

散水－蒸発サイクルに伴う塩集積土壌カラム中の 塩洗脱と再集積

LEACHING AND RE-ACCUMULATION OF SOIL SALINITY IN A SOIL COLUMN WITH A SALT AFFECTED LAYER DUE TO WATERING-EVAPORATION CYCLES

門野 浩二¹・福原 輝幸²・Chao HE³

Koji KADONO, Teruyuki FUKUHARA and Chao HE

¹ 学生会員 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻 (〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9-1)

² 正会員 工博 福井大学教授 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9-1)

³ 学生会員 福井大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9-1)

The present paper describes the heat, moisture and salt transfer in a soil column with a salt affected layer due to watering-evaporation cycles, especially the leaching and the re-accumulation of soil salinity at the soil surface under different watering conditions.

The experiment was carried out by changing the watering frequency and the amount of each watering under the same total amount of watering. After watering on the soil surface covered by a salt affected layer, the time rate of the re-accumulation of soil salinity in the surface layer is large but the duration of the re-accumulation is short, when the amount of watering is small. On the other hand, after watering on the salt-free soil layer, on which lies an intermediate salt affected layer, the re-accumulation of soil salinity in the surface layer becomes more distinct as the amount of watering and the watering times increase.

The present experimental results imply the importance of the water management to prevent the second salinization.

Key Words : *secondary salinization, leaching, evaporation, solute transfer*

1. はじめに

乾燥地・半乾燥地において農業を行おうとすれば、一般的に灌漑は不可欠である。その際、排水の不備、灌水量や灌水頻度に関する不適切な水管理（人的要因）および気象条件、土壌構造や水質など（自然的要因）により、土壌、地下水、灌漑用水に含まれる塩が地表または根域に濃縮・集積し、植物の生育に障害を与えるような 2 次的塩害が付随して発生することがある（写真-1 参照）。実際に、世界的な 2 次的塩害の拡大について多くの研究者が指摘している¹⁾²⁾。2 次的塩害は、自然的要因や人的要因、いわゆる外的要因に加えて、土壌の保水・透水性や地下水位などの内的要因が複雑に絡み合っているため³⁾、発生予測と対策は非常に困難である。

灌漑水の淡水化、排水施設の導入および土壌改良などで確実に塩害防止効果を上げようとするならば、散水－浸透－蒸発－乾燥が繰り返される土壌中の熱・水分・塩移動を明らかにすることが重要となる。

散水－浸透－蒸発－乾燥過程の塩移動および塩集積に

ついて、Kirda et al.⁴⁾ は、地表に塩を散布した後に淡水を散水する方法により、また Ghuman and Prihar⁵⁾ は、低含水状態の土壌表面に塩水を散水した後に淡水散水を行う方法を用いて、それぞれカラム実験で調べた。さらに、Chao ら⁶⁾ は、2 次的塩害防止の基礎的な知見を得るために、散水に伴う地表および中間塩集積層からの塩の洗脱と蒸発によって起こる塩再集積の過程を実験的に調べ、内的・外的要因の組み合わせ条件によっては、初期含塩率よりも高い含塩状態に陥る可能性を指摘した。彼らの研究では主として、塩集積層の深さをパラメータとして実験条件を設定し、散水条件については特に意図した設定が与えられなかった。

そこで本研究では、2 次的塩害に大きく起因する灌漑条件、特に同等の全散水量の下で、散水フラックス（単位面積当りの 1 回の散水量）と散水頻度の組み合わせを変化させた塩移動実験を行い、塩移動の動態を明らかにするとともに、散水による 2 次的塩害防止の基礎的検討を行う。

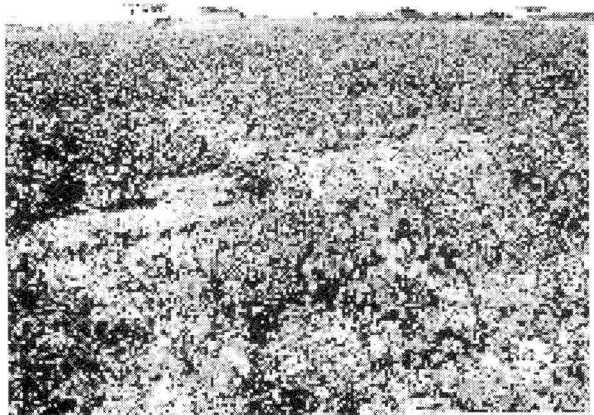


写真-1 2 次的塩害の被害を受ける綿花畑
(中国, 2001.9)

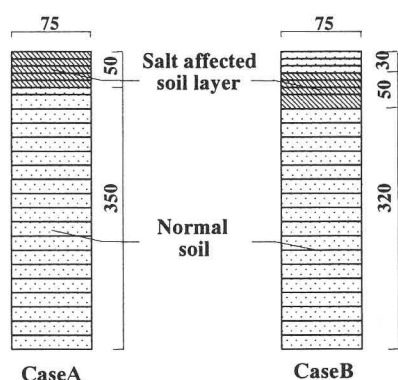


図-1 塩集積砂層カラム (Unit: mm)

2. 実験方法

実験は恒温恒湿室内（温度： $T = 25^{\circ}\text{C}$ ，相対湿度： $\text{RH} = 30\%$ ）で、16本の塩ビ製カラム（内径0.075m，高さ0.4m）および豊浦標準砂を用いて行われる。このうち15本のカラムは、サンプリングのために地表面から0.06mまでは高さ0.01m，それより深では高さ0.02mのリングにより構成される。残り1本のカラムには熱電対を9本挿入し、0.1g読みの重量計（A&D製）の上に固定することにより、土壌温度分布および蒸発量が測定される。熱電対の位置は、地表面下0.005m，0.015m，0.03m，0.05m，0.07m，0.09m，0.11m，0.13mおよび0.17mである。土壌温度と蒸発量の測定間隔は0.5時間であり、それぞれ自動的にデータログまたはコンピュータに記録される。

実験ケースは表-1に示すように、深さの異なる2種類の初期塩集積層状態、すなわち地表塩集積層（CaseA）および中間塩集積層（CaseB）と2種類の散水フラックス（ $11.3\text{kg}/\text{m}^2/\text{回}$ および $22.6\text{kg}/\text{m}^2/\text{回}$ ）を組み合わせた4種類である。表中のCaseAおよびCaseBに続く数値11および22は、1回当たりの散水フラックスの数値を表す。全散水量は全ケースとも0.3kgであり、散水時間はCase11で180秒，Case22で360秒とする。また、散水間隔はCase11

表-1 砂層カラムの初期含塩状態および散水条件

実験ケース	初期塩集積層 区分	塩集積層位置 (地表面下 (m))	散水フラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{回}$)
CaseA-11	地表塩集積層	0～0.05	11.3
CaseA-22			22.6
CaseB-11	中間塩集積層	0.03～0.08	11.3
CaseB-22			22.6

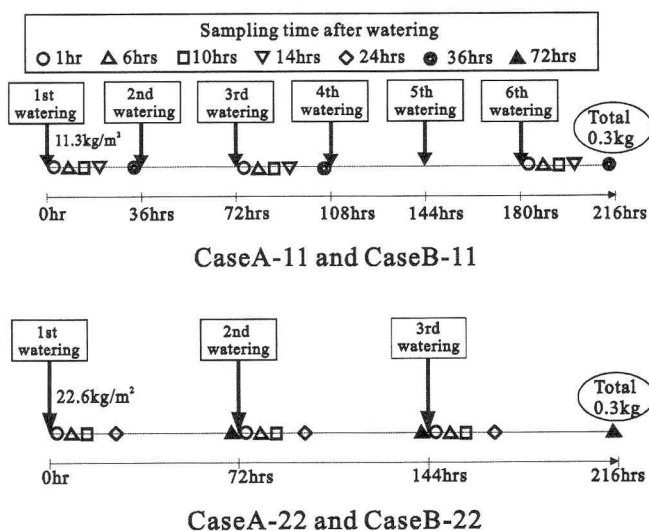


図-2 散水条件およびサンプリング時間

で36時間，Case22で72時間である。なお、散水温度は室温に等しい。

図-1に示されるように、地表塩集積層は地表面下0.05mまで、中間塩集積層は地表面下0.03m～0.08mの範囲とする。塩集積層は粉碎したNaCl（純度99.99%）と豊浦標準砂を混合して作られ、含塩率 S_e （=単位体積土壌中の塩質量/単位体積乾燥土壌の質量 $\times 100$ （%））は0.4%とする。この値は、一般的に植物の生育に障害が現れるとされる限界含塩率である⁷⁾。なお、すべてのカラムはゴム製のハンマーによる打撃によって同じように締め固めを行い、充填密度を $1600\text{kg}/\text{m}^3$ に統一する。

次に実験方法について述べる。砂を充填後、砂層表面から0.3mの高さに設置された赤外線ランプ（ $850\text{W}/\text{m}^2$ ）を24時間照射し、砂層内に温度勾配を形成する。その後、霧吹きで1回目の淡水散水（1次散水）を行い、カラムを赤外線ランプの下に曝露する。これを1次散水期間とし、CaseA-11およびCaseB-11では6次散水まで、CaseA-22およびCaseB-22では3次散水まで、それぞれ1次散水と同じ条件で繰り返す。散水条件およびサンプリング時間の詳細は図-2に示す通りであり、全実験ケースとも実験期間は216時間である。

サンプリングでは各リング中の全土壌を採取し、炉乾

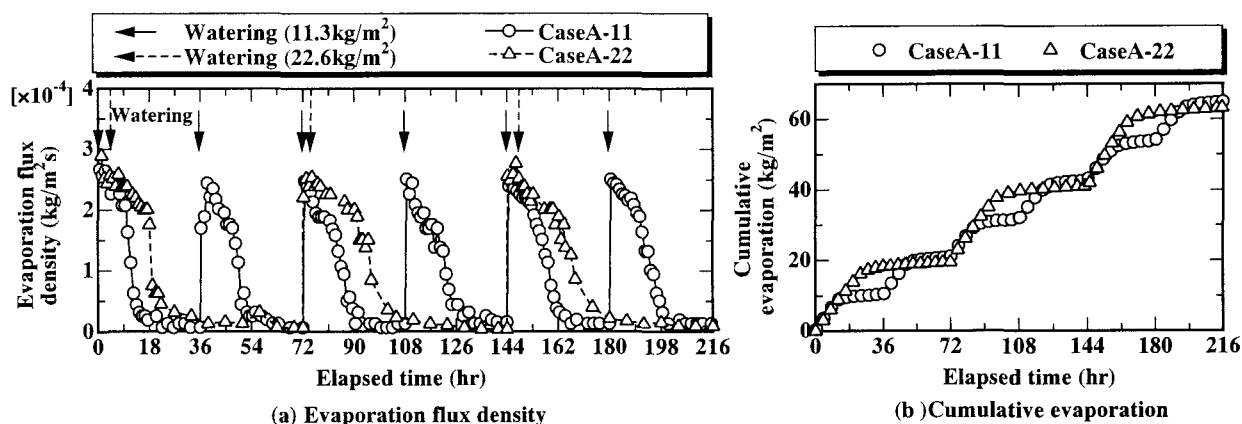


図-3 蒸発フラックス密度および積算蒸発量の経時変化

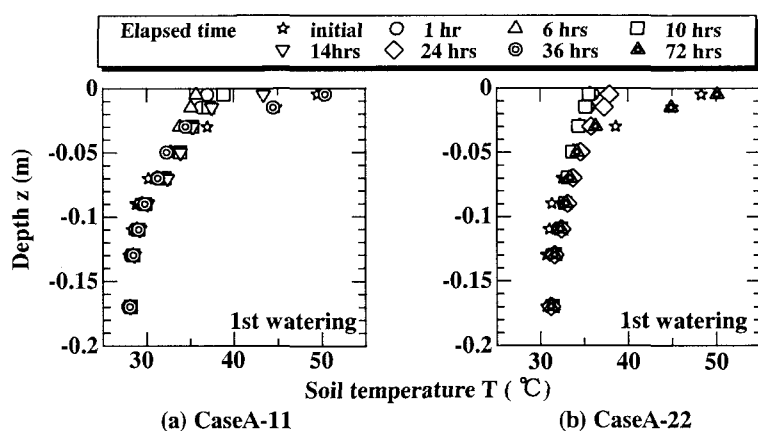


図-4 土壌温度鉛直分布の経時変化

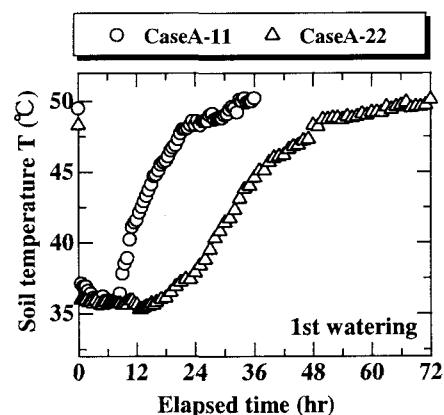


図-5 表層土壌温度の経時変化

燥法により体積含水率を求める。これに純水 0.3kg を加えて攪拌し、24 時間放置した後、電量滴定法を利用した塩分濃度計（朝日ライフサイエンス製）を用いて塩濃度を求め、含塩率を計算する。

3. 実験結果および考察

(1) 蒸発量

図-3 は、CaseA-11 と CaseA-22 の蒸発フラックス密度、および積算蒸発量の経時変化をそれぞれ示す。両者は気象条件、換言すれば外部蒸発能に違いがないため、蒸発フラックス密度の最大値、すなわちポテンシャル蒸発フラックスに差異はない。恒率蒸発期間と称せられる蒸発フラックス密度が一定な期間は現れず、蒸発フラックス密度は散水後から時間とともに徐々に減少する。この原因は、表面蒸発による潜熱によって地表面温度が下がり、地表面の水蒸気密度（飽和水蒸気密度）が低下することに起因する。そこで、散水後に蒸発フラックス密度が緩やかに低下する期間を、表面蒸発期間と称することにする。その後、蒸発フラックス密度が急激に低下する期間（減率蒸発期間）が現れる。減率蒸発期間の出現は、表

面蒸発から内部蒸発への移行（遷移）を表す。減率蒸発期間の開始時刻は、CaseA-11 では散水開始から約 10 時間後、CaseA-22 では約 19 時間後となり、散水フラックスが大きいと遅くなる。実験終了時の積算表面蒸発期間および積算蒸発量は、両ケース間で殆ど差異はなく、それぞれ約 60 時間および約 60kg/m^2 となる。なお、CaseB-11 および CaseB-22 の蒸発特性は、CaseA-11 および CaseA-22 とほぼ同じであるため、ここでは省略する。

(2) 土壌温度分布

土壌温度分布についても、散水フラックスの違いだけが温度に影響するので、CaseA-11 および CaseA-22 の結果のみを図-4 に示す。図-5 には、表層（地表面下 0.005m）土壌温度の経時変化を示す。また、散水回数増加に伴う分布形状に違いはないため、1 次散水期間の結果のみを示す。なお、両ケースの初期温度分布はほぼ同じである。

図-4 および図-5 に従えば、CaseA-11 では散水直後の表層土壌温度は、散水の顕熱によって、散水前の 50°C から 37°C まで急激に低下する。その後 10 時間後までは蒸発潜熱によって、表層土壌温度は徐々に低下する。3. (1) で前述したように、地表面蒸発が終了する散水から 10 時

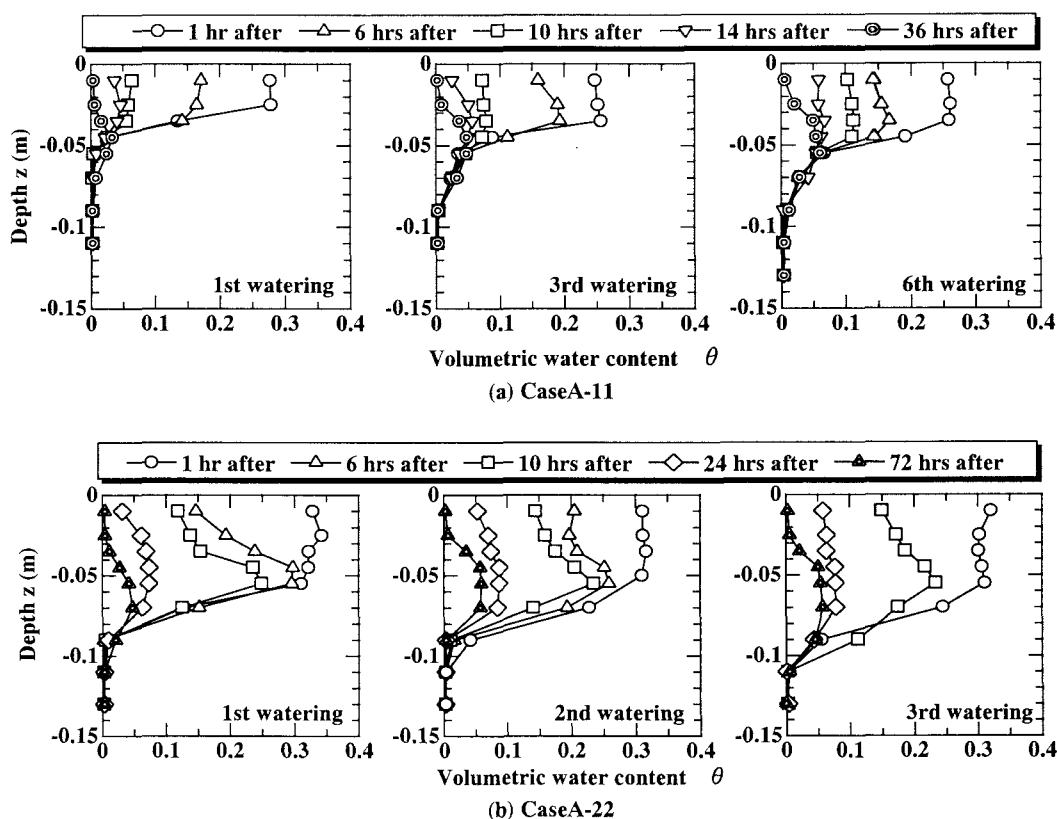


図-6 体積含水率鉛直分布の経時変化

間後以降、蒸発潜熱が作用しなくなると表層土壌温度は上昇し、36 時間後の温度分布は散水前のそれに近づく。

一方、CaseA-22 では、CaseA-11 に比べて散水フラックスが大きいため、表面蒸発期間が長くなり、蒸発潜熱による表層土壌温度の上昇抑制は散水開始から約19時間後まで認められる。その後はCaseA-11 と同様に、表層土壌温度は上昇し始め、72 時間後の温度分布は散水前のそれにほぼ等しくなる。

(3) 水分分布

図-6(a)および(b)は、散水回数の増加に伴う CaseA-11 および CaseA-22 の体積含水率 (θ) 鉛直分布の経時変化をそれぞれ示す。CaseB-11 および CaseB-22 の結果は CaseA-11 および CaseA-22 とほぼ同じであることから、ここでは省略する。なお、全ケースとも初期土壌は気乾状態 ($\theta = 0.01$) である。

図-6(a)より、CaseA-11 では1次散水直後、地表面下0.04m までの θ が急激に増加し、湿潤前線は深さ0.06m に留まる。その後、蒸発によって θ は地表から減少し始め、36 時間後には散水前の水分分布に近づく。しかしながら、地表面下0.04m から0.06m の範囲に水分の残存が認められる。

3次散水、6次散水となるにつれて、湿潤前線は徐々に深くなるが、 θ の分布形状に大きな違いは生じない。6次散水後の湿潤前線は、地表面下約0.09m となる。散水

が繰り返される毎に湿潤前線が下方に移る原因としては、浸透した液状水が前回までの散水で残存した水分と連結して、下方移動が促進されるためと考えられる。

一方、図-6(b)の CaseA-22 では、CaseA-11 に比べて散水フラックスが大きいため、1次散水後の湿潤前線は0.09m 付近となる。その後、乾燥に伴って θ は表層から減少し、72 時間後では地表面下0.03m まで気乾状態となる。3次散水後では、湿潤前線は約0.11m の深さに達する。

(4) 含塩率分布

図-7 は、各ケースの1次および最終散水期間における含塩率 (S_e) 鉛直分布の経時変化を示す。

ここで、含塩率 S_e を選んだ理由は、塩濃度に比べて含塩率の方が塩の絶対量をより正確に把握でき、塩の移動状態が把握しやすいこと、および植物生育障害のパラメータとして一般に用いられるためである⁹⁾。

a) 散水フラックスおよび散水頻度の影響

ここでは、同じ塩集積層深さで散水フラックスおよび散水頻度の違いによる塩移動の相違を検討する。まず、地表塩集積層の CaseA-11 と CaseA-22 (図-7(a)および(c)) について考察する。地表付近の塩の洗脱は散水フラックスの大きい CaseA-22 の方が明瞭であり、最大含塩率の発生位置は CaseA-11 (地表面下0.035m) よりも CaseA-22 (地表面下0.07m) で深くなる。同時に、含塩率は CaseA-22 の方が CaseA-11 より広範囲に分散するため、CaseA-22 の

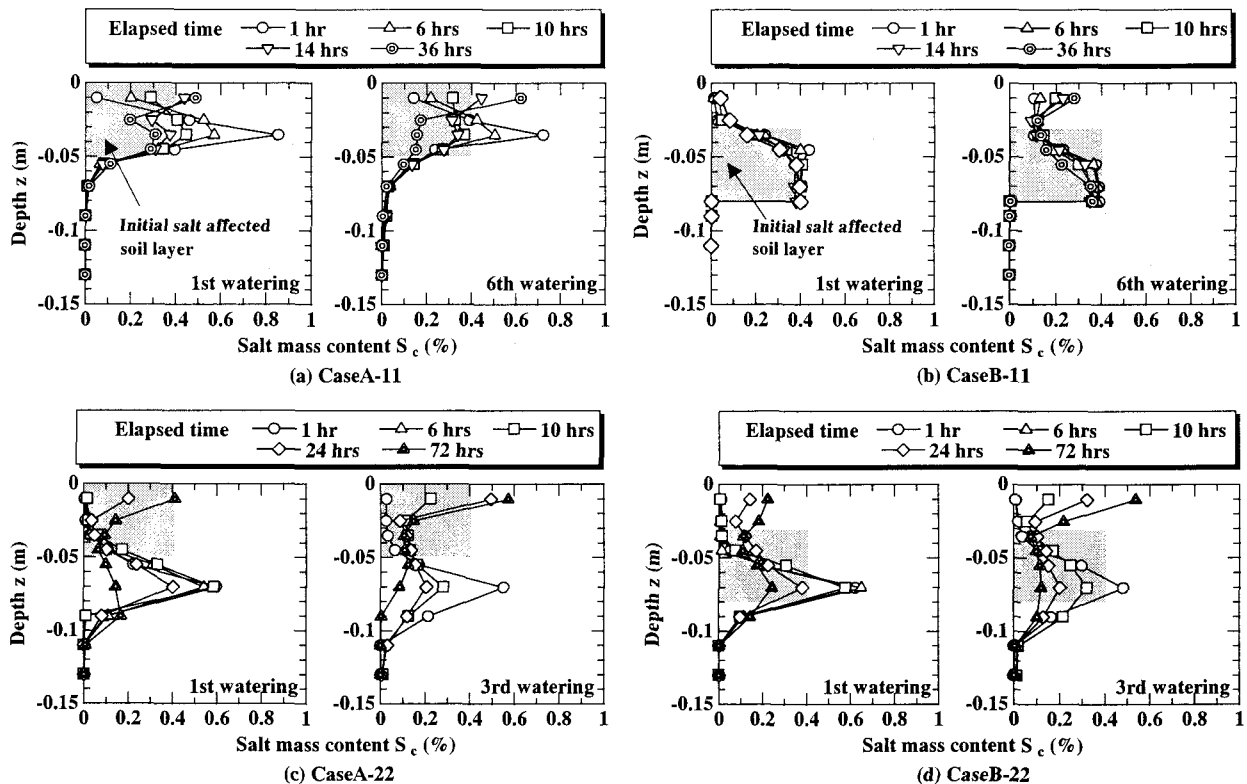


図-7 含塩率鉛直分布の経時変化

最大含塩率は CaseA-11 のそれより小さい。1 次散水後、蒸発に伴う水分上方移動による地表面下 0.01m までの含塩率（表層含塩率）の上昇は、CaseA-11 では散水開始から 6 時間後で既に認められるが、CaseA-22 では後で示す図-8 から知れるように、約 10 時間後に現れ、散水フラックスの小さい CaseA-11 で早まる。

しかしながら、実験期間終了時（散水開始から 216 時間後）の CaseA-11 および CaseA-22 の表層含塩率はほぼ等しい。これより、地表塩集積層の場合、散水フラックスと散水頻度が違っていても、全散水量、積算表面蒸発期間および積算蒸発量が同じであれば、表層含塩率はほぼ同じような値になる可能性が高いと推察される。この点については、後の 3. (4) c) で考察を加える。

次に、中間塩集積層の CaseB-11 と CaseB-22（図-7(b) および(d)）を比較する。CaseB-11 では初期塩集積層上部のみが洗脱され、最大含塩率は初期塩集積層内（地表面下 0.05m）に生じる。しかし、この値は初期含塩率（0.4%）よりもわずかに高い程度である。CaseB-22 では、CaseB-11 よりも塩の洗脱量が増えるために、1 次散水後の最大含塩率は 0.65% となり、増大する。CaseB-11 に注目すると、1 次散水後、表層含塩率は殆ど上昇しないが、散水回数が増えるにつれて徐々に増大する。一方、CaseB-22 の表層含塩率は 1 次散水期間終了時点で既に上昇しており、表層土壌は塩性化する。この表層土壌の塩性化は、2 次、3 次散水となるに従ってさらに明瞭となる。

実験期間終了時における表層含塩率は、CaseB-11 より CaseB-22 で著しく高い。中間塩集積層の場合、全散水量、積算表面蒸発期間、および積算蒸発量が同じでも、散水フラックスおよび散水頻度の違いにより表層塩性化の進行に差異が生じることが示唆される。

b) 塩集積層深さの影響

以下では、同じ散水フラックスおよび散水頻度の下で塩集積層深さの違いが塩移動に及ぼす影響を考察する。

まず、図-7(a)および(b)の CaseA-11 と CaseB-11 を比較すると、散水後、地表塩集積層を有する CaseA-11 の方で多くの塩が洗脱されるために、CaseA-11 の最大含塩率は中間塩集積層 CaseB-11 のそれよりも大きくなる。この値は、前者で約 0.8~0.9%、後方で 0.4% 程度である。両ケースとも浸透の範囲が地表面下 0.06m までに限られることから、CaseB-11 では初期塩集積層下部の含塩率は変化しない。蒸発—乾燥に伴う下層からの塩上方移動は、CaseB-11 よりも CaseA-11 で明確である。

続いて、図-7(c)および(d)の CaseA-22 と CaseB-22 の比較を行う。1 次散水直後、最大含塩率が現れる深さは両ケースで同じ（地表面下 0.07m）である。その後の蒸発に伴う表層土壌の塩性化は、地表塩集積層の CaseA-22 の方で明瞭となる。しかしながら、2 次、3 次散水となるにつれて、両ケースの含塩率分布の違いは希薄となる。

c) 表層土壌の塩性化に及ぼす蒸発の影響

図-8 は、CaseA-11 および CaseA-22 の表層含塩率 $S_{c, \text{surf}}$

と蒸発速度 V_w の経時変化をそれぞれ示す。

CaseA-11 では散水 1 時間後、塩の洗脱により $S_{c\text{ surf}}$ は 0.4% から 0.05% まで低下する。その後、蒸発による水分上方移動によって $S_{c\text{ surf}}$ は増加し、散水開始から 14 時間後には初期の 0.4% に戻る。これ以降の $S_{c\text{ surf}}$ の時間増加率は減少し、1 次散水期間終了時の $S_{c\text{ surf}}$ は 0.5% となる。

一方、CaseA-22 では、CaseA-11 に比べて塩の洗脱量が多く、より深部まで塩は移動するため、蒸発によって表層へ塩が到達する時間は長くなり、散水開始から約 10 時間後までの間は、 $S_{c\text{ surf}}$ の増加が殆ど見られない。CaseA-22 は、CaseA-11 に比べて $S_{c\text{ surf}}$ の時間増加率は小さいものの、その持続時間は長くなる。その結果、CaseA-22 における散水期間最終時の $S_{c\text{ surf}}$ は、CaseA-11 のそれに近い値になったと考えられる。

以上より、CaseA-11 および CaseA-22 において、表層の塩性化は散水直後から減率蒸発期間終了までで顕著であり、その後の低率蒸発期間では殆ど進行しない。また、 $S_{c\text{ surf}}$ の時間増加率が、CaseA-22 よりも CaseA-11 で大きくなった原因は、CaseA-11 では表面蒸発期間の初期から表層塩集積が生じたのに対し、CaseA-22 では表面蒸発期間の途中から (CaseA-11 よりも小さな蒸発フラックスで) 表層塩集積が始まったためと推察される。

4. おわりに

本研究は、乾燥土壌中に初期塩集積層を設け、同一全散水量下で散水フラックス (単位面積当たりの 1 回の散水量) と散水頻度を組み合わせた散水-蒸発塩移動実験を行い、地表付近の塩集積に及ぼす散水条件の影響を調べた。

その結果、本研究に関して次の結論が得られた。

- (1) 散水後、地表に再び集積する塩の含塩率は、散水および気象条件によっては、初期のそれより増大する可能性がある。また、地表面下で集積していた塩が散水後の蒸発によって地表に到達し、再集積する可能性が示された。
- (2) 地表塩集積層の場合、散水フラックスが小さいと洗脱後の表層土壌の再塩性化は、散水フラックスが大きい場合に比べて時間的に早く現れ、表層含塩率の時間増加率は大きい。しかしながら、表層含塩率が増大する期間は、散水フラックスが大きい場合に比べて短くなる。
- (3) 中間塩集積層の場合、散水フラックスが大きくて散水が塩集積層に達すると、散水回数が増すにつれて、表層土壌の塩性化は明確になる。
- (4) 表層土壌の塩性化は、表面蒸発期間から減率蒸発期間終了までの間で顕著であり、その後の低率蒸発期間では殆ど認められない。
- (5) 本実験から、散水のみによって 2 次的塩害を防止す

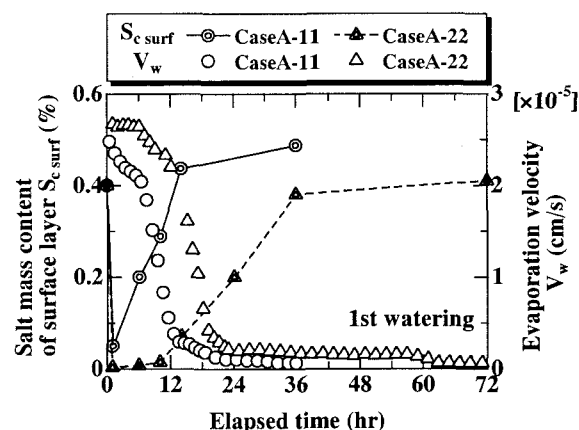


図-8 表層含塩率および蒸発速度の経時変化

る具体的な対策は見出せなかったが、熱・水分・塩移動理論モデルの検証に供するデータを得ることができた。

今後、理論モデルによる数値実験から、塩害を抑制するような散水条件の設計が可能になると思われる。

参考文献

- 1) Toderich, K.N., Tsukatani, T., Black, C.C., Takabe, K. and Katayama, Y. : Adaptations of Plants Metal/Salt Contained Environments: Glandular Structure and Salt Excretion, Discussion Paper No.552, 2002.
- 2) The UNEP GEO team (DEIA & EW) : UNEP Global Environment Outlook 2000, Chapter 2, United National Environment Program, 1999.
- 3) Rhoades, J.D., A.Kandiah, and A.M.Mashali : The use of saline waters for crop production, FAO of the United Nations, FAO irrigation and drainage paper 48, 1992.
- 4) Kirda, C., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. : Simultaneous transport of chloride and water during infiltration, Soil Sci. Soc. Am. Proceeding., Vol.37, pp.339-345, 1973.
- 5) Ghuman, B.S. and Prihar, S.S. : Solute dispersion in sandy soil as affected by wetness, infiltration, and evaporation regimes, Soil Sci., Vol.136, pp.33-41, 1983.
- 6) Chao, H., 福原輝幸, 高野保英, 南條雅志, Yang, J. : 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.
- 7) 王 ソン親ら : 中国塩漬土, 科学出版社, 1993.
- 8) Yang, J. : 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, Manila, Philippines, pp.61-73, 1999.

(2004. 9. 30 受付)