

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06291

研究課題名(和文) 表層吸引溶脱法の拡張による節水型除塩技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of water-saving salt removal system by extension of the surface suction leaching method

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実際の圃場への適用を念頭に表層吸引溶脱法を大型化した自走式除塩機の開発を試みた。まず、本法による除塩過程を数値モデルで再現し、最適な運転条件が存在することを数値実験で明らかにした。次いで、大型化した本システムを実装した自走式除塩作業機を、耕耘機を改造して製作した。本作業機には自動制御可能な操作盤を設置し、運転者が一人で除塩作業を完遂できるようにした。最後に、自走式除塩作業機を用いて透水性の異なる2種類の塩類集積土層を調整し、除塩実験を行った。その結果、低透水性土壌においては最大塩回収率65%が得られたが、バラツキが大きく、実用のためには更なる改善が必要であると結論に達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

塩類集積が深刻化した農地を再生する除塩方法は現在存在しない。そのため、塩類集積が容易に深刻化する乾燥地域では、発生の初期段階において対処する必要がある。本研究では、発生初期の部分的な塩害農地を修復する能動的な方法として表層吸引溶脱装置を実装した自走式除塩作業機を開発した。本機による除塩法は塩類集積農地を抜本的に改善するものではないが、発生する度に逐次処理するという新しい対処法を提示したといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to develop a salt removal machine equipped with a larger-scale version of the surface suction leaching device for actual field applications. First, the salt removal process using this method was reproduced by a numerical model, and the existence of optimal operating conditions was clarified by numerical experiments. Next, a salt removal machine equipped with a large-sized surface suction leaching device was fabricated by modifying a cultivator. The machine is equipped with an operation panel that can be automatically controlled so that the operator can complete the salt removal work by himself. Finally, salt removal experiments were conducted using the machine on two types of salt-accumulating soil layers with different permeability. The results showed that a maximum salt removal rate of 65% was achieved in the low permeability soil, but the variation was large and further improvement is needed for practical use.

研究分野：農業農村工学分野

キーワード：除塩 塩類集積 乾燥地 農地修復

1. 研究開始当初の背景

過剰な可溶性塩類を土壤中から取り除く既存の方法として最も普及しているのが溶脱（リーチング）法である。本法は既存の灌漑施設が利用可能という大きな利点があるが、十分な量の水が必要不可欠であり、排水機能が十分に機能している農地でなければ溶解塩が圃場に残留して二次的塩類集積を引き起こす要因となる。乾燥地／半乾燥地における農地の排水は明渠によるのが一般的であるが、北村と矢野（2000）が報告している通り、リーチング後の排水管理の面では機能していない場合が多く、このことが、溶解塩の確実な排除を困難にしている。また、塩類集積の初期段階では塩濃度の高い地点と適正な地点がモザイク状に発現することがあるが、これらの方法では、一筆の圃場を全面的に処理するため、問題の発生していない地点に塩が侵入する危険性もある。

局所的な除塩法には表面剥離法がある。本法では、塩濃度の高い土壌を工学的に剥ぎ取るため、除塩のための水を必要としないため二次的塩類集積は発生しない。しかし、剥ぎ取った塩濃度の高い土壌の保管と処理という大きな問題が残される。さらに、剥ぎ取った土壌の代わりとなる健全な土壌を客土する必要があるためコスト増は避けられない。

表層吸引溶脱法は、「塩類集積は農地の表層土壌において卓越しているため、その部分を湿潤状態にすることで集積塩を溶解させ、下層に浸透する前に地表面から吸引排水する方が節水的でかつ効率的ではないか」という申請者の発想に基づいて開発された。塩類集積を防止する抜本的な対策ではないが、発生する度に逐次処理できる新たな対処法といえる。本法を用いることで、局所的に顕在化した塩類集積を初期段階で少量の除塩用水量で処理することが可能となる。しかし、現状では、装置の運搬、設置、操作は手動で行われるシステム構成となっており、実際の圃場での実用のためには装置の規模の拡大、可搬性の向上、運転制御の精密化といった問題を解決が必要不可欠となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、従来法とは全く異なる新しい除塩法である表層吸引溶脱法を実際の圃場で適用可能にするために、本法に準拠した除塩装置を実装した自走式除塩作業機を開発し、現場圃場への装置の輸送、設置を機械化し、除塩操作を自動化する運転制御プロセスを持つ除塩システムの確立を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、本法を実用化するためにスケールアップした条件下での表層吸引溶脱装置の最適運転条件を土壤中の水分・塩分・熱の移動解析が可能な HYDRUS-2D/3D (Šimůnek et al., 2012) を用いた数値実験によって明らかにした。同時に、圃場規模での利用を念頭においてスケールアップした表層吸引溶脱装置を実装した自走式除塩作業機を、耕耘機を改造して作製した。本作業機には、運転者が一人で除塩作業を完遂できるように自動制御可能なシステムを開発した。最後に、温室内と屋外の透水性の異なる土壌を持つ圃場に人工的な塩類集積土層を作製し、除塩実験を行って試作した自走式除塩作業機の性能評価試験を行った。

4. 研究成果

(1) 表層吸引溶脱装置の大型化

Fig.1 に本法で用いる装置の概要を示した。本装置は土壌への挿入部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。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、コックで切り替え可能となっている。吸引ポンプを使って吸引された水は排水タンクに貯留される。本法の操作手順は、まず、挿入部を土壌表面の塩類集積している部分に差し込む。次に、送水ポンプを作動させ、下層浸透が発生しない程度の量の水を土壌に供給する。そして挿入部のコックを採水部側に切り替えて、吸引ポンプにより土壌内に供給した水を溶解させた塩ともども吸引し採水タンクに貯留する。挿入部のコックを送水ポンプ側に再度切り替える。この一連の作業を1サイクルとして除塩作業を行う。Fig.2 に本システムを自動制

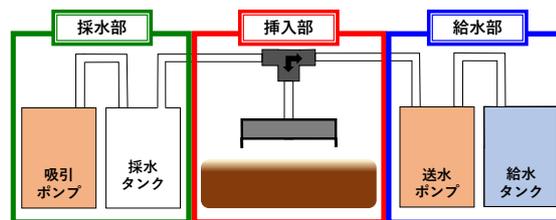


Fig.1 表層吸引溶脱法の概要

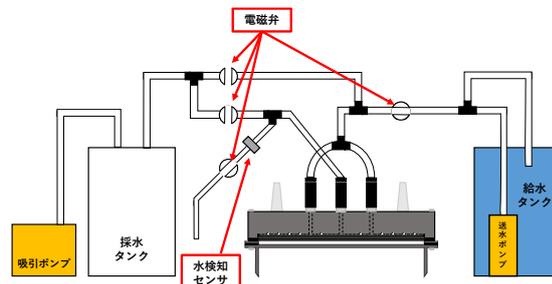


Fig.2 表層吸引溶脱装置の自動化の概念

御可能とする装置の概念図を示した。除塩作業機を作製するに当たり、挿入部への送水と吸引の切り替えは電磁弁と水検知センサを用いて自動化した。

Fig. 3 にスケールアップした表層吸引溶脱装置の土壌挿入部の概要を示す。室内で実施した土壌カラム実験用のパイロット装置では土壌に差し込むガイドが直径 10 cm、高さ 1cm であり、フィルター素材にはガラスフィルターを使っていた。スケールアップした仕様では、土壌挿入部ガイドの直径が 30 cm、高さは 3~5cm とした。ここでは 5cm サイズを使用した。また、フィルター素材としてガラスフィルターを大型化するの技術的に困難であったため、金属フィルターの一つである SUS フィルターを採用した。また、挿入部を土壌に押し込むために挿入部全体を円形の金属壁で囲った。

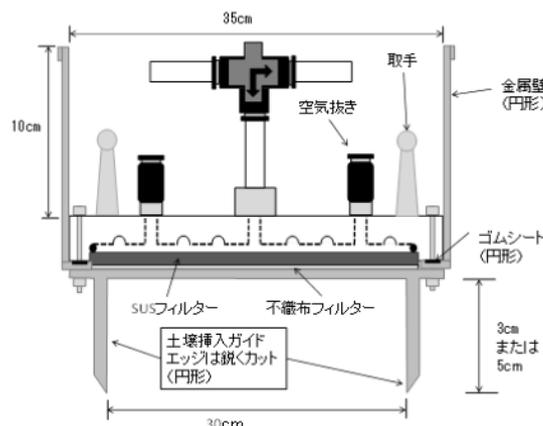


Fig. 3 スケールアップした表層吸引溶脱装置の土壌挿入部の概要

(2) 数値実験による表層吸引溶脱装置の最適運転条件の探索

数値実験ではFig. 3を模した計算領域を設定して、最適運転条件の探索を行った。数値モデルには水分・溶質移動プログラムである HYDRUS2D/3D を用いた。

数値実験の計算領域は Fig. 4 に示した円筒領域とした。大型化した表層吸引溶脱装置の土壌挿入部には前述の通り、直径 30 cm、深さ 5cm の金属ガイドを有している。したがって、除塩作業が実施される時間での水分移動の影響はせいぜい半径 40cm 程度と想定される。また、除塩対象土壌は深さ方向に半無限と考えるべきであるが、下層浸透の範囲もせいぜい 10~20cm 程度と考えられることから、本実験では計算領域の深さを 50cm とした。

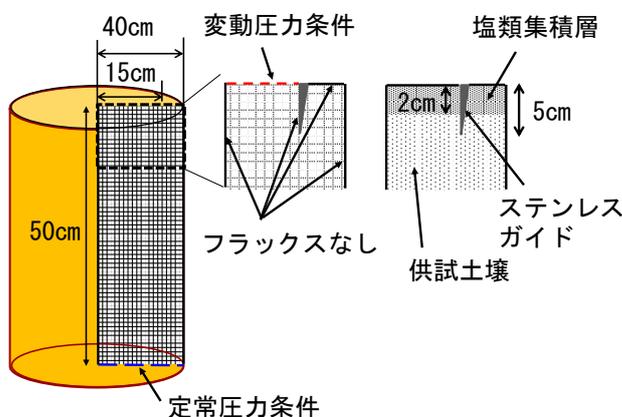


Fig. 4 数値実験における計算領域と境界条件

Table 1 運転条件

条件	給水時間 (秒)	吸引時間 (秒)	
A	Case1	15	60
	Case2	15	180
	Case3	15	300
B	Case4	30	60
	Case5	30	180
	Case6	30	300
C	Case7	60	60
	Case8	60	180
	Case9	60	300
D	Case10	15	600
	Case11	15	1200
	Case12	15	1500

上部境界条件は挿入部領域に時間変動の圧力水頭を与え、給水時は-1 cm、吸引時は-1000 cm とし、給水時間と吸引時間を様々に設定した。下部境界条件は自由排水、それ以外の境界はフラックスなしとした。初期条件の設定の際には、まず予備実験として、領域全体の圧力水頭を-100 cm とし、上部境界を 0.4 cm/d の一定フラックス (地表面蒸発)、下部境界を自由排水としてプログラムを走らせ 180 時間後の水分状態を計算した。その結果を本数値実験の初期条件として取り込んだ。溶質の初期条件として EC で 14.3 dS/m に相当する 9.63×10^{-3} g/cm³ の塩濃度を持つ厚さ 2cm の土層が表層に存在するものとした。それ以外の土層の初期塩分濃度は 0 g/cm³ とした。

実験試料は砂質壤土、土壌水理モデルには修正 van Genuchten-Mualem モデル (Vogel and Cislserova, 1988) を用いた。溶質移動パラメータには HYDRUS2D/3D のデフォルト値を使用した。

実験条件を Table 1 に示す。運転条件の違いによる給水量への影響を明らかにするため、給水時間の異なる条件 A, B, C を設定し、各条件において、吸引時間を 3 通りに変化させた。次に、吸引時間の増加による給水量への影響を明らかにするため条件 D を設定した。実験の終了は、各

条件での積算溶質吸引量が挿入部直下に分布した初期溶質量の80%に到達した時点とした。

実験終了時点でのサイクル数および給水量をTable 2に示す。全ての条件下で吸引時間が大きい条件ほどサイクル数は少なくなり、給水量も小さくなった。条件Bは少ないサイクル数で除塩率80%に到達したが、給水量が条件Aを下回ることはなかった。したがって、より節水的な運転を行うためには給水時間を短く、吸引時間を長くするのが良いと言える。しかし、条件Dでは吸引時間の増加に伴いサイクル数と給水量が増加した。この理由を明らかにするためにCase10とCase12におけるサイクルごとの溶質吸引量をFig. 5に示した。1サイクルの吸引時間が大きいCase12の溶質吸引量は、運転開始から3サイクル目以降でCase10より小さくなった。この時のCase10と12の圧力水頭のプロファイル分布をFig. 6に示す。Fig. 6より、Case12の方がCase10に比べて土壌が全体的に乾燥していたといえる。すなわち、Case12では長時間の吸引を行ったため、初期の溶質吸引量は大きくなったものの、その後の土壌の乾燥をもたらし、1サイクルの溶質吸引量の低下を引き起こしたといえる。その結果、所定の除塩率を得るためにより多くのサイクル数が必要になったと考えられる。

以上のことから、所定の除塩率を得るためには、給水時間と吸引時間の間に最適な組み合わせがあり、本実験の条件では15秒給水、600秒吸引が最適であることが明らかとなった。

Table2 各Caseの実験終了に要したサイクル数と給水量

条件	サイクル数	給水量 (cm ³)	
A	Case1	19	978
	Case2	17	884
	Case3	16	839
B	Case4	17	1441
	Case5	15	1278
	Case6	14	1196
C	Case7	22	3311
	Case8	17	2586
	Case9	16	2445
D	Case10	15	791
	Case11	16	828
	Case12	17	882

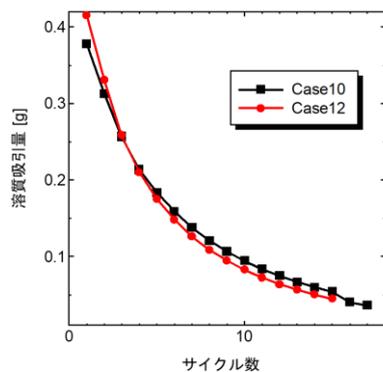


Fig. 5 サイクル数と吸引された溶質量との関係

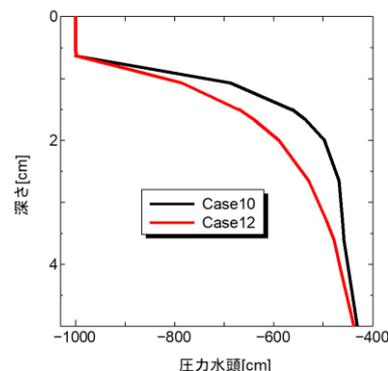


Fig. 6 Case10とCase12における3サイクル目の圧力水頭のプロファイル分布

(3) 自走式除塩作業機の開発

本法の作業効率を高めるために、送水・吸引過程を自動制御可能としたシステム一体型の自走式除塩作業機を開発した (Fig. 7). 挿入部を塩が集積する地表面に差し込むときに亀裂の発生を最小限度に抑えるためにパンタグラフ型のアームに挿入部を接続し、作業機の自重によって所定の深さまで押し込む方式を取り入れた。適用を想定した農地の貫入抵抗から必要な押し込み荷重を1800 Nと推定し、その荷重を得るために作業機自体に錘を載せ重量を増加させた。さらに挿入部を押し込む際の中心軸を後方に移動させて、自重が効率的にアームに伝達し、挿入部を押し込むように車体後部にアウトリガーを設置した。実際の作業においては、Fig. 8に示したように、まずアームを降下させ、次いでアウトリガーを降下させる。その後、アームを伸張させて土壌挿入部を押し込む機構とした。



Fig. 7 自走式除塩作業機

除塩作業中は作業機のエンジンを稼働させて発電し、バッテリーを充電することで送水ポンプおよび給水ポンプ、制御システムの電源を確保した。なお、操縦席にシステムを管理する制御盤を設置し、全ての工程をオペレータが一人で実施可能とした。

(4) 塩類集積圃場での除塩性能評価試験

除塩性能評価は砂質壤土と埴壤土の圃場で実施した。温室内の砂質壤土圃場にECeで8 dS/mとなるように設定した塩土を表層1cmに敷き詰めた。3×3mの区画に60×60cmの小区画を設け、



Fig.8 アウトリガーを用いた挿入部の差し込み手順

小区画毎に除塩実験を行った。除塩作業終了後に挿入部を差し込んだ地点の直下 0～1cm, 1～5cm, 5～10 cmの土壌をサンプリングし、残留している塩量を測定した。除塩率は、回収水の塩濃度から回収塩量を算出した。回収塩量を敷き詰めた塩量で除して算出した。また、深さ 10 cmまでの塩量分布を求め、両者から総合的に除塩性能の評価を行った。埴壌土は屋外の裸地圃場であり、8dS/mの塩水を 3×3mの区画に 300L 散水し、ビニルシートで覆って塩類集積を発生させた。除塩作業ならびに除塩性能評価は砂質壤土と同様の方法で行った。その結果、砂質壤土では除塩率は最大でも 11%にとどまり、多くの塩が下層に流下した。一方、埴壌土の塩回収率は 4～65%となった。最大値は砂質壤土よりも改善されたが、塩回収率のバラツキは大きくなった。これは亀裂の有無の影響と考えられた。また、数値実験で見いだされた給水時間と吸引時間との関係は実際の圃場では顕在化しなかった。以上の結果から、本装置は低透水性土壌では一定の成果が期待できるものの、塩回収率は不安定であり、実用のためには更なる改良が必要であることが明らかとなった。

引用文献

- 1) 北村義信・矢野友久, 中央アジア乾燥地における二次的塩類集積防止のための広域管理研究, 地球環境, 5 (1&2), 27-36, 2000
- 2) 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
- 3) Vogel, T. and Cislerova, M. (1988): On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from moisture retention curve. Transport in Porous Media, 3: 1-15

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 猪迫耕二, 犬持智, 齊藤忠臣, 竹下尚志	4. 巻 33
2. 論文標題 表層吸引溶脱法による地表面からの塩分の除去	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用水文	6. 最初と最後の頁 41-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 猪迫耕二, 犬持智, 野波和好, 奥橋瑛良, 齊藤忠臣
2. 発表標題 表層吸引溶脱装置を実装した自走式除塩作業機の開発
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Inumochi Satoru, Inosako Koji, Saito Tadaomi, Nonami Kazuyoshi
2. 発表標題 Optimum operational conditions of surface suction leaching method for effective removal of partially accumulated salts from salt-damaged soil
3. 学会等名 International Conference of Desert Technology 14 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 犬持智, 猪迫耕二, 齊藤忠臣, 井上光弘
2. 発表標題 簡易蒸発法を用いた土壌水分保持曲線および不飽和透水係数の同時測定
3. 学会等名 第75回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 犬持智, 猪迫耕二, 齊藤忠臣, 野波和好
2. 発表標題 表層吸引溶脱法における最適運転条件の検討
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野波 和好 (NONAMI Kazuyoshi) (20704795)	鳥取大学・農学部・教授 (15101)	
研究分担者	齊藤 忠臣 (SAITO Tadaomi) (70515824)	鳥取大学・農学部・准教授 (15101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------