

# 塩クラストによる蒸発抵抗の土壌および溶質依存性 Dependence of salty crust resistance for evaporation on soil type and chemical composition

島野隆寛\*, 藤巻晴行\*, 井上光弘\*\*, 安部征雄\*, 中根和郎\*\*\*

SHIMANO Takahiro, FUJIMAKI Haruyuki, INOUE Mitsuhiro, ABE Yukuo, NAKANE Kazurou

## 1. はじめに

乾燥地・半乾燥地の灌漑農業において、塩類集積は大きな減収要因であり、その主な駆動力である土壌面蒸発速度の適切な数値予測は、その克服の鍵となる。土壌面蒸発により表面付近に集積した溶質は、①浸透ポテンシャルの低下、②塩クラストによる水蒸気通過抵抗の増大、③アルベドの増加などにより蒸発速度を低下させる。筆者らは、②を考慮することによって、より適切に蒸発速度が数値解析できる可能性を示してきたが、マサ土・NaCl 以外の土壌・溶質での測定は未だ行われていない。そこで本研究では、異なる土壌・溶質の組み合わせにおける塩クラストによる水蒸気通過抵抗の測定を試みた。

## 2. 実験方法

風洞(防災科学技術研究所地表面乱流実験施設)内で以下の塩類集積実験を行った。内径3.8cm、高さ5.2cmのカラムに、風乾させたマサ土もしくは豊浦砂を均一の仮比重で充填した。3000ppmの水溶液で飽和した後、マサ土については-75cm、豊浦砂については-40cmの圧力水頭をカラム下端にマリOTT装置を用いて与え、実験期間中一定に維持した。供給水の濃度も3000ppmで一定とした。排水開始後2時間経過した時点でカラム上面を開放し、蒸発を開始した。以後、蒸発開始時刻を0とする。放射以外の気象条件は、気温25°C、湿度、風速を実験期間中ほぼ一定とした。カラムは3本ないし4本用意し、そのうち1本には熱電対を深さ約0.15cmに挿入した。地温が25°Cで均一かつ一定となるように下向き放射強度を適時調節した。気象条件を均一にするため、12時間ごとの重量測定の際に位置をローテーションするとともに、カラムの風に対する向きを反転させた。48時間ごとに1本ずつ採土し、水分及び塩分分布を測定した。実験は豊浦砂-NaCl、マサ土-NaCl、マサ土-KClの3通りの土壌・溶質の組み合

わせで行った。また各実験ごとに、清水により十分湿らせた土壌からの蒸発速度を測定し、空気力学的抵抗を求めた。

## 3. 数値解析

土壌面蒸発速度  $E$  (cm/s) の計算には、バルク輸送式の分母に塩クラスト抵抗  $r_{sc}$  (s/cm) を追加した次式を用いた。

$$E = \frac{\rho_{vs}^* h_{rs} - \rho_{va}^* h_{ra}}{r_a + r_{sc}} \quad (1)$$

ここで、 $\rho_{vs}^*$ : 土壌面における飽和水蒸気濃度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $h_{rs}$ : 土壌面における相対湿度、 $\rho_{va}^*$ : 基準高度における飽和水蒸気濃度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $h_{ra}$ : 基準高度における相対湿度、 $r_a$ : 空気力学的抵抗 (s/cm) である。 $h_{rs}$  は次式で与えられる。

$$h_{rs} \approx h_{re} = \exp\left(\frac{\psi_w}{R_v T}\right) \quad (2)$$

ここで、 $h_{re}$ : 平衡相対湿度、 $\psi_w$ : 水ポテンシャル (cm)、 $R_v$ : 水蒸気の気体定数 (4697 cm<sup>3</sup>/K)、 $T$ : 温度 (K) である。

水分移動の数値解析は等温水蒸気移動式を含

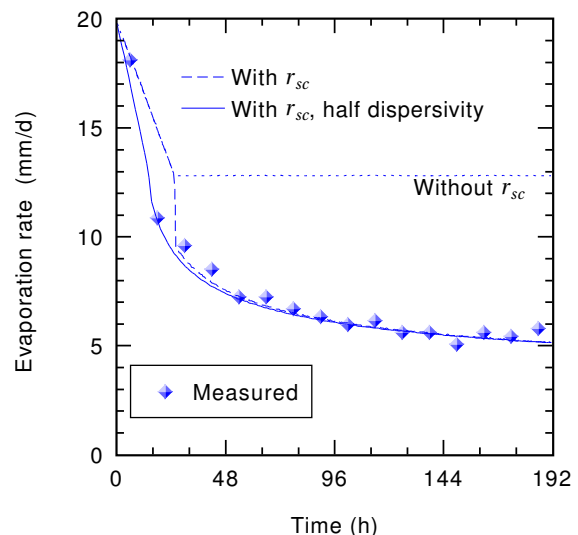


Fig.1 Temporal change of evaporation rate for Toyoura sand

\* 筑波大学大学院

\*\* 鳥取大学乾燥地研究センター

\*\*\* 防災科学技術研究所

Univ. of Tsukuba

Arid Land Research Center, Tottori Univ.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

キーワード: 土壌面蒸発, 塩類集積, 溶質移動

む Richards 式を修正 Picard 型差分法で解くことにより行った。本実験で得られた塩クラスト抵抗を考慮した場合と無視した場合の2通りの上部境界条件で結果を比較した。

溶質移動の数値解析では移流分散方程式 (CDE)を陰解型差分法により解いた。その際、本実験とは別個に測定された分散長 (豊浦砂: 0.18cm, マサ土: 0.11cm)をそのまま用いた場合と、表層 2cm のみ半減させた場合について比較した。溶質拡散の屈曲度の水分依存性も別途測定したものをを用いた。数値的分散の補正も行った。空間増分は 0.025cm で均一とした。

#### 4. 結果と考察

蒸発速度の経時変化の一例 (豊浦砂) を Fig.1 に示す。土壤面は十分湿っているため、蒸発速度の低下は全て塩の影響である。点線は塩クラストの影響を考慮しない場合の数値解である。浸透ポテンシャルで説明可能な蒸発速度の低下幅以上に蒸発速度が低下しており、塩クラストによる水蒸気通過抵抗が生じていることを示している。マサ土を用いた実験においても同様であった。

低下した蒸発速度と、空気力学的抵抗  $r_a$  から塩クラスト抵抗値  $r_{sc}$  を求めた。 $r_{sc}$  の大きさは塩クラスト量に依存するが、塩クラスト量自体の測定は困難なため、深さ 0.25cm より上部の溶質量  $\Gamma$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) との関係調べ、それぞれ次式であてはめた (Fig.2)。

$$r_{sc} = a \ln(\Gamma) + b \quad (3)$$

ここで、 $a, b$ : 実験定数である。

同一の土壤については、KCl より NaCl の方が同じ  $\Gamma$  に対して塩クラスト抵抗の値が大きい。これは結晶の析出形状の違いによるものと考えられる。一方、溶質が同じ場合、マサ土、豊浦砂の間で曲線に明瞭な違いが見られなかった。これは塩クラストが主として土壤面上 (外側) に形成されるためだと思われる。

Fig.1 には、得られた  $r_{sc}(\Gamma)$  を用いた蒸発速度の数値解 (破線) も示されている。析出開始後は実測値と良く一致しているが、蒸発開始後 30 時間程度の蒸発速度の急速な低下が再現できていない。

塩濃度分布の実測値と数値解の比較の一例 (豊浦砂, 48 時間後) を Fig.3 に示す。塩はごく表層に集積しており、土壤面で濃縮された塩は深さ 0.5cm より下部には拡散していない。しかしながら、実測された分散長をそのまま用いた場合には、下

方への拡散を過大評価している。蒸発速度の低下の遅れは、下方への拡散を過大評価したことにより、土壤面における濃度上昇が遅れたためと考えられる。一方、分散長を半減させた場合は濃度分布、蒸発速度とも実測値と良く一致した。

マサ土を用いた実験においても同様であった。水分分布についてはいずれの数値解析でも実測値と良く一致していた。

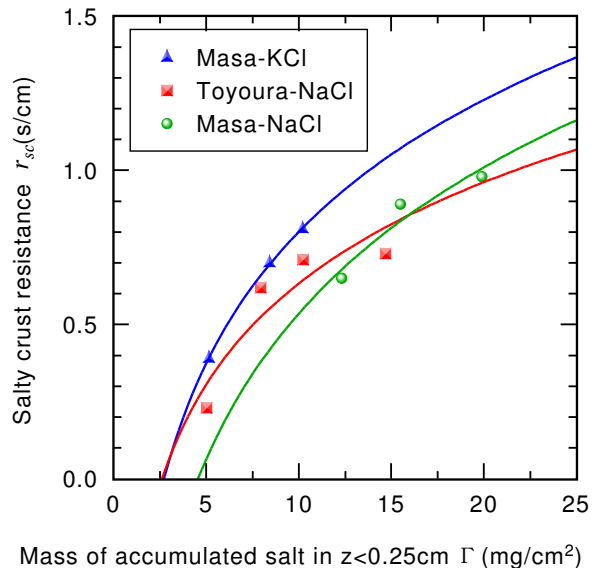


Fig.2 Salty crust resistance as a function of accumulated salt

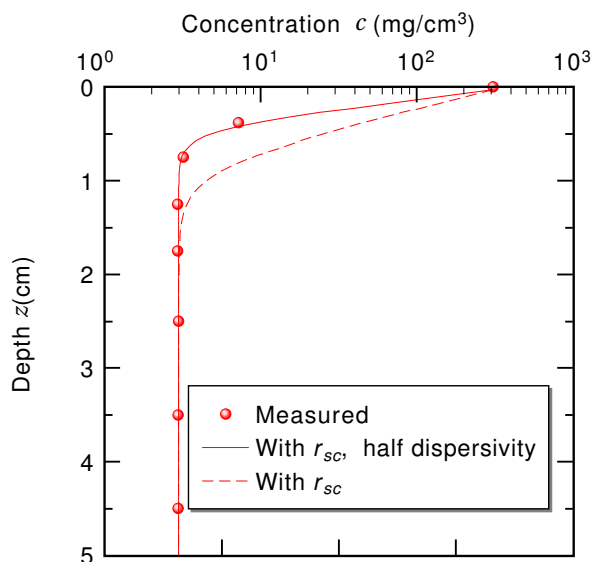


Fig.3 Comparison of measured and simulated concentration profiles at  $t = 48\text{h}$  for Toyoura sand