

塩水飽和チャオソイルの塩析出過程と 減率蒸発特性

SALT CRYSTALLIZATION PROCESS AND PROPERTIES OF EVAPORATION
REDUCTION ON CHAO SOIL SURFACE SATURATED WITH SALINE WATER

王媛¹・寺崎寛章²・福原輝幸³・城戸拓人⁴

Yuan WANG, Hiroaki TERASAKI, Teruyuki FUKUHARA and Takuto KIDO

¹学生会員 福井大学大学院 特別研究学生 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

²学生会員 工修 福井大学大学院 工学研究科システム設計工学専攻 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

³正会員 工博 福井大学大学院教授 工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

⁴非会員 福井大学 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

This paper introduces two new methods “Water Absorption Paper method” and “Microscope Visualization method” to help a better understanding of the properties of evaporation from Chao soil surface saturated with saline water. The former can measure the salt concentration on the soil surface, C_{surf} . The latter can visualize the occurrence-multiplication of salt crystal and the growth of the deduced salt.

These new methods found the following two results; (i) the commencement of 1st falling-rate evaporation period is mostly in agreement with the appearance time of the crystal form of salt (salt crystal) on the soil surface after C_{surf} reached the saturation salt concentration, (ii) the commencement of 2nd falling-rate evaporation period is mostly in agreement with the appearance time of deduced salt caused by drying of the salt crystals.

Key Words : *Falling-rate evaporation, Salt crystal, Deduced salt, Microscope Visualization method, Soil surface salt concentration, Water Absorption Paper method, Chao soil*

1. はじめに

乾燥・半乾燥地における灌漑農地では、表層土壌に塩類が集積する塩害により土壌が荒廃していく例が、数多く見られる¹⁾。塩害が深刻な国の一つである中国では、東は沿岸部から西はチベット高原まで広範囲に亘って塩類集積が見られ、その面積は約3666万haに達し、中国の農耕地面積の約25%を占める²⁾。今後の人口増加に伴う食糧増産を考慮すると、塩害の拡大防止および土壌改良は極めて重要となる。

上述の塩類集積は、塩性地下水位の上昇および不適切な灌漑水の使用により引き起こされることが多い。前者に対しては排水設備(暗渠)の設置やマルチによる蒸発抑制³⁾、後者に対しては塩性化した灌漑用水の淡水化⁴⁾や塩濃度のモニタリングなどの塩害防止策がある。

一方、塩類集積土壌に対しては、灌漑水を用いて土壌中の塩を排出させるリーチング法⁵⁾や塩類捕集シートを用いたDehydration法⁶⁾などの除塩技術が開発されている。

さらに、土壌改良剤の使用や耐塩性植物の導入⁷⁾などの対策が試みられている。

いずれの方法においても確実に塩害防止効果を上げようとするれば、土壌表面からの塩析出(乾燥に伴って土壌表面に結晶化した白い塩が現れる現象)を予測し、除塩効率を上げる必要がある。しかしながら、除塩効率向上の鍵の一つとなる塩析出と蒸発速度の相互作用については、未解明な部分が多い。

蒸発に伴う塩析出は、(1)土壌表面の乾燥に伴う塩析出、(2)湿潤状態からの塩析出、に大別される。(1)の塩析出に関して、例えば、安部^{8),9)}は土性の異なるカラムを用いて塩集積現象を再現し、粘土含有量の違いによる土壌内の水分変化を調べるとともに、塩集積層厚および塩集積層内の濃度勾配などを詳細に検討した。松川と中野¹⁰⁾は飽和土壌カラムからの蒸発実験を行い、乾燥に伴う土壌内部の塩濃度変化に加えて、土壌表面塩濃度および析出塩量を数値解析により予測した。また藤巻¹¹⁾は浅い地下水面を持つ土壌カラムからの蒸発に伴う塩集積実験を行い、移流分散方程式の適用の妥当性について検

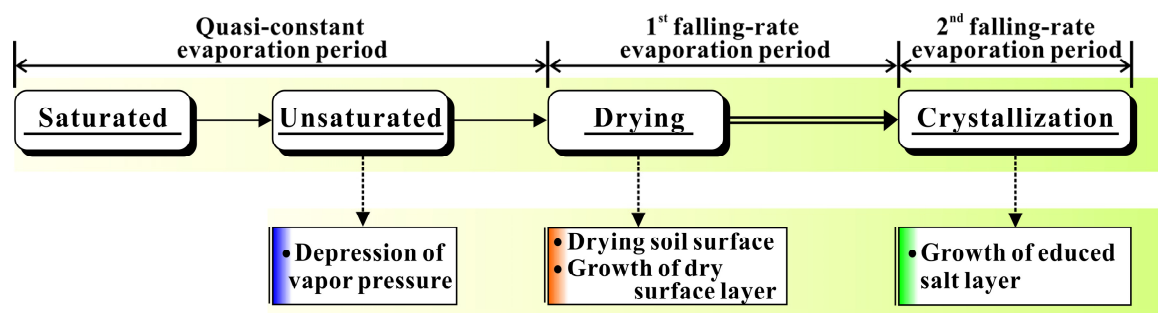


図-1 土壌表面の乾燥に伴う塩析出と蒸発減少

表-1 湿潤状態からの塩析出と蒸発減少に関する問題点とその解決策

	問題点	解決策
1	塩析出の開始 ⇒数mmから数10mm厚のサンプリングでは土壌表面塩濃度 C_{surf} は求め難い	サンプリング法の改善 ⇒吸水紙法
2	塩析出が確認される以前で起こる減率蒸発(湿潤減率蒸発) ⇒水蒸気密度(蒸気圧)の低下では説明し難い	塩析出の可視化 ⇒マイクロスコープ可視化法

討した。

これらの研究から得られた塩析出による蒸発速度の変化は、1) 表層土壌の塩濃縮によって、土壌表面の水蒸気密度(蒸気圧)が低下して、蒸発フラックスがわずかに減少する擬似恒率蒸発、2) 土壌表面の乾燥層の発達に伴う第一減率蒸発(乾燥減率蒸発と呼称)、3) 析出塩層の成長に伴う第二減率蒸発(塩析出減率蒸発と呼称)、に分類される(図-1を参照)。

一方、(2)の塩析出は、見かけ上(1)のそれと類似するものの、現象の原因解明には多くの問題点を残す(表-1を参照)。その代表的な現象は、飽和状態で土壌表面が十分に湿潤しているにも関わらず、塩析出の前に起こる蒸発速度の著しい低下である(湿潤減率蒸発と呼称)。この湿潤減率蒸発は乾燥減率蒸発と類似しており、上述した1)の水蒸気密度の低下だけでは説明できない¹²⁾。湿潤減率蒸発および塩析出減率蒸発を定量的に評価するためには、(i) 塩析出の前に土壌表面で起こる素過程、(ii) 塩析出開始時間、および(iii) 析出塩の成長過程、をそれぞれ詳細に調べる必要がある。

塩析出開始時間に関する研究は、藤巻ら¹¹⁾が照度計を用いて開始時間を推定した以外は殆ど皆無である。地表面の乾燥とは異なり、塩水湿潤土壌表面では塩析出の前に色彩的な変化が現れ難いので、この方法では湿潤減率蒸発の開始を検出することが難しい。よって湿潤減率蒸発および塩析出に到る素過程を正確に把握するためには、土壌表面塩濃度が重要となるが、土壌表面塩濃度を実測した研究は未だない。

そこで本研究では、表-1に示す問題点を解決するため、吸水紙を用いて土壌表面塩濃度を測定する方法(吸水紙法¹³⁾)を提案するとともに、マイクロスコープを用いて、塩水飽和チャオソイルの湿潤減率蒸発および塩析出減率蒸発の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

(1) カラム実験概要

実験は恒温恒湿室内(温度:21℃, 相対湿度:15%)で16本の塩化ビニル製カラム、給水タンクおよびチャオソイルを用いて行われた(図-2を参照)。16本のカラム(高さ:0.17m, 内径:0.077m)のうち、14本は塩水を供給した塩水土壌カラム、残り2本は比較用に淡水を供給した淡水土壌カラムである。

塩水土壌カラム12本は厚さ0.01mおよび0.02mのリングを積み重ねて構成され、カラム分割法によりリング毎にサンプリングした。塩水土壌カラム2本および淡水土壌カラム1本には、熱電対を挿入し、土壌温度を測定した。また、温・湿度センサー(Vaisala)により、空気温度・湿度を計測した。蒸発量は最小読み0.01gの重量計(Mettler Toledo)を用い、土壌カラムの重量減少分から求めた。析出塩量 $M_{crystal}$ (kg/m²)は析出塩直接測定法¹²⁾により、最小読み0.001gの重量計(Mettler Toledo)を用いて測定した。

次に、実験手順について述べる。カラムにチャオソイルを乾燥密度1600kg/m³で充填した後、給水タンクより7本の塩水土壌カラムには供給塩濃度 $C_{supply}=10\text{kg/m}^3$ の塩水を、残り7本の塩水土壌カラムには $C_{supply}=80\text{kg/m}^3$ の塩水を、それぞれカラム底面から供給した。マリオット管で水面を地表面下0.1mに保つことでカラム内土壌を毛管飽和させた。その後、膨潤が終了した時点で余盛り土壌を取り除き、光散乱シート(地表面より高さ0.1m)および125Wのランプ(地表面より高さ0.3m)を取り付け、ランプを照射して実験を開始した。 $M_{crystal}$ は実験開始120時間、168時間、210時間および288時間後に、それぞれ計測した。また蒸発量および土壌温度は10分間毎に自動計測した。

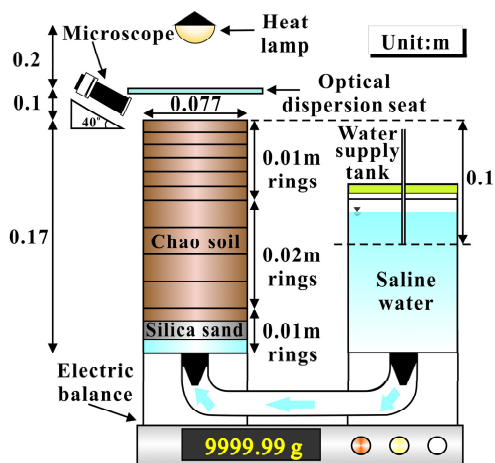


図-2 実験概要

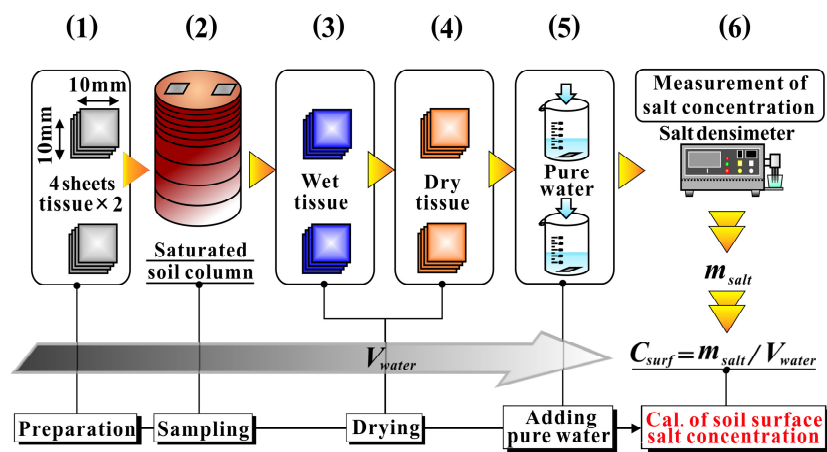


図-3 吸水紙法

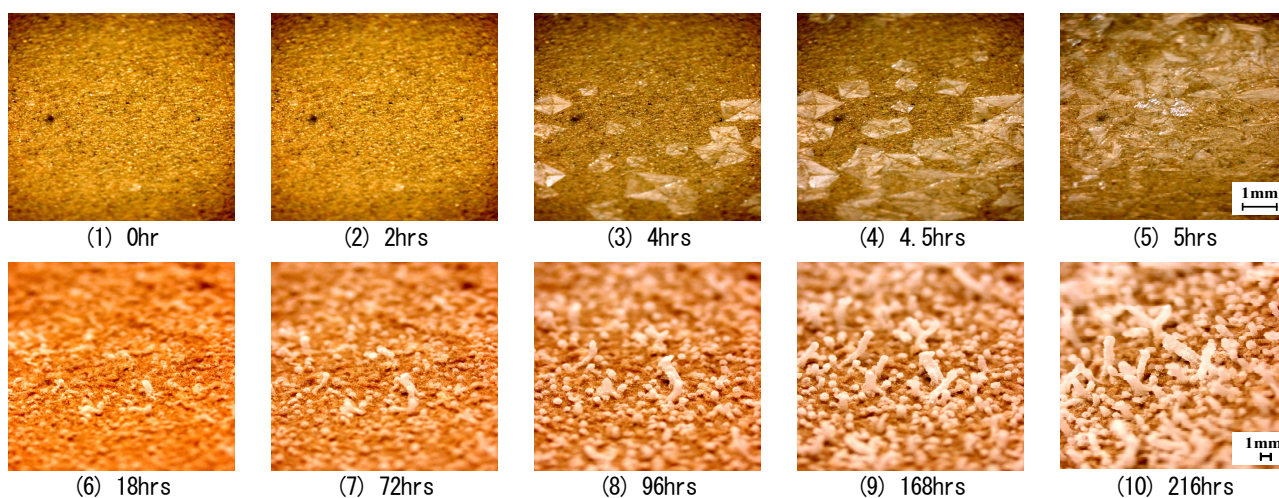


写真-1 結晶塩の発生・増加(上段)および析出塩の成長(下段) ($C_{init}=80\text{kg/m}^3$)

(2) 吸水紙法

実験開始から塩析出に至るまでの土壌表面塩濃度 C_{surf} の経時変化を、吸水紙法(以下の手順)で調べた(図-3を参照)。(1)4枚重ねにした10mm四方の厚さ0.075mmの吸水紙(ティッシュ)を2つ用意する。(2)吸水紙を土壌表面の異なる2点に静かに置き、それに土壌表面の塩溶液を吸水させる。(3)吸水後、最小読み0.001gの重量計にて、塩溶液を含む吸水紙の質量を計測する。(4)吸水紙を乾燥させ、その質量を計測することで吸水量およびその吸水体積 V_{water} を求める。(5)乾燥吸水紙と純水をビーカーに入れ、十分に攪拌する。(6)塩分濃度測定器を用いて、採取した塩量 m_{salt} を測定し、2点の平均値より $C_{surf}(=m_{salt}/V_{water})$ を決めた。

なお、 C_{surf} の計測は実験開始から目視にて塩析出が観測される時点まで、0.5～3時間毎に行った。

(3) マイクロスコープ可視化法

結晶塩の発生と増加の様子を詳しく観察するため、マイクロスコープを用いて土壌表面を10分間毎に撮影した

(以下、マイクロスコープ可視化法と呼称)。またマイクロスコープ可視化法で、塩析出の開始および析出塩の成長状態も観察した。

3. 実験結果および考察

(1) 塩析出状況

写真-1は、マイクロスコープにて撮影された初期塩濃度 $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ の土壌表面の様子を、実験開始から順次示す。実験開始約4時間後に土壌表面に逆ピラミッド型の透明な結晶塩が観察された(写真-1 (3), (4)を参照)。その後、結晶塩は時間とともに数を増し、平面的な広がりを見せ、約5時間後に土壌表面全体を覆った。結晶塩の存在は、土壌から出て来た空気塊が土壌表面で閉じ込められた状態、すなわちエントラップエアとして観察されたことにより気づくことができた。さらに、結晶塩は互いにくっついて膜状になり、時間とともに厚くなった。その後、結晶塩が乾燥することにより、約18時間後

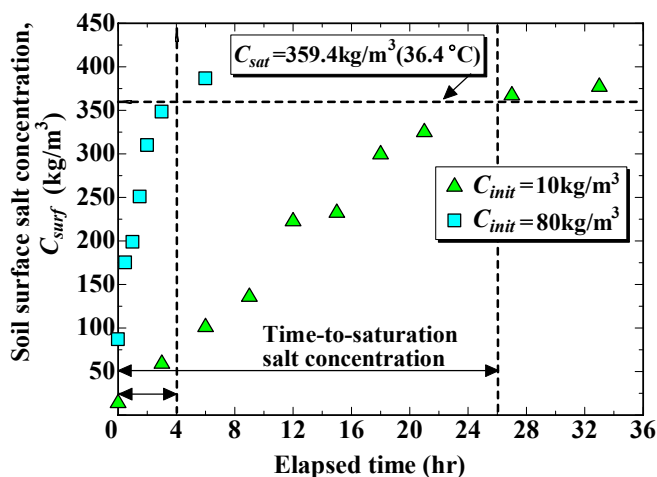


図-4 土壌表面塩濃度 C_{surf} の経時変化

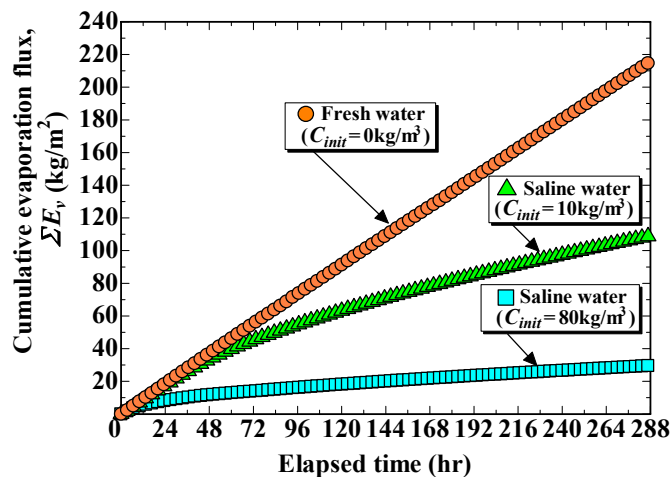
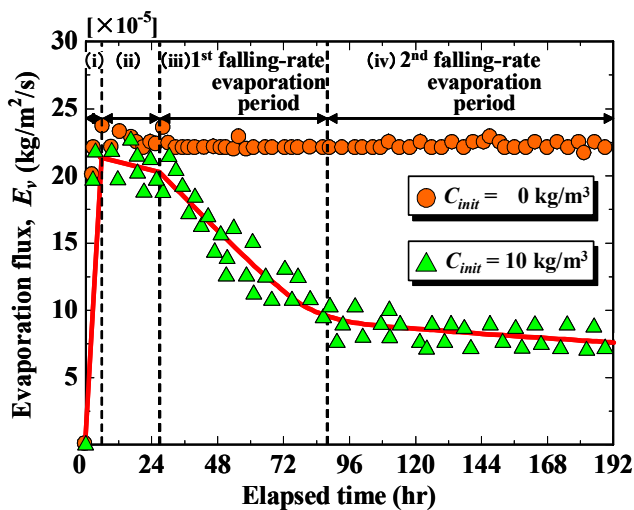
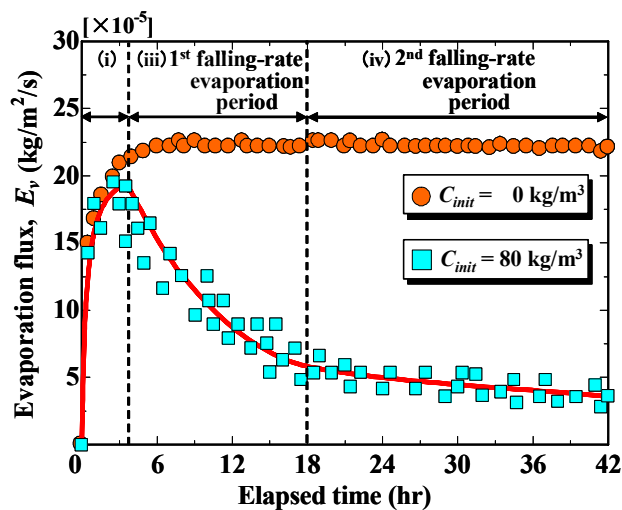


図-5 積算蒸発量 ΣE_v の経時変化



(a) $C_{init}=10\text{kg/m}^3$



(b) $C_{init}=80\text{kg/m}^3$

図-6 蒸発フラックス E_v の経時変化

に析出塩が観察され、さらに成長して層状となった。

(2) 土壌表面塩濃度

図-4は、吸水紙法により得られた土壌表面塩濃度 C_{surf} の経時変化を示す。図-4より、 $C_{init}=10$ および 80kg/m^3 の C_{surf} は実験開始初期において概ね線形的に増加したが、その後増加率は減少した。また $C_{init}=10\text{kg/m}^3$ は実験開始から約26時間後に、 $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ は約4時間後に、それぞれ C_{surf} は飽和(飽和塩濃度 $C_{sat}=359.4\text{kg/m}^3$ 、地表面温度 36.4°C)に達した。この飽和塩濃度到達時間は、 $C_{init}(=C_{supply})$ が高いケースで早い。また2つのケースともに、写真-1に示す結晶塩が観察され始めた時間と飽和塩濃度到達時間は概ね一致した。

なお、飽和塩濃度到達時間後の C_{surf} が C_{sat} を超えているが、これは吸水紙に結晶塩が付着したためと考えられる。

(3) 蒸発量

図-5は、積算蒸発量 ΣE_v (E_v : 蒸発フラックス) の経時変化を示す。淡水土壌カラムの ΣE_v は実験期間中、時間

とともに線形的に増加した。これに対して、塩水土壌カラムの ΣE_v は、実験開始初期において淡水土壌カラムのそれと重なっていたが、時間の経過とともにその時間増加率(勾配)は小さくなった。塩水土壌カラムの ΣE_v が淡水土壌カラムの ΣE_v から離脱する時間は、 $C_{init}(=C_{supply})$ が高いほど早まる。最終的に、実験終了時(288時間後)の蒸発比(塩水土壌カラムの ΣE_v / 淡水土壌カラムの ΣE_v) は、 $C_{init}=10$ および 80kg/m^3 で、それぞれ0.51および0.14となった。

図-6は $C_{init}=10$ および 80kg/m^3 の蒸発フラックス E_v の経時変化を示す。 $C_{init}=10\text{kg/m}^3$ の E_v の変化は、概ね4つの期間に分けられる。すなわち、(i) 実験初期、ランプ照射により E_v が急上昇する期間、(ii) その後、ほぼ恒率蒸発に相当するような期間(擬似恒率蒸発期間)、(iii) 急激に E_v が減少するような第一減率蒸発期間(湿潤減率蒸発期間)、(iv) 緩やかに E_v が低下するような第二減率蒸発期間、である。一方、 $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ では期間(ii) は判別し難く、期間(i)、(iii) および(iv) のプロセスを経た。この理由は、 E_v の上昇中に C_{surf} が飽和に達したため、結晶塩

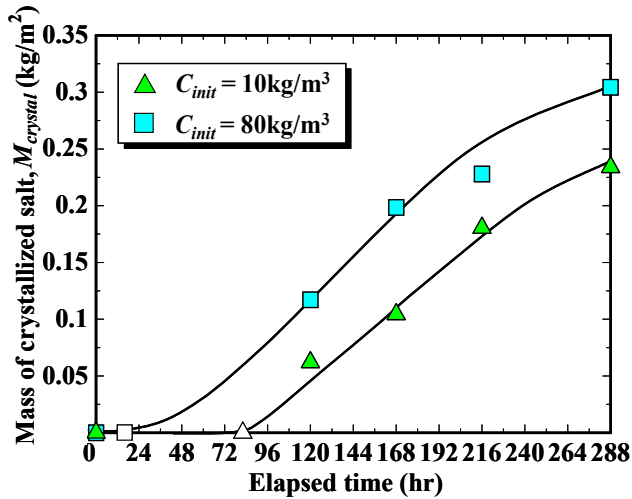


図-7 析出塩量 $M_{crystal}$ の経時変化

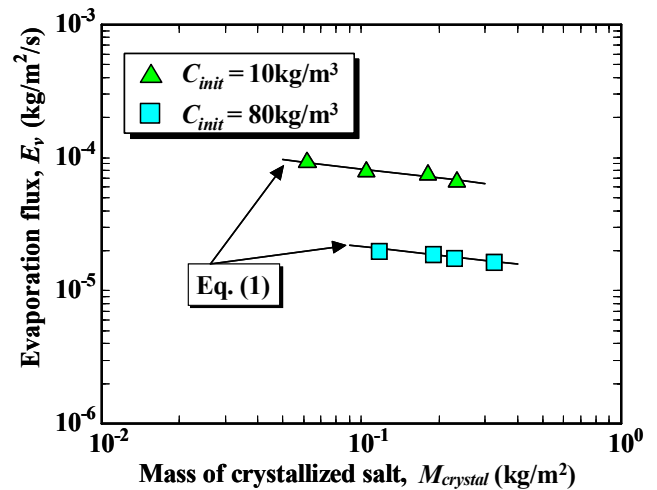


図-8 析出塩量 $M_{crystal}$ と蒸発フラックス E_v の関係

の形成に起因して期間(ii)が現れることなく、 E_v の急激な低下が始まったと推察される。

擬似恒率蒸発は、Heら¹⁴⁾によって指摘されているように、塩濃縮に伴う水蒸気密度の低下によると考えられる。第一減率蒸発の開始時間は、図-4の飽和塩濃度到達時間、つまり写真-1の結晶塩の発生開始時間にほぼ等しい。したがって、第一減率蒸発の原因は、結晶塩の平面的な広がりに伴う蒸発面積の減少によると推察される。第二減率蒸発の開始時間は、概ね析出塩の発生時間と同じであることから、第二減率蒸発の原因は析出塩の成長に伴う水蒸気移動抵抗によると思われる。それゆえ、第二減率蒸発を塩析出減率蒸発と呼ぶことにした。

(4) 析出塩量

図-7は析出塩量 $M_{crystal}$ の経時変化を示す。図中の▲および■は $C_{init}=10$ および 80kg/m^3 の $M_{crystal}$ をそれぞれ意味し、白抜きのプロット(△および□)は $C_{init}=10$ および 80kg/m^3 に関して析出塩が観察され始めた時間の $M_{crystal}$ を意味する。

$M_{crystal}$ は C_{init} に関係なく同じような分布形を呈しているが、同じ経過時間でも $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ の $M_{crystal}$ は、 $C_{init}=10\text{kg/m}^3$ のそれよりも大きい。

なお、本実験における塩収支(カラム内増加塩量+析出塩量=供給塩量)の誤差は±5%以内であった。

図-8は、析出塩量 $M_{crystal}$ と蒸発フラックス E_v の関係を示す。同じ $M_{crystal}$ でも C_{init} が大きいと、 E_v は小さくなる。これは図-4に示したように、 $C_{init}=10\text{kg/m}^3$ に比べて $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ では、 C_{surf} が飽和に達する時間が短いため、 E_v の上昇期間も短縮し、 E_v の最大値が相対的に小さくなったことによる。各塩濃度に対する $M_{crystal}$ と E_v の関係は次式で表わされる。

$$\ln(E_v) = a + b \ln(M_{crystal}) \quad (1)$$

ここに a および b は係数であり、 $C_{init}=10\text{kg/m}^3$ において、 $a=-9.931$ および $b=-2.28 \times 10^{-1}$ であり、 $C_{init}=80\text{kg/m}^3$ において、 $a=-1.126 \times 10^1$ および $b=-2.22 \times 10^{-1}$ であった。

本実験に関する限り、 $M_{crystal}$ の増加に伴う E_v の減少割合は C_{init} に依存しなかった。

(5) 塩析出過程と蒸発減少

図-9は塩水飽和チャオソイル表面における塩濃縮、結晶塩の発生、析出塩の成長に伴って起こる減率蒸発の特性と原因を示す。

[I] 擬似恒率蒸発期間： C_{surf} が上昇(塩濃縮)する期間を表す。 E_v の低下は、土壌表面での塩濃縮に伴う土壌表面の水蒸気密度(蒸気圧)の低下に起因する。

[II] 第一減率蒸発期間： C_{surf} が飽和に達して、土壌表面に結晶塩が発生し、時間とともに土壌表面全体に結晶塩が広がっていく期間を表す。この期間の E_v の著しい低下は、結晶塩の広がりによる蒸発面積の減少に起因する。

[III] 第二減率蒸発期間：結晶塩が厚くなり、局部的に乾燥が進行して、析出塩が発生し、水平方向および鉛直方向に成長する期間を表す。 E_v の低下は、析出塩による水蒸気移動抵抗に起因する。

4. まとめ

本研究では吸水紙法により土壌表面塩濃度の上昇(塩濃縮)および飽和塩濃度到達時間を、マイクロスコープ可視化法により結晶塩の発生および析出塩の成長を詳細に観察し、湿潤減率蒸発および塩析出減率蒸発の原因を明らかにした。

本実験により得られた知見を、以下に列挙する。

- (1) 吸水紙法は土壌表面塩濃度の測定に有効である。
- (2) 塩水飽和チャオソイル表面からの蒸発は、土壌表面の乾燥に伴う蒸発と同じように、擬似恒率蒸発、

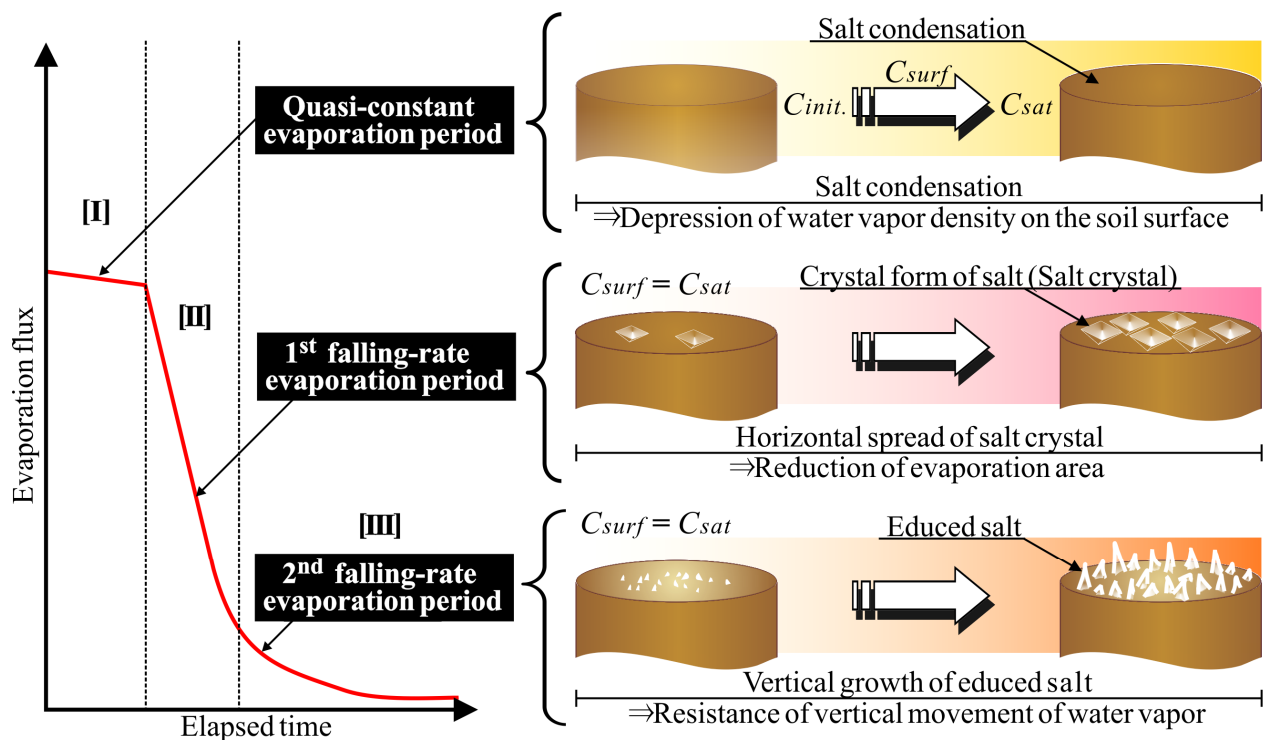


図-9 塩濃縮、結晶塩の発生、析出塩の成長に伴って起こる減率蒸発の特性と原因

第一減率蒸発(湿潤減率蒸発)および第二減率蒸発(塩析出減率蒸発)の3つに分類される。

- (3) 第一減率蒸発の開始時間は、土壤表面塩濃度が飽和に達した後に起こる結晶塩の出現時間と概ね一致する。
- (4) 第二減率蒸発と析出塩の出現時間は概ね一致する。
- (5) 供給塩濃度が高いほうが析出開始時間は早いものの、析出塩量の増大に伴う蒸発フラックスの低下率は、本析出塩量の範囲内において供給塩濃度に関係なく同じである。

参考文献

- 1) 王遵亲ら：中国塩漬土，科学出版社，1993。
- 2) Yang, J. S. : Integrated management for sustainable use of salt affected soils in China: Extent, causes and management, *Proceedings of the 2nd international workshop on integrated soil management of salt affected soils*, Philippines, pp. 61-73, 1999.
- 3) Terasaki, H., Fukuhara, T., Ito, M. and He, C. : Effects of gravel and date-palm mulch on heat moisture and salt movement in a desert soil, *Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, China, pp. 320-325, 2008
- 4) Islam, K. M. S., Fukuhara, T., Asano, F. and Mutawa, H. A. A. : Productivity of the tubular solar still in the United Arab Emirates, *Proceedings of MTERM international conference*, Asian Institute of Technology, Thailand, pp. 367-372, 2005.
- 5) 山本太平，藤山英保：乾燥地における砂漠緑化と農業開発(その4)－塩類特性とリーチング技術－，農業土木学会誌，Vol. 57, No. 1, pp. 53-60, 1989.
- 6) 安部征雄，仲谷知世，桑島健也，横田誠司：蒸発力を利用した新たな集積塩類除去法(Dehydration法)と地表灌漑方式によるLeaching法との比較研究，砂漠研究，Vol. 10, No. 2, pp. 147-156, 2000.
- 7) 郝金标ら：新疆塩生植物，科学出版社，2006。
- 8) 安部征雄：土性の相異と塩類集積特性との関係－塩類集積の機構とその対策に関する土壤物理学的研究(I)－，農業土木学会論文集，Vol. 94, pp. 32-40, 1981.
- 9) 安部征雄：飽和供試体の乾燥過程における塩類集積形態－塩類集積の機構とその対策に関する土壤物理学的研究(II)－，農業土木学会論文集，Vol. 106, pp. 61-71, 1982.
- 10) 松川進，中野政詩：結晶析出過程を含む土中の塩類集積，農業土木学会論文集，Vol. 161, pp. 1-9, 1992.
- 11) 藤巻晴行，取手伸夫，山本太平，井上光弘：浅い地下水面を持つ砂丘砂カラムからの土壤面蒸発に伴う溶質移動，農業土木学会論文集，No. 190, pp. 77-86, 1997.
- 12) 寺崎寛章，福原輝幸，竹嶋大貴：析出塩直接測定法による飽和チャオソイルの塩析出特性，水工学論文集，Vol. 53, pp. 511-516, 2009.
- 13) Wang, Y., Terasaki, H., Kido, T. and Fukuhara, T. : Measurement of salt concentration on the soil surface by the Water Absorption Paper method, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集，II－153, pp. 305-306, 2009.
- 14) Chao HE, 福原輝幸，高野保英，南条雅志，Jingsong YANG：塩集積層を有する土壤中の散水－蒸発過程における熱・水分・塩移動，土木学会論文集，No. 747/II－65, pp. 15-28, 2003.

(2009. 9. 30受付)