

第4章 捕集材質の相異が Dehydration 法の除塩効率に及ぼす影響

4-1. 背景および目的

これまでの研究から Dehydration 法の除塩効率は土性によって大きく異なり、特に細かな土粒子を含む供試体を用いた実験では除塩効率が極端に低くなることが分かった。また、除塩効率と灌漑の水量や水質、灌漑流束などに関係していることは既往の研究から明らかになっている(桑嶋・安部, 2001 など)。

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。

本章では、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することを目的とした。

4-2. 実験方法

4-2-1. 供試土壌および捕集材

供試土壌には豊浦標準砂を用い、捕集材としてマサ土を用いた。捕集材としてマサ土を利用したのは、①水分移動特性および溶質移動特性が既に測定済みであり、②低水分領域におけるマトリックポテンシャルがガーゼよりも大きく、土壌溶液の毛管上昇がより促進されると予想されるためである。乾燥密度は豊浦標準砂が 1.53g/cm^3 、マサ土が 1.46g/cm^3 である。

4-2-2. 塩類集積・除塩実験

1) 塩類集積過程

内径 3.75cm、高さ 10cm のカラムに十分洗浄した豊浦標準砂をできるだけ均一に上述の乾燥密度で充填した。0.3%NaCl 溶液の入った容器に浸してカラム底部の小孔から毛管飽和させた後、容器から取り出し、土壌面からの蒸発が起こらないように注意しながら排水を行った。以後、塩類集積実験の手順および環境条件は前章 3-2 で述べた方法に従って行った。カラムは全部で 4 本用意し、うち 1 本を塩類集積過程終了後に解体し、水分および塩濃度の測定を行った。

2) 除塩過程

塩類集積過程終了後、残り 3 本のカラムの土壌表面にマサ土を敷設した。敷設の際には、マサ土が乱されないように、最上段のカラムの上にさらに高さ 0.25cm の同径のカラムを取り付けた。豊浦標準砂とマサ土の接触面には、解体時に容易に分離できるようにガーゼを 1 枚敷設した。

マサ土の敷設後、土壌表面に 0.05%NaCl 溶液を霧吹きによって灌水した。灌水作業中は 3 本すべてのカラムに均等に灌水されるように努めた。この時の灌水強度は $3.3 \times 10^{-3}\text{mm/s}$ 、灌水時間は約 2 分であった。灌水終了後は塩類集積過程と同じ環境条件下で蒸発実験を行った。その他の手順は前章 3-2 で述べた方法に従った。

カラムの解体は灌水終了からそれぞれ 6 時間後, 12 時間後および 24 時間後に行い, 解体後は各試料の水分, 塩濃度を測定した. なお, 塩濃度の測定に当たっては 1:2 浸潤法を用いた.

3) 数値モデルの適用

前章の結果から, Richards および移流分散方程式を基本として Dehydration 法に数値モデルを適用すれば, 除塩量のある程度推定することが可能であることが分かった. そこで本章では前述した塩類集積・除塩実験の諸条件に対してこれらの数値モデルを適用し, 水と溶質の同時移動現象について数値計算を行い, 除塩量の推定を行った. また, 捕集材と供試土を別の組合せにした場合についても同様に数値モデルを適用し, 除塩率を推定した. 捕集材と供試土の組合せについては表 4-1 に示す. なお, 地温を均一かつほぼ一定の条件下で計算を行うため, 熱移動の解析は考慮していない. 捕集材および供試土の水分移動特性および溶質移動特性, また数値計算を行う上での諸条件は次のとおりである.

表 4-1 捕集材と供試土の組合せ一覧

Case	供試土	捕集材	検討方法
1	豊浦標準砂	ガーゼ	実験および数値計算
2	〃	マサ土	実験および数値計算
3	〃	豊浦標準砂	数値計算
4	マサ土	ガーゼ	実験および数値計算
5	〃	マサ土	数値計算
6	〃	豊浦標準砂	数値計算

(1) 水分移動特性および溶質移動特性

捕集材および供試土の水分移動特性および溶質移動特性は前章 3-2 で測定した結果を用いた. マサ土と豊浦標準砂の水分保持曲線および不飽和透水係数の近似式は(3.16)~(3.19)式で表され, 実験定数は表 3-2および表 3-3に示したとおりであ

る。また、溶質移動特性のうち、拡散係数については(3.20)式および表 3-4で表される。分散長についても前章 3-2 の測定結果から、豊浦標準砂 0.19、マサ土 0.16 とした。計算は、Dehydration 法の数値モデルとして必要なヒステリシス、非平衡溶出を考慮して行った。また塩クラスト抵抗については、供試土が豊浦標準砂の場合のみ考慮した。

(2) 計算条件

数値計算に関わる諸条件は、基本的に前章で用いた(3.21)～(3.31)式と同様の条件を設定し、計算を行った。ただし、上部境界条件における空気力学抵抗 r_a は、Case2 および Case3 については本実験で測定された 0.55s/cm とした。Case5 および Case 6 では前章 3-4-3 でマサ土の場合に用いた 0.54s/cm とした。

(3) 数値計算

数値計算についても、基本的に前章 3-4-4 の方法に従った。ただし、空間増分 Δz は、本実験では捕集材として使用した土壌の厚さが 0.25cm であったことと、捕集材内部での水分溶質移動も解析できるように補集材の厚さの 1/2 倍とし、0.125cm で一定とした。

4-3. 実験および計算の結果と考察

4-3-1. 捕集材としてマサ土を使用した場合

除塩対象の供試土として豊浦標準砂、捕集材としてマサ土を利用して行った場合の体積含水率と体積含塩量の実験結果および数値計算結果を図 4-1および図 4-2に示す。また、除塩率の計算を(3.35)式に基づいて行ったところ、実験結果から61.0%であり、同様の環境条件下で捕集材にガーゼを用いた場合(47.9%)に比べて、高い除塩効果を示した。

塩類集積過程では前章で行った実験と設定条件が同じであったことから、実験および計算ともに同様の結果を得たが、除塩過程では捕集材としてガーゼを用いた場合(図 3-12, 図 3-13)と比べ、マサ土を用いた場合には以下に説明するような若干異なる結果を示した。

まず体積含水率分布(図 4-1)をみると、計算結果では除塩過程終了後、表層直下の体積含水率が極端に低下しているが、実験結果では計算によって得られたような極端な乾燥層は見られなかった。実験に用いたカラムの分割最小厚さが 0.5cm であったため、計算結果が示すような乾燥層が実際に生じたとしても、その層だけを体積含水率のより高い他の層から厳密に切り離して分割することは困難である。計算結果が示すように乾燥層が生じたと仮定した場合、これは次のように説明できる。除塩用水灌水後、十分な土壌溶液が残存している間は、捕集材と供試土間の土壌溶液移動の連続性が保たれていたと考えられる。本実験で用いた捕集材(マサ土)は、供試土に使用された豊浦標準砂に比べ、低水分領域でのマトリックポテンシャルがより低いため、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。従って、ポテンシャル勾配は徐々に平衡状態に近づくが、その時点で供試土側、特に捕集材と接している土壌面付近の体積含水率は、捕集材に比べ非常に小さくなる。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。図 4-2においても、計算では同様の深さの塩分量が小さくなっているが、これは土壌溶液が吸引されることによって溶質も同時に移動した結果であろう。

第 2 章で述べたように、粘土を含む供試土に捕集材としてガーゼを用いた場合、

捕集効率が極端に小さくなるのが既に分かっている。Dehydration 法の除塩効率を高めるために、水分保持能の高い材質を捕集材として利用することは重要であるが、土壌溶液の毛管現象を維持し、除塩効率を上げるためには、供試土と捕集材の水分保持特性を考慮して、捕集材を決める必要があると考えられる。

4-3-2. 供試土と捕集材の様々な組合せと除塩効率

前述したように、水分保持特性が異なる捕集材を用いた場合には、当然ながら除塩効率も異なる。ここでは表 4-1 に示した組合せのうち、実験を行っていない場合について数値計算を行い、除塩率を推定した。各 Case における実験結果および計算結果を表 4-2 に示した。なお前章の結論から、使用した数値モデルによる計算値は、概算値としては使用可能な範囲にあると判断し、ここでは実測値との比較に用いた。

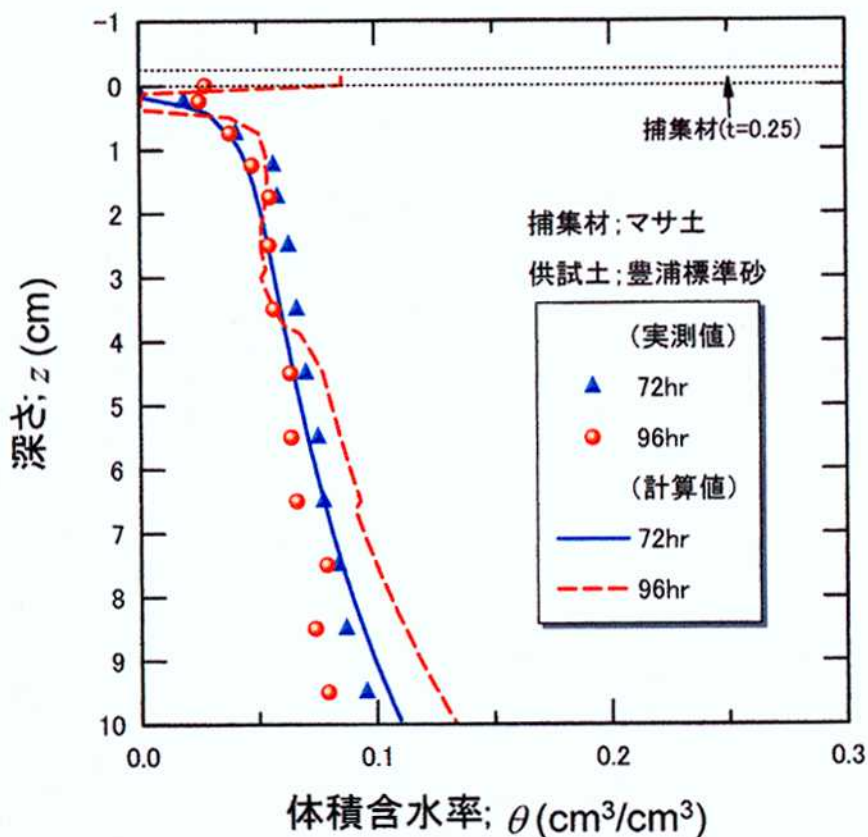


図 4-1 Case2 における経過時間別の体積含水率分布

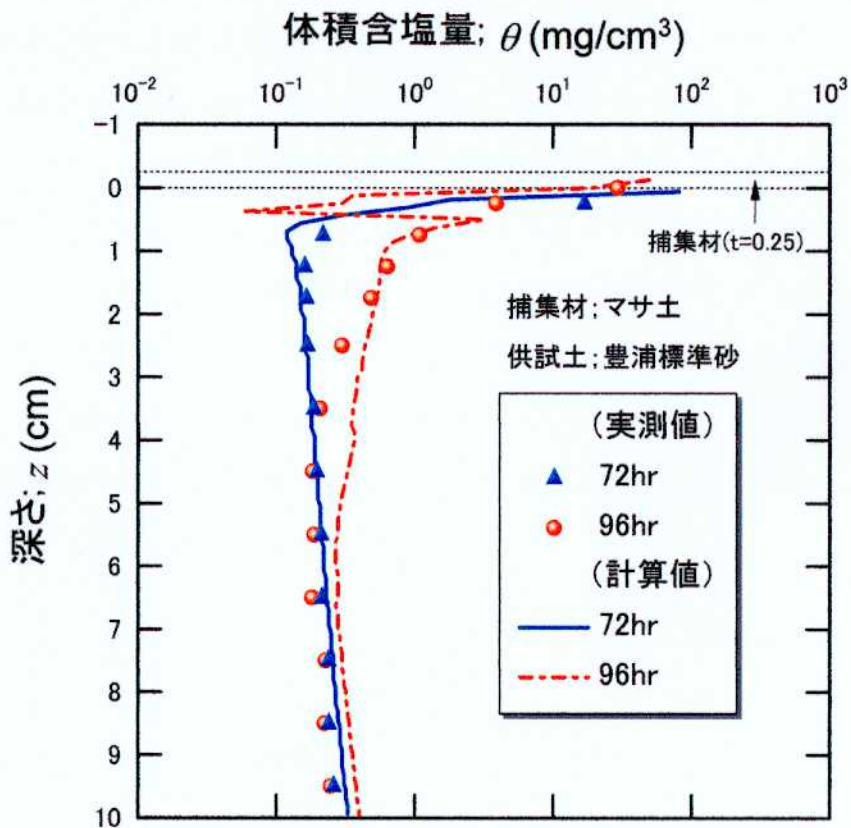


図 4-2 Case2 における経過時間別の体積含塩量分布

表 4-2 捕集材と供試土の組合せ別測定結果および計算結果

Case	供試土	捕集材	厚さ (cm)	捕集塩量 (mg)	単位面積あたり捕集量(mg/cm ²)	除塩率 (%)
1	標準砂	ガーゼ	0.15	67.47	6.11	47.9
(1)	"	"	"	105.05	9.52	74.7
2	標準砂	マサ土	0.25	84.18	7.62	61.0
(2)	"	"	"	95.83	8.68	69.5
(3)	標準砂	標準砂	0.25	9.12	0.83	6.5
4	マサ土	ガーゼ	0.15	9.31	0.84	7.7
(4)	"	"	"	6.27	0.57	5.2
(5)	マサ土	マサ土	0.25	83.97	7.61	65.9
(6)	マサ土	標準砂	0.25	3.01	0.27	2.4

番号に()のある Case は計算による推定結果を, その他は実測値を示す.

比較結果(表 4-2)を見ると, マサ土を捕集材として使用した場合, 供試土が豊浦標準砂の場合(Case2)には除塩率が最も高く, 供試土がマサ土の場合(Case5)も同様の結果となった. 一方, 豊浦標準砂を捕集材として使用した場合(Case3, Case6)はいずれの場合も低い除塩率となった. これらの結果を考察するために, まず本実験(Case2)の除塩過程における積算蒸発量の経時変化を図 4-3に示した. 約 3 時間経過時点付近で, 蒸発速度が急減していることが読み取れる. またその時間には実測されたデータはないが, 同様の時間に蒸発速度が減少していると推察できる. よって, 除塩過程開始から約 3 時間までが恒率蒸発期で, それ以降が減率蒸発期であるといえる.

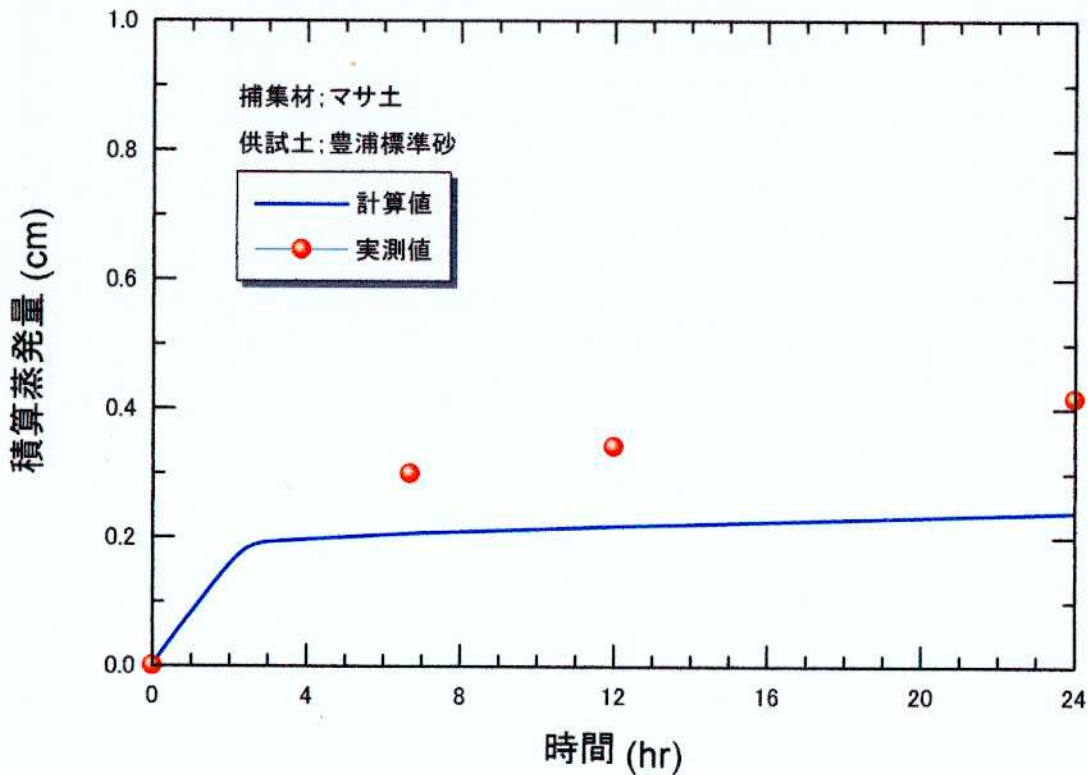


図 4-3 Case2 における除塩過程の積算蒸発量の経時変化

次に捕集材(マサ土)の体積含塩量と体積含水率の経時変化を図 4-4に示した. なお, 示したデータは数値計算によって得られた結果であり, 捕集材を厚さ 0.125cm で上層と下層に分割した場合の, 下層における計算結果を示している. 塩分量, 体積含水率ともに除塩過程開始から 3 時間までは高い値を示しているが, これは除塩用水灌水直後であり, 供試土壌表面に集積した塩類が溶出・移動したことおよび土

壤溶液が十分に蒸発・再分配されていない状態であることによるものである。3 時間経過後には塩分量は一旦低くなるが、その後徐々に増加している。桑畠ら(2001)は塩類集積が減率蒸発期に旺盛に行われると指摘しており、今回の計算結果と一致していることが分かる。この時捕集材の体積含水率は約 0.1 であり、以降漸減している。

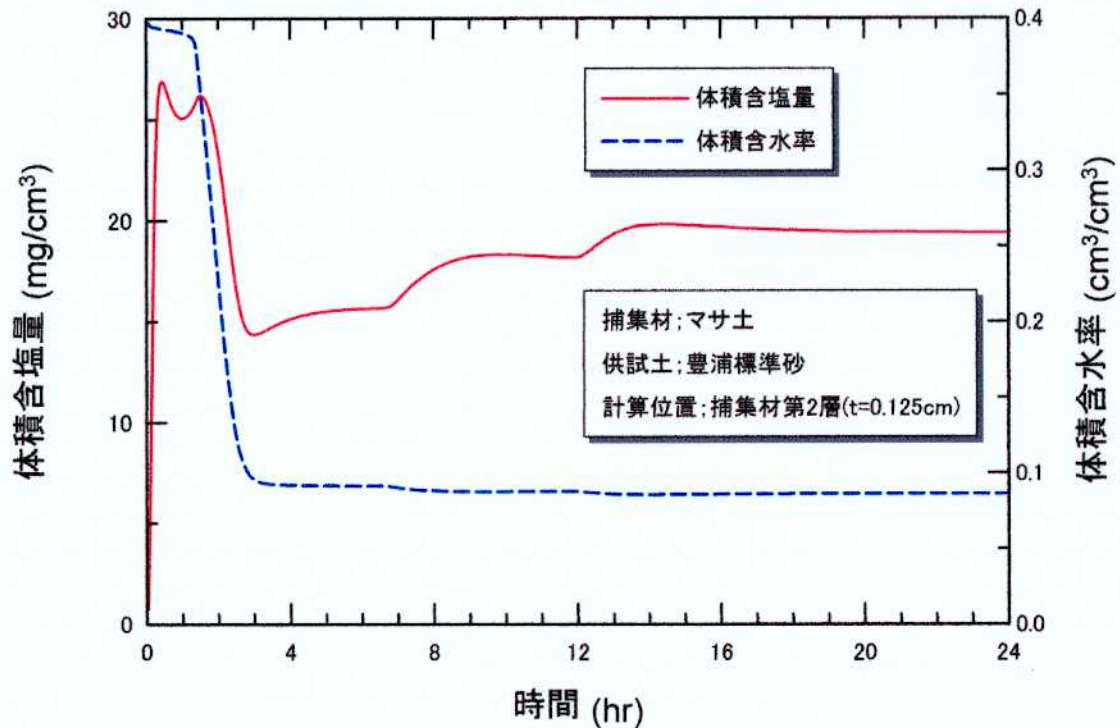


図 4-4 除塩過程における体積含塩量および体積含水率の経時変化(Case2)

ここで、捕集材のサクシオンを見るために、図 3-1を図 4-5にまとめて示した。体積含水率が 0.1 の時、サクシオンは豊浦標準砂、ガーゼ、マサ土の順に高くなっている。一方、不飽和透水係数はマサ土、ガーゼの順で小さくなっており、豊浦標準砂が最も大きいことが分かる。各捕集材を $\theta=0.1$ の時のサクシオンで表し、各 Case における除塩率を図 4-6に示した。

豊浦標準砂を捕集材として用いた場合、供試土が豊浦標準砂であってもマサ土であっても除塩効率が上がらないという計算結果が得られた。これは浸透ポテンシャルが極めて小さいとすると、 $\theta=0.1$ の時のマトリックポテンシャルが相対的に高く、供試土の土壤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、さらに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、供試土内の土壤溶液は、より下方へと再分配され、毛管上昇

がわずかに生じた場合でも捕集材まで到達できないことになる。捕集材がガーゼ、供試土が豊浦標準砂の場合は、捕集材のマトリックポテンシャルがより小さいため、捕集材中の水分が保たれるため、供試土と捕集材間の水と溶質の移動が比較的良好に行われたと推察される。一方で、捕集材がガーゼ、供試土がマサ土の場合は、マサ土のマトリックポテンシャルがガーゼに比べ非常に低いことから、捕集材の水分も供試土に吸引され、結果として溶質の移動も損なわれたのであろう。マサ土を捕集材として用いた場合は、供試土が豊浦標準砂とマサ土の両者いずれの場合も高い除塩率を示した。供試土が豊浦標準砂の場合(Case2)については前述したように、供試土と捕集材の境界付近の水分がより強く捕集材側に吸引されることで毛管上昇が妨げられたが、供試土がマサ土の場合は、よりスムーズに水と溶質の移動が行われたと推察できる。

以上のことから、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。

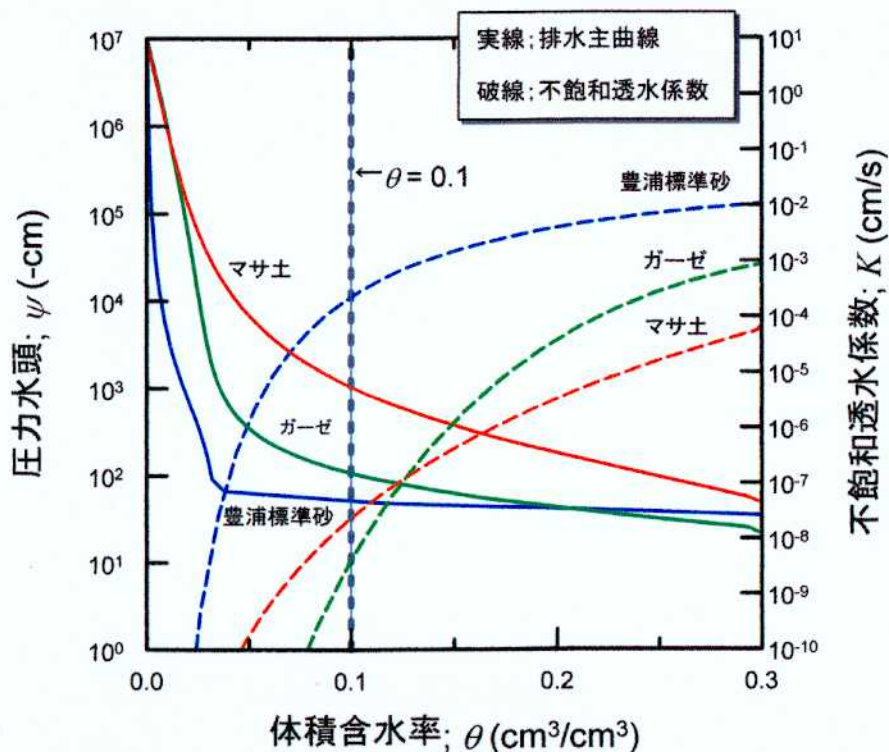


図 4-5 低水分領域における捕集材の水分保持特性と不飽和透水係数

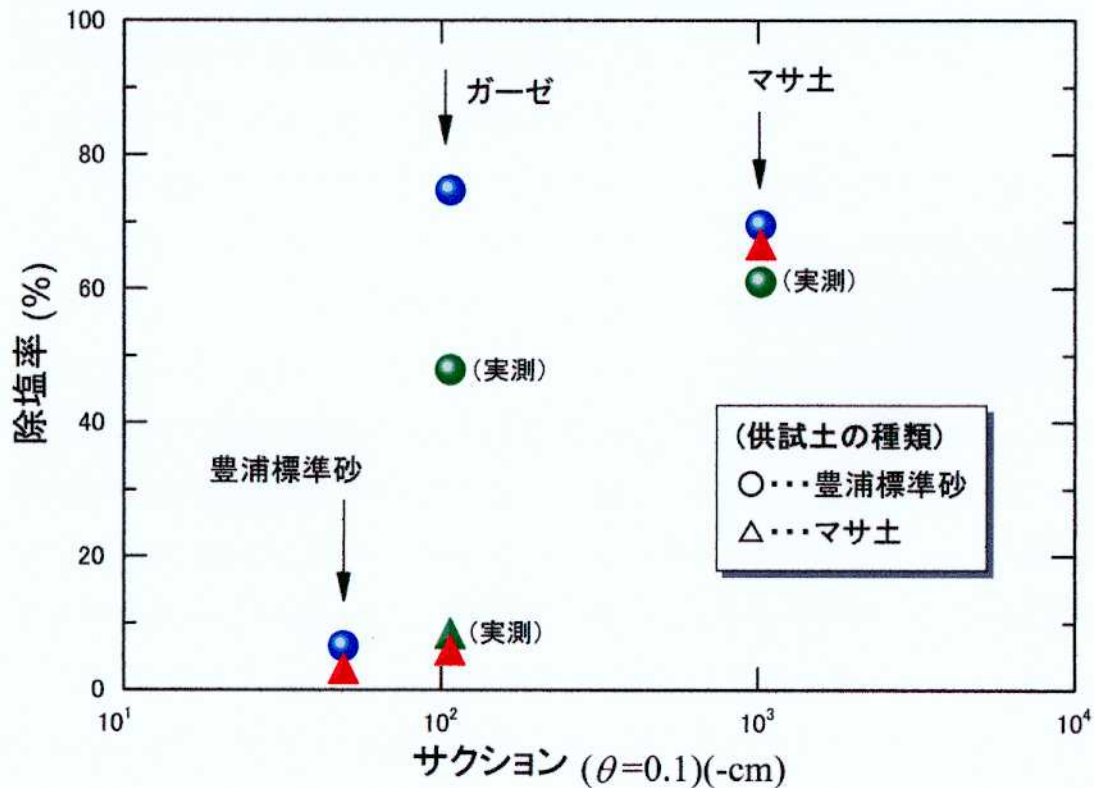


図 4-6 捕集材と供試土の組合せ別の除塩率

4-3-3. 土壌と繊維の物理構成と除塩効率

Dehydration 法では、捕集材の水分移動特性が除塩率に影響していると予想されることは先に述べたとおりであり、ここでは土壌と繊維の構成要素の違いに着目し、繊維の物理特性に影響を与える要素と水分移動特性および除塩率との関係についての考察を試みる。まず、土壌と繊維の水分移動に関わる要素について述べる。

土壌基質を構成する固相の主要な属性は土性(特に粘土の含量)、比表面積、そして構造(単粒状、塊状および団粒状)である。土性と比表面積は一定で、特定の土壌に対しては固有であるが、土壌構造は変わりやすい性質を持つ。一方、繊維の場合、繊維材質、繊維のより数、糸間隙、繊維間隙、ケバがその基質を決定づける主要な要素と考えられる。これらは土性に相当するものとして用いることができ、また繊維に対して比表面積の概念を取り入れることは可能である。土壌構造に相当する繊維の属性について考えた場合、繊維孔隙空間の幾何学的形状を示すもの、すなわち

糸によって囲まれた糸間隙の形状と糸とそれを構成する繊維の形状などが考えられるが、各繊維が完全に独立しているものとして扱うべきであり、土壤構造で区分されるような塊状および団粒状といった構造は考えにくい。

次に塩捕集効率を高めるために、捕集材に求められる状態を考えると、最も必要なことは、水分移動を妨げることのないように捕集シートがより長い時間湿潤状態にあることであろう。捕集シートと除塩対象土壤表面との密着性が保たれている場合、土壤溶液の毛管上昇を維持し、捕集材に塩類を捕集するためには、捕集材内部に土壤溶液の移動を妨げないだけの水分が保持されていなければならない。そのためには捕集材表面での蒸発を抑制、すなわち捕集材内部の毛管移動速度を抑え、同時に水蒸気通過抵抗を小さくすることが有効であると考えられる。これによって、減率蒸発期の蒸発速度を極力抑えられ、塩捕集効率を向上させることができると推察される。

Lyon ら(1971)によれば、シート状物質が乾燥する過程は速度定数が一定な恒率蒸発期と速度が変化する減率蒸発期に分けられ、その変曲点で臨界水分率が定義されている。山田(1985)によれば、シート内の水分毛管移動速度が大きな素材ほど、臨界水分率は小さくなり、また、綿素材は一般的に絹・ポリエステル等と比較して恒率蒸発期の蒸発速度が大きく、減率蒸発期の蒸発速度は小さい、と報告している。この理由として、綿のように濡れやすい親水性繊維では、恒率蒸発期において糸間隙、繊維間隙やケバでも蒸発が起こり、繊維自身が濡れない疎水性繊維よりも蒸発速度が大きくなること、また減率蒸発期においては、疎水性繊維では繊維表面で水分蒸発が起こるのに対し、親水性繊維では、水分が繊維内部に保持され、その結果疎水性繊維よりも蒸発速度が小さくなること、を挙げている。このことを土壤と対比させてみると、細かな土粒子を多く含み、保持される水分の多いマサ土では、比較的土粒子の粗い豊浦標準砂よりも減率蒸発期の蒸発速度が小さいことと似ているといえる。実験に用いた医療用ガーゼは綿製の紡績糸からなる織布であり、糸間隙は大きい(約0.8mm)、繊維間隙は比較的小さいと推察される。そのため、特に間隙面積の大きな糸間隙中の水分が蒸発した後の低水分領域におけるマトリックポテンシャルは図 4-5 に示したように、豊浦標準砂よりも低く、マサ土よりも高い値となったと考えられる。ガーゼのマトリックポテンシャルが豊浦標準砂よりも低い結果、ガーゼの減率蒸発期における蒸発速度についても豊浦標準砂よりも小さい値で推移したと推察され、より高い除塩率を得た要因のひとつと考えられる。

さらに、比表面積について考えると、ガーゼ、マサ土、豊浦標準砂の3つのうち、粘土を多く含むマサ土が最も大きいと容易に推察でき、またガーゼと豊浦標準砂では粒径の粗い豊浦標準砂の方が小さいと推察できる。そう考えると、除塩率と比表面積は負の相関関係が認められたことから(図 2-8)、それぞれを捕集材として用いた場合の除塩率の結果と一致する。

また、水蒸気通過抵抗について、金網ら(1994)は糸のより数が多い紡績糸からなる織布では、糸のより数の少ない絹・ポリエステルなどのフィラメント糸からなる織布よりも糸中の繊維間隙を水蒸気が通りやすく、また、紡績糸からなる織布は、糸から糸間隙に出ている毛羽が通気に影響を及ぼしており、フィラメント糸からなる織布よりも水蒸気通過抵抗は大きいとしている。ここでは土壌とガーゼの比較はできないが、水蒸気通過抵抗の小さな素材を用い、蒸発速度を抑制すれば除塩効率向上が期待できると考えられる。

以上から、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。また捕集材の厚さは、厚いほど水蒸気通過抵抗が大きくなり(山田, 1985)、また塩を捕集し得る空間の容量が増すが、作業効率を考慮しながら実用的な厚さを決定するのが望ましいであろう。

4-4. まとめ

これまでの研究において捕集材として多く用いられてきたガーゼの代わりに、土壌を用いた場合、水分移動特性の違いによって除塩効率が影響を受けることが分かった。特に供試土がマサ土のようにマトリックポテンシャルのより低い土性であっても、それと同等もしくはそれ以上に低いマトリックポテンシャルを有する素材を捕集材として用いることで除塩効率を高めることができる。また、供試土と捕集材の水分移動特性が大きく異なる場合は、どちらかに水分が強く吸引され、その結果除塩効率が下がる。従って、捕集材としては、供試土よりも極端にマトリックポテンシャルの低い材料ではなく、水・溶質移動が保たれる程度の材料が望ましいと考えられる。今後、捕集材の改良・開発の上では、土壌を何種類かに分級し、それぞれに適した素材を考案することが重要となるが、その際に土壌と捕集材の両者の水・溶質移動特性のバランスに着目することで、より効率的な検討が可能になるであろう。

また、捕集材に織布を用いる場合は、使用される繊維の親水性や糸間隙、繊維間隙、糸のより数等が除塩率に影響することが示唆された。

本章で行った実験は、塩類集積を再現した供試土を用いたため、供試土表面付近に多量の塩類が集積しており、このことが除塩率を高める一要因となった。最適な除塩用水量や灌水方法についてさらに研究を進めることで、下方に再分配された塩分の捕集効率を高めることが期待できる。