

表層吸引溶脱法による地表面からの塩分の除去

Removal of salts from soil surface by a surface suction leaching method

猪迫 耕二*・犬持 智**・齊藤 忠臣*・竹下尚志***

*鳥取大学農学部（〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101）

**鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科（〒680-8550 鳥取市湖山町南 4-101）

***倉敷市役所水道局（〒710-8565 倉敷市西中新田 640）

INOSAKO Koji*, INUMOCHI Satoru**, SAITO Tadaomi*, TAKESHITA Naoyuki***

*Faculty of Agriculture, Tottori University (4-101 Koyama-cho Minami, Tottori, 680-8553)

**Graduate School of Sustainability Science, Tottori University (4-101 Koyama-chi Minami, Tottori, 680-8550)

***Kurashiki City Water Works Bureau (640, Nishinakashinden, Kurashiki, 710-8565)

(Received 4 December 2020, Accepted 22 February 2021)

Abstract

Salts sometimes accumulate in spot states in soil surface layers. Authors developed the Surface Suction Leaching Method (SSLM) to remove salts from such a salt accumulation spot. An instrument for SSLM consisted of three parts, water supply, drainage and insert parts. The water supply part had a storage tank for leaching water and a flowing pump. The drainage part had a vacuum pump and a collection tank for soil water. The insert part was a disc-shaped container with a stainless guide for inserting into soil, a glass filter, and an inlet/outlet pipe with a bidirectional cock. It was directly inserted into a salt accumulated zone on soil surface. Through the cock, the inlet/outlet pipe was connected with the water supply and drainage parts, respectively. An operator could select the stages of water supply for leaching and collection of soil water for removal of salts by changing the cock. In this study, the method was applied into a sandy loam soil column with an artificial salt accumulated soil layer with 15 dS/m. As results, the concentration in the salt accumulated layer was reduced by 45.5% and it could collect 89.1 % of leaching water from the soil layer. Moreover, a soil water and solute transport model was used for assessing the performance of SSLM. Although the trend of salt diffusion in soil in SSML estimated by the model was different from the soil column experiments, it could qualitatively reproduce the collection of leaching water from soil by SSML.

Key words: salt accumulation, arid region, soil column, simulation model, water-saving leaching method

要 旨

本研究では、土壌表面に発生した局所的な集積塩に少量の水を供給し、塩を溶解させた後に地表面より塩水を吸引除去する表層吸引溶脱法を新たに提案した。ここでは、砂質壤土を供試土壌とした土壌カラム実験を行い、本法の除塩性能を評価した。また、不飽和土壌中の水分・溶質輸送の数値モデルである HYDRUS 2D/3D を用いた本法の性能評価を試みた。その結果、表層吸引溶脱法は土壌に供給した除塩用水の 89.1% を回収し、塩類集積層の塩濃度を 45.5% 低減させた。さらに、数値モデルによる除塩実験の再現において、除塩用水の回収については定性的に妥当な結果が得られたが、塩の回収過程の再現には課題が残り、数値モデルによる性能評価にはさらに検討が必要であることが示された。

キーワード: 塩類集積, 乾燥地, 土壌カラム, シミュレーションモデル, 節水型リーチング法

1. はじめに

現在、世界の土地面積の 12% に当たる 16 億 ha が農作物の栽培に利用されている。このうちの 20% にあたる 3 億 ha で灌漑農業が営まれており、総作物生産量の 40% を賅っている (FAO, 2011)。世界の食料供給に重要な役割を果たしている灌漑農地において塩類化の進行は大きな問題となっており、その総面積の 25% で何らかの塩害の影響が生じているという推計もある (北村, 2016)。

乾燥地／半乾燥地における持続可能な農業にとって、農地の除塩は極めて重要な課題であり、すでにいくつかの方法が実用化されている。十分な水が確保できる地域では、リーチング法、フラッシング法、クリーニングクロープ法が主な除塩法として利用されている (Qadir et al., 2000)。この中で、リーチング法は既存の灌漑設備を利用できることから最も広く普及している方法と言える。しかし、十分な排水能が確保されていない農地に適用した場合、下層に移動させた塩が排除されずに土壤中に滞留し、栽培期間末期には土壌表面に再集積するといった問題が報告されている (Yamamoto, 2009)。また、水資源が乏しい地域では集積塩を作土とともに剥ぎ取る表面剥離法が用いられている (井上, 2012)。本法は除塩用水を一切必要としないが、剥ぎ取った塩を多量に含んだ土壌を保管する場所が必要になる。さらに、作土を取り除くため健全土壌の客土が必要になるといった問題もある。このように、あらゆる場面に適用できる万能な除塩法は未だ確立されていない。

ところで、塩類集積は常に農地全面に発生するわけではない。猪迫と大原 (2004) はタンザニアの塩害水田でスポット状に発生した塩類集積によってイネの栽培が阻害されている事例を報告している。このような局所的に集積した塩を取り除くには、従来のリーチング法などのように農地全体を処理対象とするよりも塩の集積部に直接働きかける方が水資源の有効利用の観点から合理的といえる。安倍ら (2000) が提案したディハイドレーション法は、あらかじめ灌水した塩類集積部に薄いシートを敷き、シートに塩水を吸引させて塩分を取り除く方法であり、このような局所的な塩類集積への適用が可能と思われる。本法は蒸発力によって塩水が土壌からシート内に上昇移動することを前提としており、土壌面蒸発に強く依存していることから受け身的な除塩方法といえる。

本研究では、局所的に顕在化した集積塩をより能動的に除去する表層吸引溶脱法を開発した。本法は、土壌の表層付近に少量の水を供給して集積塩を溶解させ、そのまま表層から吸引除去するため、水資源の乏しい乾燥地などにも適用可能な節水的な除塩法である。ここでは本システムを詳細に説明するとともに、土壌カラムを用いた室内実験による除塩性能の評価を行った。また、本法の性能評価手法として数値モデルの適用の可否について検討を加えた。

2. 表層吸引溶脱法の概要

表層吸引溶脱法は、「地表面の局所的な塩集積部に直ちに重力排水されない程度に少量の水を直接供給した場合、供給された水は表層塩を溶解しつつ、地表面付近の間隙中に保持される。この間隙中の塩水が下層に浸透する前に地表面から吸引すれば土壌から集積した塩を排除できる。」という考え方にに基づき、この一連の操作を繰り返すことで、土壌表層の塩濃度を所定のレベルまで低減させる方法である。局所的な塩害が問題となっている地点を直接修復できること、回収した水を除塩に再利用することも可能であることから、従来法の通常のリーチング法に比べ節水的な除塩法といえる。

本法で用いる装置の概要を Fig.1 に示した。本装置は土壌の塩集積部に挿入される挿入部

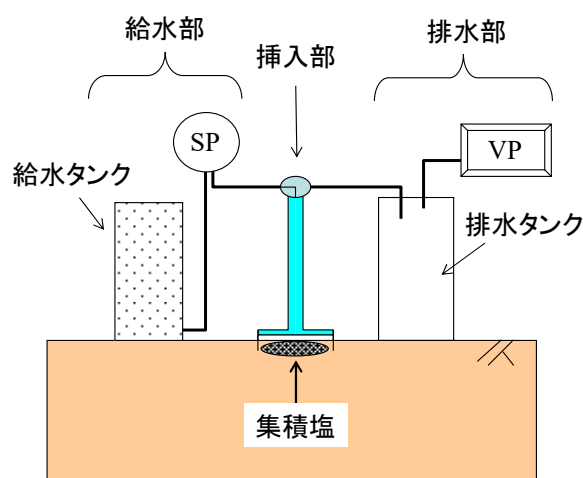


Fig.1 表層吸引溶脱装置の概要
SP：送水ポンプ、VP：吸引ポンプ

とそれに接続される給水部ならびに排水部で構成される。給水部では送水ポンプを使用して、給水タンクから挿入部へリーチング用水が送られる。挿入部は排水タンクを経て吸引ポンプにも繋がっており、二方コックで切り替え可能となっている。排水部では、吸引ポンプによって所定の値まで排水タンクを減圧し、土壌表層と排水タンク中の圧力差によって土壌中の塩水を吸引する。吸引された塩水は排水タンクに貯留される。

Fig.2 に挿入部の模式図を示す。挿入部の下部には土壌深さ 1 cm まで挿入できるようにステンレス製のガイドを取り付けており、図のように厚さ 5 mm のガラスフィルター（透水係数 $6.7 \times 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$ ）をはめ込んでいる。給水と吸引の切り替えは、装置上部の二方コックを用いて、任意に手動で行う。

本法では、**Fig.3** に示した手順に従って除塩を行う。①土壌表面の塩類集積部直上に挿入部を差し込む、②給水タンクからリーチング用水を送水ポンプで送りこみ、挿入部のガラス

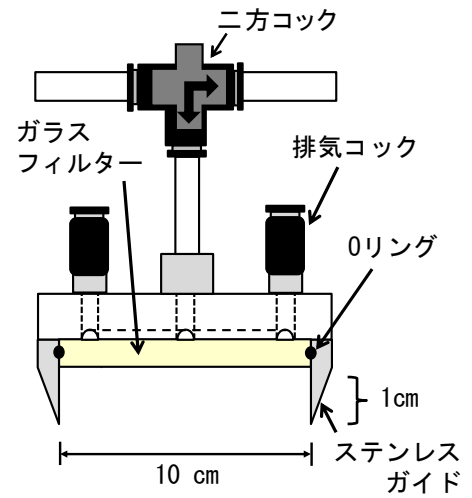


Fig.2 挿入部の模式図

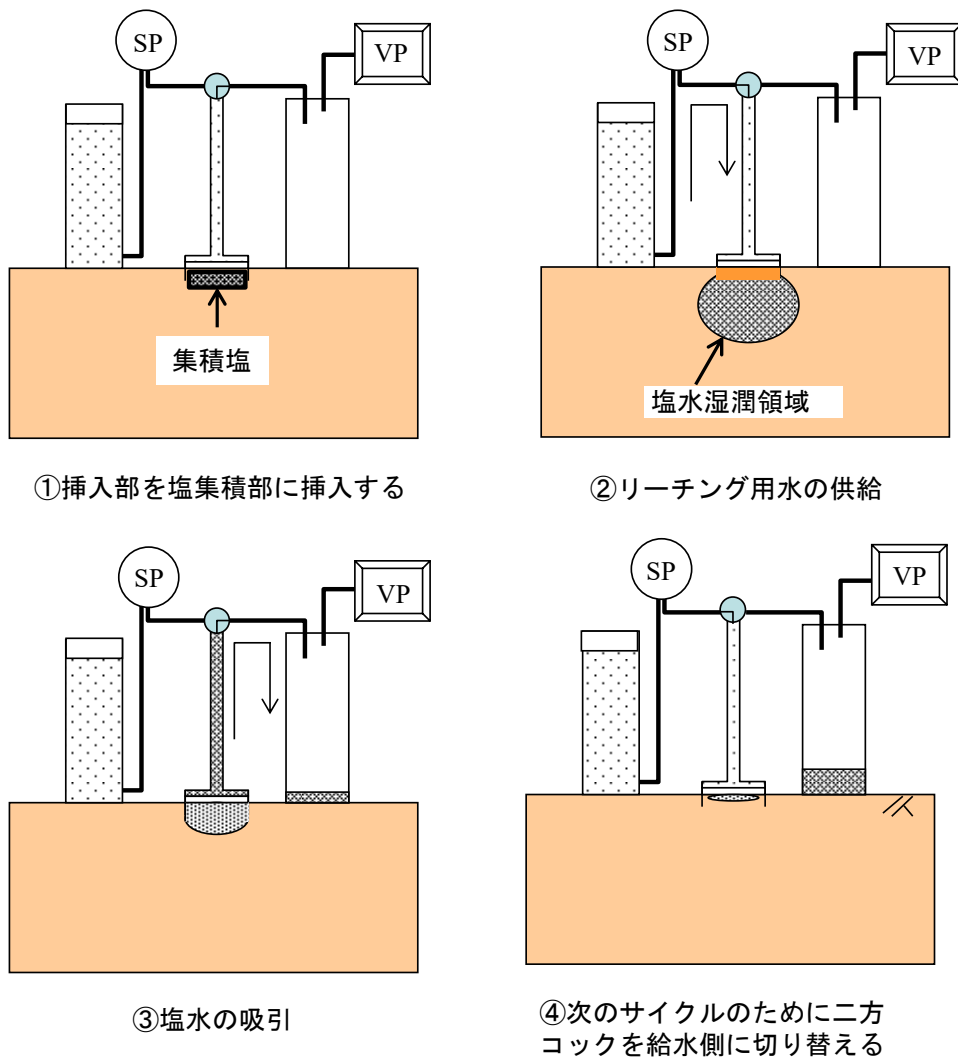


Fig.3 表層吸引溶脱装置の操作手順

フィルターを介して土壤に浸潤させ、土壤表層の塩を溶解させる、③挿入部の二方コックを排水部側に切り替え、吸引ポンプで土壤中の塩水を吸引する。④次のステップに入るために、二方コックを送水側に切り替える。②～④を1サイクル（除塩サイクル）として、土壤の塩濃度が所定の値に到達するまで除塩サイクルを繰り返す。

3. 実験方法

3.1 土壤カラムによる除塩実験

本法の性能を評価するために土壤カラムによる除塩実験を行った。Fig.4 に実験システムの概要を示す。挿入部は土壤カラムの地表面に設置した人工的に調整した塩類集積層に挿入した。給水過程では、給水タンク中のリーチング用水が挿入部を介して一定時間土壤に供給された。次いで、二方コックを排水タンク側に切り替えて排水過程に移行した。排水タンクは電子天秤に静置し、重量測定から排水量を求めた。本実験での表層吸引溶脱装置の運転条件は、送水フラックス $1.3 \times 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$ 、給水時間 10 秒、吸引時間 110 秒とした。これらの組合せは試行錯誤的に決定した。なお、吸引時の排水タンク内の圧力水頭は約-800cm であった。

Fig.5 に実験で使用した土壤カラムの概要を示す。土壤カラムは直径 15 cm、高さ 50 cm で底部には透水係数 $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ のセラミックフィルターを敷き、排水のために下端に-27cm の圧力水頭をかけた。

塩水の下層浸透が発生しているか否かを確認するために、体積含水率と電気伝導度の測定を深さ 5, 15, 25, 35, 45 cm で行った。体積含水率の測定には TDR センサー (MiniTDR-R-L6, CSI 製) を用い、バルク電気伝導度 (EC_b) の測定には 4 極 EC センサー (サンケイ理化製) を用いた。土壤カラムは、あらかじめ自然排水させた供試土壤の上に厚さ 2cm の人工塩類集積層を充填した。乾燥密度は 1.36 g cm^{-3} である。人工塩類集積層は飽和抽出法による電気伝導度 (EC_e) で 15 dS m^{-1} となるように供試土壤を NaCl 溶液と混合して調節した。なお、本実験の供試土壤は砂質壤土 (真砂土) である。リーチング用水には電気伝導度 (EC_w) 0.085 dS m^{-1} の水道水を使用し、その供給量は 400 cm^3 とした。実験終了時に土壤を深さ 1cm ずつ採取して EC_e の鉛直分布を測定した。また、比較のために同量の水道水を用いて従来

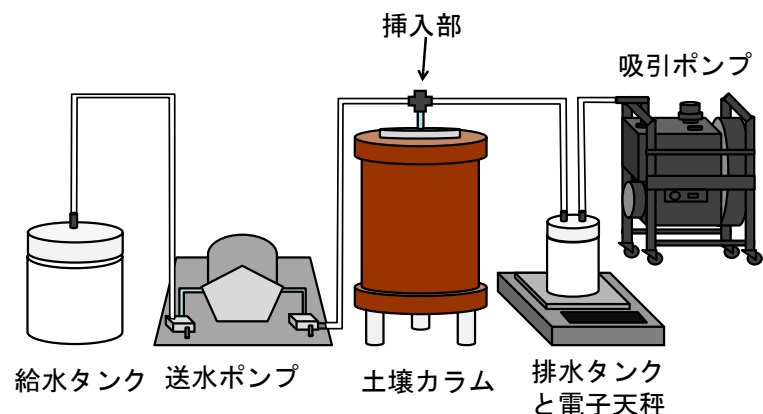


Fig.4 除塩実験システムの模式図

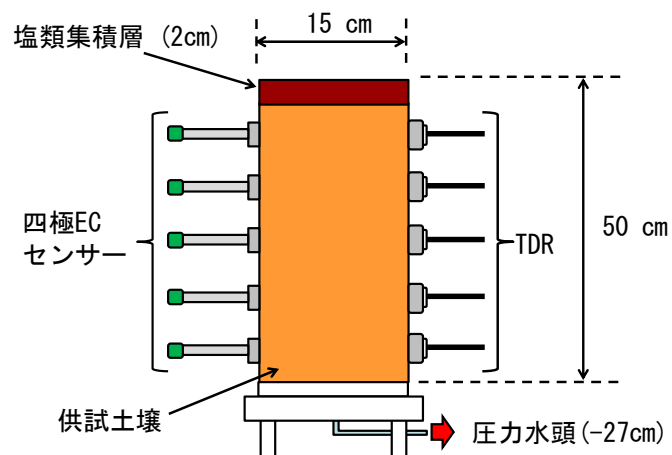


Fig.5 土壤カラム実験装置の模式図

法によるリーチング試験も行った。リーチング試験ではビーカーを用いて所定の水量を地表面に均等に散布した。リーチング試験における測定は下層のセンサーの値が一定になるまで続けた。

3.2 数値実験

表層吸引溶脱法では給水時間と吸引時間の組合せ、給水フラックスや吸引圧の設定など除塩効果を最大化する運転条件を決定するために多くの要因を決定しなければならない。土壌カラム実験や圃場実験でこれらの条件を最適化するには多大な労力と時間を要する。このような場合にはシミュレーションモデルによる数値実験が適している。ここでは、土壌中の水分・溶質移動をシミュレートできる HYDRUS 2D/3D (Šimůnek et al., 2012) を用いて土壌カラムにおける除塩実験の再現を試み、数値モデルによる表層吸引溶脱法の性能評価の可否について検討を加えた。

本モデルにおける水分移動は Richards の式に基づいており次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K \cdot (\nabla h + 1)] \quad (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率, h : 圧力水頭, K : 透水係数テンソル, t : 時間である。土壌の水理特性モデルには van-Genuchten - Mualem モデル (van Genuchten, 1980) を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^{\frac{1}{m}} \right]^2 \quad (3)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度, θ_s, θ_r : 飽和体積含水率, 残留水分率, α, n, m : 実験定数, ただし, $m = 1 - 1/n$, K_s : 飽和透水係数, l : 間隙結合係数である。

溶質移動では次式に示した移流分散方程式が用いられている。

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta D \cdot \nabla C - qC] \quad (4)$$

ここで、 C : 溶液濃度, q : フラックス, D : 分散係数テンソルである。なお、分散係数は分子拡散係数と水理学的分散係数の和であるが、ここでは分子拡散係数は水理学的分散係数に比して小さいため無視できるとした (Hanson et al., 2006)。

計算領域は Fig.6 に示したとおり、土壌カラムを模擬した円筒領域における2次元断面とした。挿入部は地表面にガラスフィルターが接しているものとし、ステンレスガイドが土壌深さ1cmまで挿入されているとした。

HYDRUS 2D/3D では、上部境界条件をフラックス条件と圧力条件に連続的に切り替える設定ができない。そこで、ここでは上部境界条件として、ガラスフィルターが接する地表面のみを変動圧力条件とし、給水時に土壌カラム実験と同程度の送水フラックスを与える条件として2cmの圧力水頭を与え、吸引時には-800cm

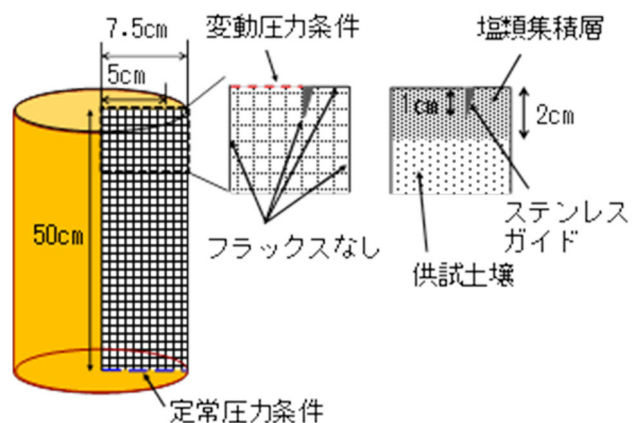


Fig.6 数値実験における計算領域と境界条件

の圧力水頭を与えた。それ以外の上部境界はフラックスなしとした。また、ステンレスガイド表面、ならびに、土壌カラム側面もフラックスなしの条件とした。下部境界条件として土壌カラム下端に-27cmの定常圧力水頭を与えた。水分分布の初期条件として、塩類集積層は-500cmで均一の圧力水頭を与え、それより深い部分の土壌は、均質な湿潤状態(-10cm)から6時間自然排水させた後の圧力水頭分布を与えた。溶質濃度分布の初期値として、塩類集積層は $9.82 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ とし、それ以外の土層には水道水のそれ($5.50 \times 10^{-5} \text{ g cm}^{-3}$)を与えた、なお、数値モデルにおける溶質濃度の単位は g cm^{-3} とし、初期値はInosako et al.(2019)を参考に電気伝導度の値から換算した。

Table1 に計算に用いた土壌のモデルパラメータをまとめた。なお、分散長はHYDRUS 2D/3Dの初期設定値およびSiyal et al. (2013)を参照して決定した。

Table1 土壌水理・溶質移動パラメータ

乾燥密度 (g cm^{-3})	飽和透水係数 (cm s^{-1})	θ_s	θ_r	α (cm^{-1})	n	l	D_L (cm)	D_T (cm)
1.36	2.89×10^{-4}	0.312	0.0266	0.0258	1.31	0.5	0.5	0.05

D_L : 輸送方向の分散長, D_T : 横方向の分散長

4. 実験結果と考察

4.1 土壌カラム実験

Fig.7 に体積含水率と土壌水の電気伝導度の経時変化を示した。なお、深さ45cmは欠測のため示していない。測定値がやや振動しているものの、体積含水率も土壌水の電気伝導度もすべての深度においてほぼ一定の値を保っており、表層吸引溶脱法による表層からの給水および吸引の影響は現れなかった。このことから、本実験の運転条件では深さ5cmより下層への塩水の溶脱は発生しなかったといえる。

実験終了時の総回収水量は 356.4 cm^3 であり、これは総給水量の89.1%に相当している。なお、本法では、1サイクルの吸引を行うと、塩水に続いて空気も吸引された。挿入部に混入した空気は、次の送水時に排気コックから排除されるが、この空気に置き換わる水量も総給水量に組み込まれている。また、

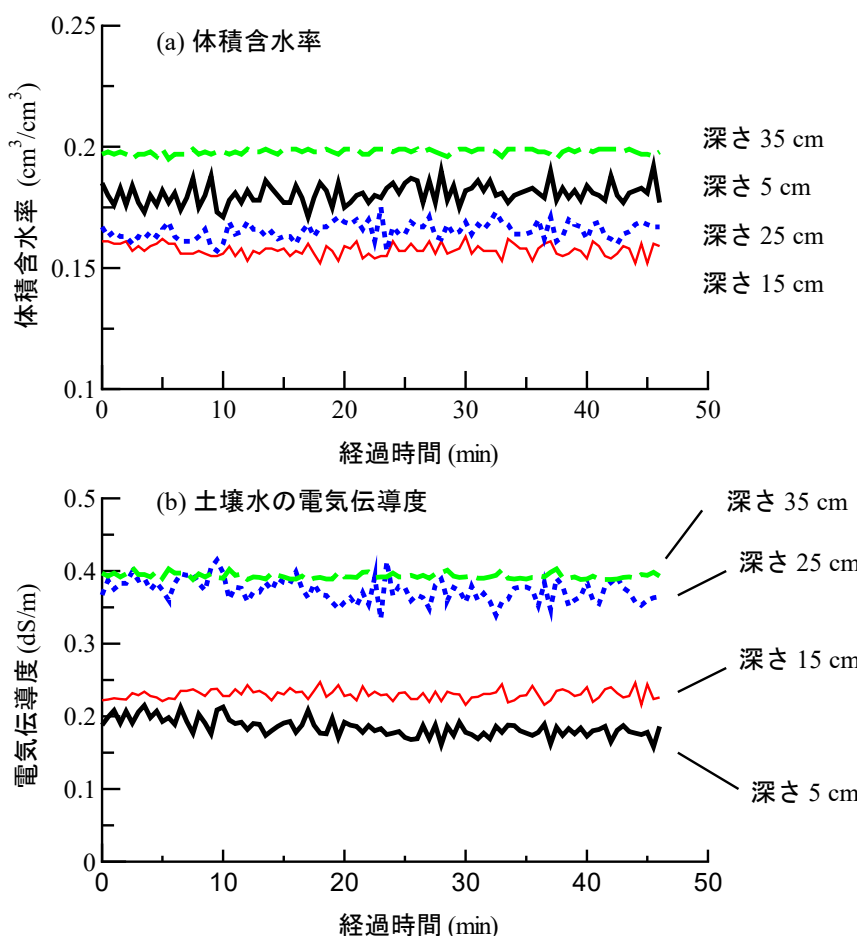


Fig.7 表層吸引溶脱法の体積含水率と土壌水の電気伝導度の経時変化

また、

回収時には挿入部内の水も回収されている。したがって、実際に土壌に出入りした水量は、ここに示した総給水量と総回収水量よりもやや少ない。

積算回収水量の経時変化を **Fig.8** に示す。図に示した通り、積算回収水量は時間の経過とともに階段状に増加した。本実験での1サイクルの内訳は前述のとおり、10秒給水、110秒吸引であった。給水過程では二方コックは給水部側に接続されているため、吸引は行われない。したがって、積算回収水量の時間変化において1サイクルに最小10秒間は回収水量が増加しない時間帯が発生する。そのため、増加曲線は階段状となるが、図より明らかに増加する時間よりも一定値に近い時間の方が長い。そこで、最初の2サイクルの積算回収量(破線枠内)を拡大して **Fig.8** 内に表記した。この拡大図の時間の単位は秒としている。図より、二方コックが排水部に接続されると10秒程度で 10.9 cm^3 の塩水が回収されていた。その後の回収水量は100秒で 2.8 cm^3 増加しており、全体の約80%が最初の10秒間で回収された。この傾向は運転終了時まで継続した。このことから、吸引時間をより短く設定するなど、

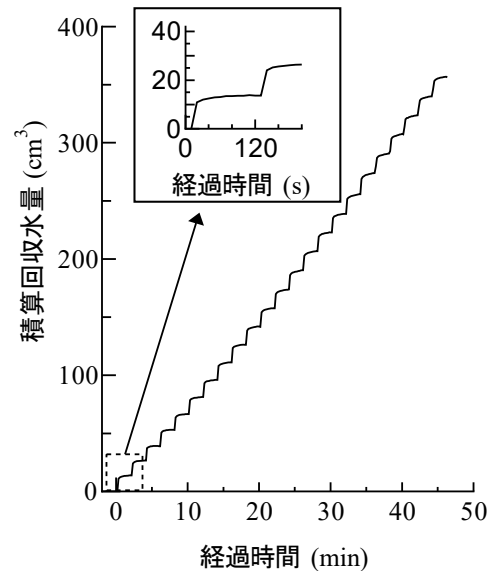


Fig.8 積算回収水量の経時変化

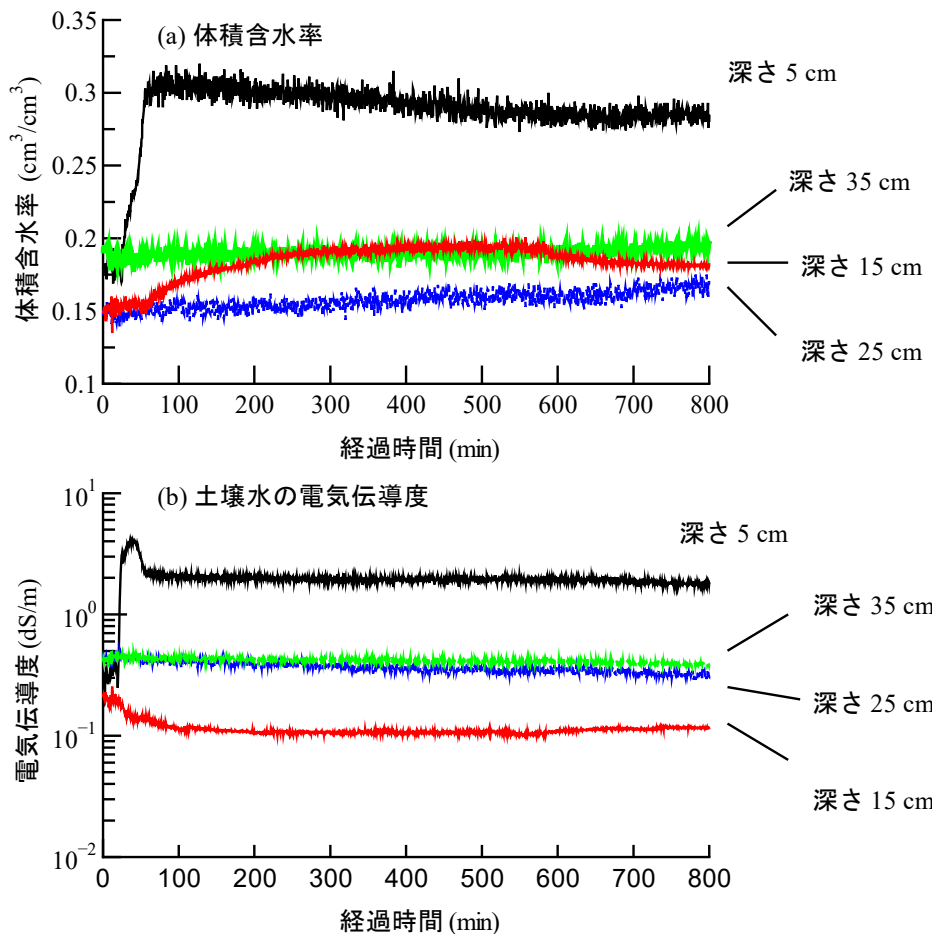


Fig.9 従来法のリーチング試験による体積含水率と土壌水の電気伝導度の経時変化

送水時間と排水時間を最適に組み合わせることでより効率的な除塩が可能になると思われる。なお、挿入部内の残留水量は約 1.8 cm^3 であった。

Fig.9 に比較のために行ったリーチング試験の測定結果を示す。リーチング試験では 800 分まで測定を継続させた。体積含水率をみると、5 cm 深さではリーチング後 30 分程度で明確に上昇し始め、56 分後には飽和状態近傍に達した。その後緩やかに減少したが、湿潤な状態は維持された。15 cm 深さにおいても 60 分経過後から緩やかに上昇した。25 cm 深さではわずかに増加する傾向がみられるが、35 cm 深さではほぼ一定であった。また、土壌カラム末端からの排水も確認されなかった。すなわち、今回のリーチング用水量では下層深くまで浸透しなかったといえる。一方、 EC_w は 5 cm 深さで最大 4 dS m^{-1} まで上昇し、その後は 2 dS m^{-1} で安定した。表層の集積塩が溶解して降下浸透したのは明らかであり、除塩効果が認められる。しかし、15 cm 以深では EC_w の増加傾向は認められず、従来法によるリーチングで下層深くに表層塩を除塩させるには今回の水量は不十分であったと考えられる。

表層吸引溶脱法による除塩実験および従来法によるリーチング試験の後にカラム内の土壌をサンプリングして求めた土壌水の EC_e の値を Fig.10 に示した。表層吸引溶脱法は、深さ 1 cm で 1.67 dS m^{-1} 、深さ 2 cm で 14.9 dS m^{-1} 、深さ 3, 4, 5 cm でそれぞれ $1.47, 0.81, 0.81 \text{ dS m}^{-1}$ 、6 cm 以深は 0.47 dS m^{-1} であった。初期値は 1, 2 cm で 15.2 dS m^{-1} 、3 cm 以深で 0.84 dS m^{-1} であったことから厚さ 1 cm の表層で顕著な除塩が認められた。また、2 cm 以深に EC_e の上昇がほとんど認められないことから表層吸引溶脱法の除塩効果は深さ 1 cm にとどまったものの、その範囲内では確実に土壌から塩を除去したといえる。 EC_e の低減率を次式で定義すると、表層吸引溶脱法による塩の低減率は表層 1 cm であれば 89% となるが、塩類集積層全体では 45.5% にとどまった。

$$R = \frac{\sigma_i - \sigma_e}{\sigma_i} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 σ_i , σ_e : EC_e の初期値および実験終了時の測定値である。

一方、従来のリーチング法は表層 1, 2 cm の EC_e をそれぞれ $1.97, 2.02 \text{ dS m}^{-1}$ と低下させており、表層 1 cm の低減率で 87.2%、塩類集積層全体でも 86.9% に達した。しかし、Fig.10 に示したように深さ 15 cm まで全層的に EC_e が増加していたことから、 400 cm^3 のリーチング用水量では表層の塩を比較的浅い下層に分布させたに過ぎないといえる。

4.2 数値モデルによる表層吸引溶脱法の除塩性能の評価

Fig.11 に変動圧力境界における積算回収水量と積算給水量の時間変化を示す。図に示した通り、Fig.8 同様、積算回収水量は階段状に増加する傾向を示した。また、1 サイクルにおける総回収水量が 5.7 cm^3 であるのに対し、最初の 10 秒間で 58% に相当する 3.3 cm^3 を回収した。1 サイクルの 80% を超過するのに必要な時間は 23 秒であった。25 サイクル 50 分間の総回収水量は 171 cm^3 となった。これは土壌カラム実験の 48% に過ぎず、かなり小さい。一方で、給水は 10 秒間行われ、次のステップまで 110 秒停止するため、積算給水量も積算回収水量と同様に階段状の形状を呈する。総給水量は 190.8 cm^3 であり、総回収水量同様土壌カラム実験の 48% 程度であった。リーチング用水の回収率は 89.6% に達しており、土

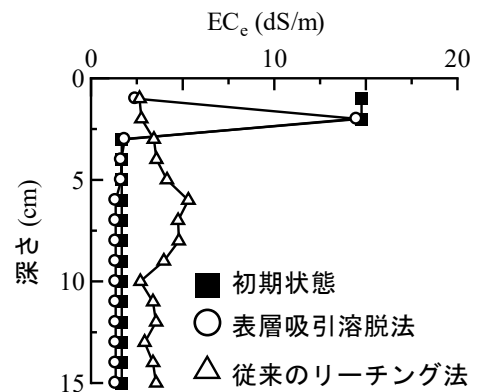


Fig.10 土壌水の電気伝導度の鉛直分布

壤カラム実験とほぼ同程度となった。すなわち、給水量の過小評価が回収水量の過小評価につながっており、リーチング用水の回収については定性的には土壌カラム実験を再現できているといえる。給水量の過小評価の原因の一つは上部境界の給水フラックスを定量的に再現できていない点にあると思われる。

Fig.12 に積算回収塩量の時間変化を示す。積算回収水量が階段状を呈しながらも増加率はほぼ一定の線形的な上昇傾向を示すのに対し、積算回収塩量は時間の経過とともに増加率は低下していく。これは、サイクルが増す毎に回収できる塩量が低下していることを意味している。そのため、回収可能な塩量の80%は全除塩時間の60%に当たる除塩開始30分で達成された。

Fig.13 に挿入部直下の塩濃度プロファイルと除塩サイクル数との関係を示した。1サイクル目で除塩効果が主に認められるのは表層1 cmであるが、深さ2 cm付近では一部の塩が下層に分散している。これは、塩類集積層とその下の土層との間に初期水分状態の相違があり、それによる土壌水と塩の輸送が生じたためと思われる。その後、除塩サイクルを重ねることによって、最終的には挿入部直下では塩類集積層全体で除塩が進行した。初期状態での表層2 cmの含有塩量は0.216 gであり、25サイクル後の表層2 cmの含有塩量は0.0823 gであった。表層吸引溶脱装置によって回収された塩量は0.118 gであったことから、挿入部直下の塩類集積層から8%程度が下層あるいは側方へ輸送されたと考えられる。表層吸引溶脱装置の塩の低減率を表層2 cmで考えると54.1%となった。これは土壌カラム実験よりやや大きい。この違いは、土壌カラム実験の除塩効果が表層1 cmにとどまったのに対し、数値実験では2 cmまで塩濃度が低下したことによる。表層2 cmにおける塩濃度分布の相違から、今回の数値実験では表層吸引溶脱装置における塩の挙動を十分な精度で再現できたとは言いがたい。

以上の結果から、HYDRUS 2D/3Dによる表層吸引溶脱法の除塩過程の評価において、リーチング用水の回収に関しては土壌カラム実験を定性的に再現できており、性能評価に適用可能と思われる。数値実験によって表層吸引溶脱法で生じると想定される塩回収の特性が把握できたと思われるが、表層の塩の挙動については十分な精度で再現できたとは言えなかつ

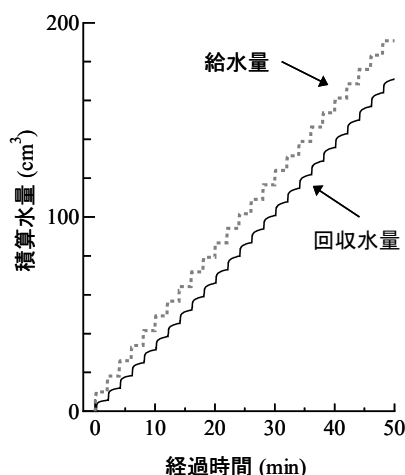


Fig.11 数値実験における積算回収水量の経時変化

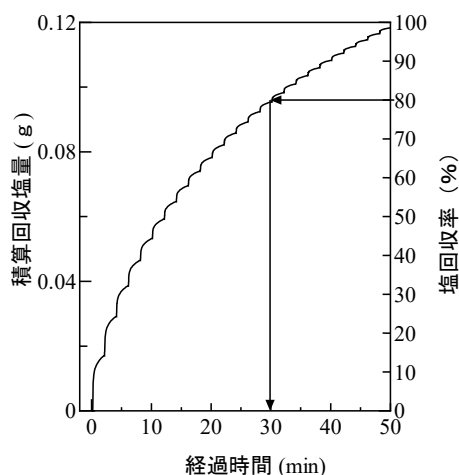


Fig.12 数値実験における積算回収塩量の経時変化

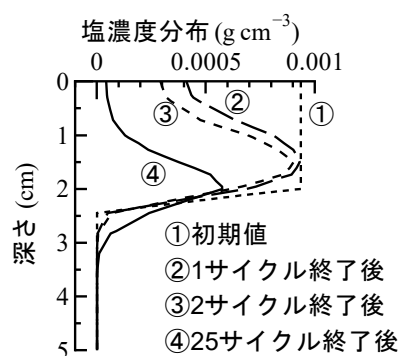


Fig.13 塩濃度分布とサイクル数の関係

た。今回は溶質移動パラメータについてはほぼモデルの初期値を用いており、塩の輸送に影響の大きい分散長の決定などを詳細に検討する必要があると思われる。

5. おわりに

本研究では、局所的な集積塩を節水的に取り除く新しい除塩方法として表層吸引溶脱法を提案し、その除塩性能を土壌カラム実験で評価した。また、数値モデルによる性能評価の可能性を検討した。その結果、土壌カラム実験からは、土壌に供給された送水量の 89.1% が回収され、損失率は 10.9% であった。一方で、表層の除塩はごく表面でのみ効果が認められ、塩類集積層全体の塩濃度の低減率は 45.5% にとどまった。本法の特徴である、土壌水の表層からの吸引では、1 サイクルの吸引開始の最初の 10 秒（吸引設定時間の 10%）で 1 サイクルの 80% に相当する土壌水が回収されており、1 回の吸引時間を削減しうることが示唆された。除塩効率を高めるために運転条件の再検討を行う必要があるといえる。

また、HYDRUS 2D/3D を用いて土壌カラム実験の再現を試み、本法の性能評価への数値モデルの適用について検討した。その結果、リーチング用水の回収については定性的には十分妥当な結果が得られたが表層塩分の除去傾向については十分な精度での土壌カラム実験の再現はできなかった。今後、溶質移動パラメータや境界条件の設定等に検討が必要であることが明らかとなった。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究助成金 基盤研究 (C) および鳥取大学国際乾燥地科学研究教育機構の補助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 安倍征雄・仲谷知世・桑畑健也・横田誠司 (2000) : 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, 沙漠研究, 10-2, pp.147-156.
- FAO (2011): The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing system of risk, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, 21p.
- Hanson B. R., Šimůnek J. and Hopmans J. W. (2006): Evaluation of urea-ammonium fertigation with drip irrigation using numerical modeling, *Agric. Water Manage.*, 86, pp.102-113.
- 猪迫耕二・大原克之 (2004) : タンザニア共和国モンボ地区における塩害発生水田の除塩について, 平成 16 年度農業土木学会大会講演会講演要旨, pp.502-503.
- Inosako K., Saito T., and Omachi K. (2019): Analysis by numerical experiments of desalinization of a salt-affected paddy field using a rice husk underdrainage system, *Paddy and Water Environment*, 17(2), pp.211-219.
- 井上光弘 (2012) : 塩類化の現状と除塩技術, 地盤工学会誌, 60-1, pp.12-15.
- 北村義信 (2016): 乾燥地の水をめぐる知識とノウハウ 食料・農業・環境を守る水利用・水管理学, 技報堂出版, 東京, 173p.
- Šimůnek J., van Genuchten M. Th. and Šejna M. (2012): The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three- Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solute in Variably-Saturated Media. Technical Manual Version 2.0, PC Progress, Prague, 246p.
- Siyal A. A., van Genuchten M. Th. and Skaggs T. H. (2013): Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation, *Agric. Water Manage.*, 121, pp.73-80.
- Qadir, A., A. Ghafoor and G. Murtaza. 2000. Amelioration strategies for saline soils: A review. *Land Degrad. Develop.*, 11, pp.501-521.
- van Genuchten, M. TH. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, pp.892-899
- Yamamoto, S. (2009): Study of secondary salinization on irrigation farmland and characteristics of salinized soils. In Sunada K. (ed.), *Study on Asian River Basins*, Japan Science and Technology Agency, Tokyo, III-7p.