

総括

現在、乾燥・半乾燥地域の面積は、世界の陸地の 3 分の 1 に達する。これら半乾燥地や乾性半湿潤地においては、沙漠化によって生物生産性が失われることになる。土壌の塩類集積は沙漠化の人為的要因のひとつであり、乾燥地域、半乾燥地域の水の不足しがちな灌漑地域のうち、特に水管理技術が十分発達していない国や地域において、さらに半乾燥地域の降雨依存農地において多く発生している。

本研究では、沙漠化の現状と塩類集積現象についてまとめ、蒸発力を利用した新たな除塩技術として提案された Dehydration 法について、土性の相異、除塩効率および数値モデルの適用可能性を中心に、土壌の物理性、水分移動特性、溶質移動特性等の諸要素から、様々な条件下での Dehydration 法の適用可能性や改良方法の検討を行い、新たな除塩技術の進歩の一助となることを目指した。得られた成果を以下にまとめた。

1) 土性の相異が Dehydration 法の除塩効率に及ぼす影響

過去の Dehydration 法の研究では、主に豊浦標準砂を用いて実験が行われていることから、ここでは供試土の土性の相違に着目し、それが Dehydration 法の除塩効率に及ぼす影響を検討するための実験を行った。

供試土は豊浦標準砂 S に木節粘土を全体重量の 5%、10%、20%混ぜたものを用いた(C₅、C₁₀ および C₂₀)。内径 10cm、高さ 10cm のカラムの下半分には供試土のみを、上半分には塩化カリウム(KCl)を混入した供試土を用い、1 回あたりの除塩用水量(3.5%KCl 溶液)は、各供試土に対してそれぞれ 4.7mm、6.3mm、7.9mm、15.7mm に設定した。乾球温度 40°C、相対湿度 50%に設定した恒温恒湿槽内に供試体を入れ、96 時間乾燥させた。その結果、設定した実験条件下では C₁₀よりも粘土が多く含まれる土壌では土壌中の塩類をガーゼに捕集することはできず、除塩用水に含まれる塩類の一部が土壌中に残留する結果となったことから、Dehydration 法を適用する際に高塩濃度の除塩用水を用いる場合、対象土壌の粘土含有量はその除塩率を大きく左右すると推察される。また、C₅ では実塩捕集量が除塩用水に含まれる塩量を大きく上回り、C₁₀ ではほぼ等しく、C₂₀ では除塩用水中の塩量が実塩捕集量を大きく上

回る結果が得られた。Dehydration 法における実塩捕集量の決定には塩移動に関わる因子が支配的であり、除塩用水濃度には大きく左右されないとすれば、本実験条件下において 10%を越える粘土を含む供試土に対して効果的な除塩を行うためには、その土性に応じてより低濃度の除塩用水を用いる必要がある。また粘土含有率が高く、除塩用水量が多い場合に土壤表面に顕著にクラストが観察された。乾燥が進む恒率蒸発期にクラストが形成され、シート表面での水分蒸発が抑制されることにより土壤溶液の移動が制限される。その結果、捕集シートへの塩移動、集積はほとんど行われなくなる。クラストの形成プロセスは本実験においては確認できなかったが、粘土含有率が高いほどその形成速度は速く、捕集シートの除塩効果を著しく低下させる結果になったと考えられる。

供試土 C_{10} と C_{20} について、除塩作業を繰り返して行った結果、3.5%の除塩用水を用いた場合でも、 C_{10} 程度であれば、繰り返して除塩作業を行うことで塩捕集量を高めることができることが分かった。また体積含水率では C_{10} 、 C_{20} とともに各除塩回数で表層から一定深さまでほぼ同じ値を示し、全体的に C_{10} よりも C_{20} の方が高い結果となった。各除塩回のポテンシャル勾配がほぼ一定であるため、その影響を受けて溶液の上方移動が行われるカラム上部では同じ傾向を示し、 C_{20} の方が土壤溶液を吸着する粘土をより多く含むために体積含水率が高くなったと考えられる。

2) Dehydration 法における数値モデルの適用可能性の検討

Dehydration 法による除塩量の予測は、より効率的な除塩方法を探る上で必要であるが、土壤の物理性、気象環境条件、捕集材質、灌水フラックスおよび土壤の初期含塩量など、除塩効率に影響を及ぼすと考えられる因子が多く存在する。土壤面蒸発に伴う土壤中の溶質移動の予測には、通常、Richards 式ならびに移流分散方程式 (CDE) が用いられる。そこで、土壤と捕集シートの水分移動特性、溶質移動特性の測定を行い、数値モデルを用いて数値解析を行うと同時に、カラムによる集積・除塩実験を行い、Dehydration 法における数値モデルの適用可能性を検討した。水・溶質移動の解析に広く用いられている HYDRUS や SWAP といった土壤物理シミュレーションモデルでは水蒸気移動および結晶析出・溶出過程は組み込まれていない。ここではこれらを考慮して数値解析を行った。

実験では供試土に用いた豊浦標準砂とマサ土だけでなく、捕集シートとして用いた

医療用ガーゼについても水・溶質移動特性の測定を行った。カラム実験では、内径 3.75cm、高さ 5.0cm のカラムに供試土を充填し、0.3%NaCl 溶液で毛管飽和させた後に水分を蒸発させて、塩類集積供試体として用いた(塩類集積過程)。その後、捕集シートを敷設して除塩用水(0.05%NaCl 溶液)を 6mm 程度灌水し、再度蒸発させて土壌内集積塩類を捕集した(除塩過程)。水分と溶質の挙動について数値モデルにより計算し、実験結果との比較検討を行った。

結果としては、通常モデルのまま解析を行った場合、実験結果と解析結果が一致しないことが確認された。そこで実際の水・溶質移動現象と照らし、分散長補正、ヒステリシス、塩クラスト抵抗、非平衡溶出を考慮して計算を重ねた結果、両者に概ね良好な一致を見ることができ、Dehydration 法における除塩量の概算値を推定することが可能であることが確認された。他方、その精度を高めるために必要な検討事項が以下のように推察された。

まず、現在広く用いられているヒステリシスモデルは 8 種類の土壌でその妥当性が報告されているが、供試土壌の走査曲線を適格に表現できている保証はない。また、除塩用水灌水後、集積した塩類は、直ちには溶解しておらず、十数分程度の時間をかけて溶解・移動したと推察できる。溶出速度定数は土壌ならびに溶質によって異なると考えられる。さらに実測値と計算値の一致の精度を制限する要因としては、塩類の土壌内部での析出による水分保持特性および不飽和透水係数や気相率の変化が考えられる。土壌表面付近における実測値の体積含水率は計算値よりも大きい傾向にあるが、これは土壌間隙に塩類が結晶化し、間隙率が小さくなったことによって土壌の保水能が大きくなった結果であると考えられ、同時に透水係数も小さくなったためと推察される。これら数値モデルの精度向上に向けたさらなる研究により、Dehydration 法における、より正確な塩挙動解析、さらには除塩効率向上に向けた検討が可能となる。

3) 捕集材質の相異が Dehydration 法の除塩効率に及ぼす影響

除塩効率を左右する重要な要素である捕集材の検討については、これまで医療用ガーゼのほかに麻やキッチンペーパーなどいくつかの素材を用いて実験が行われているが、医療用ガーゼが最も除塩率が高い結果となっている。しかしながら、Dehydration 法による除塩効率をより高めるためには、灌水条件のほかに捕集材の改

良が今後の課題となることから、低水分領域で医療用ガーゼよりもマトリックポテンシャルのより低い土壌を捕集材として利用して実験を行うほか、数値モデルを用いて他の供試土、捕集材の組合せの場合に除塩率がどのように変化するかを検証した。

実験では、供試土に豊浦標準砂を用い、捕集材としてマサ土を用いた。実験条件は数値モデルの適用可能性検討の際に行われた実験条件と同じに設定した。

体積含水率と体積含塩量について実測値と計算値では、概ね良好な一致が確認されたと同時に、医療用ガーゼよりも高い除塩効果を示した。一方、実験結果では観察されなかったが、計算結果から、捕集材と接する供試土壌面付近の体積含水率が極端に低下していることが分かった。これは、捕集材として用いたマサ土が供試土の豊浦標準砂に比べて、低水分領域でのマトリックポテンシャルがより低く、乾燥が進むと、捕集材が供試土表面の水分をより強く吸引するためである。供試土表面の体積含水率の極端な低下は、土壌溶液の移動、すなわち毛管上昇を妨げることになると推察される。

また、捕集材の体積含水率 $\theta=0.1$ 程度の時に毛管上昇が旺盛に行われていたことが分かった。そこで、 $\theta=0.1$ の時の、各捕集材のマトリックポテンシャルをみると、豊浦標準砂、ガーゼ、マサ土の順に低くなっている。一方、不飽和透水係数はマサ土、ガーゼの順で小さくなり、豊浦標準砂が最も大きいことが分かった。これらのことから捕集材が豊浦標準砂の場合に除塩効果が得られなかったのは、 $\theta=0.1$ の時のマトリックポテンシャルが相対的に高く、供試土の土壌溶液を吸引するのに十分でないことのほか、透水係数が大きいことから、除塩用水の下方浸透が進み、捕集材自体がいち早く乾燥してしまうためであると考えられる。その結果、供試土内の土壌溶液は、より下方へと再分配され、毛管上昇が生じた場合でも捕集材まで到達できないことになる。さらに、その他の捕集材と供試土の組合せについての計算を行い、比較した結果、マトリックポテンシャルがより低い供試土壌に対しても、除塩効果を示す捕集材料（ここではマサ土）が存在することが明らかになった。供試土と捕集材の水分移動特性のバランスを考慮し、適切な材料を選定することで除塩率を向上させることが可能であると考えられる。また、捕集材として織布を用いる場合、マトリックポテンシャルが低い土壌に対してより高い除塩効率を得るために考えられる条件としては、①紡績糸のように親水性があり、②繊維間隙が小さく、また③ケバを持つ糸で、④糸のより数が多く、⑤糸間隙が小さい、すなわちきつく織られた布であること、などが挙げられる。

4) 実証試験に向けた Dehydration 法の除塩効果予測

Dehydration 法は、一定の条件下に設定された室内実験ではその除塩効果が確認できたものの今後も研究を重ねていく必要があり、実際の現場で適用するためにはその場の状況に応じた除塩量の推定などが重要となる。そのため、将来 Dehydration 法を用いた実証試験を行う上で、期待できる除塩量の推定を行うとともに、効率的な技術システムとして完成度の高い Leaching 法と比較しながら、考えられる問題点の抽出およびその解決策の提案を行った。

Leaching 法と Dehydration 法の比較では、100m×100m の圃場を想定し、気象、土壌条件を与えて得られた総除塩量、除塩用水量について検討し、さらにそれぞれの除塩法の違いによる特色を比較した。総除塩量については Leaching 法では Dehydration 法と比べ約 9 倍となっている。この理由としては、Leaching 法の除塩対象面積および深さが Dehydration 法よりも大きいことが挙げられる。除塩用水量に関しては、Leaching 法に比べると Dehydration 法は約 1/80 の量であり、極端に少なくて済むこと、灌水量あたりの除塩量では Dehydration 法が Leaching 法の約 9 倍効率が高いことが確認された。また、Leaching 法では、より低濃度の除塩用水を多量に必要となり、水源確保が重要であるが、Dehydration 法では、塩濃度が高い除塩用水であっても利用可能である。地形条件では、Leaching 法は排水処理施設が必要なため、その設置が可能となる地形が必要であるが、Dehydration 法では特に考慮する必要はない。さらにコストの面では、土工事や多くの施設を必要としない Dehydration 法が有利である。十分な捕集効率が期待できる捕集シートが開発されるならば、たとえそれが高価であっても、排水・廃棄物処理の点から、Dehydration 法は十分適用できる技術であるといえる。

実証試験に向けては、土性および除塩用水量と除塩効率のさらなる研究、また数値モデルの改良および捕集材の改良・開発が望まれる。さらに、より精度の高い研究成果を得るためには、具体的な実証試験計画の立案が不可欠となる。

これらの点を踏まえ、Dehydration 法の現場適用に向けた、より一層の研究が期待される。