

第5章 実証試験に向けた Dehydration 法の除塩効果予測

5-1. 背景と目的

これまで塩類集積土壌における塩類除去技術について、様々な研究が行われてきた。これらの研究成果は、実際の現場においてもその条件に応じて適用されている。一方 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課題となる。

本章では、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、これまで幅広く研究が行われている 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う。

5-2. 除塩効果比較のための条件設定

除塩効果について Leaching 法と Dehydration 法の比較する方法として、本章では実際の圃場を想定し、除塩量の推定を行う。これは、本研究が最終的には集積塩類の除去を目的としており、その目的の達成状況を最も分かりやすく表現できるためである。

除塩量の推定を行う際には、気象状況や水質、土壌内塩分濃度といった自然条件のほか、圃場面積や排水施設などの除塩作業を行う施設条件等、除塩操作を施す現場の条件設定が必要となる。

5-2-1. 自然条件

1) 気象条件

排水によって土壌内塩類の除塩を行う Leaching 法と蒸発力を利用する Dehydration 法の両方式のうち、その除塩効果に気象条件が大きく影響するのは後者の Dehydration 法である。ここでは比較的高い除塩率を示した第 3 章の室内実験と同じ環境条件である気温 25℃、相対湿度 40%を設定し、本章の検討上の気象条件とする。また土壌表面上を風速 1.4m/s 程度の風が吹いているものとする。

2) 土壌条件

対象土壌の物理性は、第 2 章で用いた豊浦標準砂と同等の砂(粒径 100～420 μ m)で単位体積質量 1.53g/cm³とする。また、飽和透水係数を 2.1×10^{-2} cm/s、間隙率を 42%とする。また土壌内集積塩類濃度については、小麦、ソルガムおよび大豆などの主要産物が 0-10%減収となる塩類濃度を想定し(FAO/UNESCO, 1973; Maas.E.V. and Hoffman.G.J., 1977), 0.3%と仮定する。

3) 水条件

除塩作業の際には両方式ともに灌水を行うが、本章では除塩作業を行うに十分な水量が確保できているものとする。また除塩用水の塩類濃度については、塩害危険

度が中程度とした場合の 0.02%(Richards, 1954)程度が望ましいが、実際の現地で農業用水として大量に確保できる保証はない。従って、ここではそれよりも若干塩濃度を高く設定し 0.05%とする。

5-2-2. 施設概要

1) 圃場面積

除塩量の算定のための対象圃場として、100m×100m (1.0ha)を想定する。また圃場の傾斜や起伏は考慮しない。

2) 排水施設

排水施設は Leaching 法を適用した場合にのみ必要となる。ここでは暗渠排水施設を設置するものとする。

計画暗渠排水量は通常、耕地の区画(耕区)の均平度、広狭、土壌の透水性、土地利用形態等に応じて 10～50mm/day として算定される(土地改良事業設計基準「計画・暗渠排水」)。しかし Leaching 法の採用に伴う暗渠の敷設は、排水不良や地下水位上昇を防ぐ目的で暗渠を設置する場合とは異なり、地表面から灌水された除塩用水を溶解した塩類とともに排出することを目的としている。従って、ここでは計画暗渠排水量を上記の範囲に限定せず、灌水量を排出できる暗渠管の口径から暗渠間隔を決定する。土壌が均質であるとした場合、圃場の排水量は(4.1)式および(4.2)式から求められる。また各変数については図 5-1に示す。

$$a/h \geq 1 \quad Q = \frac{2\pi K(t+d-r)}{\ln \left\{ \left[\tan \frac{\pi(2d-r)}{4h} \right] \left[\cot \frac{\pi r}{4h} \right] \right\}} \quad (4.1)$$

$$a/h < 1 \quad Q = \frac{2\pi K(t+d-r)}{\ln \left\{ \left[\sinh \frac{\pi(2d-r)}{a} \right] \left[\operatorname{cosech} \frac{\pi r}{a} \right] \right\}} \quad (4.2)$$

ここで、 h :不透水層までの深さ(m)、 d :埋設深(m)、 a :暗渠間隔(m)、 r :暗渠管の半径(m)、 t :湛水深(m)、 K :透水係数(m/s)、 Q :暗渠単位長あたりの排水量(m³/s)である。

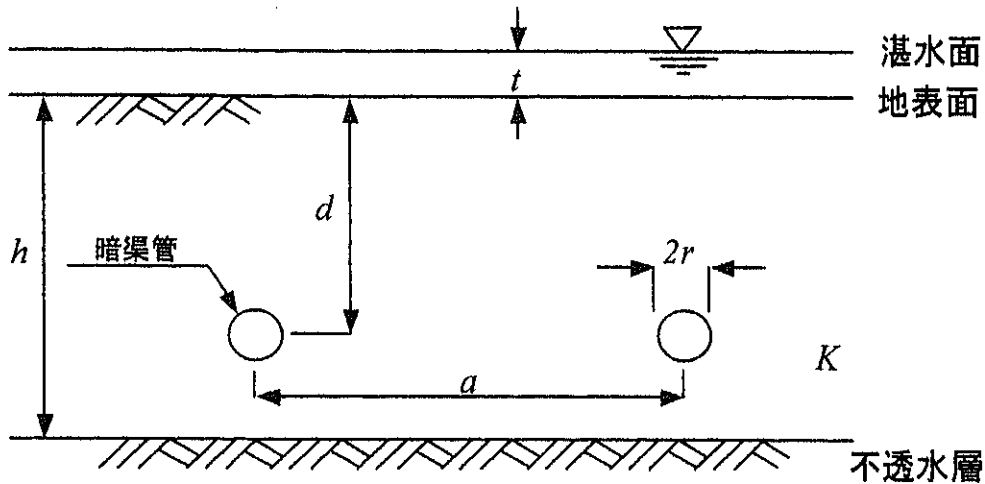


図 5-1 排水量計算式の変数

今、暗渠間隔 a に比べて地表面から不透水層までの深さ h が十分大きいと仮定すると、 $a/h < 1$ となる。従ってここでは(4.2)式を用いて計算を行う。管芯までの埋設深を 0.6m、暗渠間隔を 30m、口径 10cm の暗渠管を使用するとすれば、暗渠管の半径は 0.05m、湛水を起こさないような散水による灌漑を行うものとして湛水深 t を 0m としたとき、飽和透水係数は $2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ であることから、排水量 Q は以下の様に算出される。

$$Q = 1.97 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4.3)$$

これを圃場貯留水深に換算すると、単位 m あたりの暗渠の 1 日あたり排出量は、次のように計算できる。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1.97 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}}{30 \text{ m}} \times 3600 \text{ s} \times 24 \text{ hr} \\ &= 567.36 \text{ mm} / \text{day} \end{aligned} \quad (4.4)$$

圃場内の暗渠の配置を図 5-2に示す。

3) 畝の形状

畝については、除塩方法の違いから Leaching 法と Dehydration 法では異なる形状を設定した。まず Leaching 法の場合は、除塩対象土壌面積が圃場全体となるため平畝とする。Dehydration 法の場合は、土壌表面に塩類捕集用のシートを敷設するため、除塩対象土壌の面積をある程度狭めることができる。ここでは幅 50cm、高さ

25cm 程度の畝を想定し、また 1.0m 間隔で畝立てされていると仮定し、作物栽培が行われる畝を中心に除塩を行うものとする。また、畝の土壌表面と捕集シートとの間に隙間ができないように土壌表面は十分に整形してあるものとする。想定した畝の形状を図 5-3 に示す。

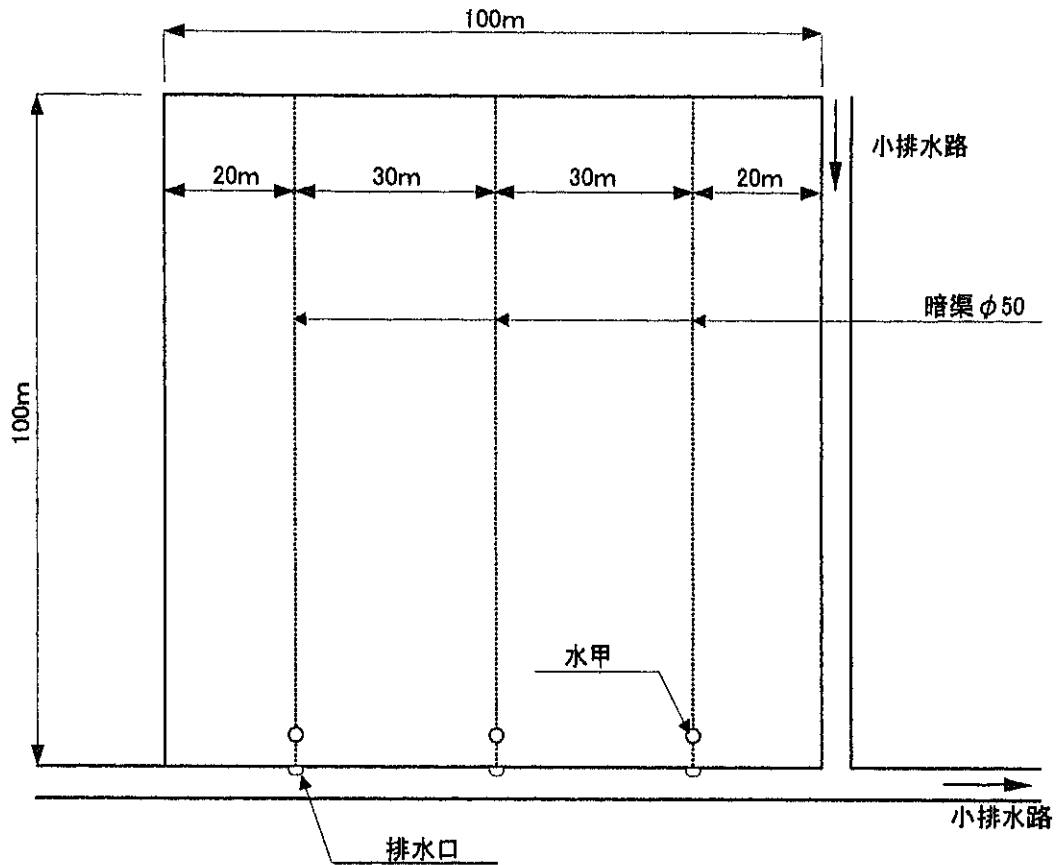


図 5-2 暗渠配置図

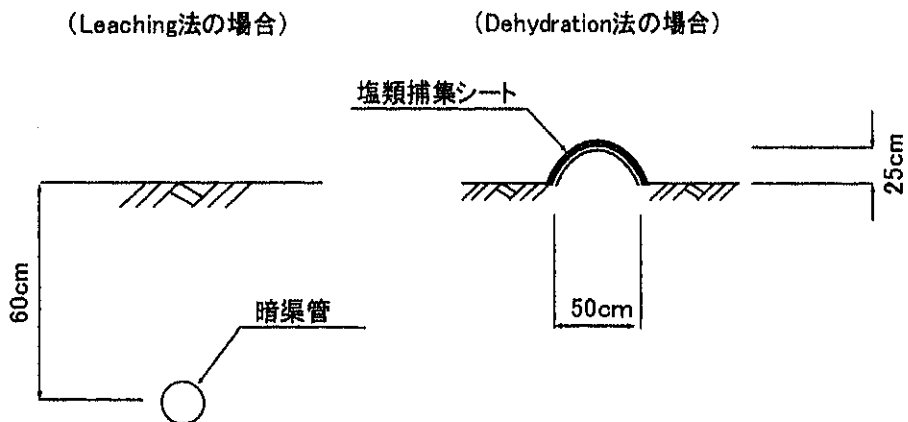


図 5-3 畝の形状

5-3. 除塩量の推定

5-3-1. Dehydration 法による除塩量

Dehydration 法による除塩は、1.0m間隔に立てられた畝に捕集シートを敷設して行う(図 5-3)。このとき、捕集シート幅は約 0.78m となる。畝の長さを圃場の長さと同しく 100m とすれば、塩類捕集シート面積 S_D は、次のようになる。

$$\begin{aligned} S_D &= 0.78m \times 100m \times 100本 \\ &= 7,800 m^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

本章で設定した気象条件下で、飽和時の塩類濃度が 0.3% の土壤溶液が乾燥・蒸発によって土壤内に集積した状態を想定し、その土壤表面に 0.05% 濃度の除塩用水を $4.9 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ で 2 分間灌水した場合 (5.9mm 相当)、18 時間乾燥後には土壤表面から深さ 10cm までに集積した塩類の約 48% を除去することが期待できる(第 3 章)。ここで、土壤表面から深さ 10cm までに含まれる単位面積あたりの塩分量を W_2 とし、捕集シート全面積で捕集可能な総塩類量 W_D とすると、それぞれの計算結果は以下のとおりとなる。またここで、土壤溶液の単位体積重量を約 1.0g/cm^3 とした。

$$\begin{aligned} W_2 &= 10cm \times 0.42 \times 0.003 \times 1.0 \text{g/cm}^3 \\ &= 0.0126 \text{g/cm}^2 \\ &= 126 \text{g/m}^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} W_D &= 126 \text{g/m}^2 \times 0.48 \times 7,800 \text{m}^2 \\ &= 471,744 \text{g} \\ &= 471.74 \text{kg} \end{aligned} \quad (4.7)$$

5-3-2. Leaching 法による除塩量

Leaching 法により、土壤中の塩類濃度を初期状態の 80% 減少させるのに必要な除塩用水量は、除塩対象土壤の間隙体積に対する除塩用水量の体積の割合である間隙体積比が 1.87 となる量と算定されている(Gardner, 1956)。このことから、土壤表面から暗渠までの深さ 60cm 内に含まれる塩類を除去するのに必要な単位面積当り

用水量を V_1 とすると、次のように算出できる。

$$\begin{aligned} V_1 &= 0.60m \times 0.42 \times 1.87 \\ &= 0.471m \\ &= 471mm \end{aligned} \tag{4.8}$$

計算によって得られた排水量が約 567mm/day であることから、計画された暗渠によって除塩用水は十分排出されることが分かる。

この時土壤に含まれる塩類量は、対象土壤の間隙体積に塩濃度 0.3% を乗じて得られる。しかしながら、本章の検討対象土壤が豊浦標準砂であることから、フィンガーストリーフによりリーチング効果が低下することが考えられる。豊浦標準砂の場合、初期含水比が風乾状態であるとき、浸潤形態は非膨張性フィンガーストリーフとなる。この場合、散水フラックスが小さい(30mm/h)とリーチング効率は 25%程度に、散水フラックスが大きい場合(180mm/h)でも 70%程度に低下する(川本ら, 1996)。ここでは、前述の計算によって求められた除塩用水量 V_1 の灌水時間を 3 時間とすると、リーチング効率は求められた結果の 70%となる。従って、土壤表面から暗渠までの 60cm 内に含まれる塩類量 W_1 は、塩類を含んだ土壤溶液の単位体積重量を約 $1.0g/cm^3$ とした時、以下のよう求められる。

$$\begin{aligned} W_1 &= 60cm \times 0.42 \times 0.003 \times 1.0g/cm^3 \times 0.7 \\ &= 0.0529 g/cm^2 \\ &= 529 g/m^2 \end{aligned} \tag{4.9}$$

さらに、除塩量はその 80%であり、 $423.2g/m^2$ となる。

除塩量を圃場全体量に換算すると総除塩量 W_L は、次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} W_L &= 423.2g/m^2 \times 100m \times 100m \\ &= 4.232 \times 10^6 g \\ &= 4,232 kg \end{aligned} \tag{4.10}$$

5-4. 比較結果

Leaching 法と Dehydration 法の両方式について、総除塩量、除塩用水量、除塩対象土壌の面積および深さ等を表 5-1に整理した。

表 5-1 Leaching 法と Dehydration 法の除塩量比較表

除塩方式	Leaching 法	Dehydration 法
総除塩量(kg)	4,232	471.74
除塩用水量(mm)	471	5.9
除塩用水量あたり除塩量(kg/mm)	9	79
対象土壌面積(m ²)	10,000	7,800
対象土壌深さ(cm)	60	10

5-4-1. 総除塩量

表 5-1から分かるとおり、Leaching 法では Dehydration 法と比べ総除塩量が約 9 倍となっている。この違いはそれぞれの塩類除去方法の特長に大きく関連している。

Leaching 法では、塩類除去に必要な灌漑水を適切に圃場外に排出する暗渠排水施設の設置が必要である。灌漑水は土壌に浸潤し、集積塩類を溶かしながら下方へと移動する。溶かした塩類を十分に含んだ灌漑水は、暗渠によって集められた後、圃場周囲の小排水路に排出され、圃場外に運ばれる。ここで、暗渠を埋設するためには余裕深を見込まなければならない。この余裕深は、一般的には地盤の収縮沈下や営農機械の走行荷重、凍結等に対する埋設管の保護を目的として設定されるものである。この余裕深を見込んで暗渠を埋設すると、植物の根群域よりもさらに深い位置に暗渠を設置することになり、従って除塩の対象となる土壌の深さも当然大きくなる。その結果、実際の植物の生長に大きな影響がない場所の土壌内集積塩類も溶出することになるため、総除塩量は大きな値となる。

Dehydration 法は、捕集シートを敷設した箇所の土壌を主に除塩の対象としてい

る。従って、Leaching 法のように広範囲の除塩を行うのではなく、必要な場所を限定して除塩することができる。また暗渠のような施設を設置しないため、特に比較的浅い土壌層の集積塩類の除塩をするという特長がある。このことから、総除塩量は Leaching 法に比べ当然小さな値となる。

5-4-2. 除塩用水量とその水質

Leaching 法では 471mm もの除塩用水を必要とするが、Dehydration 法で用いた除塩用水量は 5.9mm である。Leaching 法に比べるとその量は約 1/80 であり、極端に少なく済む。これは除塩の対象となる土壌の容量が Leaching 法と Dehydration 法で大きく異なるためであり、両者の特長を考えれば当然の結果といえよう。

さらに Leaching 法では除塩過程ですべての除塩用水が暗渠によって排水されるのではなく、土壌内に残留する水分量も多い。そのため、除塩用水の水質としては塩類を含まない若しくは極めて低濃度であることが重要となる。Leaching 法のように、対象となる土壌の容量が大きいと、塩害を引き起こさない塩濃度の除塩用水量がより多く必要となるため、水源確保が必須となる。一方、Dehydration 法の場合は、使用する除塩用水量に塩分が含まれない方が望ましいが、塩分が含まれていても除塩効果を期待することができるため(桑畠ら, 2001)、通常入手できる程度の水質であれば Dehydration 法の効果が期待できる。

5-4-3. 地形条件および対象土壌深さ

Leaching 法では、暗渠からの排水後、重力排水で圃場外に運ぶことが計画の基本となる。また仮に排水溝が設置できない場合には、ポンプ等を用いて排水除去しなければならない。そのため、塩類を含んだ排出水を適切に処理できる地形もしくは施設および手段が圃場周辺に確保できない場合には、暗渠排水工を計画することが困難となる。従って、Leaching 法を適用する際にはその土地の地形が重要となる。Dehydration 法では、除塩作業を行う際には、捕集シートのほかに特別な施設は必要ない。畝立て作業、シートの敷設作業や乾燥・塩類捕集後のシート回収、シートおよび集積した塩類の処理(洗浄、焼却)等の労務提供が必要となるが、これらは地形条

件に左右されることはない。ただし、捕集シートと土壌面との密着性が保たれるように土壌表面を十分に整形しておく必要がある。

対象土壌深さについては、Leaching 法の場合は既に 5-4-1 で述べたように、深さ 60cm まで除塩対象となることから、根群域が多少広い植物であっても適用することが可能となる。一方、これまでに研究された Dehydration 法では除塩の対象土壌深さが 10cm と比較的浅く、また深さ 10cm まで均等に除塩することは難しい。従って現段階での Dehydration 法では、土壌表面により近い層では除塩効果が期待できるがそれ以深では、土壌内の塩類が再分配される可能性がある。このことから、Dehydration 法を適用するには、塩類集積が土壌表面付近で塩濃度勾配が極めて大きくなるような状況下であることが望ましい。ただし、今後の Dehydration 法の改良により、より深い層での除塩も期待できる。

5-4-4. 除塩実施に係る費用と環境配慮

Leaching 法の実施にかかる費用としては、暗渠および小排水路敷設に係る土工事費や資材費、施設設置後の維持管理費等が挙げられる。通常これらは施設の規模が小さくても、設計から施工まで通常の土木工事と同様に見積もられ、相当額のコストがかかる。一旦施設が設置されれば大規模な改修を除き、特に労力を投入する必要はないが、経済性が良いとはいえない。また、系外への適切な排水処理が困難な場所では、塩性排水が周辺環境に与える影響も無視できない。

一方、Dehydration 法では、前述したように土壌面整形や捕集シートの敷設・撤去および灌漑作業等、作業員の投入のみで適用が可能である。従って、Dehydration 法の適用に係る費用は Leaching 法と比較して、極端に安くて済み、非常に経済的であるといえよう。さらに塩類捕集後のシートも、車両等により系外への運搬がきわめて容易であることから、環境負荷についてもほとんど考慮する必要がなく、大きな長所であるといえる。また捕集シートの改良・開発の結果、より高い捕集効果が見込めるのであれば、仮に捕集シートが高価であっても、排水および廃棄物処理の観点から、Dehydration 法は十分に適用し得る技術であると考えられる。

5-5. 実証試験に向けた提言

これまで、室内実験により Dehydration 法による除塩に関する研究がなされてきたが、今後 Dehydration 法の実証試験を開始するまでに、検討しておかなければならない事項が幾つか挙げられる。

5-5-1. 土性と除塩効率

本研究ではこれまで用いられてきた豊浦標準砂の他に、粘土を混入した供試土やマサ土を用いて実験を行った。しかし、Dehydration 法を多種多様な土性に応用するにはさらに多くの研究が必要となる。例えば、三相分布を利用して土壌をいくつかのグループに分級し、一定条件下での除塩効率の傾向を把握しておけば、現場においても Dehydration 法を適用した場合の除塩効果の見当を即座につけることができるほか、除塩方法の選定を行う際の基本資料として利用することが可能であろう。そのための作業の手順としては、これまでのような室内実験を行うほかに、水分移動特性が既に知られている土壌に対しては数値モデルを利用することで、除塩量を推定するなどが挙げられる。

5-5-2. 除塩用水量と除塩効率

最適な除塩用水量は、豊浦標準砂を用いた実験によって、既に検討が行われている(桑島・安部, 2001)。ただし、その他の土性に適用できる保証はなく、この点についての研究は今後行う必要がある。特に、乾燥・半乾燥地における塩害地では、除塩用水として利用できる水量も限られると予想され、除塩用水量に関する研究は必須であろう。また、灌水方法についても改良の余地がある。これまで行われた実験では主に土壌表面に灌水したが、より深い位置での除塩効率を高めるためには、例えば地中灌漑を併用することも検討に値するものと考えられる。さらに、Dehydration 法では塩分を含む除塩用水であっても利用できる可能性があり、水質を含めたさらなる研究が期待される。灌水施設が必要な場合にも、必要水量を事前に予測することでより経

済的な施設計画が可能となるため、実証試験を行う上での重要な要因である。

5-5-3. 数値モデルの改良

本研究では Dehydration 法に対して数値モデルが適用できる可能性を確認した。ただし、現在のモデルは Dehydration 法の水・溶質移動の予測には、ヒステリシスモデルや、土壌内析出による水分移動特性の変化など、実測値と計算値でズレが生じた原因が幾つか挙げられており、明らかにしなければならない課題として残されている。よりの確な予測が可能になれば、例えば目標塩濃度を達成するまでの日数と作付け体系との組合せや必要計画除塩用水量と計画灌漑水量を考慮した灌水施設など効率性および経済性の点でより優れた計画策定が可能となる。

5-5-4. 除塩効率の高い捕集材の改良および開発

これまで主に用いられてきた医療用ガーゼは、粘土含有率が高くなると、除塩効率が極端に下がることが確認された。このような土壌条件でより高い除塩効率を実現するためには、捕集材としてガーゼに代わる素材が必要であり、そのための条件として、毛管上昇が旺盛となる低水分域においてより低いマトリックポテンシャルを持つ素材、減率蒸発期における蒸発速度が遅い素材などが示唆された(第4章)。ただし、捕集材として利用するには、土壌面に密着できるようにフレキシブルであることや塩捕集後の回収が容易であることなど、実際に適用する上での物理的な条件を満たしている必要があるほか、現地でも入手が可能であることおよび安価であることなど社会経済的な条件も備えていることがより望ましい。

5-5-5. 実証試験計画

上述の室内実験を踏まえた上で実証試験を行うにあたっては、まず選定サイトの規模や気象条件、塩類集積状況や土壌条件等、Dehydration 法を適用する環境条件を確認し、その上で適切な実証試験条件を決定しなければならない。また捕集された塩類や使用後のシートの処理方法についても廃棄するだけでなく、再利用の方法等

を検討する必要がある。これら実証試験条件を整えば、室内実験の成果から実証試験の除塩効果の予測ができる。

現場での試験環境は室内実験に比べてより複雑であるのが普通であり、実証サイトの選定にあたっては気象条件や土壌条件等が比較的安定している場所や時期に注意を払うことが重要である。また、詳細な実証試験計画の立案によって、より精度の高い成果が期待できる。

さらに、実証試験結果を踏まえ、Dehydration 法の長短所を整理し、他の優れた除塩技術と併せ、除塩技術の選択肢のひとつとして適用できるように、体系的に研究を進めていくことが必要であろう。