

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450359

研究課題名(和文) 乾燥地・半乾燥地に展開する農地の持続的利用のための除塩・防塩システムの構築

研究課題名(英文) Development of the system of desalinization and protection of salt accumulation for sustainable utilization of farm lands in arid/semi-arid regions

研究代表者

猪迫 耕二 (INOSAKO, KOJI)

鳥取大学・農学部・教授

研究者番号：60243383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、土壌中に人工的に設けた粗粒領域で塩害発生農地の修復と持続的利用を両立させる農地管理法の開発を試みた。部分的な粗粒領域を鉛直排水トンネル(DT)、粗粒層をキャピラリーバリア層(CB層)とし、それらの単独使用、併設使用による除塩と防塩効果を評価した。その結果、高透水性土壌においてCBの使用はリーチングに影響を及ぼさず、表層の保水力強化と下層からの毛管上昇阻害に効果がある、低透水性土壌においては、CBで降下浸透水を捕捉しDTに誘導することで効率的な排水が可能となる。DTとCBの併設使用は下層からの毛管上昇をほぼ完全に遮断できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：A farm land management method was developed to remove excess salts from a surface soil layer and protect salt accumulation in a root zone. In this method, a high permeable material zone or layer are placed in soil. The zone is called a drainage tunnel (DT) and the layer is called a capillary barrier (CB). They are used as single agent or in combination for the condition of soil permeability. The performances for desalinization and protection of salt accumulation were assessed by model and numerical experiments. The results were summarized as follows: 1) CB used in high permeable soil did not inhibit leaching of salts. Moreover it enforced water retention ability of surface layers and intercepted capillary rise from lower layers. 2) The combination use of CB and DT rapidly drained leaching water from surface layers to lower layers in low permeable soil. 3) The combination use enabled to perfectly intercept capillary rise from shallow underground water and protect salt accumulation.

研究分野：水土環境保全学

キーワード：リーチング 塩類集積 キャピラリーバリア 溶質移動 毛管上昇 浸潤

1. 研究開始当初の背景

世界の全農地面積に対してわずかに 18% を占めるに過ぎない灌漑農地が、全農業生産量の 40%を生み出している。このことから、灌漑は安定的な農業生産にとって必要不可欠な農業技術といえるが、昨今の水需要の多様化から、より節水的な灌漑が必要とされる。

ところで、粗粒土壌と細粒土壌における水の吸引力の差により毛管水の移動が遮断される現象をキャピラリーバリア (CB) 現象というが、これを積極的に利用した節水灌漑法が近年注目されつつある。CB の利用は、下層から上層に移動する毛管上昇の遮断に対しても有効であることから浅い地下水面による塩類集積の防止にも効果が期待できる。

集積した塩を農地から取り除く方法として最も一般的な方法にリーチングがある。リーチングは多量の灌漑水で塩を溶解させて下層に浸透させるため、透水性の良好な土壌に適用すべき方法とされるが、現実には、透水性の低い土壌においても多用されている。この場合、一時的な除塩の後に塩の再集積が生じるため結果的に土壌の塩濃度は上昇する。このような農地でリーチングを行うには暗渠排水が不可欠であるが、平坦な地域では暗渠で集めた排水を系外に流出するのは事実上不可能であり、下層に確実に排水できる従来と異なる除塩・防塩方法の開発が必要とされる。

2. 研究の目的

乾燥地・半乾燥地に展開する農地の持続的な利用のためには除塩と塩の集積・再集積を防止する (防塩) 機能の両者が必要不可欠である。そこで、本研究では、透水性の高い領域を土壌中に設置する鉛直排水トンネル (DT) と CB を農地の土壌条件に応じて「単独使用」「併設使用」することにより、様々な土壌に適用可能な除塩・防塩システムを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) カラム実験により CB 単独使用の除塩・防塩機能の評価を行った。
- (2) CB 存在下におけるリーチング進行過程と土壌条件の関係を明らかにするために 1 次元浸透条件での数値実験を実施した。
- (3) 2 次元土槽を用いた浸透実験と浅層地下水存在下での毛管上昇試験により DT, CB の単独・併設使用による除塩・防塩システムの有効性を評価した。

4. 研究成果

- (1) キャピラリーバリア単独使用による除塩機能を維持できる土壌条件の解明

実験方法

供試材には細粒土に鳥取砂丘砂、粗粒土に粒径 9.5 mm 以下の礫を使用した。実験は恒温室内 (温度 25℃, 相対湿度 25%) で行なった。内径 5 cm, 高さ 1~2 cm のアクリルリ

ングを連結し、高さ 28 cm の円筒カラムを製作した (図 1)。CB なしと CB ありを各 3 本ずつ準備した。CB ありの場合は上部から砂土が 16 cm, CB 層が 4 cm, 下層土が 4 cm となるように充填した。CB なしの場合は、全層 (24 cm) に砂土を充填した。両処理とも余剰の水分を自然排水するために、カラムの下端 4 cm に礫を充填した。乾燥密度は砂土で 1.46 g cm⁻³, 礫で 1.33 g cm⁻³ とした。また、電気伝導度 (EC) 12.0 dS m⁻¹ の塩水を入れたマリ奥特管と各カラムを連結させて地下水面を形成した。

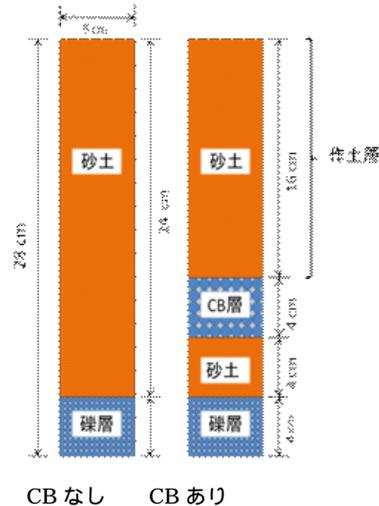


図 1 土壌カラム

塩類集積の発生手順は次の通りである。まず、土壌カラム内を飽和状態にした後に、重力排水させて地下水位を CB 層上部まで低下させた。カラム上部に設置した小型ファンで送風し蒸発を促進させた。実験開始から 7 日目で塩の析出が確認できたため、この段階を初期状態とした。その後、197.5 cm³ の蒸留水を用いてリーチングを行った。リーチングの際には、下部は大気開放にして十分に排水されるようにした。また、注水による洗掘を防ぐために土壌表層に紙を敷き、1 cm の湛水状態を維持した。リーチング水を十分に排水させた後、マリ奥特管に連結し、カラム下端から高さ 5 cm に地下水面を形成した。再度小型ファンを設置して蒸発を促進させて、塩類集積確認時 (初期状態) とリーチング後 1 日目、7 日目にそれぞれ 1 本ずつ解体し、体積含水率と EC を計測した。土壌の EC は 1:5 抽出法を用いた。

結果と考察

図 2 に体積含水率の鉛直分布を示す。CB なしの水分分布から、地下水面より 10cm ほど高い位置まで毛管飽和が生じていることがわかる。絶えず水分補給が生じているため、リーチング後 7 日目で 1 日目より全層的に含水量が大きくなっている。一方、CB ありでは、実験開始後 1 日目で上層の含水量が初期値より低下し、CB 層ではさらに著しく低下したことから、リーチング用水が CB 層より下層へ

排水されたことが確認できる。図3にECの鉛直分布を示す。CBなしの場合、初期値では 4.05 dS m^{-1} であったECがリーチング後1日目で 0.138 dS m^{-1} となった。深さ2 cm以降のECもほぼ 0 dS m^{-1} まで低下しており、確実に除塩されたといえる。しかし、継続的な毛管上昇による塩供給の結果、7日目の表層は 10 dS m^{-1} もの高塩濃度となった。一方、CBありではリーチング後1日目の表層のECはほぼ 0 dS m^{-1} まで低下し、さらに、7日目の表層のECは 1.06 dS m^{-1} に留まった。CBありでは、リーチングによってまず高濃度の塩分がCB層下に溶脱され、作土層内には低塩濃度の水が保持された。さらに、毛管上昇による塩の補給も阻止された。

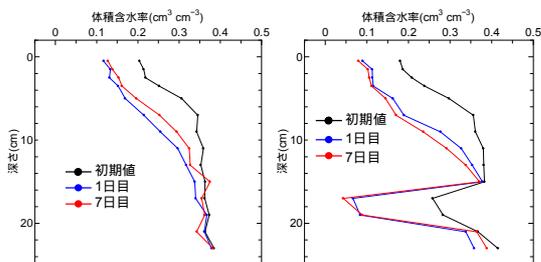


図2 体積含水率の鉛直分布

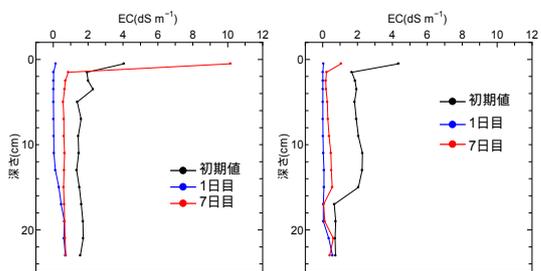


図3 ECの鉛直分布

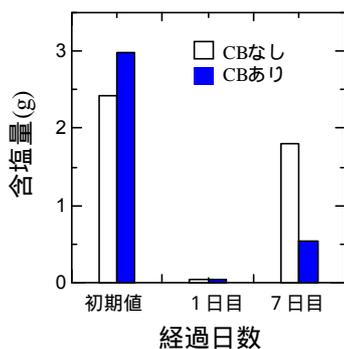


図4 土層の含塩量の変化

図4に作土層内の含塩量の変化を示した。リーチング後の含塩量はCBありの場合でも増加していた。これは作土層内に塩を含んだ地下水が供給されたことを意味している。その原因としては、CB層内に砂土が侵入し、水の遮断が完全ではなかったことが挙げられる。しかし、塩の増加率で見ると、CBなしの場合では作土層内の塩質量は1日目の45倍

だったのに対して、CBありでは13.5倍となり3分の1以下の増加量で留まった。CBなしでは急激に塩類化が進行したが、CBありでは塩類化の進行は少なく再集積防止に効果的といえる。さらに、除塩効果に対してもCB層の有無に関係なく残存塩が 0.04 g となり、CB層の存在下においても適切なリーチングが可能であることが確認できた。

結語

浅い地下水が存在する場合でも、CB層の存在は析出塩のリーチングに影響せず、作土層の保水量確保と毛管上昇の遮断による塩類集積の防止に効果的であることが確認された。

(2) キャピラリーバリアの除塩機能と土壌条件

実験方法

ドリップチューブを用いたリーチングを念頭に、キャピラリーバリアの存在がリーチング進行過程に与える影響を数値実験で検討した。数値計算にはHYDRUS-1Dコードを使用した。計算条件は、25cmの土壌カラムの深さ15~20 cmに粗粒土を有する成層土壌を想定した。粗粒土は礫とし、細粒土は砂土、シルト質壤土、埴土とした。水分移動特性関数には(a)式、(b)式で表されるvan Genuchten-Mualemモデルを用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h|^n\right)^{-m} \quad (a)$$

$$K = K_s S_e^{\ell} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (b)$$

ここで、 S_e : 体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 h : 圧力水頭 (cm)、 K : 不飽和透水係数、 K_s : 飽和透水係数、 α 、 n 、 m 、 L : 実験パラメータ (ただし、 $m=1-1/n$) である。使用したモデルパラメータは表1の通りである。

表1 水分移動特性関数のパラメータ

	砂土	シルト質壤土	埴土	礫
s	0.4	0.45	0.38	0.4
r	0.002	0.067	0.068	0.001
(cm^{-1})	0.076	0.02	0.008	2.5
n	4.5	1.41	1.09	2.6
L	2.2	0.5	0.5	-0.1
K_s	0.052	1.25×10^{-4}	5.56×10^{-5}	3.4
(cm s^{-1})				

上部境界条件として計算開始から10時間まで毎正時に5分間 0.1 cm min^{-1} の強度で灌水し、蒸発はないものと仮定した。下部境界条件は自由排水条件とした。初期条件は全層-100cmの不飽和状態とした。計算時間は5日間である。

結果と考察

図5に上層部の水分分布の時間変化を示した。透水性の高い砂土では、CB境界付近で体積含水率が高く維持されるのに対し、透水性の低い土壌ではCB上層が全層的に高い水分状態になる傾向がある。埴土の場合、5日後も飽和状態に近い値が全層的に維持されており、作物栽培の観点からは湿害が懸念される。

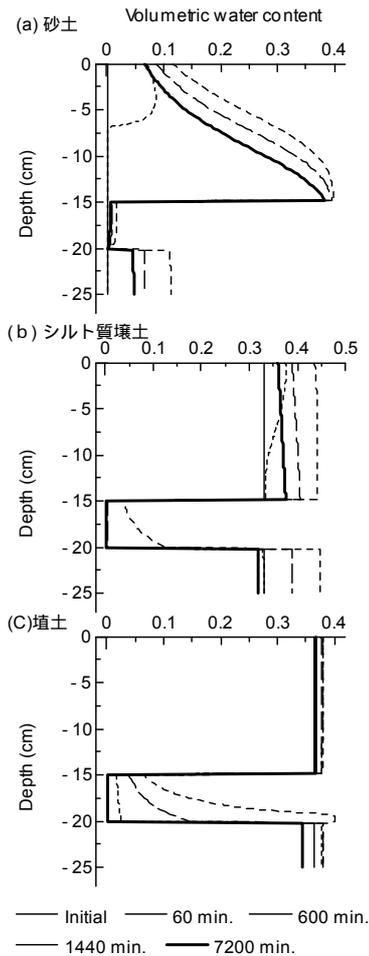


図5 体積含水率の鉛直分布

図6は下層への排水量の時間変化を表している。一般に、CB層の存在は下層への排水量を低下させる。これは、CB境界面が不飽和状態に戻れば直ちに毛管障壁機能が回復するためである。CB層の有無による排水量の差が大きい土壌では、CB層の存在が上層の保水力の強化に繋がると言える。その差が小さい土壌ではCB層の存在が排水に影響を及ぼさないことを意味している。図より明らかに高透水性土壌におけるCB層の影響が大きいといえる。

結語

キャピラリーバリアは粗粒土と細粒土の境界面における水分状態が飽和に近くなると毛管障壁機能が失われ、浸透現象が発生す

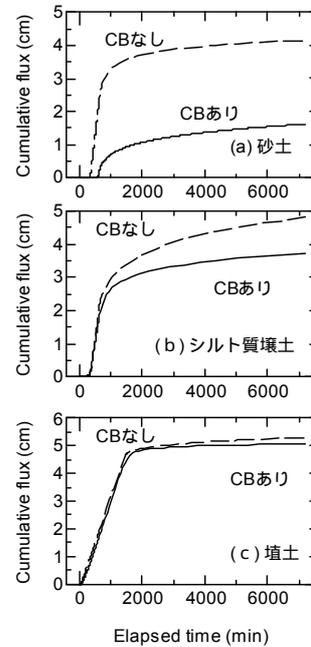


図6 下層排水量

る。しかし、境界面の水分状態が不飽和状態に戻ると再び障壁機能が発生する。この機能は細粒土の透水性にかかわらず発生する。高透水性土壌では、CB層の境界面付近で高い含水率が保持されるが、低透水性土壌ではCB上層が全層的に過湿状態に保たれる。また、低透水性土壌ではCB層の存在は下層への排水量に影響を及ぼしておらず、除塩に関しては低透水性土壌にCB層を敷設する意義は認められない。

(3) 鉛直排水トンネルとキャピラリーバリアの単独使用と併設使用における除塩・防塩効果について

実験方法

低透水性土壌の排水能を高めるDT単独使用とDT-CB併設使用システムの概念を図7に示した。

低透水性土壌には埴土を、排水トンネルには初殻を、CB層には直径5mmのガラスビ

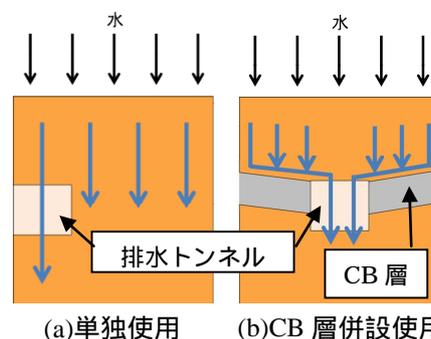


図7 排水トンネルによる浸透促進法

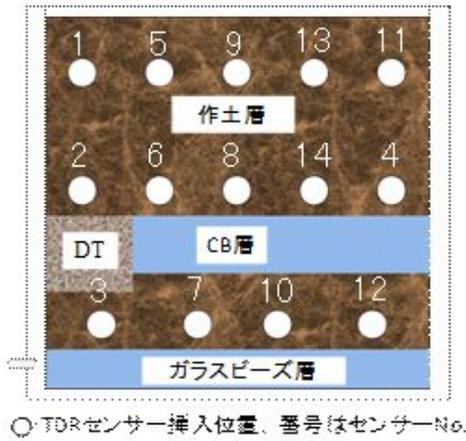


図8 2次元土槽

ーズを使用した。使用する二次元土槽(図8)は深さ50 cm, 幅50 cm, 奥行き7 cmの透明塩ビ製である。土槽条件は, 鉛直排水トンネルのみのもの(Case1), 鉛直排水トンネルとCBを併設したもの(Case2), 対照実験として低透水性土壌のみのもの(Case3)の3システムを用意し, 除塩実験と防塩実験を行った。Case1の除塩実験及び防塩実験をそれぞれCaseR1, CaseP1とし, 他の条件についても同様とした。各条件において, 浸透水を自然排水させるために土槽の下端5 cmに礫層を設けた。土槽側面の穴からTDRセンサーを14本挿入して体積含水率と電気伝導度を測定し, 各地点における水と塩の経時変化をモニタリングした。各センサーをデータロガーに接続し, 5分毎に自記計測を行った。除塩実験では, 土槽の上部に塩化カルシウム水溶液($EC\ 4\ dS\ m^{-1}$)で飽和した後に風乾させた塩類土壌を厚さ2 cmで表面を水平にして設置し, 土槽の上に設置した多孔質灌水チューブを用いて4時間毎に1回15分の灌水を行った。CB層の収集効果を得るため, 土槽を傾斜のある台に載せた。1回の実験時間は灌水開始から最下層までリーチング水が到達するまでとした。防塩実験では土槽下部にある礫層を塩化カルシウム水溶液に浸し, 毛管上昇を発生させた。1回の実験時間は, センサーNo.2が挿入された高さよりも毛管水が上昇し, 出力値の変化を測定できるまでとした。

結果と考察

図9にCaseR2における体積含水率の分布を示す。赤線で囲んだ領域は排水トンネル, 桃色の線で囲んだ領域はCB層である。灌水開始から24時間後にCB層より上で保持されていた浸透水が72時間後には排水トンネルを通過し, 下層へ流下している。また, Fig.4にCaseP2におけるバルク電気伝導度の分布を示す。灌水開始から24時間後, CB層より下では毛管水が上昇しているがCB層より上までは上昇せず, 実験を終了した。118時間後も同様であった。

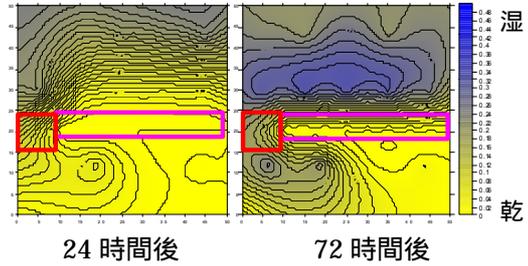


図9 CaseR2における体積含水率の分布

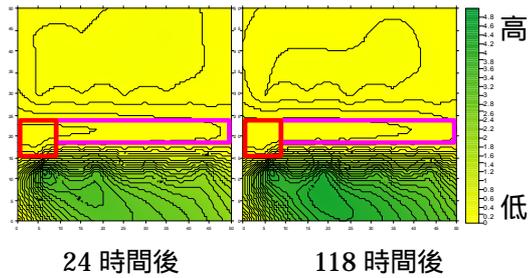


図10 CaseP2におけるバルクECの分布

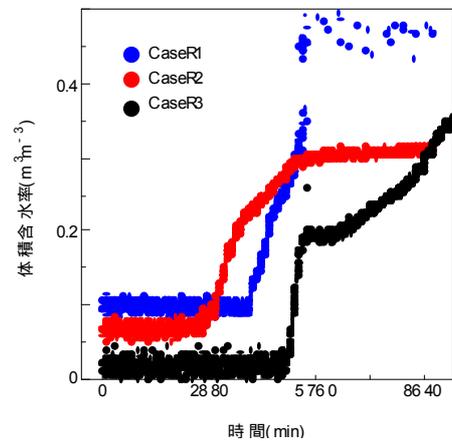


図11 センサーNo.3における除塩実験の体積含水率の経時変化

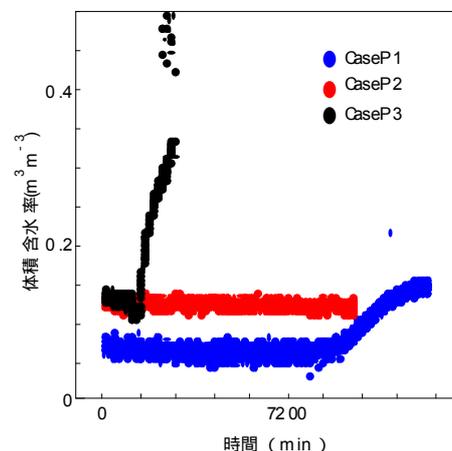


図12 センサーNo.2における防塩実験の体積含水率の経時変化

図 11 に排水トンネル直下に位置するセンサーNo.3 における除塩実験の各条件の体積含水率の経時変化を示す。CaseR2 は、CaseR1, R3 よりも体積含水率の上昇が早い。CB 層で収集されたリーチング水が排水トンネルで浸透を促進されたためと考えられる。

図 12 に排水トンネル直上に位置するセンサーNo.2 における防塩実験の体積含水率の経時変化を示す。CaseP3 では 1440 分(24 時間)後に体積含水率が上昇した。CaseP1 では 8640 分(144 時間)後に体積含水率が上昇しているが、毛管上昇水が排水トンネルを迂回してセンサーNo.6 の方から浸透したことが原因である。CaseP2 では体積含水率は全く上昇しなかった。粗粒で構成する排水トンネルと CB 層で毛管上昇水を遮断することができる。

結語

低透水性土壌でリーチングを行う場合、鉛直排水トンネルと CB 層の粗粒領域が降下浸透水を収集し、排水の促進に有効であるということが明らかになった。また、防塩効果において、鉛直排水トンネルと CB 層の併設使用は毛管水と塩の上層への移動をほぼ完全に遮断することが示された。鉛直排水トンネル単独使用では直接的な毛管上昇は阻止されるが、トンネルのない部分で毛管上昇が発生するため、十分に時間が経過すると塩も上昇してくることが示唆された。

(4) 結論

本研究では、様々な土壌に適用可能な除塩・防塩法の開発を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

高透水性土壌においてキャピラリーバリアの使用はリーチングに影響を及ぼさず、表層の保水力を強化する。また、下層からの毛管上昇を阻害する。

低透水性土壌においてはキャピラリーバリアの使用は表層を全層的に過湿状態にする可能性がある。

低透水性土壌において部分的な粗粒領域(鉛直排水トンネル)の単独使用は浸透速度をやや大きくするが、迂回流の発生により効果が発現しない場合もある。

低透水性土壌においてはキャピラリーバリアによって降下浸透水を捕捉し、鉛直排水トンネルに誘導することで効率的な排水が可能となる。

鉛直排水トンネルとキャピラリーバリアの併設使用は下層からの毛管上昇をほぼ完全に遮断する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

井上光弘, 齊藤忠臣, 猪迫耕二, 藤巻晴行,

高塩分濃度の砂に対する WET マルチセンサーの測定精度の評価, 日本砂丘学会誌, 査読有, 63(1), 1-10, 2016(6)

猪迫耕二, 齊藤忠臣, 西中董, 藤巻晴行, 粗粒層の毛管障壁機能が作土層の水分と塩分の移動に与える影響, 応用水文, 査読有, 27, 1-7, 2015(3)

[学会発表](計 5 件)

猪迫耕二, 阿部晴奈, 齊藤忠臣, 低透水性土壌におけるリーチング水の浸透促進法の開発, 第 61 回日本砂丘学会全国大会研究発表・シンポジウム要旨集, 13-14, 青森県弘前大学, 2015(8月)

猪迫耕二, 齊藤忠臣, 藤巻晴行, 低透水性土壌に適したリーチング法の開発, 鳥取大学乾燥地研究センター共同研究発表会(鳥取県鳥取市), 2014年12月6~7日

猪迫耕二, 齊藤忠臣, 西中董, 藤巻晴行, 粗粒層の毛管障壁機能が作土層の水分と塩分の移動に与える影響, 農業農村工学会水文水環境部会シンポジウム, 東京農工大学(東京都府中市), 2014年11月18~19日

Inosako, K. and T. SAITO, Salt and water movement after leaching in salt-accumulated soil under the condition of existence of a coarse textured layer, International Conference of Desert Technology 11, San Antonio(USA), 2013年11月19~22日

猪迫耕二, 西中董, 齊藤忠臣, 井上光弘, 藤巻晴行, 粗粒層を有する塩析出土壌におけるリーチング前後の水分・塩分移動, 日本砂丘学会第 59 回全国大会研究発表・シンポジウム要旨集, 5-6, 日本砂丘学会第 59 回全国大会, 東京工業大学キャンパス・イノベーションセンター(東京都港区), 2013年7月4, 5日

6. 研究組織

(1)研究代表者

猪迫 耕二 (INOSAKO KOJI)

鳥取大学・農学部・教授

研究者番号: 60243383