DSLバルク法のマサ土への適用

Applying the DSL Bulk Method to an Arkose Sand

賀 文君*・小林哲夫* (九州大学農学部)

Wenjun HE・Tetsuo KOBAYASHI

Faculty of Agriculture, Kyushu University

The DSL bulk method was examined if it is applicable to an arkose sand, which method was devised to measure the rate of evaporation from dry soil surfaces by remote sensing and substantiated to be effective by applying it to the Tottori-Dune sand (He and Kobayashi, 1998). The result of the experiment shows that the DSL bulk method is also effective for an arkose sand by adapting the coefficients of the formulae to the soil.

Key words: Evaporation, DSL, DSL bulk method, Remote sensing

乾燥土壌面からの蒸発速度をリモートセンシングによって測定するために開発され、鳥取砂丘砂へ適用してその有効性が実証されたDSLバルク法(He and Kobayashi, 1998)が、マサ土に対しても適用可能か否かを検討した。その結果、公式の諸係数を対象土壌に適合させることによって、DSLバルク法はマサ土にも適用できることが確認された。

キーワード: 蒸発, DSL, DSLバルク法, リモートセンシング

I. はじめに

土壌面蒸発の第3段階、すなわち土壌表面の乾燥が進み、土壌水分が水蒸気体でのみ移動できる乾燥表土層(dry surface layer of soil, DSL)が形成された段階においては、接地気層内の水蒸気フラックス(蒸発速度)をバルク法などによって評価することは不可能である(Kobayashi *et al.*, 1998)。そこでHe and Kobayashi(1998)は、DSL内の水蒸気上昇フラックスをバルク法によって評価するDSLバルク法を提案し、鳥取砂丘砂に適用してその有効性を示した。本方法はまた、リモートセンシングによって測定可能な土壌表面温度と厚さ5cmの表土層内の平均体積含水率のみがパラメーターとして必要になるよう公式化された。

本報では、DSLバルク法をマサ土へ適用した結果について報告する。鳥取砂丘砂の場合は、DSLは湿潤下層と色調の違いによってはっきり識別できるため、その厚さ δ も容易に測定できる。しかし、マサ

土の場合は、特に厚さが薄い場合はそれが難しい。従って、砂丘砂の場合のように、 δ を実測し、DSL法によって蒸発速度を評価することはできない(Kobayashi and Nagai, 1995)。そこで、本研究では、試料土を詰めたポットを用いて実験を行い、その重量変化から蒸発速度を求めた。

II. 実験

1. 試料土

実験には、2mmフルイを通過したマサ土を用いた。試料土の特性を表-1に示す。

2. 実験方法

実験は、九州大学農学部の圃場内に設置されたビニルハウス内で、1998年4月から5月にかけて行われた。ただし、ビニルハウスは雨よけのためにのみ用いられ、側壁部は開放され、十分な通風・換気が確保されるようにした。

風乾した試料土を10個の内径20cm、高さ20cmの塩

*九州大学農学部農業気象学研究室 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

Lab. Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

化ビニル製ポットに詰めて試料とし、ハウス内の台上に並べた。その際、土壌表面がポットの上端から約5cm下になるようにした。10個のポットのうち2個は表面体積含水率測定用、1個は表面中心の直下と深さ5cmにサーミスター温度センサー(直径4mm)(SK-200T, SATO)を埋設して地温測定用とし、残る7個はロッド長5cmのTDR(TRIME, IMKO)を表面から鉛直に差し込んで厚さ5cmの表土層の平均体積含水率を測定し、かつ全重量を測定するのに用いた。

4月27日1500JSTに土壌間隙量の約70%(表-1)に相当する水を各試料ポットに注ぎ、全重量を測定した。その後、地温は10分間隔で読み取り、記録させた。翌4月28日から、1日1回約1500JSTに、炉乾法による土壌表面(深さ0~4mm)の体積含水率 θ_o (ポット1個当たり試料数2個)、TDRによる厚さ5cmの表土層の平均体積含水率 θ_m (ポット1個当たり測定回数3回)と天秤による全重量(試料数7個)、およびアスマン通風乾湿計による地上120cmの気温と湿度の測定を行った。

TDRによる θ_m の測定は5月11日で打ち切り、その後は試料を1~2個ずつ破壊し、炉乾法による θ_o の測定(ポット1個当たり試料数2個)と定容採土器による深さ0~5cmと5~10cmの乾燥密度の測定を数回行った。その際、色調の変化に基づき、物差しにより δ も測定した。

Ⅲ. DSLバルク法の公式化

DSLバルク法は、DSL内の土壌水分分布の変化が小さくなり、 δ が最大になって蒸発過程が準定常と見なせる午後に適用することが望ましい。本研究では、1500JSTにおける蒸発速度 $E_{1500}(\text{cm s}^{-1})$ が次式のように表現できるものとする。

$$E_{1500} = C_T D(T_o, \theta_m) (\theta_s - \theta_o) / \delta \quad (1)$$

ここで、

T_o : 地表面温度(K)

θ_m : DSL内の平均体積含水率($\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$)

$D(T_o, \theta_m)$: DSL内の一種の水蒸気拡散係数(cm^2s^{-1})

θ_o : 土壌表面体積含水率($\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$)

θ_s : DSLと湿潤下層の境界における体積含水率(pF $\approx$ 4.8に相当する)($\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$)

δ : DSLの厚さ(cm)

C_T : T_o とDSL内の平均温度との差異による影響を補正する因子

試料土であるマサ土の土壌水分特性曲線(表-1)から、 $\theta_s=7.6\%$ となる(以後、体積含水率は%表示)。従って、 $\theta_o < 7.6\%$ が式(1)適用可能な必要条件である。一種の拡散係数 $D(T_o, \theta_m)$ は近似的に次のように表すことができる(小林, 1990)。

$$D(T_o, \theta_m) = \exp(0.0615T_o - 47.97) \theta_m^2 (\theta_m - 11.64)^6 \quad (2)$$

DSLが形成された後、 θ_o は約2%で推移したので、DSL内の平均体積含水率 θ_m は約5%と推定される。これはpF=5.6に相当する。ちなみに、鳥取砂丘砂の場合は $\theta_m=1\%$ となり、同じくpF=5.6に相当した(He and Kobayashi, 1998)。また、本実験ではポット内の土壌を対象としたので表面付近の地温勾配も比較的小さく、DSLの厚さも高々3cmであったので、DSL内の平均温度を T_o で代表させることにし、 $C_T=1$ とした。

DSLバルク法はリモートセンシングによる蒸発速度の評価を目指したもので、 T_o と θ_o から E_{1500} を評価できるよう公式化された。以上の議論から明らかのように、

$$\theta_o = \theta_o(T_o, \theta_s) \quad (3)$$

$$\delta = \delta(T_o, \theta_s) \quad (4)$$

の関係を定めることができれば、その目的を達成することになる。

Ⅳ. 結果と考察

1. 土壌表面の体積含水率

土壌表面の体積含水率 θ_o と厚さ5cmの表土層の平均体積含水率 θ_m の日々変化を図-1に示す。ただし、試料土の平均乾燥密度は 1.33gcm^{-3} であった(表-1)。実験開始直後は共に30%を超えていたが次第に低下し、5月4日には θ_o は $\theta_s=7.6\%$ を下回った。従って、この日以降が解析対象となる。その間、 θ_s は徐々に低下したが、 θ_o は約2%前後で推移した。

表-1 試料土(マサ土)の性質

粒 径	重量百分率
< 0.005mm	15%
0.005mm ~ 0.07mm	15%
0.07mm ~ 0.4mm	37%
0.4mm ~ 2mm	33%
比 重	2.72
乾燥密度	1.33g cm^{-3}
間 隙 率	0.511
土壌水分特性曲線 : pF=-0.288 θ +7.0 ($\theta < 14.3\%$, 体積百分率)

図-1 土壌表面の体積含水率 θ_s と厚さ5cmの表土層の平均体積含水率 θ の日々変化(測定時刻1500JST)

鳥取砂丘砂の場合(He and Kobayashi, 1998), θ_s と θ の間に正の相関があったが, 本実験の場合はそれが認められなかった。細粒土になるほど表面付近の土壌水分の鉛直分布と移動過程は複雑になるため, 他の要因による影響によって覆い隠されていたものと考えられる。鳥取砂丘砂の場合は晴天のみを対象としたが, 本実験ではそのような制限をしていないことが第1の原因と考えられる。従って, この場合は, 式(3)において θ を説明変量として採用しないのが適当と思われる。その結果, 蒸発の第3段階が実現したと判断される(4.3参照)7日間のデータを用いて得た回帰式は次のようになった。

$$\theta_o = 13.6 - 0.0377T_o \quad (r=0.81, N=7) \quad (5)$$

図-2に上式を用いて得た推定値と実測値の散布図を示す。ちなみに, 鳥取砂丘砂の場合の温度に対

図-2 θ_o の実測値と本文式(5)による回帰推定値の散布図(1998.5.4~5.10)

図-3 日蒸発量の日々変化

する偏回帰係数は -0.00795 で, マサ土の場合の数分の1であった。土壌表面が乾燥すると蒸発に使われる気化熱が減少するため, 日中の表面温度は上昇する。従って, 偏回帰係数の絶対値が大きいということは, θ_o の減少に伴う蒸発に使われる気化熱の減少, すなわち蒸発速度の低下の割合が小さいことを意味すると思われる。

2. DSLの厚さ

マサ土の場合, DSLの厚さを色調の違いに基づいて測定することは, 特にDSLが薄い場合は難しい。そこで式(1)の左辺の E_{150} に日蒸発量の実測値(前日の1500JSTから当日の1500JSTまでの蒸発量) E_d から推定した値を代入し, 逆算して δ を求めることにする。

図-3に E_d の日々変化を示す。 θ_o が θ_s を下回った5月4日から蒸発量は急激に減少した。DSLが形

図-4 DSLの厚さ δ の日々変化 黒丸は本文式(6)において R_{dm} を0.4, 白丸は0.3として推定した結果, ×印は色調の違いに基づいて物差しによって測定した値。

成された後の(晴天日の) E_d と E_{1500} には、近似的に次の関係が成り立つ(He and Kobayashi, 1998)。ただし、 E_d の単位は cm s^{-1} に変換する。

$$E_{1500} = E_d / R_{dm} \quad (6)$$

He and Kobayashi(1998)によれば、マサ土の場合は $R_{dm}=0.3\sim 0.4$ となった。これを式(1)に代入して得た δ の推定値を図-4に黒丸($R_{dm}=0.4$)と白丸($R_{dm}=0.3$)で示す。ただし、 E_d が得られた日のうち測定時に蒸発の第3段階が実現していた日のみを対象とし、 θ_o が欠測の日は $\theta_o=2\%$ を用いた。また、実験期間の後半に色調の違いに基づいて測定した δ の値を×印で示す。これより、式(6)の適用は、第一近似としては許され、 $R_{dm}=0.3$ が実態に近いものと判断される。

上記のようにして求めた δ の推定値と θ_o の実測値を用いて式(4)に相当する次のような回帰式を得た(図-5)。ただし、 T_o と δ は独立に測定された量で

図-5 δ と θ_o の関係(1998. 5. 4~5. 18) 黒丸と白丸については図-4の説明文参照。

図-6 日蒸発量から $R_{dm}=0.3$ として求めた E_{1500} と T_o と θ_o から推定した E_{1500} の散布図

はないので、 T_o を説明変量とはしなかった。

$$R_{dm}=0.4:$$

$$\delta = 7.2 \exp(-0.17 \theta_o)$$

$$R_{dm}=0.3:$$

$$\delta = 5.4 \exp(-0.17 \theta_o) \quad (r=0.81, N=11) \quad (7)$$

ちなみに、鳥取砂丘砂の場合は次のようになった(He and Kobayashi, 1998)。

$$\delta = 6.3 \exp(-0.41 \theta_o) \quad (r=0.96, N=39) \quad (8)$$

両者を比較すると、マサ土の場合は θ_o の値そのものが砂丘砂より数倍大きいために、 θ_o の変化に伴う δ の変化の割合が砂丘砂の場合よりかなり小さい。式(7)の相関係数 r は式(8)と比べて小さいが、 δ が第一近似に基づく推定値であることを考慮すれば、このような関数形がマサ土の場合にも有効であると判断される。

図-6は $R_{dm}=0.3$ として日蒸発量から求めた E_{1500} と T_o と θ_o から式(1)、(5)及び(7)を用いて推定した E_{1500} の散布図を示す。推定誤差は最大100%近くになるが、数日間の積算値を用いれば、誤差は数%になり、現実的な結果が得られるものと期待される。

3. 第3段階の判定

土壌面蒸発の第3段階は、 θ_o が θ_s より小さくなってDSLが形成され、液体水の気化が土壌中で行われるために、晴天日には土壌表面温度が著しく上昇することによって特徴づけられる。従って、He and Kobayashi(1998)は土壌表面温度と気温の差を用いて第3段階の判定ができるとした。しかし、本

図-7 天気の種類別にみた1500JSTにおける δ と土壌表面温度と気温の差 ΔT_{1500} の関係(1998. 4. 27~5. 18)

実験はビニルハウスで雨を避けてはいるが、天気は晴天に限らず、またポットに詰めた土壌を試料として用いた。従って、同様な判定基準が使えるとは限らない。

図-7は、1500JSTにおける土壌表面温度と地上1.2mにおける気温の差 ΔT_{1500} と δ の関係を示す。また、測定時の天気を晴天(○)、雨天(●)および曇天(×)で区別した。これより、DSLが形成されていなくても($\delta=0$)、ポットが加熱されるために ΔT_{1500} は最大7K程度まで達したことがわかる。しかし、DSLが形成されると、 ΔT_{1500} は晴天の場合は約10Kより大きく、雨天や曇天でも約5Kより大きくなった。ただし、*印のついた黒丸は、DSLが十分発達した後の雨の日(5月11日)の結果を示す。蒸発量が少ないために δ の推定値は大きくなったが、 ΔT_{1500} は0.3Kと小さく、 θ_0 も前日の2.2%から3.4%へと著しく増加し、蒸発の第3段階が実現していなかったことは明らかである。

従って、このような実験条件でも、第3段階の判定は、 θ_0 が θ_s より小さいということだけではなく、 ΔT_{1500} のような土壌表面温度と気温の差に関する指標も併用して行う必要がある。DSLより下層で気化した水蒸気が土壌表面温度と気温の差が小さいためにDSLで盛んに吸収される状態は、第3段階から第2段階への移行期と考えなければならない。

V. 結 論

マサ土を用いた蒸発実験の結果から次のような結論が得られた。

1. 蒸発の第3段階における土壌表面の体積含水率 θ_0 と厚さ5cmの表土層の平均体積含水率 θ_s の間には、鳥取砂丘砂の場合のような(He and Kobayashi, 1998)有意な関係は認められなかった。しかし、 θ_0 と土壌表面温度 T_0 の間には負の相関関係が認められ、 T_0 を測定して θ_0 を推定することが可能である。
2. DSLの厚さ δ と θ_s の間には、鳥取砂丘砂に関して得られたのと同様な関数関係が認められ、 θ_s から δ を推定することが可能である。

DSLバルク法は、 θ_0 と δ が T_0 と θ_s から評価できることを前提としているが、以上の結果よりDSLバルク法はマサ土にも適用可能と判断される。

VI. むすび

本報では、He and Kobayashi(1998)が提案し、鳥取砂丘砂への適用例を示したDSLバルク法が、マサ土へも適用可能か否かをみるために行った実験結果について報告した。結論としては、係数を変えることによって同じ公式が使えることが判明した。今後は、さらに多くの種類の土壌に適用し、土壌の種類と諸係数の値域の関係を明らかにして、リモートセンシングによる乾燥地からの蒸発量評価に結び付けたいと考えている。また、式(5)に関しては、天気の種類ごとに異なる回帰式を作れば、更に精度は向上すると思われる。

本実験では、土壌表層の含水率測定にTDRを用いた。その結果、TDRによる測定結果と炉乾燥法による結果の間に目立った傾向の違いは認められず、TDRが表土層の体積含水率の測定に使用可能であることが明らかになった。ただし、TDRにも多くの器種があり、本研究で用いたのとは異なる器種に対しては本結果から何の判断もできないことは当然である。

本実験を行うに際して、有迫鉄朗氏(九大農学部)のご協力を得た。また、本実験は科学研究費補助金(萌芽的研究)(課題番号09876062)を受けて行われた。記して感謝の意を表する。

引 用 文 献

- He, W. and T. Kobayashi (1998): A rational parameterization of evaporation from dry, bare soil, *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, pp. 955-963.
- 小林哲夫(1990): 乾燥裸地面からの蒸発について, 水資源研究センター報告(京大), **10**, pp. 29-41.
- Kobayashi, T. and H. Nagai (1995): Measuring the evaporation from a sand surface at the HEIFE desert station by the dry surface layer (DSL) method, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp. 937-945.
- Kobayashi, T., W. He and H. Nagai (1998): Mechanisms of evaporation from soil with a dry surface, *Hydrol. Process.*, **12**, pp. 2185-2191.

(受付: 1998年11月30日, 受理: 1999年2月10日)