

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

CHARACTERISTICS OF CRYSTALLIZED SALT ON SATURATED CHAO SOIL SURFACE BY A DIRECT CRYSTALLIZED SALT MEASUREMENT METHOD

寺崎寛章¹・福原輝幸²・竹嶋大貴³

Hiroaki TERASAKI, Teruyuki FUKUHARA and Hiroki TAKESHIMA

¹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)

²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)

³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)

The present paper describes a new technique, “direct crystallized salt measurement method” to precisely measure the mass of the crystallized salt on saturated Chao soil surface associated with evaporation. Seven columns filled with Chao soil and saline water (saline water soil column) were used for the present experiment besides one column filled with Chao soil and fresh water (fresh water soil column). A constant-rate stage lasted for the experiment duration for the fresh water soil column. However, a falling-rate stage, which the evaporation rate falls progressively, was observed following the constant-rate stage for the saline water soil column. The start of the falling-rate stage was mostly in agreement with the appearance time of white spots on the soil surface. The salt crystallization had already appeared before the salt concentration of a soil surface layer with a thickness of 5mm did not reach saturation.

Key Words : *direct crystallized salt measurement method, salt accumulation, evaporation, Chao soil*

1. はじめに

写真-1および写真-2に見られるごとく、土壌の塩害は世界の各地に広がっている。国際規模でその対策が進められているものの、残念ながら砂漠化や塩害土壌は拡大傾向にあり、改善の兆しが見えてこない¹⁾。最終的には写真-1のように耕作地を放棄せざるを得ない。今まで以上に塩害対策を施さない限り、食糧危機は世界規模で今後益々深刻化すると懸念される。

土壌中の塩移動を明らかにすることは塩害防止の基幹である。蒸発に伴う土壌中の塩移動に関する研究は従来から数多くなされ、塩移動のモデル開発が行われている。例えば、田中と山本²⁾は高温乾燥下における塩移動を、何ら³⁾は散水の浸透水と地下水の連結後の塩移動をそれぞれ調べ、塩移動モデルの妥当性を検討した。

また、塩集積過程を実験的に促進させて、塩移動モデルの妥当性を検討する試みも行われている。例えば、大塚ら⁴⁾は蒸発過程の塩移動から分散長および分散係数と実流速の関係を検討し、また藤巻ら⁵⁾は移流分散方程式を用いて塩濃度分布に加え、塩析出の予測も行い、

それぞれ解析と実験の比較を行った。さらに析出塩が地表を横切る熱・水分移動に影響を及ぼすと考えられるアルベドの増加⁶⁾、蒸発量の減少⁷⁾および浸透ポテンシャルの低下⁸⁾、⁹⁾を組み込んだモデルが近年開発されている。

しかし、塩害の象徴である塩析出を伴うような地表近傍の塩・水分移動を解析する場合、当然ながら土壌中の塩濃度分布だけで解析の精度やモデルの妥当性は議論できない。析出塩量に関する計算値と実測値の比較は不可欠であるにも関わらず、析出塩量の測定方法は未だ確立されていない。

そこで著者らは、中国の代表的な塩害土壌の1つであるチャオソイルを対象として、土壌表面に析出した塩を直接採取する析出塩直接測定法および画像解析により析出塩量を測定する析出塩間接測定法を提案し、両方法は析出塩量の測定に有効であることを示した¹⁰⁾。しかしながら、析出塩直接測定法では析出塩のみならず、それに付着する土壌(析出塩付着土壌)も僅かながら採取することは避けられない。従来では、必ずしも析出塩と析出塩付着土壌に含まれる塩(析出塩付着土壌塩)の分離およびその測定精度は十分でなかった。



写真-1 オーストラリアの塩害(飛行機より撮影, 2007年12月)



写真-2 中国江蘇省濱海地区の塩害(2006年3月)

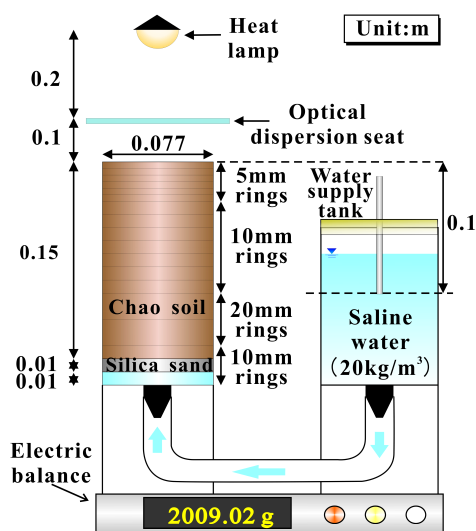


図-1 実験概要図

そこで、従来の析出塩直接測定法に改良を加えることで、蒸発に伴う飽和チャオソイルの析出塩量の時間変化を精度良く追跡することが可能となった¹¹⁾。

ここでは、飽和チャオソイルの塩析出過程で得られた熱・水分および塩移動に関する新たな知見を報告する。

2. 実験概要

(1) カラム実験概要

実験は恒温恒湿室内(温度:25℃, 相対湿度:22%)で8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-1に示すような内径0.077mのリングを積み重ねた全長0.17mのカラムを作製し、その中にチャオソイルを密度1600 kg/m³で充填した。

カラム8本のうち7本は、塩水士壤を充填した塩水士壤カラム, 残り1本は比較用に淡水士壤を充填した淡水士壤カラムである。

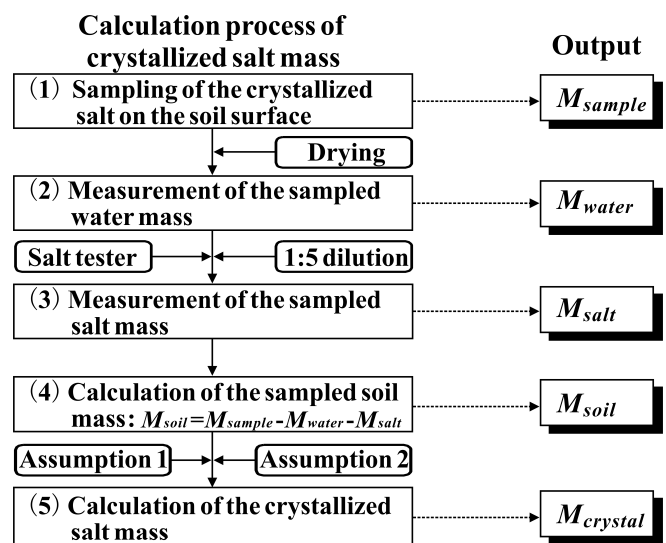


図-2 析出塩直接測定法による析出塩量 $M_{crystal}$ の計算過程

地表付近の塩濃度分布を詳細に観察するために、地表面から0.03mまでは厚さ0.005mのリングを用いた。それ以深の0.03~0.1mまでは厚さ0.01m, 0.1~0.14mまでは厚さ0.02m, 最下層は厚さ0.01mのリングをそれぞれ用いた。塩水士壤カラム1本と淡水士壤カラム1本には、熱電対を地表面からの深さ $z = -0.005, -0.01, -0.03, -0.05, -0.07, -0.1, -0.15$ および -0.17 mにそれぞれ挿入した。また、温・湿度センサー(Vaisala)により、地表面から高さ0.01mの空気温度・湿度を同時に計測した。蒸発量は最小読み0.01gの重量計(Mettler Toledo)を用い、士壤カラムの重量減少分から求めた。体積含水率および塩濃度は、リング毎に炉乾燥法および塩分濃度測定器(朝日ライフサイエンス)で求めた。また、析出塩量および析出高さの測定には最小読み0.001gの重量計(Mettler Toledo)および300倍まで拡大可能なデジタルマイクロスコープ(ソニック)をそれぞれ用いて、前報¹⁰⁾よりも測定精度を高めた。

次に、実験手順を述べる。カラムにチャオソイルを充

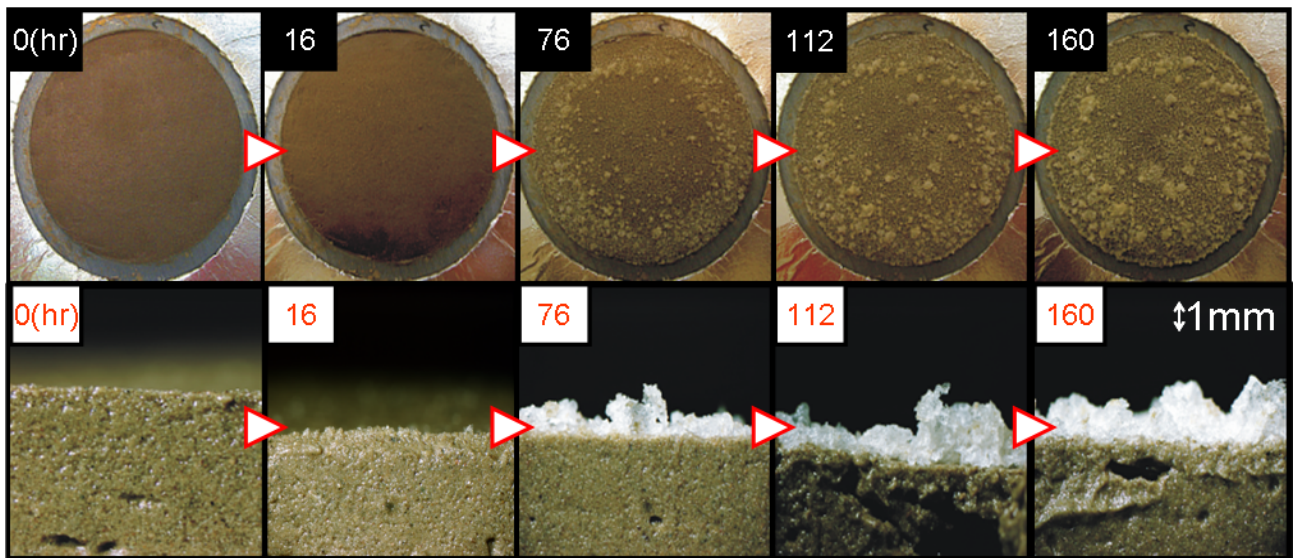


写真-3 塩析出状況(上段：地表面，下段：鉛直面，写真中の数字は経過時間(hr))

填した後，給水タンクより塩濃度 $C=20\text{kg/m}^3$ の塩水をカラム底面から供給し，マリオット管でその水位を地表面下0.1mに保つことで毛管飽和させた．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の赤外線ランプ(地表面より高さ0.3m)をそれぞれ取り付け，赤外線ランプを照射し，実験を開始した．照射直前(0時間)，照射16時間，40時間，76時間，112時間，160時間，220時間後に塩濃度，体積含水率，析出塩量および析出高さをそれぞれ計測した．また，蒸発量および土壌温度は10分毎に自動計測した．

なお今回，塩析出開始時間を精度良く判定するために，実験期間中に亘り地表面のビデオ撮影を行った．

(2) 析出塩量の計算過程

土壌表面の析出塩量は以下の手順で求めた(図-2参照)．
 (1)析出塩をピンセットで採取し，その質量(サンプル質量 M_{sample})を測定する．(2)析出塩と析出塩付着土壌を炉乾燥させ，全付着水量 M_{water} (析出塩付着水(析出塩の間隙水)および析出塩付着土壌水(析出塩付着土壌の間隙水)の合計質量)を求める．(3)乾燥後の析出塩と純水を1:5の質量割合で希釈・攪拌した後，36時間放置する．その後，塩分濃度測定器を用いて，攪拌後の土壌溶液中の Cl^- 量を測定し，採取した析出塩の塩量(採取塩量 M_{sal})を求める．(4)析出塩付着土壌の質量 M_{soil} は， M_{sample} から M_{water} および M_{sal} を差し引いて求める．(5)最終的に，析出塩量 M_{crystal} は M_{sal} から析出塩付着水塩量(析出塩付着水に含まれる塩量)および析出塩付着土壌水塩量(析出塩付着土壌水に含まれる塩量)を差し引いて求める．

なお上述の諸計算では，(仮定1)析出塩付着水および析出塩付着土壌水の塩濃度は飽和である，(仮定2)析出塩付着土壌の体積含水率はカラム土壌のそれに等しい，とそれぞれみなして， M_{crystal} を求めた．

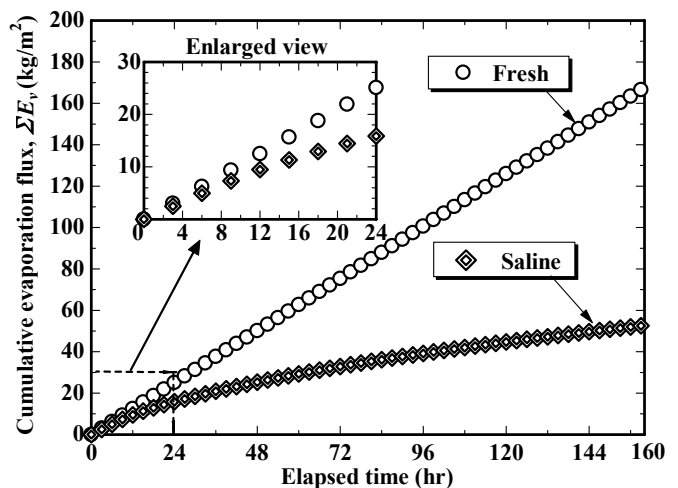


図-3 積算蒸発量 ΔE_v の経時変化

3. 実験結果および考察

(1) 塩析出状況

写真-3は塩析出の拡大状況(上段：地表面(定点撮影)，下段：鉛直面(サンプリング時に撮影))を示したものであり，実験開始から76時間以降で析出塩の水平面的な広がりや鉛直方向の成長が分かる．実験開始から約8時間後に直径2～3mmの淡白色の斑点が観察され，これが時間とともに集約されながら拡大し，析出塩に移行する．160時間後の析出塩は1～2mm程度の厚さを有する．

(2) 蒸発量

図-3は淡水土壌(図中 Fresh) および塩水土壌(図中 Saline)に対する単位面積当りの積算蒸発量 ΔE_v の経時変化を示す．塩水土壌の ΔE_v (◇) は時間の経過とともに折れ曲がり，直線的な淡水土壌の ΔE_v (○) の下方に位置する．

図-3を詳細に考察するために、図-4に淡水土壌および塩水土壌における質量蒸発フラックス(それぞれ、 E_{vf} および E_{vs} とし、以下では蒸発フラックスと呼称)の経時変化、図-5に蒸発比 $R_{ev}(=E_{vs}/E_{vf})$ の経時変化をそれぞれ示す。

図-4より淡水土壌の蒸発は実験終了まで恒率段階にあることが知れる。一方、塩水土壌も常に淡水土壌と同じ湿潤状態にあるが、 E_{vs} の時間変化はあたかも表層土壌が湿潤から乾燥に至る過程で現れるそれと同じである¹²⁾。すなわち、図-5から明らかなように、実験開始から約6～8時間までの恒率蒸発期間の後に、表層土壌の乾燥過程と同じような減率蒸発期間が現れ、 E_{vs} の急激な低下が認められる。乾燥層に相当するような水蒸気移動抵抗が発生したことは間違いない。

そこで、水蒸気移動抵抗のメカニズムを調べるために、まず恒率蒸発期間の R_{ev} を検討した。この期間で R_{ev} が0.8となった原因は、蒸気圧降下であると考えられる。そこで恒率蒸発期間の E_{vs} は以下の式(1)に、後述する図-8の表層(層厚5mm)の代表(平均)塩濃度(表層塩濃度)およびHEら¹²⁾の水蒸気密度降下率 ϕ (C の関数)を適用して、計算された。

$$E_{vs} = \beta \gamma_m \{ (1 - \phi) \rho_{v, surf} - \rho_{v, air} \} \quad (1)$$

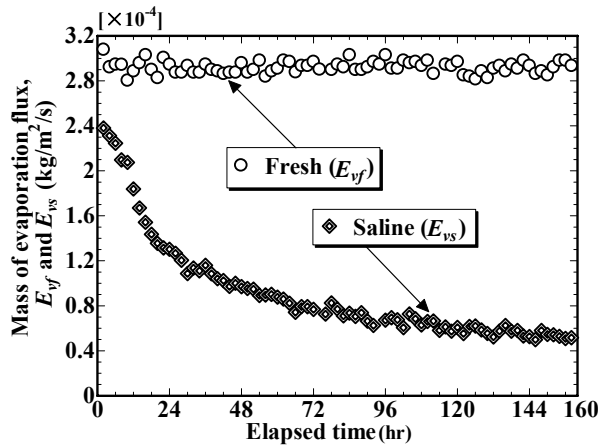
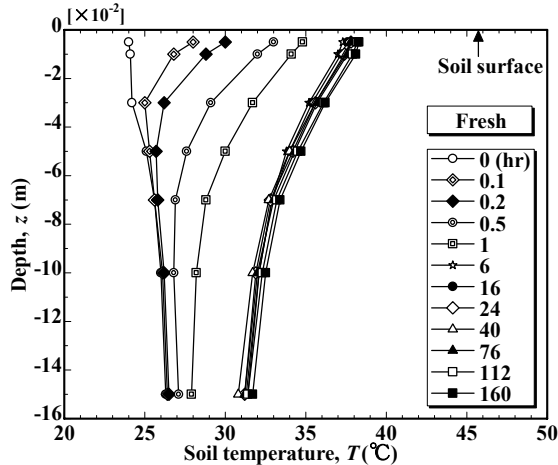


図-4 蒸発フラックス E_{vf} および E_{vs} の経時変化



(a) 淡水土壌

ここに、 β : 蒸発効率(表面蒸発時、 $\beta=1$)、 γ_m : 蒸発係数(m/s)、 $\rho_{v, surf}$: 土壌表面の飽和水蒸気密度(kg/m^3)、 $\rho_{v, air}$: 空気の水蒸気密度(kg/m^3)である。

ここで、6時間後の E_{vs} (E_{vs-6})と E_{vf} の蒸発比 $R_{ev-6}(=E_{vs-6}/E_{vf})$ を計算すると、0.93となり、前述の実験値($R_{ev}=0.8$)よりも大きくなった。この主な原因は、地表塩濃度に対応した ϕ を用いなかったためと思われる。すなわち、表層塩濃度は地表塩濃度よりも小さいことから、 ϕ を過小評価したと推察される。なお、 E_{vs-6} の計算では $\phi=0.06$ ($C=118\text{kg/m}^3$)を与えた。

また、減率蒸発と3.(1)で述べた淡白色の斑点の発生時刻が概ね一致したことは、減率蒸発の解明の糸口になると推察されるので、今後、淡白色の斑点の構造を詳細に検討する。

(3) 土壌温度

図-6(a)および(b)は、淡水土壌および塩水土壌の温度鉛直分布の経時変化をそれぞれ示す。初期および実験開始から1時間までの土壌温度 T (°C)の分布に違いはないものの、その後の両者の違いは大きい。すなわち、淡水土壌の温度上昇の時間的割合(温度上昇率)は6時間まで顕著で、それ以降は僅かであるのに対して、塩水土壌の温度上昇は24時間まで明確であり、それ以降の温度上昇

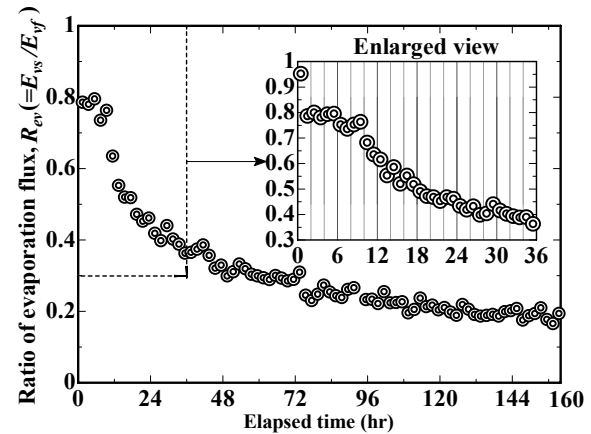
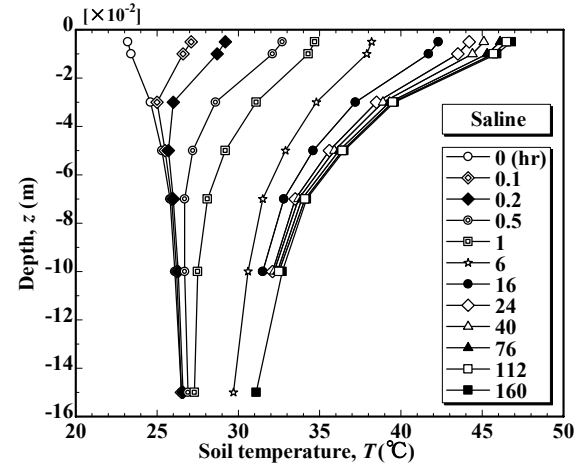


図-5 蒸発比 R_{ev} の経時変化



(b) 塩水土壌

図-6 土壌温度鉛直分布 $T(z)$ の経時変化

率は小さい。

図-7は淡水土壌と塩水土壌の地表面温度 T_{surf} (厳密には地表面下5mm)の経時変化をそれぞれ示す。淡水土壌ではランプ照射から2時間後までの間で T_{surf} は上昇し(図中 t_1)、8時間以降の T_{surf} はほぼ一定となる(図中 t_3)。

一方、塩水土壌の T_{surf} の挙動は複雑である。ランプ照射直後の T_{surf} の上昇(第1上昇、図中 t_1)は淡水土壌のそれ(図中 t_1')と同じであるが、8時間から22時間の間で再び明確な温度上昇(第2上昇、図中 t_2)が起こる。しかし、34時間以降(図中 t_3)の温度はほぼ一定となる。第2上昇は図-5から分かるように、減率蒸発期間の中でも特に蒸発フラックスの著しい低下期間に対応していることから、蒸発の減少に伴う潜熱の低下に起因すると推察できる。

(4) 塩濃度

図-8は実験開始から220時間までの塩濃度鉛直分布の経時変化を示す。初期に表層塩濃度が高いのは、ランプ照射前の地表面からの蒸発による移流効果(地表に向かう塩移動)に起因する。分散の影響範囲は地表面下0.04mの範囲に集中する。

注目すべきは表層塩濃度である。実験開始から160時間後の表層塩濃度は 280kg/m^3 であり、表層は塩析出の発

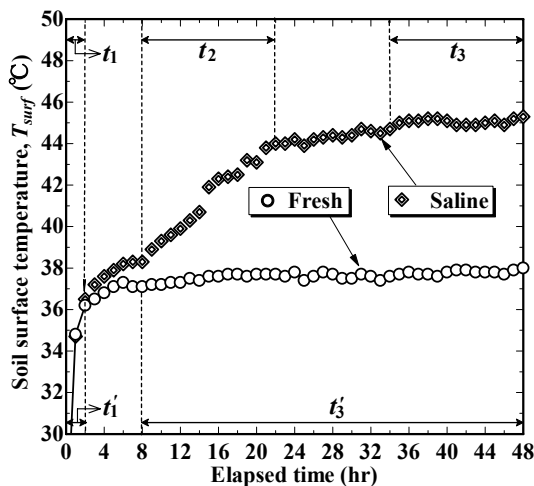


図-7 地表面温度 T_{surf} の経時変化

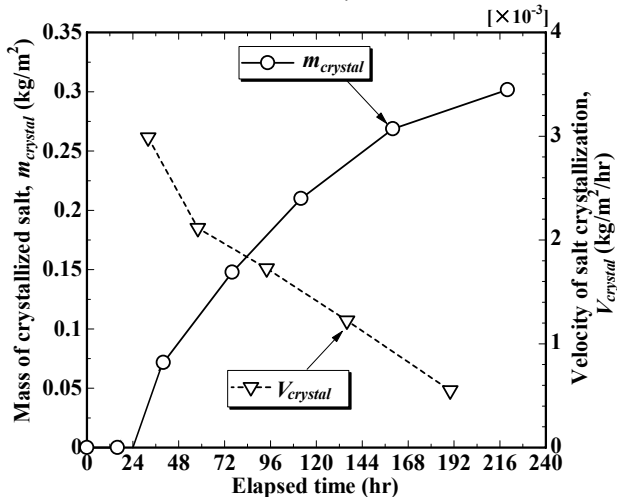


図-9 析出塩量 $m_{crystal}$ と塩析出速度 $V_{crystal}$ の経時変化

生条件である飽和塩濃度 C_{sat} (約 366kg/m^3)に達していない。にもかかわらず写真-3から判るように、同時間では既に厚さ1~2mmの析出塩が形成されている。この矛盾の原因として、1)表層厚(5mm)が大きいために、表層塩濃度と地表塩濃度(飽和)の差が大きくなったこと、2)表層塩濃度は C_{sat} 以下であるものの、地表の凹凸および蒸発に伴う上向き水分移動の非一様性によって、地表で局所的に C_{sat} に達したこと、が考えられるが、現時点で原因の特定に到っていない。今後、これらについて更なる検討を行う。

(5) 析出塩量

図-9は単位面積当りの析出塩量 $m_{crystal}$ ($=M_{crystal}/A$, A :土壌表面積)およびそれを時間で微分した塩析出速度 $V_{crystal}$ の経時変化をそれぞれ示す。目視で確認できる塩析出は実験開始から約24時間後である。 $m_{crystal}$ は析出が始まると急激に増加し、その後、時間経過とともに増加率は低下する。一方、 $V_{crystal}$ は初期に大きく、その後は時間経過とともに低下する。 $V_{crystal}$ の時間変化は図-4の E_{vs} と相似であり、 $V_{crystal}$ は E_{vs} と正の相関を有することが再確認された¹³⁾。

図-10は平均析出高さ $H_{crystal}$ と析出塩密度 $\rho_{crystal}$ の経時

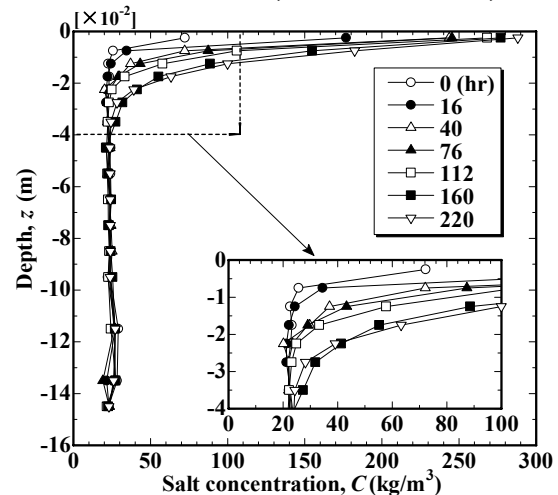


図-8 塩濃度鉛直分布 $C(z)$ の経時変化

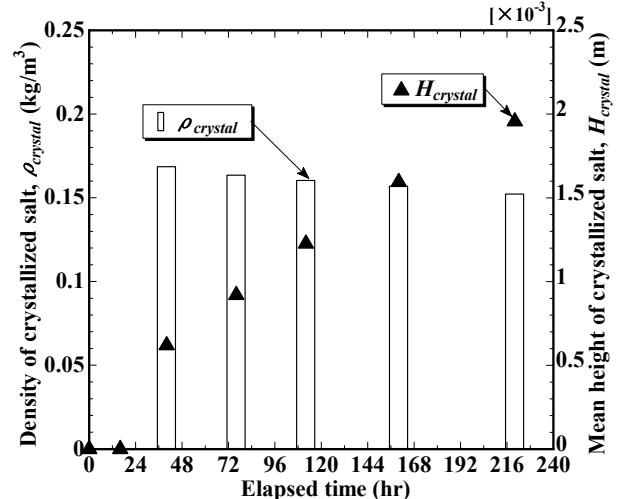


図-10 平均析出高さ $H_{crystal}$ と析出塩密度 $\rho_{crystal}$ の経時変化

表-1 析出塩量, 析出塩付着水塩量, 析出塩付着土壌水塩量, カラム内塩量, 供給塩量および塩収支誤差

経過時間 (hr)	析出塩量 $m_{crystal}$ (kg/m ²)	析出塩付着水塩量 (kg/m ²)	析出塩付着土壌水塩量 (kg/m ²)	カラム内塩量 $M_{c,salt}$ (kg)	供給塩量 $M_{in,salt}$ (kg)	塩収支誤差 $E_{r,salt}$ (%)
40	0.07171	0.00490	0.00672	0.00836	0.00857	-1.4
76	0.14784	0.00933	0.00799	0.00863	0.00965	3.3
112	0.20997	0.01194	0.00803	0.00987	0.01048	-3.5
160	0.26869	0.01216	0.00620	0.01043	0.01138	-2.6
220	0.30168	0.02384	0.00621	0.01161	0.01254	-3.8

変化をそれぞれ示す。 $\rho_{crystal}$ は時間に依存することなく約 0.15~0.17kg/m³である。 よって、 $H_{crystal}$ は $m_{crystal}$ と類似な分布(時間変化)になる。

表-1は析出塩量 $m_{crystal}$, 析出塩付着水塩量, 析出塩付着土壌水塩量, カラム内塩量 $M_{c,salt}$, 供給塩量 $M_{in,salt}$ および後述する塩収支誤差 $E_{r,salt}$ (%)の時間変化を示したものである。 厳密には表-1の第2列と第3列を加えたものが真の析出塩量である。 ただし、 後者の値は前者の4~8%と小さいので、 第2列の析出塩量を真の析出塩量と近似して問題はない。

最後に、 $E_{r,salt}$ は式 (2) で評価した。

$$E_{r,salt} = \frac{M_{in,salt} - M_{c,salt} - M_{crystal}}{M_{in,salt}} \times 100 \quad (2)$$

$E_{r,salt}$ は、 表-1の第7列に示すように $\pm 4\%$ 以内であった。

4. まとめ

析出塩直接測定法により蒸発に伴う飽和チャオソイルの塩析出およびその過程で生じる熱・水分移動の特性が、本研究で明らかになった。

以下に得られた結果を列举する。

- (1) 土壌カラムの塩収支の誤差は $\pm 4\%$ 以内であり、析出塩直接測定法は析出塩量の測定に適している。
- (2) 析出塩密度は析出塩層の発達過程で殆ど変わることなく、0.15~0.17 kg/m³である。
- (3) 飽和土壌表面からの蒸発にもかかわらず、塩析出を伴う塩水土壌からの蒸発では恒率段階に引き続き、減率段階が発生する。
- (4) 減率蒸発の開始時刻は、地表面で淡白色の斑点の発生が観察された時間とほぼ一致する。
- (5) ランプ照射に伴う塩水土壌の地表面温度の上昇には、第1上昇(照射に起因)と第2上昇(蒸発速度の減少に伴う潜熱の低下に起因)がある。

参考文献

- 1) 久力文夫：中国の水資源問題，京都産業大学 ORC 中国経済プロジェクト，2008。

(2008. 9. 30受付)

- 2) 田中明，山本太平：地下水位一定の土壌カラムからの蒸発に伴う水と塩の動態，農業土木学会論文集，Vol. 129, pp. 25-31, 1987.
- 3) 何超，福原輝幸，高野保英：浅い地下水位をもつ地下水と散水浸透水との連結および蒸発に伴う塩集積，水文・水資源学会誌，Vol. 18, No. 3, pp. 221-232, 2005.
- 4) 大塚義之，井伊博行，榊原晋：カラム実験での塩分集積過程の解析，砂漠研究，Vol. 6, No. 2, pp. 115-120, 1997.
- 5) 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壌面蒸発に伴う溶質移動，農業土木学会論文集，Vol. 190, pp. 77-86, 1997.
- 6) Fujimaki, H., Shiozawa, S. and Inoue, M. : Effect of salty crust on soil albedo, Agricultural and forest meteorology, Vol. 118, pp. 125-135, 2003.
- 7) Fujimaki, H., Shimano, T., Inoue, M. and Nakane K. : Effect of salt crust on evaporation from a bare saline soil, Vadose Zone Journal, Vol. 5, pp. 1246-1256, 2006.
- 8) 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, No. 11, pp. 1-9, 1992.
- 9) Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. : Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil. I. Theory, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 60, pp. 1001-1009, 1996.
- 10) 寺崎寛章，城戸拓人，福原輝幸：飽和チャオソイルカラムの析出塩量評価，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，2-062, pp. 121-122, 2006.
- 11) 寺崎寛章，竹嶋大貴，福原輝幸：直接法による析出塩計測，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，2-043, pp. 85-86, 2008.
- 12) 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壌中の散水－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.
- 13) 福原輝幸，佐藤邦明：砂層表面蒸発に伴う塩類集積に関する基礎的研究，水工学論文集，Vol. 38, pp. 241-246, 1994.