi, T., Matsuda, A. and Kamichika, M., 1989: A simple method for estimating the rate of evaporation from a dry sand surface, *J. Agr. Met.*, **44**, 269-274.
- Philip, J. R. and DE Vries, D. A., 1957: Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Amer. Geophy. Union*, **38**, 222-232.
- Toya, T. and Yasuda, N., 1988: Parameterization of evaporation from a non-saturated bare surface for application in numerical prediction models, *J. Met. Soc. Japan*, **66**, 726-739.