

ジブチ共和国南部沙漠地帯の土壌面蒸発量算定と水蒸気移動形態の解明 Calculation of Soil Surface Evaporation and study on Water Vapor Transport Patterns in the Southern Desert of the Republic of Djibouti

倉光太一¹・鈴木伸治²・渡邊文雄²
¹東京農業大学大学院・²東京農業大学

熱帯砂漠気候のジブチ共和国の南部において、乾燥層の閾値となる体積含水率(m^3/m^3)と厚さを推定し、乾燥層内の水蒸気フラックスを土壌面蒸発量とすることで合理的な結果を得ることができた(RMSE=0.082 mm/d)。乾燥層形成時(344 日/年)、下降フラックスが発生し、夜間から早朝にかけて水蒸気吸着が発生していた。

キーワード: 乾燥層、水蒸気フラックス、液状水の拡散係数、蒸発、水蒸気吸着

Key words: Dry Soil Layer, Water vapor flux, Water diffusion coefficient, Evaporation, Water vapor adsorption

1. はじめに

本研究の対象地であるジブチ共和国は、アフリカの角地域に位置する熱帯砂漠地帯であり、年降雨量は50~200 mmと非常に少ない。このような地域では、蒸発の定量化が必要だが、正確な水収支を得ることが困難である。ジブチでは降雨時を除くほとんどの期間で土壌表面に乾燥層が形成され、ボーエン比法等では算定が難しい。また、ジブチ全土の9割以上で植生がないため、乾燥層を考慮した蒸発量算定方法の確立は非常に重要である。同時に、降雨以外の大気からの水分供給である結露や水蒸気吸着も水収支に大きく関係する。Kosmasら(2001)によると、半乾燥地域では地表水収支において水蒸気吸着が支配的な役割を果たし、時には蒸発散量の約70%を占めることが報告されている。筆者らの今までの研究により、ジブチにおいても、非降雨による大気から土壌への水分供給が確認されており、それらの特性を明らかにすることが必要である。本研究では、①乾燥層を考慮した蒸発量算定、②非降雨による水分供給の実態、を明らかにすることを目的とした。

2. 野外観測地概要

ジブチ南部の Douda 試験農場を調査対象地とした。この地域は平坦であり、表面水の流入は無い。また、土性は壤質砂土である。ウェザーステーションにより、気温、相対湿度(RH)、風向、風速、日射量を観測している。敷地内に4 m×4 mの区画を設け、Fig.1のように土壌水分センサ及び温度センサを2反復設置した。これらの観測を2023年2月15日から行った。

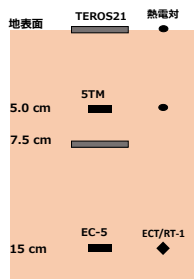


Fig. 1
Sensor
Arrangement

3. 乾燥層を考慮した蒸発量算定

乾燥層では、毛管水での移動はほとんどなく、水蒸気移動が卓越している。そこで乾燥層の閾値(m^3/m^3)を求め、乾燥層内の水蒸気フラックスを蒸発量とした。

3. 1. 乾燥層閾値の仮定

野外観測地で採取した土壌の水分特性曲線(Fig.2)及び、不飽和透水係数(Fig.3)を長谷川(1999)の方法で求めた。得られた不飽和透水係数に、フィックの拡散則と同様の形にする拡散係数の関数を導入し、体積含水率に対する液状水の拡散係数の関係から乾燥層の閾値を $0.068 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と仮定した(Fig.4)。

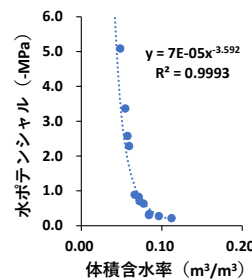


Fig. 2 soil-water characteristic curve

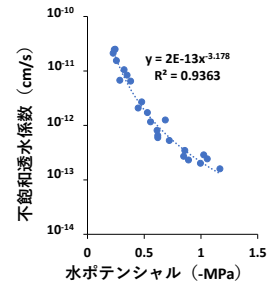


Fig. 3 unsaturated hydraulic conductivity

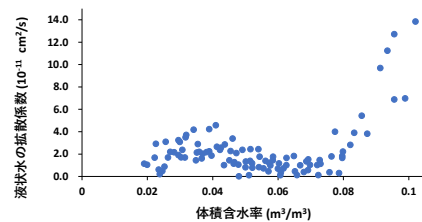


Fig. 4 Diffusion coefficient of liquid water

3. 3. 乾燥層厚さの推定

観測地の土壌水分プロファイルをもとに、閾値の体積含水率以下に該当する地表面からの深さの範囲を乾燥層厚さとした。

3. 4. 水蒸気フラックスの算出

土壌内の水蒸気拡散の式(Philip and de Vries, 1957)を用いて、乾燥層を考慮した蒸発量(以後、蒸発量と表記)を計算した。なお、降雨後の乾燥層が形成されていない期間は、深さ5 cmと15 cmに埋設した土壌水分センサにより、土壌水分減少法で蒸発量を算定した。また、地表面で測定した水ポテンシャルと温度から地表面の水蒸気圧を求め、大気-地表面の水蒸気圧勾配に標準大気圧下の水蒸気拡散係数を乗じ、大

気から地表面へ向かう水蒸気移動量（下降フラックス）を計算した。

精度検証のため、内径 5.0 cm、高さ 10.2 cm のステンレス円筒容器を用いたマイクロライシメータ法で得た実蒸発量と、計算によって求めた蒸発量を比較したところ、RMSE=0.082 mm/day であり、非常に精度よく算出できていた。(Fig.5)。

乾燥層は降雨時に消失し、5~10 日後に再形成された。厚さは無降雨期間に増大し、最大 18 cm であった。乾燥層形成時のほとんどの場合、地表面(RH=15%)は常に大気(RH=66%)よりも乾燥し、大気から水蒸気が供給されている可能性があった(Fig.6)。また、推定した乾燥層厚さの根拠となる可能性を考え、地表面から深さ 27.5 cm まで、2.5 cm ごとの土壌 EC_{1:5} を測定した。EC の最大値は深さ 20~25 cm の層に存在し、推定した乾燥層厚さが 5~18 cm であったため、実際はより厚い可能性も示唆されたが、降雨による浸潤前線との関係も考慮していく必要がある (Fig.7)。

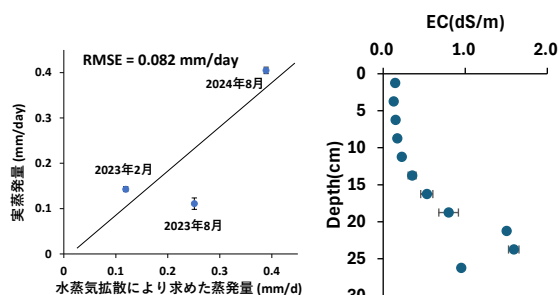


Fig. 5 Accuracy verification of evaporation

Fig. 7 Electrical conductivity (EC) profile

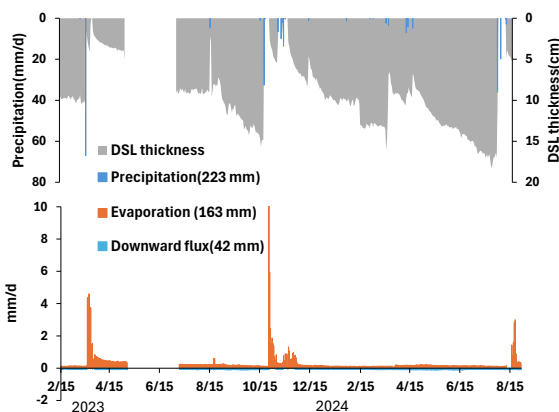


Fig. 6 Annual changes in dry soil layer thickness and evaporation

4. 非降水の水分供給量の測定

4.1. 方法

2024年8月20日~28日に対象地にて、内径 5 cm、高さ 5.1 cm の 100 cm³ ステンレス製円筒容器で採取した不攪乱供試体の質量を、電子天秤とデータロガーを用いて 10 分間隔で測定した。測定区には、雨よけを設置したが、日射及び風通しを妨げないものとした。同時に供試体付近の気温と相対湿度、教師土壌表面の温度を測定した。測定終了後に土壌表面の含水比を測定し、Fig.2 より土壌の水ポテンシャルから水蒸気圧を算出した。測定期間において、平均の大気水蒸気圧と、土壌表面の水蒸気圧から、下降フラックスを算出した。

4.2. 結果

測定期間中の夜間、設置した土壌カラムの質量が増加した日があり、大気からの水分供給が確認できた (0.1 ~ 1.0 mm/day) (Fig.8)。同時に測定していた、土壌面温度は露点を下回することは無かったため、大気からの水分供給の実態が、結露ではなく水蒸気吸着であることが明らかになった。12月の早朝、Douda では地表面温度が露点に達することから、結露が生じることがあるものの限定的である。一方で、水蒸気吸着は年間を通して、発生すると考えられた。

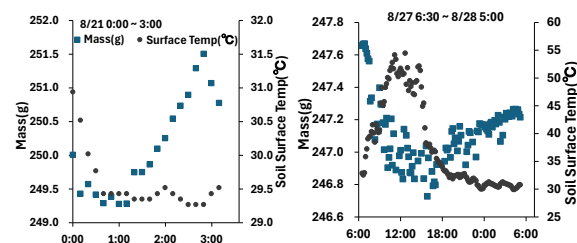


Fig. 8 Occurrence of water vapor adsorption

4.3. 考察

水蒸気吸着が発生した時間帯、平均の下降フラックス量は 0.50 mm/day であり、水蒸気吸着量は平均 0.35 mm/day であったため、下降フラックス量の 70% は水蒸気吸着し、土壌水分として供給され、残りの 30% は吸着せずに再蒸発したと考えられた。

5. 結論

乾燥地の正確な蒸発量算定方法は未だ確立されておらず、乾燥層を考慮する必要がある。本研究では、乾燥層の閾値及び厚さを推定し、乾燥層内の水蒸気フラックスを土壌面蒸発量とすることで合理的な結果を得ることができた(RMSE=0.082 mm/d)。

乾燥層は無降雨期間に厚さが増大し、降雨時に消失して、降雨後 5~10 日で再形成された。乾燥層形成時は大気(RH=66%)よりも地表面(RH=17%)が乾燥しており、降雨量の 18% に相当する水蒸気移動量(42 mm)が大気から地表面へ発生していた(下降フラックス)。乾燥層が 344 日/年も地表を覆っていることが確認でき、乾燥層を考慮することの重要性が再確認された。

非降水の実態解明では、大気からの水分供給発生時、地表面温度が露点に達することが無かったため、結露ではなく、水蒸気吸着(0.35 mm/d)であることが確認できた。また、下降フラックス(0.50 mm/d)の内、70% が水蒸気吸着し、土壌水分に供給され、残りの 30% は再蒸発したと考えられた。ただし、下降フラックスが発生しているにもかかわらず水蒸気吸着が起こらない日もあったため、他の要因も考えていく必要がある。

参考文献

- 長谷川周一(1999):畑作土壌の-0.1 MPa 以下の透水係数の値 日本土壌肥科学雑誌, 70(2), 194-197.
- HILLEL, D. (1995): 不飽和土壌内での水の流れ. 土壌物理学概論, 岩田進午・高見晋一・内嶋善兵衛編, 101-126, 養賢堂.
- Philip, J.R. and D.A. de Vries (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Am. Geophys. Union, 38 pp.222-232