

乾燥地における土壌中の水分および塩移動特性

何 超* 福原 輝幸** 寺崎 寛章*** 孫 杰**** 馮 為民****

Characteristics of Moisture and Salt Movement in a Soil in an Arid Region

Chao HE*, Teruyuki FUKUHARA**, Hiroaki TERASAKI***,
Jie SUN**** and Weimin FEN****

(Received February 6, 2009)

In order to understand the characteristics of the salt movement in a soil associated with a strong evaporation from the soil surface, field experiments were carried out in the United Arab Emirates. The time changes of the moisture content and of the salt mass content due to watering on the soil surface and the subsequent drying were measured with 20 columns embedded into the soil. The most significant moisture loss due to evaporation occurred within first 24 hours after watering and reached about the 60~70% of the volume of the supplied water. The salt mass near the soil surface decreased first to reaching. After that the evaporation from the soil surface gradually decreased with time, while the salt mass content near the soil surface increased with time associated with an upward movement of the soil water due to evaporation. Our study can provide valuable advice on salinity control for irrigated agriculture in the Middle East.

Keywords : Evaporation, Salt Movement, Heat and Moisture Transfer

1. はじめに

地球の陸地の約3分の1を占める乾燥地・半乾燥地において農業を行う際、一般に灌漑は不可欠である。その際、排水の不備、不適切な灌水および灌漑水質の不良などが原因で、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(2次的塩害)が起こる。2次的塩害は、気象条件、土壌特性、灌漑条件などが複雑に絡み合って起こるため、その予測は非常に困難である。

不飽和土壌中の水分および塩移動に関する研究は、Fritton et al.^[1], 安部^{[2]-[4]}, 松川および中野^[5]などで代表されるような室内実験が多い。一方、野外の塩移動実験は、土壌の不均一性、熱・水分・塩移動の複雑な相互作用および長期観測に伴う経済的、人的制約などにより、未だ稀である。しかしながら、地域土壌を用いた塩移動実験は、当該地域における今後の塩害対策を進める上で、その重要性は高い。

そこで、中東乾燥地に位置するアラブ首長国連邦(UAE)において、散水-蒸発に伴う土壌中の熱・水分および塩移動を明らかにするために野外実験を行ったので、得られた知見を報告する。

2. 実験装置および実験方法

試験地は写真1に示すように、エリア1およびエリア2に分けられる。いずれのエリアとも面積は9m²(3m×3m)である。

実験に際して先ず両エリアから、大きな石、木片、根片、ゴミなどを取り除き、土壌を均等にかき混ぜ

* 中国浙江建設職業技術学院

** 福井大学大学院工学研究科

*** 福井大学大学院建築建設工学専攻

**** 武漢科技大学

* Zhejiang College of Construction

** Architecture and Civil Eng. Course,
Graduate School of Engineering

*** Dept. of Architecture and Civil Eng.

**** Wuhan University of Science and Technology

る。次に、エリア内の異なる場所から土壌を採集し、塩分 (NaCl) 濃度をコンパクト塩分計 (HORIBA 製) により測定する。

エリア 1 の中心部に、高さ 0.4m、内径 0.19m のアクリル製の計測カラムをカラム頂部と地表が一致するように埋設する。その後、試験地の土壌を均一にカラム中に充填する。なお、土壌充填の前に計測カラムには図 1 に示すように、土壌温度・湿度センサー (VISALA 製) および TDR 方式 P2 型土壌水分センサー (東北電子製) がそれぞれ挿入されている。土壌温度・湿度センサーの挿入位置は、地表面下 0.01m, 0.02m, 0.03m, 0.04m, 0.05m, 0.06m, 0.07m および 0.1m である。TDR 方式 P2 型土壌水分センサーの挿入位置は地表面下 0.01m, 0.025m, 0.04m, 0.055m, 0.07m, 0.085m, 0.1m, 0.115m, 0.13m および 0.145m である。

また地上には、長波放射計、アルベド計 (いずれも英弘精機製)、3 杯式風速計 (牧野応用測器研究所製)、気温・湿度センサー (VISALA 製) をそれぞれ設置した (写真 1 を参照)。その高さは長波放射計: 地上 2m, アルベド計: 地上 0.5m, 風速計: 地上 0.2m および 0.5m, 気温・湿度センサー: 地上 0.01m, 0.05m, および 0.5m である。

エリア 2 には、高さ 0.15m、内径 0.065m の塩ビ製サンプリングカラム 20 本を、カラム頂部と地表が一致するように埋設した。なお、カラムは頂部から深さ 0.05m までは厚さ 0.01m のリングで、それより以深では厚さ 0.02m のリングで構成される。20 本のカラムは写真 1 に示すように、4 列 (各列 5 本) に配置した。その後全てのカラムに試験地と同じ土壌を充填した (充填密度は 1650kg/m^3)。

散水後の蒸発量を直接測定するために、試験地と同じ試料を充填した 2 つ蒸発パンを両エリアに埋設した。蒸発パンはいずれも計測センサーあるいはカラムの影響 (日陰や局所的な風) を受けない場所に設置した。

上述した準備作業が終了後、カラムおよび蒸発パン中の土壌温度・湿度が周囲土壌と馴染むように、

カラムおよび蒸発パンを 3 日間放置した。その後 8 月 28 日 18:50 に散水器を用いて、両エリアに地下水 (塩濃度 $C=1.4\text{kg/m}^3$) を一様に散布した。散水条件は表 1 を参照されたい。

エリア 1 の各データは自動的に計測されるが、エリア 2 では予め決められた時間にカラムを掘り出し、層 (リング) 毎に土壌を採取した。採集された試料はガス焔炉で乾燥させ、体積含水率を求めた。さらに、乾燥させた土壌に純水を加えて攪拌し、コンパクト塩分計 (HORIBA 製) を用いて、塩分濃度を求めた。

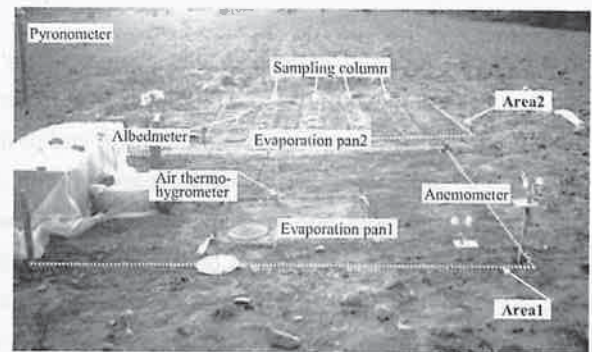


写真 1 実験地概要

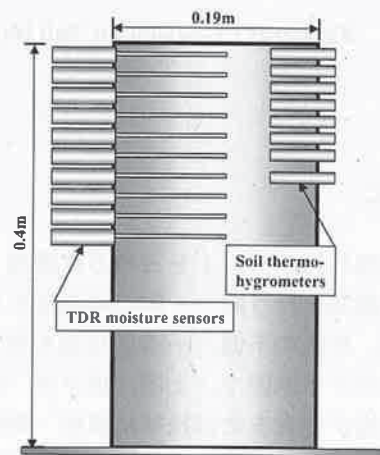


図 1 計測カラムのセンサー配置状況

表 1 散水条件

	散水水温 ($^{\circ}\text{C}$)	散水塩濃度 (kg/m^3)	散水開始時間	散水所要時間 (s)	散水フラックス密度 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
1 次散水	36.8	1.4	8 月 28 日 18 : 50	520	10.2×10^{-3}
2 次散水	36.4		9 月 1 日 18 : 50	540	9.5×10^{-3}
3 次散水	38.2		9 月 5 日 18 : 50	580	9.1×10^{-3}

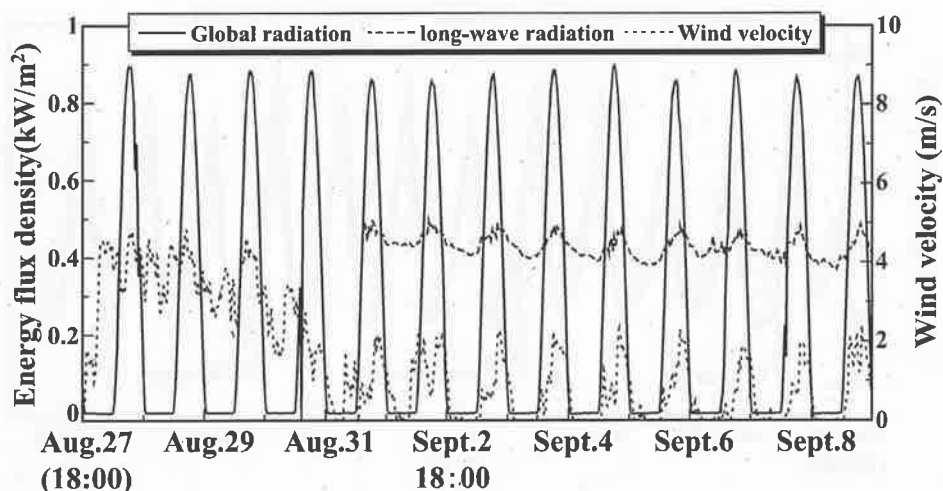


図2 全天日射量および風速の経時変化 (8月27日~9月9日)

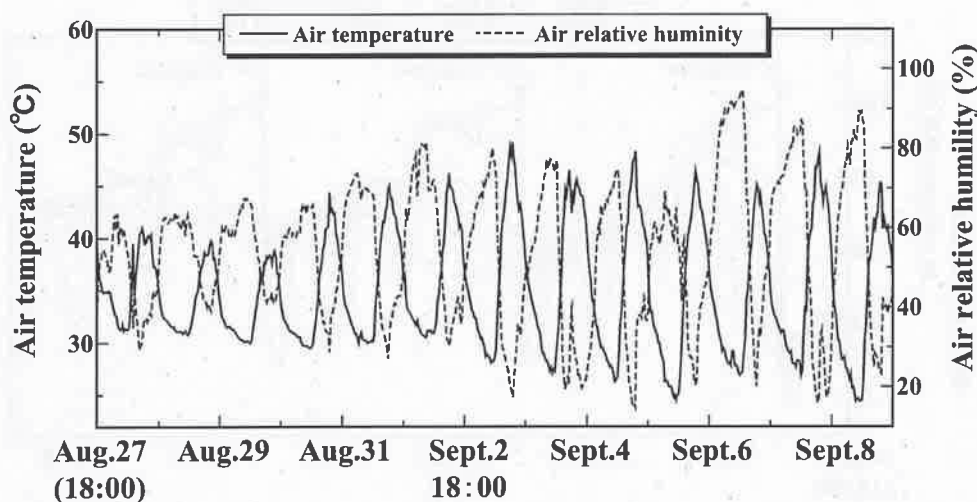


図3 気温および空気相対湿度の経時変化 (8月27日~9月9日)

3. 実験結果および考察

3.1 気象条件

図2および図3は、8月27日18:00より9月9日18:00までの試験地における全天日射量、天空長波放射量、風速および空気中の温・湿度の経時変化をそれぞれ示す。なお、8月27日18:00から9月1日9:00までの長波放射データは欠測である。

図2は、全天日射量および風速の経時変化を示しており、測定期間中は快晴が続き、最大値は正午に約 0.9 kW/m^2 に達した。天空長波放射量は昼間に大きく、夜間に小さい。しかしながら、その日周期変動は小さく、平均値は 0.41 kW/m^2 、振幅は 0.08 kW/m^2 であった。また、風速は8月27日から8月30日までの間で大きく、かつ不規則に変動した。その間の風速の最大値は 4.5 m/s に達した。その後、風速は弱

くなり、9月1日から規則的な日周期変動となり、夜間に小さく、昼間に大きい。

図3は大気の温・湿度の経時変化であり、最高気温は 50°C 近くに、また日較差は約 20°C に達した。湿度は20%を下回る日があり、大気は蒸発能力の高いことが知れる。

3.2 地温および土壌空隙相対湿度

図4および図5は、8月27日18:00から9月9日18:00に亘る地温 T_s および土壌空隙相対湿度 RH_s の経時変化をそれぞれ示す。図中の矢印で示される時点は、散水開始時刻(18:50)である。

地温 T_s の日変動は、地表から下方に向かうにつれて小さくなり、位相遅れが増大する。地表面下 0.01 m の T_s について観ると、その最大値および最小値は、いずれの日も13:00頃および6:00頃に現れた。また、

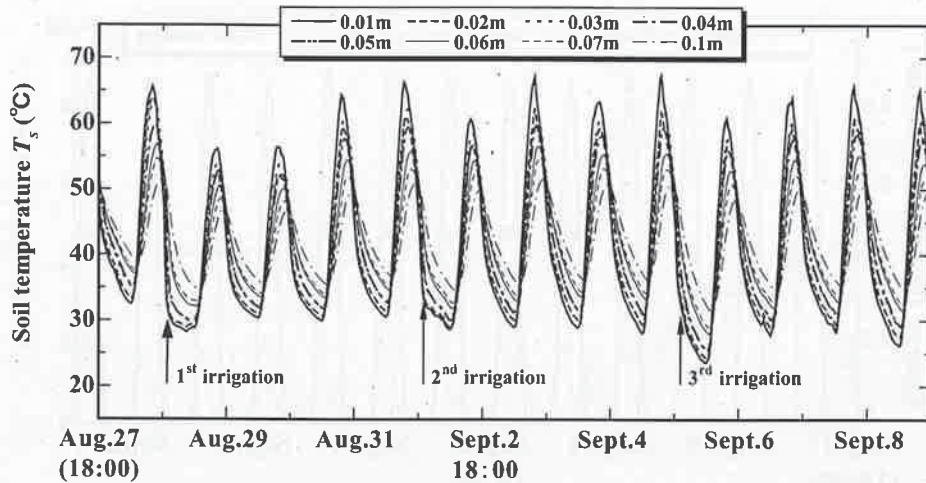


図4 土壌温度の経時変化 (8月27日～9月9日)

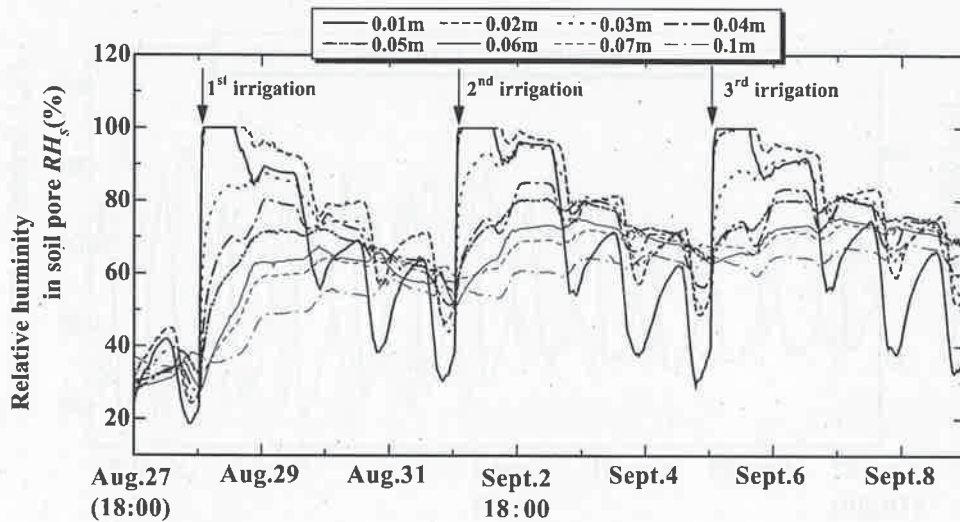


図5 土壌空隙相対湿度の経時変化 (8月27日～9月9日)

散水時 T_s と散水水温の差が小さいことから、散水顕熱による T_s の変化は殆どなかった。散水翌日の地表面の T_s の最高地温は 56°C であり、散水当日のそれより約 10°C 低くなった。これより、散水による地温上昇は蒸発潜熱により抑制されたことが分かる。しかしながら、散水から3日目になると、 T_s の変化はほぼ散水前の状態に戻った。

1次散水前の RH_s は T_s と逆位相で日変動する。散水後、地表に近いほど RH_s の上昇は明確であり、深度が大きくなるほど、時間遅れは明瞭になる。ここで、1次散水の地表面下 0.01m の RH_s に注目する。散水直後、 RH_s は散水前の 24% から急激に上昇し、 100% に達した。その14時間後(8月29日8:00)、 RH_s は 100% から減少し、日周期変動し始めた。その後、地表面下 0.02m の RH_s も 100% から減少し、日周期変動し始めた。高野ら^{[6],[7]}によると、 RH_s は地表か

ら下方に向かって増大し、最大値に達した土壌深さが、概ね乾燥前線に相当することを指摘している。よって、この時点で地表面下 0.01m までの表層土壌が乾燥しているものと推察される。なお、2次、3次散水後についても、1次散水期間と類似の傾向が観られた。

3.3 蒸発量

図6は、8月28日19:00から9月9日19:00に亘る累積蒸発フラックスの Q_v (実線)、および蒸発損失率(破線)の経時変化を示す(左軸が蒸発フラックス、右軸が蒸発損失率)。蒸発損失率は Q_v を散水フラックス I_v ($=5.2\text{kg/m}^2$) で除した値である。

図6より、各散水時間が夕方19:00にも関わらず、その後の累積蒸発フラックスの増加は著しい。また、 Q_v の時間増加率は昼間大きく、夜間に小さくなるよ

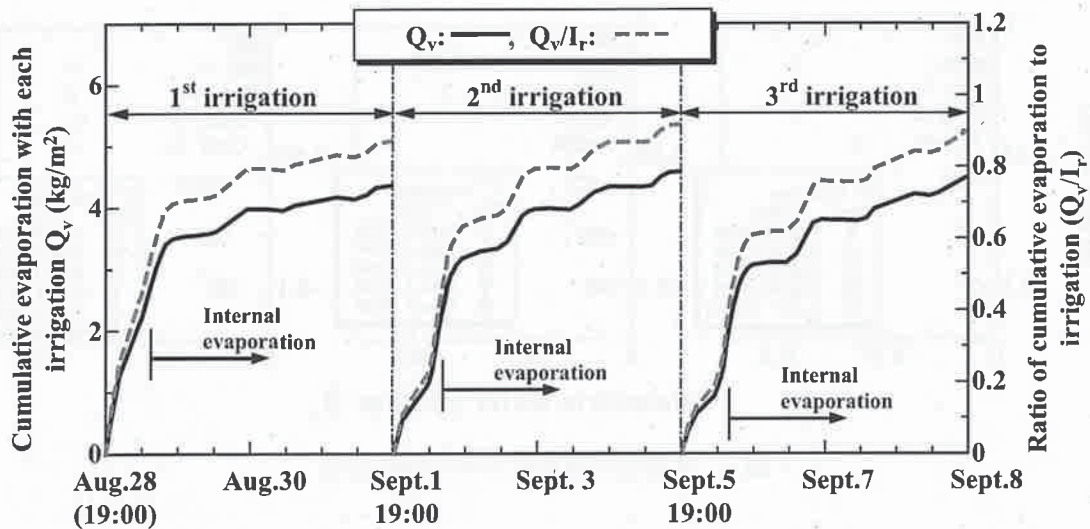


図6 累積蒸発フラックスおよび蒸発損失率の経時変化

うな日変化を繰り返した。散水14時間後、地表面下0.01mの相対湿度は100%から減少し始めたことから、8月28日19:00から8月29日8:00までの蒸発は表面蒸発期間と判断する。その後、蒸発は内部蒸発期間に移行して、蒸発量は日毎に逓減した。また、蒸発損失率を観ると、1次散水から24時間までに散水量の70%が蒸発により失われた。これに対し、2次、3次散水後の同時間での蒸発損失率は約60%であり、1次散水に比べて10%減少した。これは図2から分かるように、1次散水に比べて、2次、3次散水期間の風速が弱まったために、蒸発が鈍化したと考えられる。しかしながら、各散水実験終了時において、蒸発損失率はほぼ同じで90%であった。

3.4 液状水移動

図7は、各散水期間における体積含水率 θ_v の鉛直分布の経時変化を示す。

1次散水前(8月28日18:00)、カラム内の θ_v は0.02であり、土壌は気乾状態である。散水直後(8月28日19:00)、 θ_v は地表面下0.045mまでの範囲で増大した。その際、地表面下0.005mの θ_v は0.16に達した。その後、液状水の下方浸透および蒸発によって、地表付近の θ_v は減少した。目視より、地表面は散水翌日の8月29日朝には気乾状態であった。同図より、(i)散水の下方浸透は、せいぜい地表面下約0.06mまでに限られる、(ii)9月1日の θ_v から分かるように湿潤領域はほぼ消失し、水分状態はほぼ散水前に戻る、ことが理解できる。また、2次、3次散水後も1次散水と同じ水分変化が現れ、どちらも散水後1日間での水分減少が著しい。ただし、2次、3次散水直後(9月1日19:00、9月5日19:00)の θ_v の増加

は、1次散水とそれぞれ異なる。その原因は、散水の個人差によって、全散水量は同じであってもカラムの中に入った散水量が必ずしも等しくなかったと考えられる。

3.5 塩移動

図8は、各散水期間における含塩率 S_c の鉛直分布の経時変化を示す。 S_c は(含塩量/乾燥土壌質量) $\times 100$ (%)で与えられる。実験前に採集された試料の塩分濃度は全て0.4%であった。

まず、1次散水期間の含塩率分布に注目すると、散水によって地表面下0.035mまでの塩(8月28日19:00)は洗脱され、その下方0.035~0.07mの範囲に再配分(蓄積)された。この時、地表面下0.045mの含塩率は散水前の0.4%から1%まで増加し、全層での最大となった。その後、蒸発に伴う液状水の上方移動によって、蓄積された塩は地表に輸送されるために、 S_c は徐々に減少した。それに対して、地表の S_c は散水前で0.4%であったが、散水直後の洗脱によって0.07%まで減少した(8月28日18:00)。その後、地表の S_c は下方からの塩供給によって増大するものの、最終的に0.3%に留まり、散水前の値を下回った(9月1日18:00)。

2次、3次散水期間の S_c 分布は散水の影響を受け、1次散水期間のそれとは多少異なるが、散水期間終了時(9月5日18:00、9月9日18:00)の地表の S_c は、1次散水と同じく、散水前のそれより低かった。

以上より、本散水条件では下方で再配分された塩は植物の根元域に残留するので、植物の生育に障害をもたらす可能性がある。

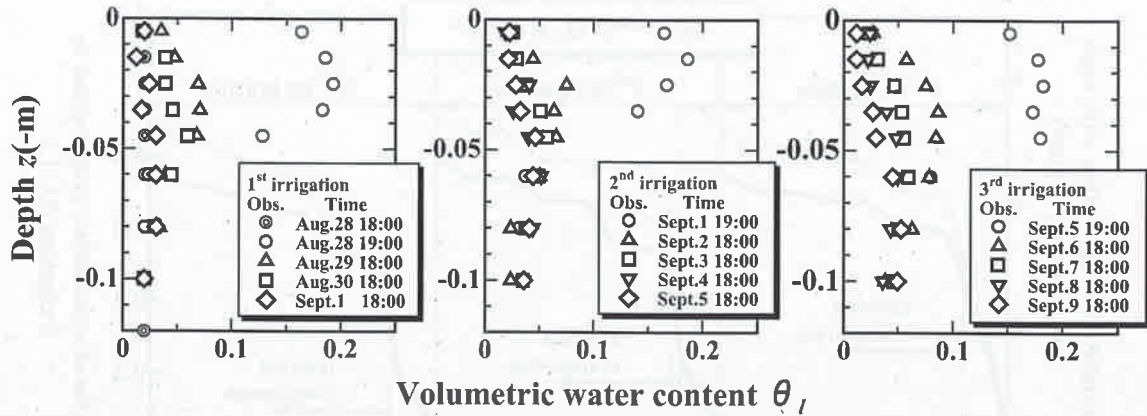


図7 体積含水率鉛直分布の経時変化

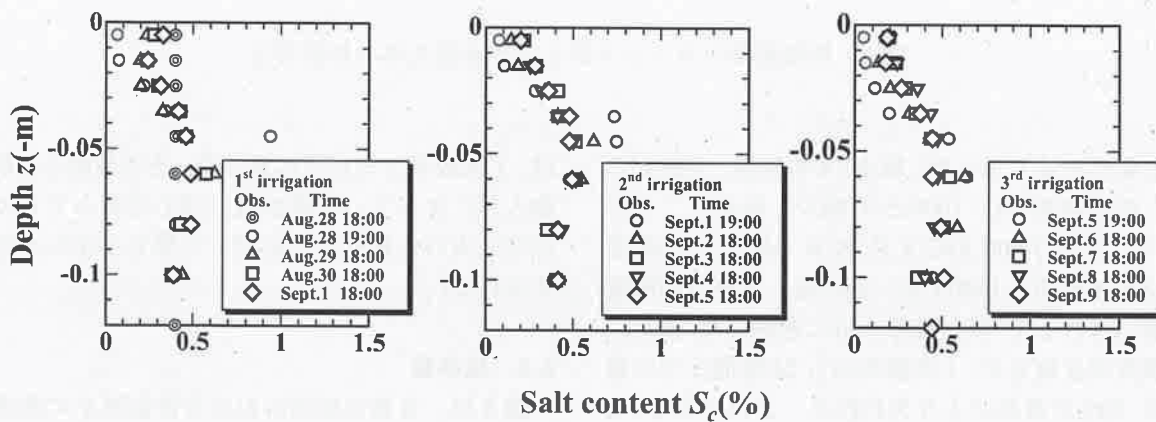


図8 含塩率鉛直分布の経時変化

4. おわりに

乾燥地における土壌中の水分および塩移動特性を把握するために、乾燥地である中東のアラブ首長国連邦において、地域土壌を用いた散水-蒸発野外実験を行った。

以下に結論を列挙する。

- 1) 蒸発・乾燥実験によって、蒸発パンによる乾燥地での蒸発量の計測方法は簡便で有効であることが明らかになった。
- 2) 蒸発による土壌中の水分損失は散水後 24 時間まで最も大きく、散水量の 60~70%となった。
- 3) 散水後の蒸発潜熱により、地表付近の温度上昇は 2 日間程度抑制された。
- 4) 本実験方法は、乾燥地における散水-蒸発に伴う土壌中の塩移動の追跡に相応しい。
- 5) 本散水による洗脱およびその後の蒸発による上向き塩移動では、土壌中の全塩分を地表で取り除くことはできないことが分かった。

謝辞

最後に、本研究の一部は湖北省自然科学基金(2006ABA290)の支援を受けて行われた。ここに、謝意を表す。

参考文献

- [1] Fritton, D. D., Kirkham, D. and Shaw, R. H. : Soil water and chloride redistribution under various evaporation potentials, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol.31, pp. 599-603, (1967).
- [2] 安部政雄: 飽和供試体の乾燥過程における塩類集積形態-塩類集積機構とその対策に関する土壌物理学的研究(II)-, 農業土木学会論文集, No. 106, pp. 61-71, (1982).
- [3] 安部政雄: 土性の相異と塩類集積特性との関係-塩類集積機構とその対策に関する土壌物理学的研究(I)-, 農業土木学会論文集, No.94, pp. 32-40, (1981).
- [4] 安部政雄: 土性, 飽和溶液濃度および乾燥レベルが異なる土壌のリーチング特性-塩類集積機構とその対策に関する土壌物理学的研究(III)-, 農業土木学会論文集,

No.114, pp. 49-59, (1984).

[5] 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, No. 161, pp. 1-9, (1992).

[6] 高野保英, 福原輝幸, 佐藤邦明: 乾燥—不飽和土壌中の熱・液状水および蒸気状水移動の同時連成解析, 土木学

会論文集, No.635/II-49, pp. 13-19, (1999):

[7] 高野保英, 福原輝幸: アラブ首長国連邦における現地気象・水文観測—土壌温湿度法による灌水後の土壌蒸発・乾燥過程の評価—, 水工学論文集, 42, pp. 91-96, (1998).

