
Dehydration 法による塩類除去の効率性に関する研究

2001 年

桑島健也

博士論文

Dehydration 法による塩類除去の効率性に関する研究

筑波大学大学院

農学研究科

農林工学専攻

桑畠健也

第1章 緒論	1
1.1 本研究の意義と目的	1
1) なぜ、日本で沙漠研究なのか	1
2) 沙漠化の定義	2
3) 沙漠化が食糧生産に与える影響	3
1.2 塩類集積現象	6
1) 塩類土壌の特性	6
2) 現象発現要因	10
1.3 塩類集積抑制と除去	13
1) 塩類集積抑制対策	13
2) Leaching 法	16
3) Dehydration 法	18
第2章 DEHYDRATION 法と LEACHING 法との比較	19
2.1 目的	19
2.2 実験方法	19
1) 供試体の作成	19
2) 塩類集積供試体の作成	24
3) 塩類捕集シートの選定	25
4) 除塩実験の実施	25
5) 分割試料の塩類量および水分量の測定	27
2.3 実験結果および考察	28
1) 塩類集積供試体の特徴	28
2) 除塩用水量の比較	30
3) 除塩用水濃度の比較	34
4) 除塩用水量と濃度の関係	36
2.4 結論	38
第3章 DEHYDRATION 法の除塩効率向上	40
3.1 目的	40

3.2 実験方法.....	40
1) 供試体の作成.....	43
2) 除塩用水濃度の設定.....	46
3) 塩類捕集シートの選定.....	46
4) 除塩作業.....	46
5) 分割試料の含水量およびEC の測定.....	48
3.3 実験結果および考察.....	50
1) 除塩回数と除塩率.....	50
2) 除塩用水灌水量と除塩用水利用効率.....	54
3) 乾燥時間と塩捕集量の関係.....	59
3.4 結論.....	65
第4章 灌水装置と除塩効率.....	67
4.1 目的.....	67
4.2 実験方法.....	67
1) 供試体の作成.....	69
2) 灌水装置の作成.....	73
3) 塩類捕集シートの選定.....	73
4) 灌水流束の調整.....	77
5) 除塩実験の実施.....	77
6) 分割試料の含水量およびEC の測定.....	78
4.3 実験結果および考察.....	79
1) 灌水流束と除塩率の関係.....	79
2) 除塩処理後の含塩比と含水比分布.....	82
3) 初期含水比・含塩比と除塩率.....	86
4) 初期含水比と蒸発強度との関係.....	89
5) 孔密度と除塩率との関係.....	92
6) Dehydration 実験での溶質・水分挙動.....	97
4.4 結論.....	105
おわりに.....	107

(1) まとめ.....	107
(2) 除塩率向上のための条件.....	108
(3) 今後の展開.....	109
謝辞.....	110
参考文献.....	111

第 1 章 緒論

1.1 本研究の意義と目的

1) なぜ、日本で沙漠研究なのか

日本沙漠学会第 3 回沙漠工学講演会で、安部は、「日本でなぜ沙漠か」というテーマで、講演を行った(安部：1993).安部の論旨を要約すると、食糧供給地としての沙漠の重要性、日本としての世界に対する沙漠化対策への貢献の必要性、技術的フロンティアとしての可能性などが必要性の根拠とされていた。

安部の論旨を踏まえた上で、沙漠研究の日本での必要性を再整理する。

わが国の食糧自給率は、1997 年度、供給熱量ベースで、41%にすぎず、食糧の大部分を輸入に頼っている.そのため、常に、世界的な食糧の需給動向に配慮する必要がある.直接、沙漠化が進む地域からの食糧輸入はないにしても、これまで食糧を自給していた地域が沙漠化によって、食糧輸入を始めることは、世界的な食糧需給に影響を及ぼす.このことから、沙漠化の状況をモニタリングすることにより世界的な食糧需給動向への影響度を評価することが必要となる。

次に、モニタリングや評価を元に、沙漠化について積極的な提言を行う必要がある.わが国は、長期的食糧安定確保と、持続的な地球環境の保全の観点および諸外国からの要請などから、国際社会に対して沙漠化対策の提言を行っていく義務と責任を負っている.近年の国際社会では、地球環境問題を中心課題とした国際会議が頻繁に開催されている.2000 年度に限定しても、第 2 回世界水フォーラム(3 月、オランダ・ハーグ開催)や、COP6 気候変動枠組条約第六回締約国会議(11 月、オランダ・ハーグ開催)などでも、沙漠化は重要テーマのひとつとして取り上げられており、日本国内に、沙漠を有しないことで会議への参加が免除されるということはなく、むしろ、沙漠化に関係する諸国から、経済大国日本に対して、資金的・技術的協力や積極的なリーダーシップが常に求められている.沙漠化対策の提言にあたっては、提言に沙漠化に対する実情に対する深い理解と科学的知見を背

景とする説得力を有することが求められており、そうした説得力を有しなければ沙漠化に悩む国々から提言は受け入れられない。

また、わが国の農林業技術についての研究の蓄積は厚く、この蓄積を、世界の共有資産として活かしていくことも日本に課せられた責務である。しかし、わが国の農林業研究は、主に日本の気象条件、つまり年間降水量平均が約 1600mm という環境条件での技術研究が進められてきたため、乾燥地域・半乾燥地域の農林業の分析、技術支援に直接応用するには困難がある。これらの蓄積した技術資源を活かすためにも、乾燥地域特有の現象についての知見の蓄積が求められている。

近年、政府や NGO をはじめ、沙漠化防止のため援助活動も盛んになりつつある。こうした、援助活動の計画や成果を評価する上でも、沙漠化についての知見の蓄積は必要である。特に財政事情が厳しい今日、ODA や一部国庫費用補助を行っている NGO による沙漠化防止事業や植林事業については、これまで以上に、費用対効果を高めることが望まれている。

以上の観点から、沙漠および沙漠化についての研究は、より積極的にすすめるべきであり、今後さらなる資金と人材の投与が必要な分野といえよう。

2) 沙漠化の定義

ここまで、沙漠化というタームを利用して論を展開してきたが、沙漠化現象の示す範囲は大きく、ともすれば論者によって、沙漠化の強調点の違いから定義がまちまちの場合がある。また、本研究は、沙漠そのものの研究というより、乾燥地・半乾燥地での沙漠化を対象領域としていることから、改めて沙漠化を定義する。主に沙漠化の定義は、これまで国際機関によって発表されてきている。

近年、最も広範囲に引用されているのが、1992 年国連環境開発会議で提唱された定義である。「沙漠化とは、乾燥、半乾燥、乾性半湿潤地域において気候変動、人間活動等、様々な要因に起因して起こる土地の劣化である」(UNCED、アジェンダ 21、第 12 章：1992)。この定義に従えば、沙漠化とは土地の劣化を示すことになる。土地の劣化とは具体的には、風食・水食・物理的劣化・化学的劣化・人間活動による劣化を指す。本研究では、それらの土地劣化のなかでも、主として灌漑や森林伐採等の人為によって引き起こされる化学的・物理的劣化の一形態である塩類集積や土地の塩類化のメカニズムとその技術的対応の研究を目的とする。

3) 沙漠化が食糧生産に与える影響

本研究では、多くの環境問題の中でも沙漠化について、また、沙漠化現象の中でも、人為を起源とする塩類集積に研究の目的を設定した。このことは、沙漠化に伴う塩類集積現象が、世界の食糧生産に及ぼす影響が大きいと考えられたためである。この仮説の背景となった具体的な事実について、図 1-1 に示した、世界全体の食糧生産をめぐる歴史と現状を概観することで確認する。

世界の食糧生産量は、1961 年を 100 とすると、1997 年に 238 と飛躍的な増大をとげた（FAO「FAOSAT」）。この間の食糧増産は、主として農地の単位面積当り収穫量（以下、「単収」と称す）の増大によってもたらされた。単収の増大要因としては、新品種の開発・導入や、肥料の投入量増、及び灌漑の導入などが原因とされる。例えば、中国では、穀物の単収が、1950 年に 1.04t/ha が、1995 年には 4.06 t/ha に増加している。

第二次世界大戦後の食糧生産量は、単収増に支えられて、増加傾向にあるものの、1 人当りの耕地面積は、1961 年に、22 アール/人であったが、1997 年で 13 アール/人まで減少している（FAO[FAOSTAT]）。また、世界的な人口増加と、経済発展による肉類やアルコール飲料消費の増大は、穀物需要をさらに押し上げている。

現在、わが国は、世界第 2 位の経済力を有し、また通商国家としての物流能力を有することから、食糧の輸入が安価でかつ円滑に行なわれている。そのため、現状において、食糧輸入については、量や質、価格など、国民生活に支障を来たすということはない恵まれた状況にある。しかし、今後、世界人口の約 4 分の 1 を占めるといわれる中国の穀物需要が、経済発展とともに増大し、穀物輸入国として台頭しつつあることなどから、食糧輸入をめぐる状況は中長期的には厳しさを増していくものと考えられる。

灌漑の導入や、化学肥料の多投は単収増に貢献したが、一方で収穫量増大を追及するあまり、不適切な灌漑管理が行われると、図 1-1 に示すとおり、塩類の集積を招き土壌が劣化する危険性も高くなる。特に乾燥地域・半乾燥地域ではそのリスクは高い。乾燥地に限らず、世界の灌漑農地面積の 1/10 に当る、25 万 km² の灌漑農地が、食糧の再生産が不可能となる塩類化の影響を受け、ウォーターギング

によって影響を受けた農地を合わせると全体で 45 万 km^2 の農地が影響を受けている (Kendall and Pimentel 1994 ; Seckler 1996 ; FAO 1993). 1980 年代後半には、米国で 23% の灌漑農地、インドが 17%、中国は 15% が塩害を受けている (F. Ghassemi et al ; 1995). 現在では、世界の農地の約 15% は灌漑が行われ、世界の食糧生産の約 4 割が灌漑農地から生み出されている (FAO ; 1988) ことから、生産力の高い灌漑農業が塩類集積によって、劣化することは、世界の食糧需給にとって大きな脅威といえる. 乾燥地域に限定すると農耕地のうち、灌漑が行われている農地は全体の 6% であり、降雨依存農地は 9%、放牧地は 84% である. しかし、今後食糧増産を考えるならば、灌漑地域を広げていく必要があり、より塩類集積のリスクが高い乾燥地域では、なるべくコストのかからない塩類集積対応技術の必要性が高まっている. また、灌漑による塩類集積のみならず、森林伐採等による地下水の上昇を起源とする、塩類の集積も重大な問題である. オーストラリアでは、塩害を受けている面積は、17 万 km^2 に達している (F. Massoud ; 1977). 特に、国内の 40% の小麦を生産する西オーストラリアの降雨依存農地は、塩類集積によって、44 万 ha 以上が荒廃していると言われている (山口 : 1994).

以上のように、乾燥地域の不適切な灌漑や森林伐採による地下水位の上昇に伴う土壌の塩類化や、塩類集積の発生は、世界の食糧生産に及ぼす影響が大きいと考えられたため、本研究では、塩類集積への技術的対応策の検討に焦点を絞った.

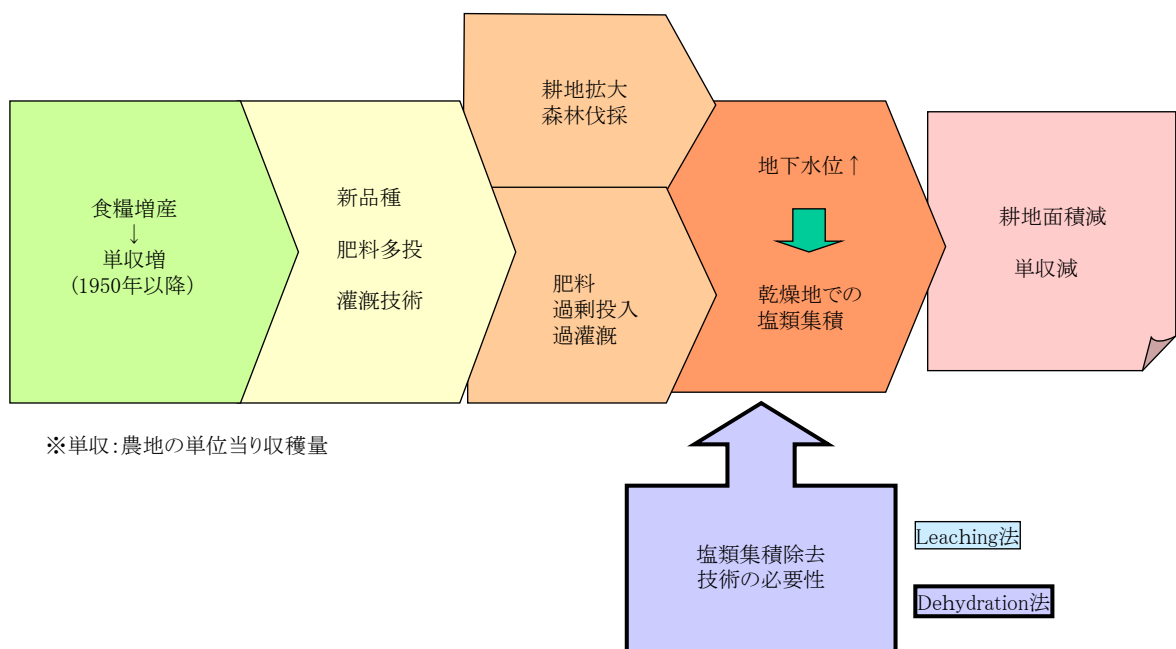


図 1-1 乾燥地・塩類集積発生の影響と背景

1.2 塩類集積現象

1) 塩類土壌の特性

土壌断面に、特に植物の生産に関係する表層から根圏域にかけて、植物の成長を阻害する量以上の塩が存在する土壌を塩類土壌という。塩類土壌のすべてが塩類集積現象を起こしているとは言えないが、塩類集積現象を起こしている土壌は、塩類土壌であるといえる。塩類土壌は、自然条件下で起こるものと、主に灌漑や、森林伐採など、人為によって発生するものに分類できる。塩類土壌の評価にあたっては、電気伝導度(EC)で表される土中の塩類量に加えて、土壌の物理性、化学性への影響が他のイオンに比べて大きいナトリウム吸着比(SAR)の二つの指標で評価されることが多い。図 1-2 に示すように、アメリカ合衆国塩類研究所(U.S. Salinity Laboratory)の分類では、ECe(水を加えてペースト状になった土壌資料からの抽出溶液の電導度)で、4dS/m を塩類土壌と非塩類土壌の境界値としている。加えて、ECe=4dS/m かつ SAR=13 以上の土壌を、塩類・ソーダ質土壌と定義している。同じ ECe 値でも、SAR 値が高くなるほど、植物の生育への影響度が高くなる ECe>14dS/m では、ほぼすべての植物が生育不可能となる。実際の塩類集積土壌の特性を確認するため、山本(1988)によるイラン国の塩類土壌の分析データを表 1-1 に示した。表 1-1 から、この塩類土壌は、表層から 2.5m の EC 値が 25.6~66.3dS/m であり、ほぼ全断面に渡って植物の生育が不可能となっている。表 1-1 の塩類土壌は、灌漑によって塩類化した土壌であり、土壌表層に近づくにつれ、EC 値が急激に上昇していることからみて、塩類集積を起こしているとみなせる。表 1-1 の場合は、地下水位が 2.5m 地点に存在していたため、このような塩類分布となったが、地下水位の高低、あるいは有無によって、塩類土壌断面の EC 値分布の形状は変わってくる。図 1-3 に示した、松本(1988)のイラク・クージェスタン州の灌漑地の地下水位と土壌断面の塩類集積の調査結果によれば、地下水位の高低で比べると、地下水位の低い方が、土壌塩類濃度が低く、また土壌表層の塩類集積も小さい。さらに、地下に砂礫層が存在する土壌断面では、深さ 140cm まで、ECe<4dS/m であることから、非塩類土壌であるといえる。

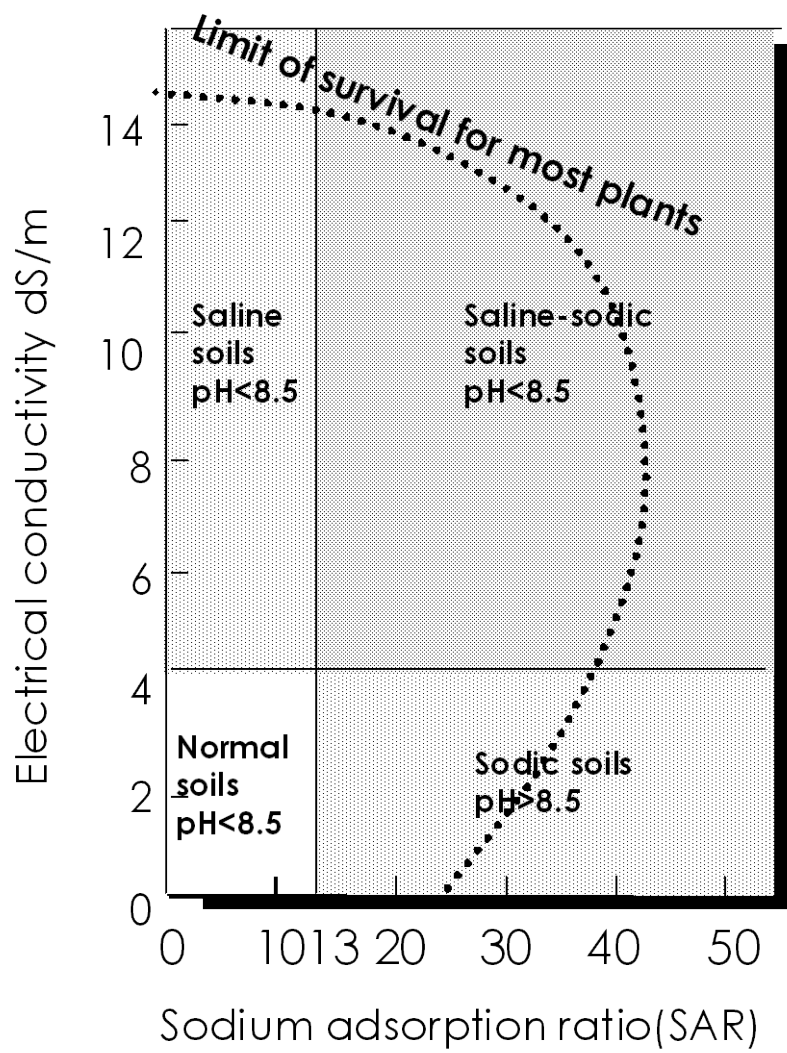


図 1-2 米国塩類研究所(U.S. Salinity Laboratory)による塩類土壌・ソーダ質土壌分類ダイヤグラム

表 1-1 塩類土壌の粒径分析と陽イオン組成(山本：1998)

塩類土壌の陽イオン組成

深さ(m)	EC(1:5) dS/m	pH	Na+ meq/100g	Ca ²⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g
0.0～0.2	66.3	8.7	436.133	35.835	1.099	0.058
0.5～1.5	29.1	8.5	237.876	7.453	0.41	0.058
1.6～2.5	25.6	8.8	124.498	10.985	0.347	0.058

イラン国農業研究教育普及機構Rudasht試験場
地下水位2.5m

塩類土壌の粒径分析

深さ(m)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	含水比 (%)
0.0～0.2	8.8	42.0	49.2	8.58
0.5～1.5	15	46.7	38.3	4.28
1.6～2.5	20.7	42.0	37.3	4.06

イラン国農業研究教育普及機構Rudasht試験場
地下水位2.5m

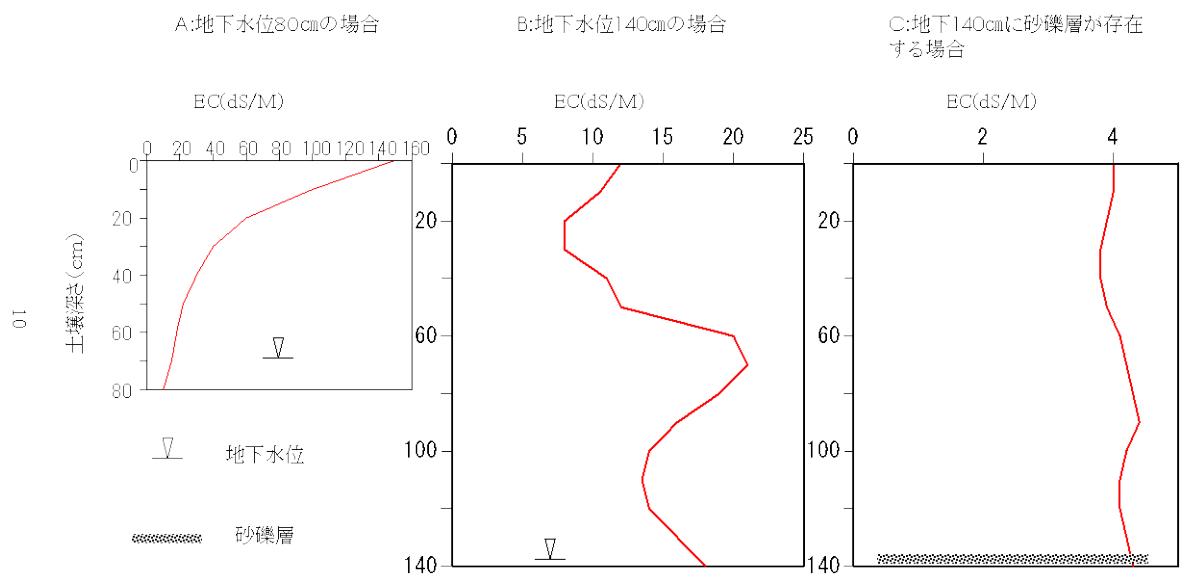


図1-3 乾燥地の地下水位と塩集積の様相(松本:1988)

図 1-3 乾燥地の地下水位と塩集積の様相(松本 : 1988)

2) 現象発現要因

塩類集積は、土壌内の塩類を含む溶液が土壌表面に移動し、溶媒である水が蒸発して溶質の塩類が土壌表層に集積する現象である。土壌表層に塩類が集積する現象は、種々の要因が複合的に作用してもたらされる。以下に、代表的な要因を列記した。

i) 少ない降水量、多い蒸発散量

塩類集積が発生する地域は、一部湿潤地域も含まれるが、その殆どが乾燥地域に分布している。このことは乾燥地域の気象条件が、塩類集積を促す条件を基本的に有していることが原因となる。ここで、乾燥地域の定義を検討する。定義はいくつかあるが、UNEP(国連環境計画：1997)が乾燥度を判定するために用いている乾燥度指数(AI)を取り上げる。

乾燥度指数(AI)は、平均年間降水量(P)と可能蒸発散量(PET)の比(P/PET)で示される。UNEPによれば、 $AI > 0.65$ の地域では基本的に沙漠化の危険性を有しているという。ことに $0.50 > AI > 0.65$ の地域は乾性半湿潤地域と分類されているが、この地域も降雨の季節変動が大きいなど、条件次第では、沙漠化の可能性が高い。ツンドラ地帯のように、少ない年降水量に、少ない可能蒸発散量であれば、塩類が集積する危険性は少ないが、大きい可能蒸発散量をもつ地域では、毛管上昇が活発であることから、塩類集積は起こりやすい。一方、年間降水量が多く、可能蒸発散量が小さい、つまり $AI > 1.0$ の地域では、土壌中の塩分が常に溶脱されるため、塩類集積はほとんどおこらない。

わが国においても、ハウス内や干拓地などでは、ハウス内では降水が遮断されるため、年降水量が少なく、保温性が高いため、可能蒸発散量が多いことで塩類集積現象が発生することが報告されている。

ii) 土壌中の塩分の存在

わが国は、平均年間降水量が土壌からの年平均蒸発散量を常に上回るため、土中の塩類が常時溶脱状態にあり、仮に土壌中に塩類が存在していても、塩類の集積現象は発生しないが、平均年間降水量が、可能蒸発散を下回る地域では、土壌中の塩は、保持されたままであり、灌漑が繰り返される、あるいは、森林の伐採により地上からの蒸発散量が減少すると、地下水位が上昇し、塩類集積現象

が顕在化する危険性がある。特に、かつては海底であった地域、例えば、インド大陸などは、土壌中に多量の塩を含んでいるため、灌漑起源の塩類集積が頻発している。

わが国でも、干拓地では、もともと海水面下であったことから多量の塩を含むため、上記の条件を満たすため塩類の集積が発生することが報告されている。

iii) 灌漑水の不足・灌漑水質の悪化

灌漑水が十分に供給できないと、灌漑を契機として、毛管力によって上昇してきた塩分を洗い流すことができなくなり、灌漑ごとに、塩類の集積が進むことになる。また、灌漑水に含まれる塩類の濃度が高い場合には、灌漑水が塩類源となる。河川水を灌漑に利用する場合、上流での肥料や農薬の投入、上流の耕作地の塩分を溶解するなどして、下流に進むに従い灌漑用水中の塩類濃度は上昇する。地下水を利用する場合でも、地下水が地中の塩を溶解している、あるいは肥料や農薬の地下水帯への浸透などにより塩類濃度が高い場合もある。USDA(米国農務省)は灌漑水を塩源とする塩類集積を防ぐため、灌漑水質に関するの基準を設けており、25℃ 時の EC 値で 100～250 μ S/m が、塩類濃度障害が「低」、250～750 μ S/m まだが「中」、750～2250 μ S/m が「高」、2250 μ S/m 以上が「極高」と分類されている。

iv) 高い地下水位

地下水が高くなる要因としては、もともと自然条件として地下水位が高い場合もあるが、効率の悪い灌漑は地下水位を上昇させる。また、森林の破壊による蒸発散量の低下も地下水位上昇の要因の一つとなる。地下水位の上昇により、地表面から、地下水位まで、一定の含水率を有すると、地下水が供給源となって、土中水の鉛直上方への移動が促進される。

以上の要因を総合的に理解するために、塩類集積発生要因の相互関係を図 1-4 に図示した。この図から、塩類集積を起させないためには、溶脱作用を促進させ、集積作用を抑制することが必要である。ただし、溶脱作用を促進させるために多量の灌水を行なうことで地下水位の上昇を招くため、多量の灌水には十分な排水施設の整備が前提となる。

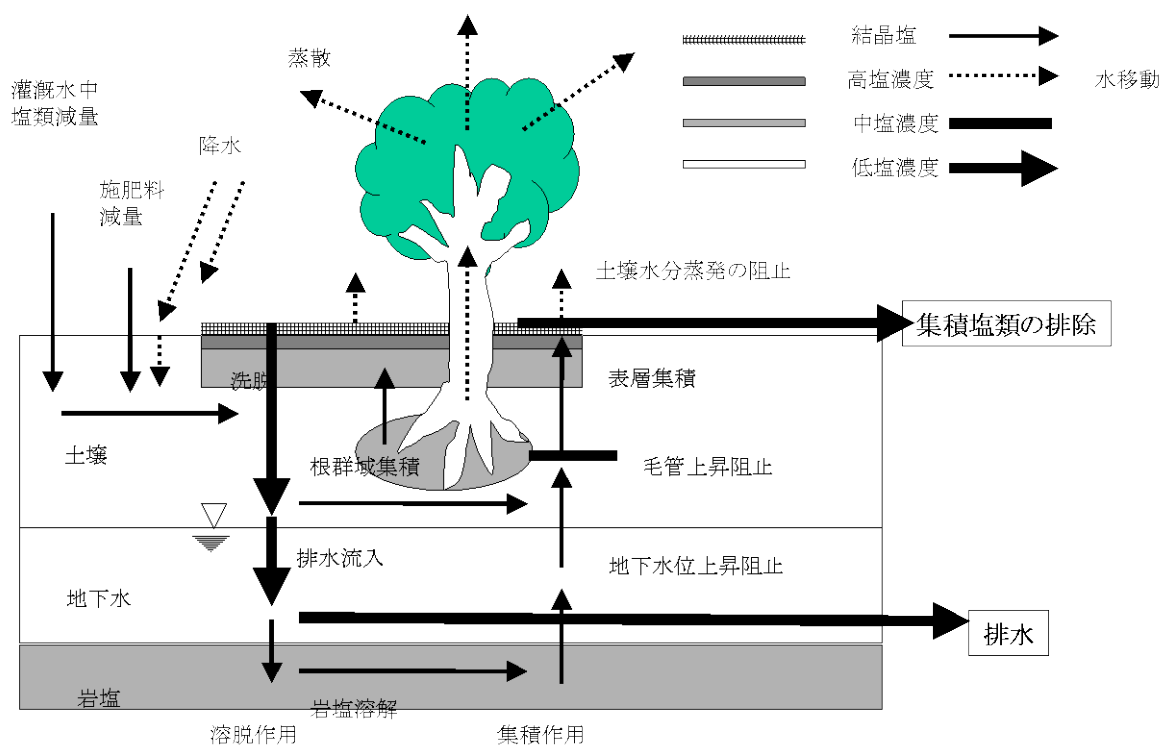


図 1-4 塩類の循環(安部)

1.3 塩類集積抑制と除去

1) 塩類集積抑制対策

前節では、塩類集積の発生のメカニズムについて概観したが、この結果を受けて、塩類集積の抑制対策を検討する。図 1-5 に示すように基本的には溶脱作用を促進させ、集積作用を抑制させることであるが、より詳細に塩類集積を抑制するためには、次に述べる方法を導入して総合的に取り組む必要がある。

i) 人為的な塩の投入の抑制

肥料や、灌漑水は人的な塩源となる。塩投入抑制のためには、施肥量の適正化と、灌漑水の塩類の低濃度化が必要である。単収の多い品種は、肥料の多投が条件である場合が多く、単収の多い品種の導入に伴い、肥料を多投する傾向が増大してきた。また、より多くの収穫量を得るために、肥料の過剰投与を行う傾向がある。農薬も同様に、過剰に投与された場合、やはり塩源となる可能性がある。肥料や農薬の多投を防ぐには、作物に見合った、適正投入量を投入することが必要となる。

灌漑水の塩低濃度化は、非常に困難が大きい。方法としては、蒸発法、イオン交換樹脂法、結晶化法、膜分離法などが考えられるがいずれも、コスト的には 1m^3 当たり 200 円～600 円程度かかり、現実的とは言えない。

ii) 塩類の溶脱作用の促進

塩類の溶脱とは、土中に存在する塩を鉛直下方方向へと移動させることである。そのために最も一般的な方法が、Leaching 法である。Leaching 法とは、土壌表面へ灌水し、土壌中の塩類を灌水に溶かし込み、塩類を含んだ灌水を下方へ排出させることによって、土壌中の塩類を排出させる方法である。多量で低塩濃度の灌漑水が確保可能な場合、Leaching 法は、土壌中の塩類除去には最も有効な方法である。しかし、Leaching 法から発生する排水が適切になされない場合、地下水位を高め、毛管上昇を促進する可能性には、留意しなくてはならない。また、溶脱作用の促進とは言えないが、機械的に土層の上層と下層を混入し入れ換える方法や、表層の土壌を取り除き新たな土壌を客土する換土も一つの方法といえる。

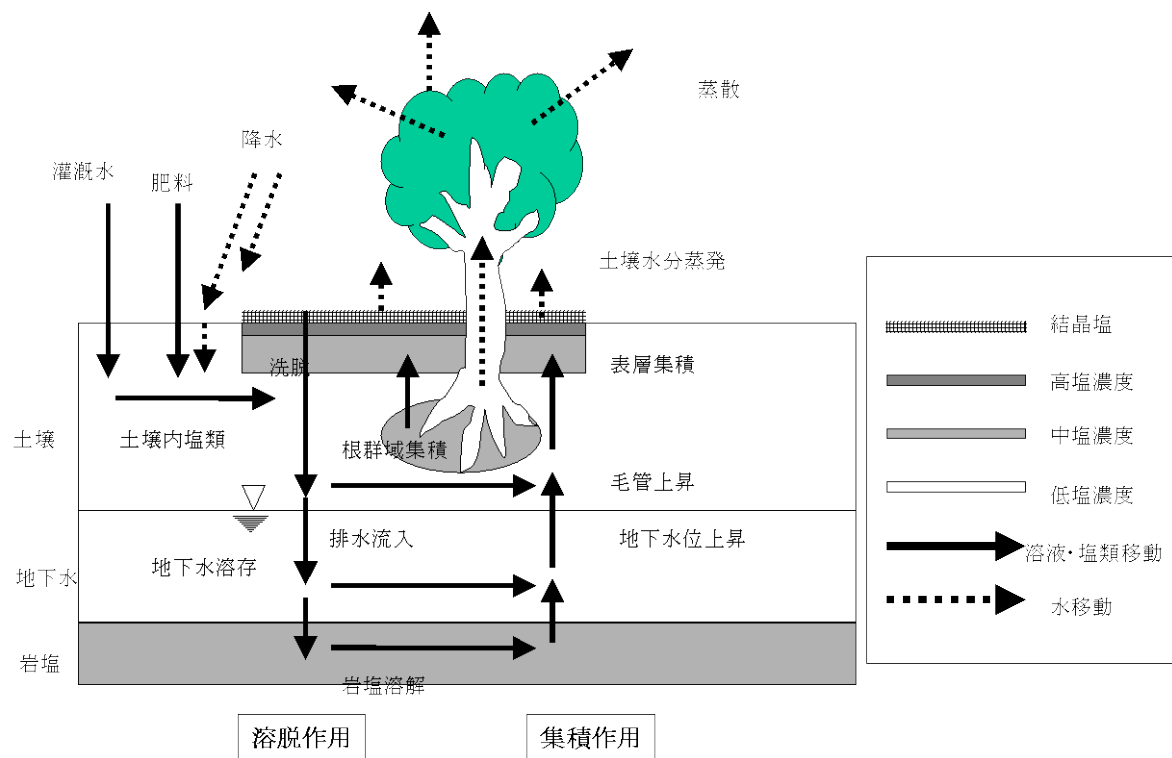


図 1-5 塩類集積抑制対策(安部：1998 を一部改変)

iii)塩類の集積作用の阻止

集積作用の阻止のためには、鉛直上向き方向の土壌溶液、および土壌表面からの蒸発を阻止することが必要である。裸地面からの蒸発は、直接的に塩類の集積を促すため、マルチやビニール被覆などによる蒸発抑制は効果が高い。また、光反射率の高いマルチは、地表面温度抑制効果もあり、さらなる塩類の集積抑制機能がある。

土壌溶液の上方への移動を阻止するには、物理的に上昇を阻止する方法としては、一定の地下に不透水性のシートを敷設する方法が考えられる。途中に透水性の低い砂質層を形成することで、毛管上昇を断つ方法もあるが、いずれの方法も大規模な土木工事が必要となること、また、費用に比較して耐用年数が短い事などの問題点がある。一般的に上昇を阻止するために、暗渠排水、機会排水、排水路システムなど、排水設備を整備する方法がある。地下水位の上昇が阻止されれば、地表面に到達する毛管上昇を抑制することにつながる。しかし、この方法も、大規模な土木工事が必要である。図 1-5 に示したとおり、根群域でも塩の集積が起る。植物は、蒸発散を促進させることで、根群域での塩類集積を促進させる。この対策としては、根群域周辺の土壌塩をドリップ灌漑等で排除する等が考えられるが、同時に、根群域外に排除された塩類をさらに、塩の循環系から排除しなければ、蒸発散が進むと再度塩が集積する。

これまでに述べた塩類集積の抑制対策以外にも、以下のような方法が実行されている。例えば、土壌内の塩類を半永久的に排除するための方法として、法排土と客土を行なう **Scraping** 法、表土を剥ぎ取り、塩類の集積した部分を洗い流す **Flushing** 法、クリーニングクロップ法と呼ばれる土中の塩を吸収しやすい植物を植えて、植物の刈り取りによって、植物が吸収した塩を排除する方法などがある。いずれの方法も問題があり、特にクリーニングクロップ法については、植物によって固定化できる塩の量には限界があり、再生産可能なレベルまで回復することは不可能である。やはり有効性が大きいのが **Leaching** 法であり、塩性排水の処理さえ適切に行なわれれば、系外への塩排出効果は大きい。

塩類集積の抑制には、塩類集積の段階に応じて様々な方法が考えられうる。敢えて分類するなら、①人為的な塩の投入の抑制、③塩類の集積作用の阻止は、集積が顕在化する以前に予防的に取り組むべき方法であり、②塩類の溶脱作用の促

進は、塩類の集積が顕在化した以降の方法とみなすことができる。

2) Leaching 法

集積した塩類を除去するため種々の除塩法が考案され、実践されてきた。代表的な除塩技術としては、Scraping 法、Flushing 法、Leaching 法(FAO、1988) 等がある。なかでも、これまで幅広く研究及び実践されてきたのは Leaching 法であり、効率的技術システムとして完成度も高い(Tanji、K. K. 1990、鈴木清、1978)。

Leaching 法の原理は、図 1-6 に示すとおり、土壌表面からの多量の灌水により、重力によって集積塩類を溶かし、土壌溶液を鉛直下方向へ溶脱させ、排水施設によって土壌系外へ除去する手法である。一般的に、Leaching 法によって土壌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、除塩対象土壌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)。なお、本論で述べる Leaching 法は、地表灌漑による Leaching 法を想定している。地表灌漑による Leaching 法には、連続灌漑法と間断灌漑法があり、後者が前者に比べて優れている(Hoffman、1980)。Leaching 法には、散水灌漑や、畝間灌漑による方法もあり、特に散水灌漑は、土壌中の塩類を溶脱させる能力が地表灌漑に比べて高い。ただし、風の強い日が多く、蒸発散量の多い地域にはふさわしくなく、加えてエネルギーや初期投資コストがかかるといった特徴もある(Tanji et al. 1990)。

しかし、Leaching 法は、低塩濃度の水の確保、排水システムの設置など、高度な灌漑排水技術を必要とする。乾燥地では、低塩濃度の水の確保は難しい、ことに河川水や湖沼水などを利用している地域では下流にいくほど、塩濃度が上昇する。また、コスト面から見ても、高度な土地利用が行われる耕地でのみ導入可能な技術といえる。系外に排出された塩性排水の処理も、特に海から離れた内陸部では問題となる。

塩類集積状態

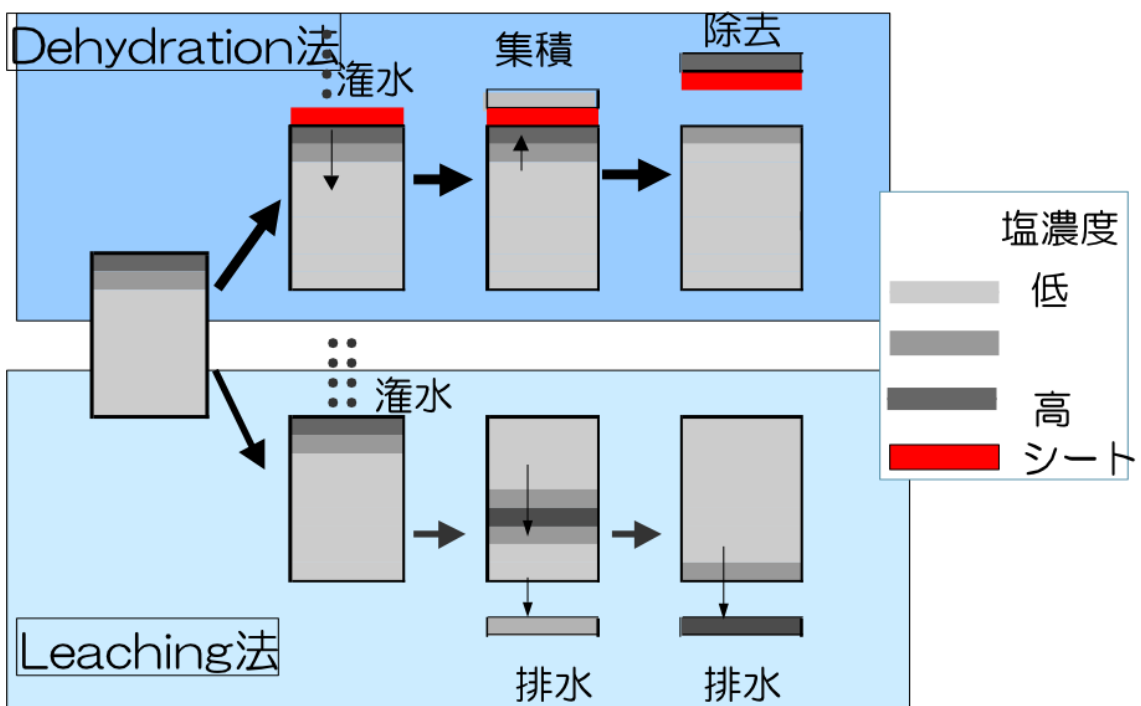


図 1-6 Leaching 法と Dehydration 法

3) Dehydration 法

Leaching 法の持つ、さらに合理的且つ効率的な除塩方法として、安部らは「Dehydration 法」を提案している。Dehydration 法と Leaching 法の除塩概念の相違について図 1-6 にとりまとめた。Dehydration 法は、乾燥地の強力な蒸発力による土壌溶液の上昇移動を利用する除塩方法である。まず、塩類集積を起こした土壌の表面にガーゼなどの透水性のシートを敷き、シート上から土壌表層に集積した塩類の溶解に必要な少量の水を灌水する。灌水した水は、土層に浸潤しながらその塩類を溶解し、溶液となって下方へ浸潤するが、灌水量が少量なので再分配深は深くない。シート表面で蒸発が始まると、水分ポテンシャル勾配や毛管上昇によって上向きに溶液移動が起る。シート上まで上昇した溶液は水分の蒸発に従い、塩類が濃縮し結晶化していく。結晶化した塩類を含む乾燥したシートを取り除くことによって土中の塩類が除去できる。以上の除塩過程から、Dehydration 法について、イ) 浸潤速度と毛管上昇速度を考慮した最適除塩用水量、ロ) 除塩効果の見込める除塩用水濃度、ハ) 土壌中の塩類を効果的に溶解させる灌漑方法、などの検討が必要となる。

第 2 章 Dehydration 法と Leaching 法との比較

2.1 目的

本章では、乾燥・半乾燥地域の環境条件を活かした案化でコスト負担の少ない、新しい発想に基づく除塩法として「Dehydration 法」を提案し、その特徴ならびに有利性を Leaching 法との比較を通じて検討する。具体的には、実験室レベルで、塩類集積の状態を再現した試料を元に、Leachig と Dehydration の処理を行った。実験の過程を通じて、Dehydration の手法や手順の確立も、実験の目的とした。

2.2 実験方法

本実験の手順を図 2-1 に示した。実験は、供試体の作成、塩類集積試料の作成、除塩実験、データ収集・処理の四段階に分けられる。本実験では、環境条件を乾燥地に設定したため、蒸散による水の損失が多であることが予想されること、用いる供試体が小型であるので散水灌漑すると灌水量にばらつきが生じ易いこと、等の理由から比較の対象として地表灌漑方式による Leaching 法を選定した。なお、本実験は Dehydration 法のカラムレベルの解析および Leaching 法との比較検討を通して、塩類の移流分散の変化を追うことを目的とし、実験結果の明確な相違を得るためにシンプルな実験条件を設定した。

1) 供試体の作成

実験カラムの断面を図 2-2 に、また、供試体の構成図を図 2-3 に示した。カラムは内径 90mm、高さ 125mm のアクリル製円筒 8 個をテープで繋ぎ合わせ、底部には濾紙(東洋濾紙社製 2 種、直径 11.0cm)とランダムに孔をあけたアクリル製多孔板(直径 10.0cm)を敷いた。このカラムに豊浦標準砂を充填した。充填密度は細密と最疎の平均値とした。標準砂の物理性、カラムへの充填密度等を表 2-1

に示した.

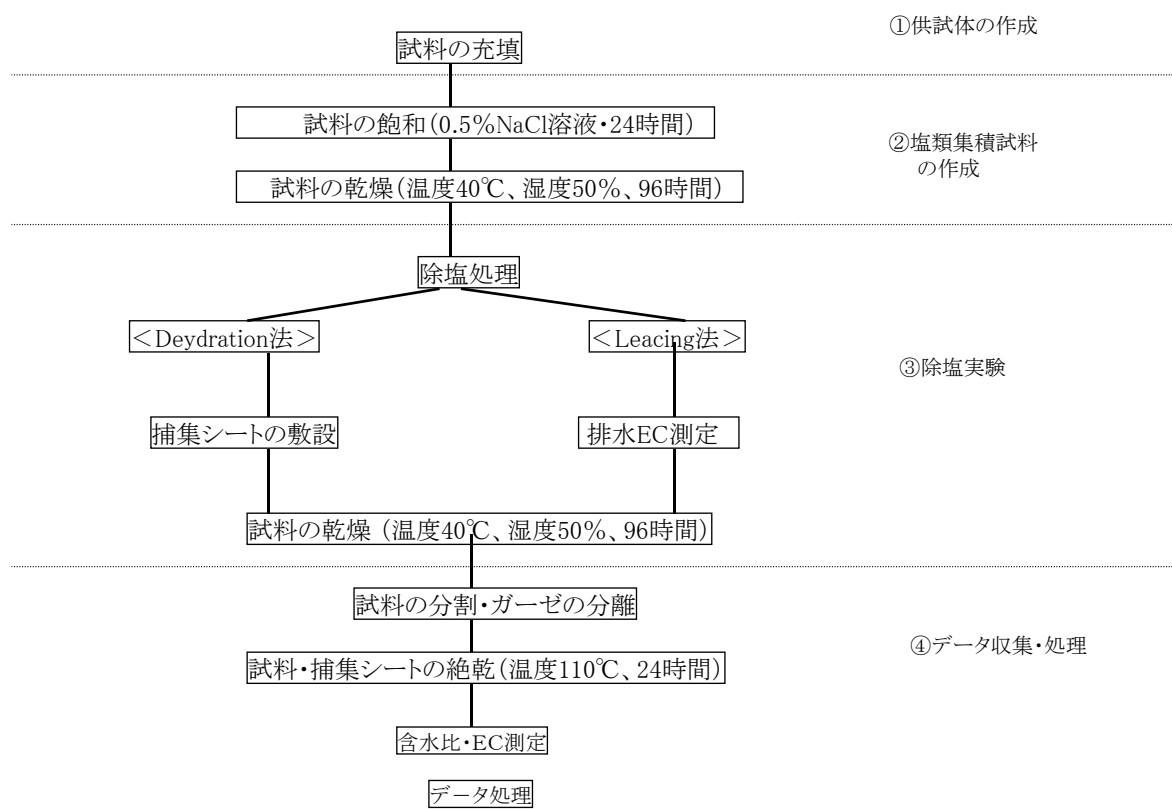
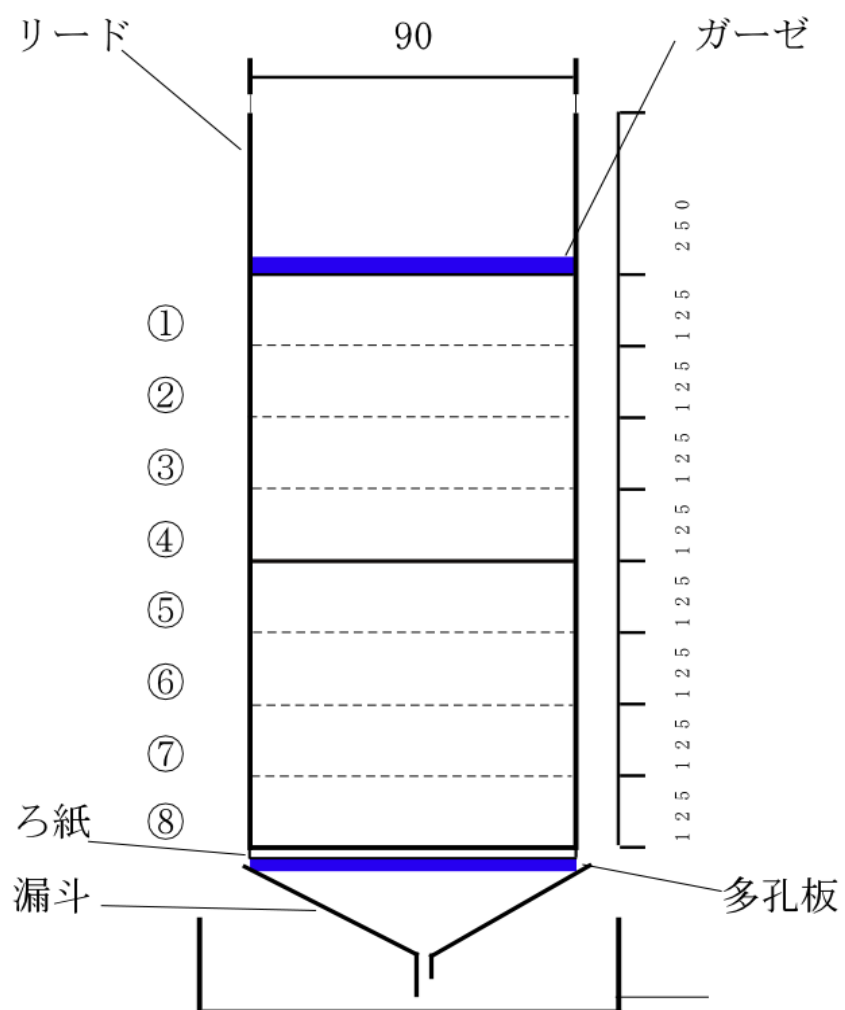


図 2-1 実験の手順



①～⑧は、分割土壌区番号

図 2-2 実験カラム断面(単位 mm)

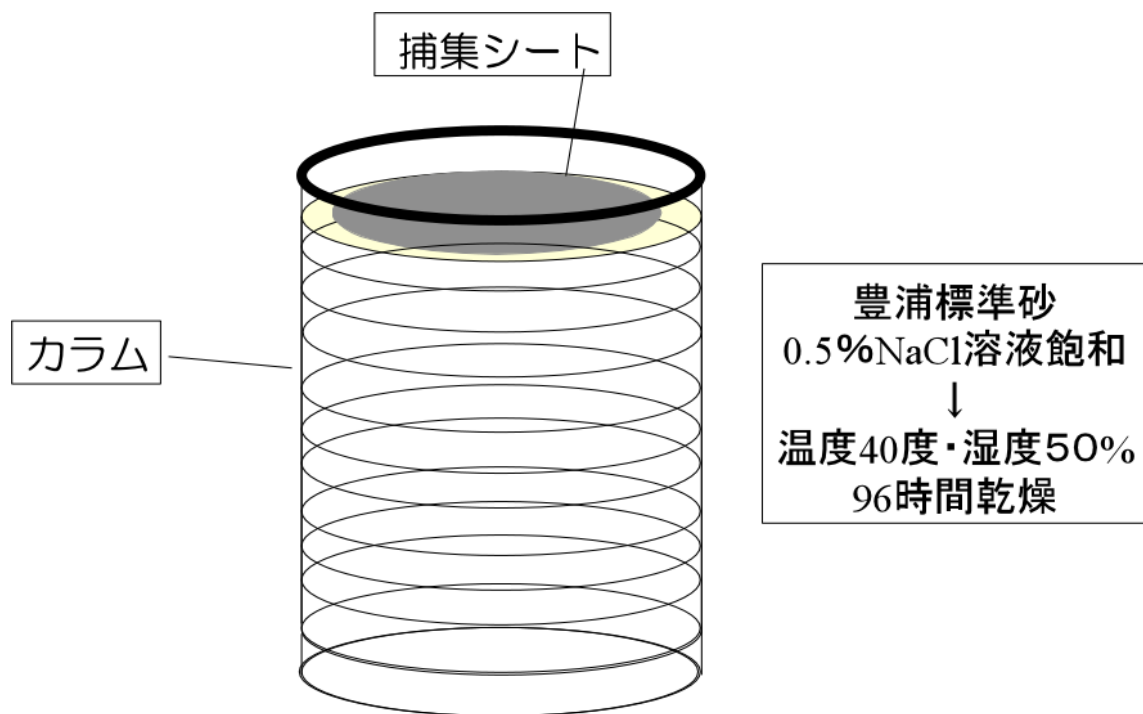


図 2-3 供試体構成図

表 2-1 標準砂の物理性、カラムへの充填密度

< 豊浦標準砂 >		
土粒子の単位体積質量	(g/cm ³)	2.63
飽和透水係数	(cm/s)	2.1X10 ⁻²
粒度組成		100～420 μ mの砂分100%
< 供試体 >		
供試体の充填質量	(g)	970.9
供試体の土柱体積	(cm ³)	635.9
供試体の単位体積質量	(g/cm ³)	1.526
間隙率	(%)	42
間隙体積	(cm ³)	267.1

2) 塩類集積供試体の作成

豊浦標準砂を充填したカラムを 0.5%NaCl 溶液中に 24 時間以上静置し、浸潤飽和させたものを飽和供試体とした。塩類を NaCl 溶液で代表させたのは、本供試土は吸着性がない砂質土であるため、NaCl は代表的な集積塩類であるため、塩類量の測定に電気伝導度を用いるので、一価イオン一種類であるほうが容易に置換が行えるため、の三点の理由による。塩類濃度を 0.5%としたのは、小麦が 10% 減収となる土壤塩類濃度が 0.5%であるというデータに基づいている (FAO/UNESCO、1973)。浸潤飽和の時間は供試体に十分溶液を浸透させるため、24 時間とした。

飽和供試体を乾球温度 40℃、湿球温度 30.3℃、相対湿度 50%、飽差 3.92hPa の乾燥条件に設定した恒温恒湿槽(プログラム低温度恒温恒湿槽、株式会社二葉科学製 GLMP-6255)内に 96 時間静置し、土壤表層に NaCl を集積させた。供試体側面への熱の影響を緩和させる為にカラム側面に発泡スチロールを二重に巻きつけて断熱した。

恒温恒湿槽内の乾燥環境条件は、オーストラリア西部の乾燥地域の夏季を模した裸地からの蒸発量が 13mm/day(4745mm/year) となる環境に設定した。乾燥時間は、土壤表層と塩類捕集シートとの間に液状水の移動が無くなったとみなせるのに十分な時間として、96 時間と設定した。

この土壤表層に塩類を集積させた供試体をモデル塩類集積試料と称した。

3) 塩類捕集シートの選定

Dehydration 法を用いて土壌内に集積した塩類を捕集するために、塩類捕集材を土壌表面にセットした。捕集材は将来的な実用化を考え、安価、再利用可能、入手容易なものという点、環境への拡散が起こった際の環境保全という点、さらに著者らの研究結果(沙漠研究 2 19-27 1992) から、天然繊維製品で塩類の吸着効率が高い医療用ガーゼ(東栄衛材株式会社製矢羽十字印) を五枚重ねにしたシート状のものをを用いた。医療用ガーゼの規格は、日本薬局方に規定されており、タイプが I から IV までである。いずれも、I ~ IV にかけて、標準重量がそれぞれ、10.3 g、8.7g、7.6 g、6.1 g であり、それぞれそれぞれ 1cm × 1 cm の縦糸と横糸の本数が、24 本から 17 本と密度が疎になっていく。仲谷(1999)の研究によれば、各タイプに除塩率が違い、I タイプでは、64.6%、II タイプでは 53.52%、III タイプでは 43.2% となり、糸密度と除塩率に相関が見られた。本実験では、最も除塩率が高い I タイプのガーゼを用いた。カーゼは規格が厳しい製品であるので、均一条件下での比較実験では有用である。この素材を塩類捕集シートと称した。

4) 除塩実験の実施

モデル塩類集積試料に対し、表 2-2 に示すような除塩用水量および濃度の NaCl 溶液を土壌表面に灌水することで除塩処理を行った。

Dehydration 法を行う供試体には、塩類集積試料の土壌表面に塩類捕集シートを設置したのち、除塩用水をビーカーで瞬間的に灌水した。塩類捕集シートを設置した後に灌水するのは、シートを湿らせることによってシートと土壌との密着性を向上させ、土壌溶液のシートへの移動を促すためである。Leaching 法を行う供試体には、裸地表面に直接除塩用水を灌水した。両除塩法を処置した供試体は、塩類集積試料の作成と同じ条件で再乾燥させた。対照実験のために、除塩処理を行わない無除塩試料も作成した。

表 2-2 除塩用水量及び濃度

< 除塩用水量 >

除塩用水量 (cm ³)	50	100	150	200	300	500
間隙体積比 (倍)	0.19	0.37	0.56	0.75	1.12	1.87
LF値 (無次元)	0	0	0	0.18	0.47	0.66

< 除塩用水塩濃度 >

NaCl濃度 (%)	0.02	0.07	0.2	0.5	1	3.5
EC(25℃) (μ m/cm)	402	1368	3740	8990	17070	53000
灌漑水質	中	高	極高	—	—	—

除塩用水塩濃度の設定は、灌漑水の水質程度として中、高、極高と評価されている塩類濃度 0.02%、0.07%、0.2%(L. A. Richards、1954) と海水の塩類濃度である 3.5%をとり、極高と海水濃度の間にさらに 2 点加えたものとした。

除塩用水量の設定にあたっては、本供試体の間隙体積 267cm^3 に先述の Gardner(1956) が提唱した体積間隙比 1.87 を乗じて算出した Leaching 法における最適除塩用水量 500cm^3 を本実験の除塩用水量の最大値とした。次に、地表面灌漑による Leaching 法の必要水量計算指標である Leaching Fraction(LF 値、無次元) を用い、本供試体において排水がおこる最小除塩用水量を理論的に算出した。LF 値は実際に根群域を通過した排水水深に対する加水水深の比を表す。つまり、Leaching 法による十分な除塩効果を得るためには、LF と同じ、もしくはそれ以上の除塩用水量を与えなければならない。この指標から、本実験の供試体が排水を起こす最小除塩用水量として 200cm^3 を設定した。次に 200cm^3 と 500cm^3 の LF 値 0.18 と 0.66 から、中間値 0.47 に相当する除塩用水量 300cm^3 を設定した。さらに、Dehydration 法の最適除塩用水量を推定するため、 200cm^3 の間隙体積比 0.75 以下の排水が発生しない除塩用水量を等間隔に 3 点設定した。

5) 分割試料の塩類量および水分量の測定

除塩実験が終了した供試体を深さ 1.25cm 毎に分割し湿土質量を計測した後、絶乾させた土壌の質量を再び計測して、含水量を測定した。その後、絶乾土壌に絶乾土壌質量の 2 倍の純水を加え、よく攪拌し塩類を抽出させた後、電気伝導度を測定した。2 倍量の純水を加える方式は長堀ら(1982) の理論を参照した。

塩類捕集シートは土壌表面から剥離させ、質量を計測した後絶乾させ、 200cm^3 の純水を加えて電気伝導度を測定した。また、除塩実験時に発生した排水についても電気伝導度測定を行った。

電気伝導度の値を NaCl 濃度に変換し、その NaCl 濃度、溶液量から体積当たりの塩類の絶対量を算出した。また、除塩実験終了後の土壌層深さごとの体積含水率と NaCl 量の分布を求めた。さらに、本実験で最も重要な除塩効率を示す指標として除塩率(%) を下記のように定義し、計算によって求めた。また、含塩比についても以下の通り求めた。

除塩率(%)

$$D = C_c / C_0 \times 100 \quad \dots(1)$$

D : 除塩率(%)

C : 修正塩捕集量(g)

C₀ : 初期含有塩量(g) × 100

含塩比(%)

含塩比 = 各層の塩量(g) / 初期含有塩量 (g) × 100

2.3 実験結果および考察

1) 塩類集積供試体の特徴

塩類集積試料の表層には NaCl が白く析出していた。図 2-4 に塩類集積試料の体積含水率及び含有塩類量分布を示した。含有塩類量分布から、深さ 0cm～1.25cm の層に供試体内に含まれる全塩類量の約 70% が集積しており、極めて浅い層に多量の塩類が集積していることが読み取れる。乾燥・半乾燥地域においては、大気の蒸発要求が大きいので、地下水位が特に高い場合には毛管上昇および水分ポテンシャル勾配により全土層が飽和状態となる。さらに蒸発が進むと極めて浅い層に多量の塩類が集積し、このような弓反り型の分布形態を示す。

体積含水率について観察すると、土壌表面には風乾状態の水分域があり、土壌表面直下との含水率勾配が最も大きくなっている。さらに、深部に至るほど含水率勾配が小さくなっている。

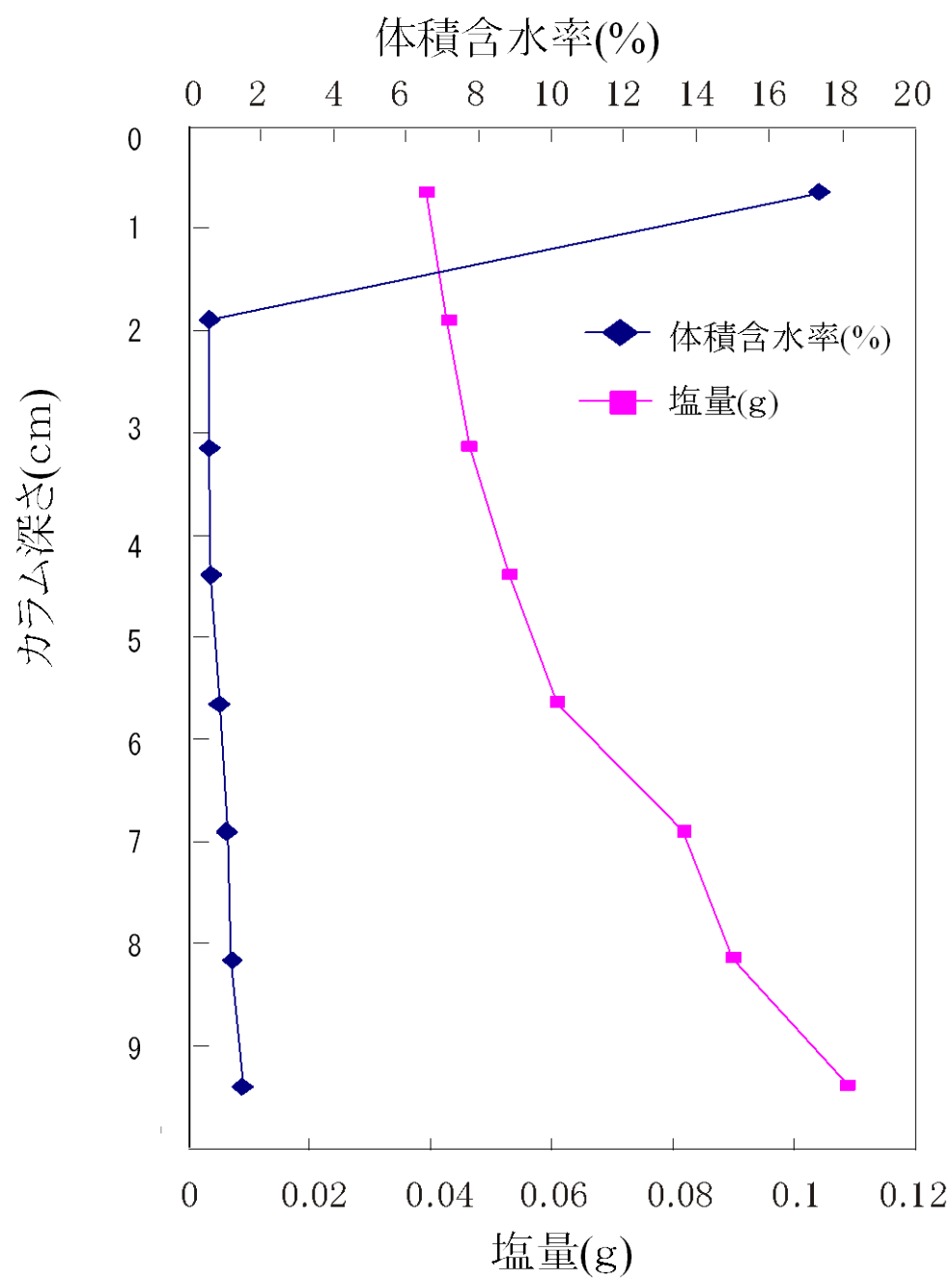


図 2-4 塩類集積試料の体積含水率及び含有塩類分布

2) 除塩用水量の比較

0. 2%NaCl 溶液を除塩用水として用いた場合の両除塩方法による除塩類量の割合と供試体内残留塩類量の割合を除塩用水量ごとに示した(図 2-5) .

図 2-5 の縦軸は投入した総ての塩類量を 100%として除塩割合、残留割合を異なる模様の棒グラフで示した. 総塩類量は浸潤飽和によって供試体に吸収された塩類量と除塩用水中の塩類量の和を示している. 横軸は除塩用水量である. 各除塩用水量の二本の棒グラフは、左が **Dehydration** 法、右が **Leaching** 法の実験結果である. 除塩用水濃度 0.2%以外の実験結果は、除塩用水量の増減に対する考察については全ての塩類濃度について全く同じ傾向を示し、除塩率に関してもほぼ同じ傾向を示した. よって、図 2-5 は 0.2%の実験結果で代表させた.

Dehydration 法による除塩実験を行った供試体では、**LF** 値からの理論的予測通り、除塩用水量 200cm^3 で排水が発生した. そこで、**Dehydration** 法については、塩類がシートに捕集された作用を **Dehydration** 作用、排水によって除塩された作用を **Leaching** 作用と称し区別した. 最少量の除塩用水量 50cm^3 で最も **Dehydration** 作用による除塩効率が良かった. **Dehydration** 作用の除塩率は、除塩用水量の増加に伴い徐々に低下し、排水が発生する 200cm^3 を越えると急激に低下した.

Leaching 法は、**LF** 値が理論的に 0 である除塩用水量(50cm^3 、 150cm^3) では、全く除塩が不可能であった. 除塩用水量が 200cm^3 以上の場合では、排水量の増加に伴って除塩割合が増加した.

次に、除塩用水量の変化に対する除塩率の変化を図 2-6 に示した.縦軸は除塩率を、横軸は除塩用水量をとった.実線で **Dehydration** 作用の結果を、破線で **Leaching** 法の結果を示した. 排水の有無の境目にあたる除塩用水量 200cm^3 に目印の線を入れ、「**Dehydration** 有効上限灌水線」と称した. この線の左側は排水の発生しない除塩用水量に、右側は排水が発生する除塩用水量にあたる.

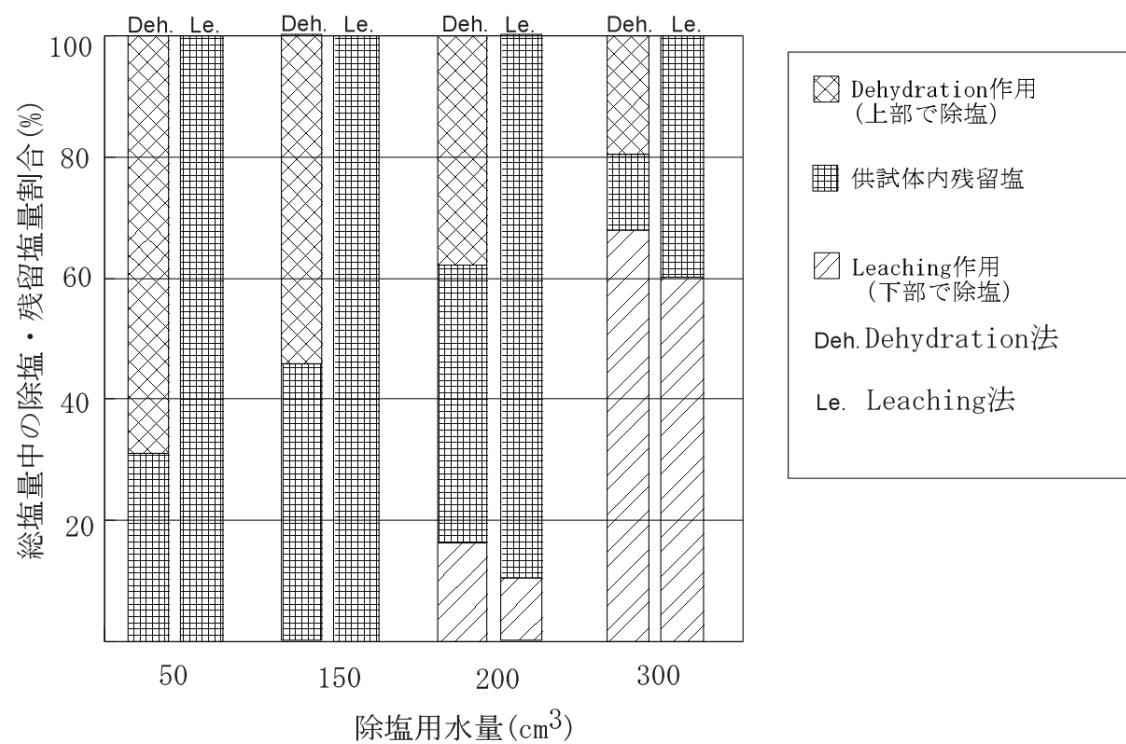


図 2-5 除塩用水量別除塩類量、残留塩類量(塩類濃度 0.2%の場合)

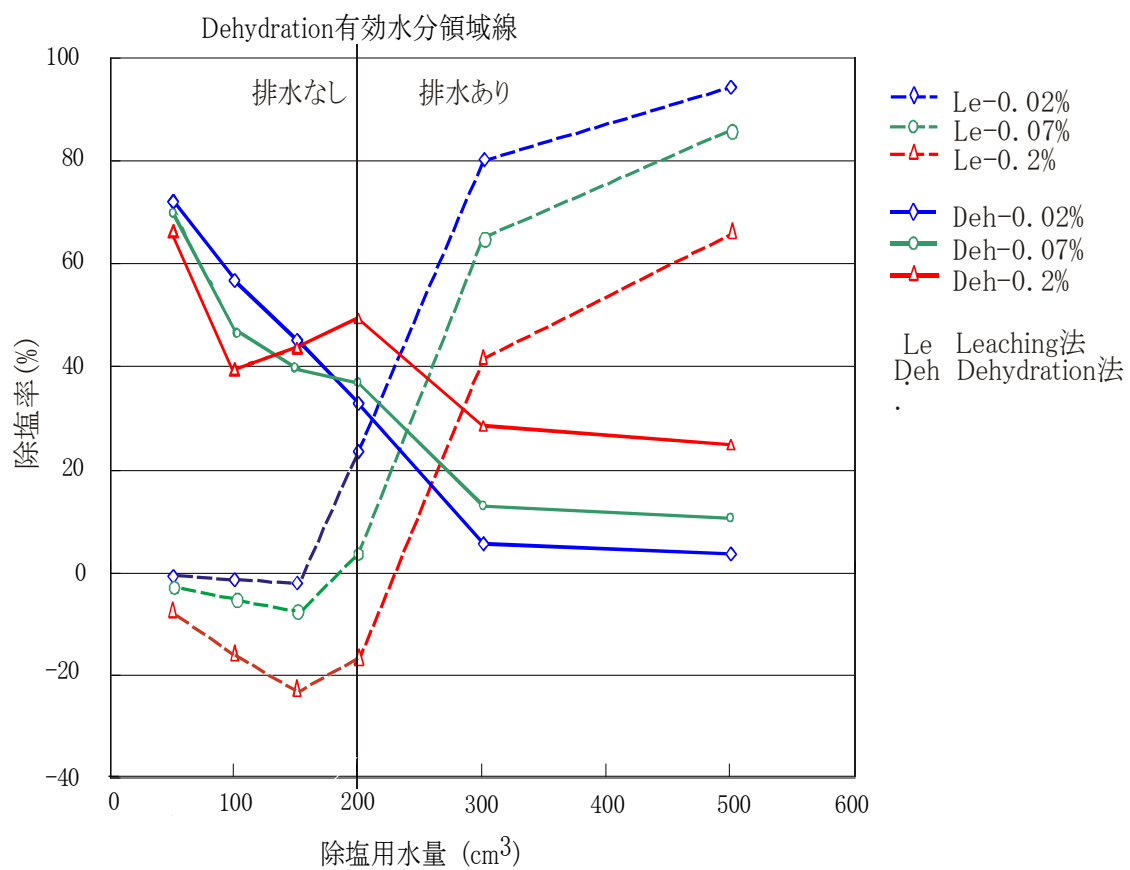


図 2-6 除塩用水量と除塩率

まず、Leaching 法の除塩率について検討する。Dehydration 有効上限灌水線左側では、除塩用水量の増加によって Leaching 法による除塩率が負の値となった。これは、排水が起きない除塩用水量では、除塩用水量の増加に従い供試体の中に含まれる塩類量も増加することによる。このことは、地下へと溶脱された塩類を含む除塩用水が土壌系外に排出されない限り、Leaching 法による除塩は逆効果となることを意味する。

Dehydration 有効上限灌水線右側の Leaching 法は、除塩用水量の増加と共に除塩率が増加する。ただし、除塩用水濃度が 0.2%NaCl 溶液のケースでは、除塩用水量 200cm³ の実験結果が示すように、除塩用水自体が含む塩類量も相対的に多くなり、除塩率は上昇するものの除塩用水によって添加された塩類量を上回る塩類量を除去することはできなかった。つまり、高塩濃度の除塩用水を灌水したことで塩類量が見かけ上添加された事になり、除塩率は負の値となった。300 cm³ 以上の除塩用水量では、どの除塩用水濃度でも約 40~80%の除塩率が得られた。しかし、除塩用水量が 300 cm³ 以上になると、除塩率の増加が停滞する傾向が見られる。よって、Leaching 法では除塩用水量を 500 cm³ 以上に増加させても、除塩率の向上を望むことは難しいと考えられ、Gardner の提案した体積間隙比から最適除塩用水量を算出する理論を再確認する結果となった。

次に Dehydration 法について述べる。Dehydration 有効上限灌水線左側は、非常に良好な除塩率となった。本実験の最少除塩用水量 50 cm³ では、約 70%の除塩率が得られた。これは、塩類捕集シートを敷設したことによって、本来なら土壌表面に再集積しようとする塩類を塩類捕集シートに捕集、除去できるからである。しかし、除塩用水量の増加に伴って除塩率が減少していく傾向が見られる。

排水が発生する Dehydration 有効上限灌水線右側での Dehydration 作用は、排水が発生しない左側と比べて除塩率が急激に減少し、ごく少量の除塩しか行えなかった。これは、より多くの除塩用水量を灌水することによって土壌表層の塩類が下層へと浸透分散し、土壌表面の塩類捕集シートに捕集、除去されなかったためと考えられる。このことから、除塩用水量が増加すると灌水直後は蒸発力より重力による下方浸透が優越することがわかる。

3) 除塩用水濃度の比較

除塩用水濃度の変化に対する除塩率の変化を図 2-7 に示した。横軸に除塩用水濃度、縦軸に除塩率をとった。除塩用水によって付加された塩類量よりも除塩類量が低かった場合には、除塩率は負の値を示す。図 2-7 では、Dehydration 作用で最も良好な結果が出た除塩用水量 50 cm³、下方浸透が生じるが排水が起きない除塩用水量 100 cm³、Leaching 法の標準的な除塩用水量 500 cm³ での除塩率を比較した。つまり、各除塩法の特徴的な除塩用水量における除塩率を示している。本実験において除塩用水量 500 cm³ による Leaching 法の除塩率は、除塩用水濃度が低い場合には良好な除塩率を示した。しかし、濃度が高くなると除塩率が急激に落ち負の値となることが確認できた。このような現象は、土壌溶液を除塩用水で置換することで除塩を行う Leaching 法の特性によるものと考えられる。Leaching 法では Leaching 終了時に土壌内に除塩用水が残留し、その後それらの残留溶液が土壌表層に再集積する。よってここでは土壌内残留溶液に含まれる塩類が大きな問題となる。土壌内に残留する塩類の量は、除塩用水濃度と密接に関係しているので、Leaching 法は除塩用水の濃度そのものの影響を受けやすい除塩方法であると言える。従って、Leaching 法は低塩類濃度の除塩用水を用いて除塩を行うことが不可欠である。

一方、Dehydration 作用でも除塩用水濃度の増加に伴って除塩率が減少するが、減少勾配は Leaching 法に比べてはるかに小さい。例えば除塩用水濃度 0.2% の除塩率はほぼ同じで図 2-7 ではドットが重なっているが、この場合、Dehydration 作用によって Leaching 法と同程度の除塩率を達成するのに必要な除塩用水量は Leaching 法の 10 分の 1 である。そのため除塩用水によって土壌に加わる塩類量も少なく、Dehydration 法終了時に土壌内に残留する塩類量が小さくなる。さらに、Dehydration 作用は Leaching 法と異なり除塩用水濃度の変化の影響を受けにくく、除塩率の減少があまり見られない。除塩用水量 50 cm³ では、除塩用水濃度が海水と同じ 3.5% というケースにおいても除塩率 57.6% という非常に良好な結果が得られた。Dehydration 作用で高塩濃度水による除塩が可能である理由は、50 cm³ の除塩用水は全て捕集シート上に移動し蒸発に用いられるので、そこに含まれる塩類はほぼ全量シート上に集積、捕集されるためと考えられる。

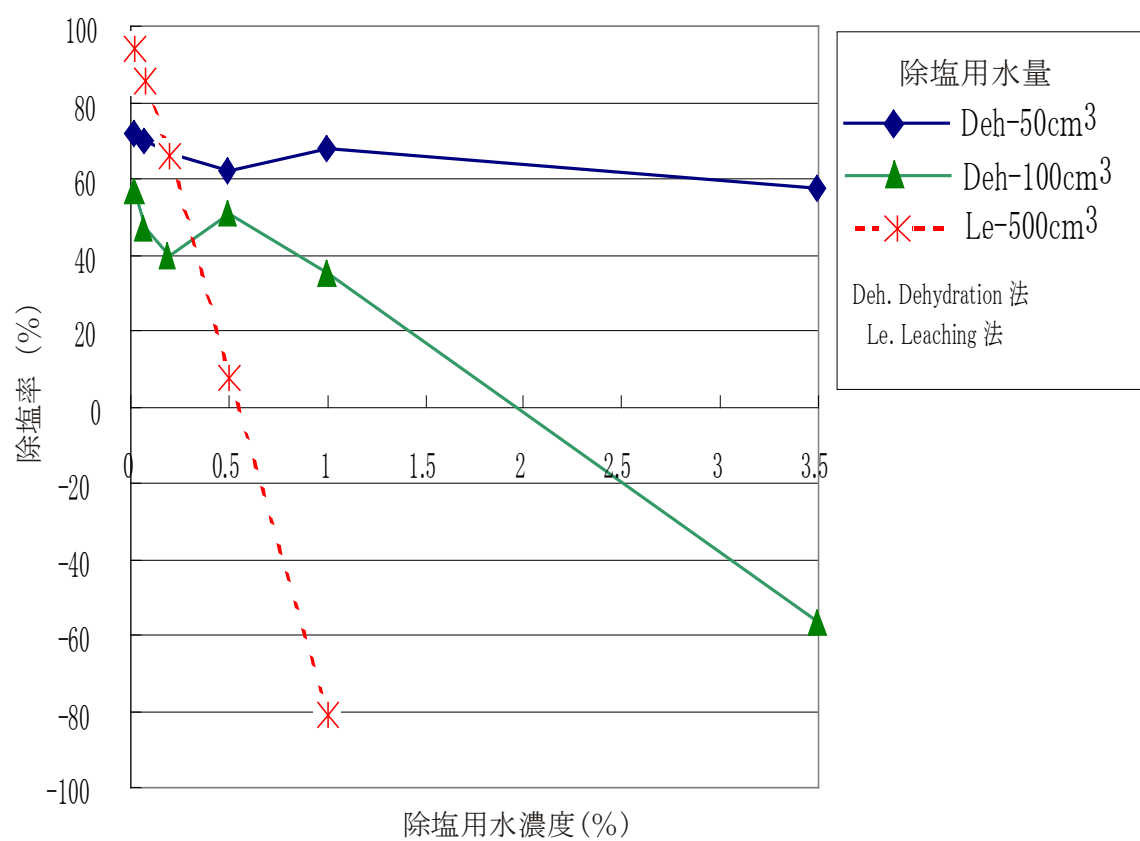


図 2-7 除塩用水量及び濃度と除塩率

NaCl の溶解度は、恒温恒湿槽の設定温度と同じ温度の水温 40℃で水 100g に対し 26.65g であり、百分率では 21.0%である。水温 20℃における溶解度は 26.38g でほとんど差がない。理論的に、除塩用水は溶解度の分量まで塩類を溶かしこむことができる。その除塩用水全てを塩類捕集シートに捕集することができれば、非常に効率よく除塩を進めることが可能となる。つまり、水温 40℃、塩類濃度 3.5%の除塩用水を用いても、残りの 17.5%分の塩類を土壌内から除去することが可能である。この理由から、海水程度の濃度の用水を用いた除塩の可能性を確認することも実験目的とした。ただし、本実験の供試土は砂質土であったので言及しなかったが、粘土分を含んだ土壌を供試土とする場合には、粘土のイオン吸着や置換反応などを考慮する必要がある。

4) 除塩用水量と濃度の関係

Dehydration 法の有効水分領域である 200cm³以下の除塩用水量の除塩用水濃度において、Dehydration 作用と Leaching 法の除塩率の差を図 2-8 に示した。この図で除塩率差が正の値である場合、Dehydration 法の方がより有効であることを意味する。どの灌水量のグラフにおいても、除塩用水量が少ないほど除塩率の差が正の値に大きくなっていることから、除塩用水量が少ない場合は Dehydration 法が特に有効であると言える。除塩用水濃度が 0.1%以下の場合、除塩用水量の塩類濃度が低いので、Dehydration 作用と Leaching 法の除塩率の差が大きくなるが、除塩用水濃度 0.1%以上の除塩用水量においては、除塩用水量の増量に従い、両除塩法の除塩率差が大きくなる。

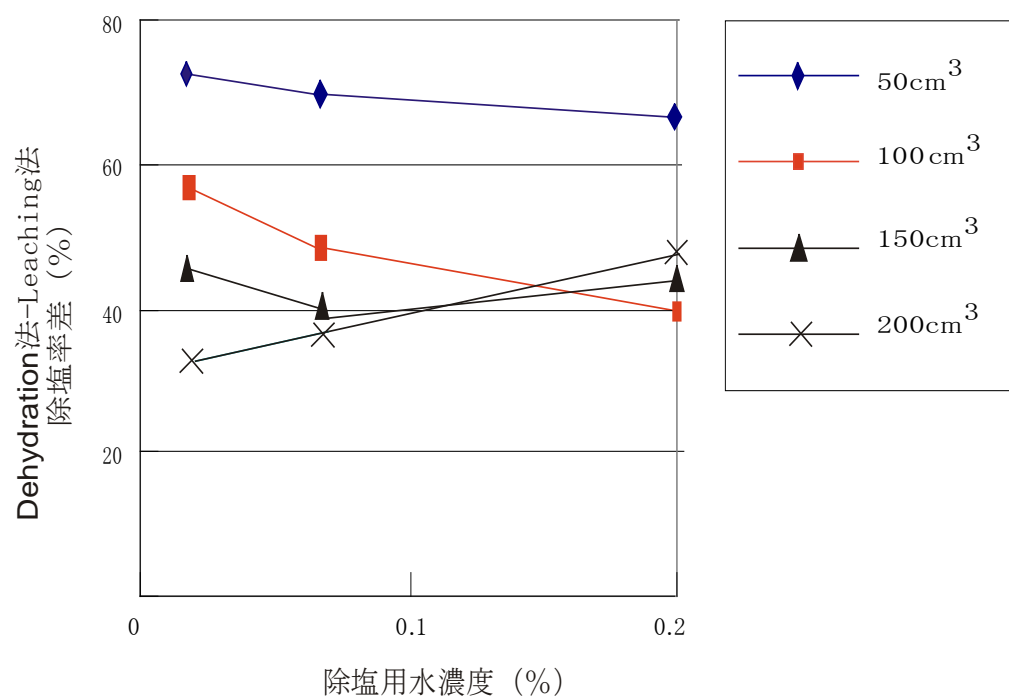


図 2-8 除塩用水濃度と除塩率差との関係

2.4 結論

除塩作業に関わるコストは、土壤に関わるもの、除塩用水に関わるもの、その他の三種に大別される。それらにはまた細かい項目がある。土壤に関連するコスト項目としては、土壤組成、蒸散量、土壤保水量、塩類集積量が検討項目としてあげられている。除塩用水については、地下水、排水、水量、水質、自然土壤と灌漑の必要性、施設費、操作費、施設維持費、水の費用があげられ、その他には植物の病気、害虫、気象条件、作物の品質、量、圃場の利用効率、作物のローテーション等があげられる (FAO/UNESCO、1973)。同一圃場で Dehydration 法と Leaching 法の比較検討を行う場合、検討項目となるのは、水量、水質、排水、施設費、操作費、施設維持費である。水の費用は水質と水量に影響されるため、そちらに含めた。操作費は除塩作業量の大小、施設費は散水施設を両除塩法が必要とするとして排水路で代表した。

本実験の Dehydration 法では、一定条件下においては Leaching 法での除塩が不可能な除塩用水量(50~150 cm³)でも、除塩が可能である事がわかった。

Dehydration 法は除塩用水量に関して Leaching 法より節水型の除塩法であるといえる。また、Dehydration 法を用いれば、Leaching 法では塩類集積を促進してしまい、灌漑用水として使用するには不適当な塩類濃度の除塩用水を用いても除塩が可能であることがわかった。以上の結果から、除塩用水の質と量に関して Leaching 法よりも Dehydration 法が除塩効率の良い方法であるという結論が得られた。

Dehydration 法がより節水、塩性水使用型の除塩方法であるとするならば、除塩用水の確保が容易になる。これは、水源に乏しい乾燥、半乾燥地での除塩作業に比較優位があると言える。さらには、除塩用水によって引き起こされる塩性地下水位の上昇を防止することが可能であると共に、Leaching 法のような大規模な排水施設のための土木工事を必要とせず、その点ではコストの大幅縮小が可能だと思われる。一方、Leaching 法が十分な量の低塩濃度用水を掛け流せばよいのに対し、Dehydration 法は塩類捕集シートを敷き、決められた除塩用水量を灌水し、塩類捕集シートを除去するという作業工程が余分にかかり、除塩作業がスケールアップした場合は予想されないコストが発生する可能性も今後は考慮する必要がある。

以上の点を勘案したとしても **Dehydration** 法は、除塩用水の量と質の確保に条件の厳しい乾燥・半乾燥地では有効な除塩法となる可能性を持っていると考えられる。

第 3 章 Dehydration 法の除塩効率向上

3.1 目的

第 2 章で、実験室レベルでのカラム実験において、Dehydration 法の一定の有効性が確認された。本章では、さらに、Dehydration 法の除塩効率を向上させるための条件について検討を行なった。除塩効率を高めるための条件を探るため、除塩回数と除塩率、除塩用水量と除塩用水利用効率、乾燥時間と塩捕集量、以上 3 つの項目について実験を行ない考察した。

3.2 実験方法

本実験では、表 3-1 に示すとおり、除塩回数、除塩用水の灌水量、乾燥時間、を変数として、実験した。実験の基本条件は、灌水量 15.7mm、除塩回数 1 回、乾燥時間 96 時間とした。これらの値は、いずれも、Dehydration 法と Leaching 法の比較実験から得られた、最も除塩率が高くなる灌水方法である。灌水の方法は、これまでの安部らの実験がビーカーから直接除塩用水を流し込む湛水灌漑であったが、今回は、灌水装置を使って、散水灌漑を試みた。基本条件に加えて、実験の種類に応じて適宜、変数を設定した。除塩回数については、1 回のみの灌水の場合ではカラム下部からの排水が発生しないことがこれまでの実験からわかっている(安部ら:1999,1992;山口ら,1996)。灌水量 15.7mm を基本量として、2 倍の 31.4mm、3 倍の 47.1mm、4 倍の 62.8mm をそれぞれとり、灌水回数 1~4 回を設定した。

1 回あたりの除塩用水の灌水量は、これまでの実験で、最高の除塩率を示した灌水量 7.9mm とその倍の灌水量、15.7mm、さらに、7.9mm の 80% 量、60% 量にあたる 6.3mm、4.7mm を設定した。除塩時間については、除塩用水量 15.7mm、除塩用水濃度 3.5%、の条件下で、12、24、48、72、84、96、144 時間を設定した。本実験の手順を図 3-1 に示した。実験は、供試体作成、除塩作業、データ収集・処理の三段階に分けられる。

表 3-1 除塩回数、除塩用水量および乾燥時間

< 除塩回数 > 乾燥時間 96時間

除塩回数	1回	2回	3回	4回
総灌水量(mm)	15.7	31.4	47.1	62.8
本実験条件 での総灌水量 (cm ³)	123.0	246.0	369.0	492.0

< 除塩用水量 > 乾燥時間 96時間

除塩用水量(mm)	4.7	6.3	7.9	15.7
本実験条件 での灌水量 (cm ³)	36.9	49.2	61.5	123.0

< 乾燥時間 > 除塩用水量 15.7mm

乾燥時間 (our)	12	24	48	60	84	96	120	144
------------	----	----	----	----	----	----	-----	-----

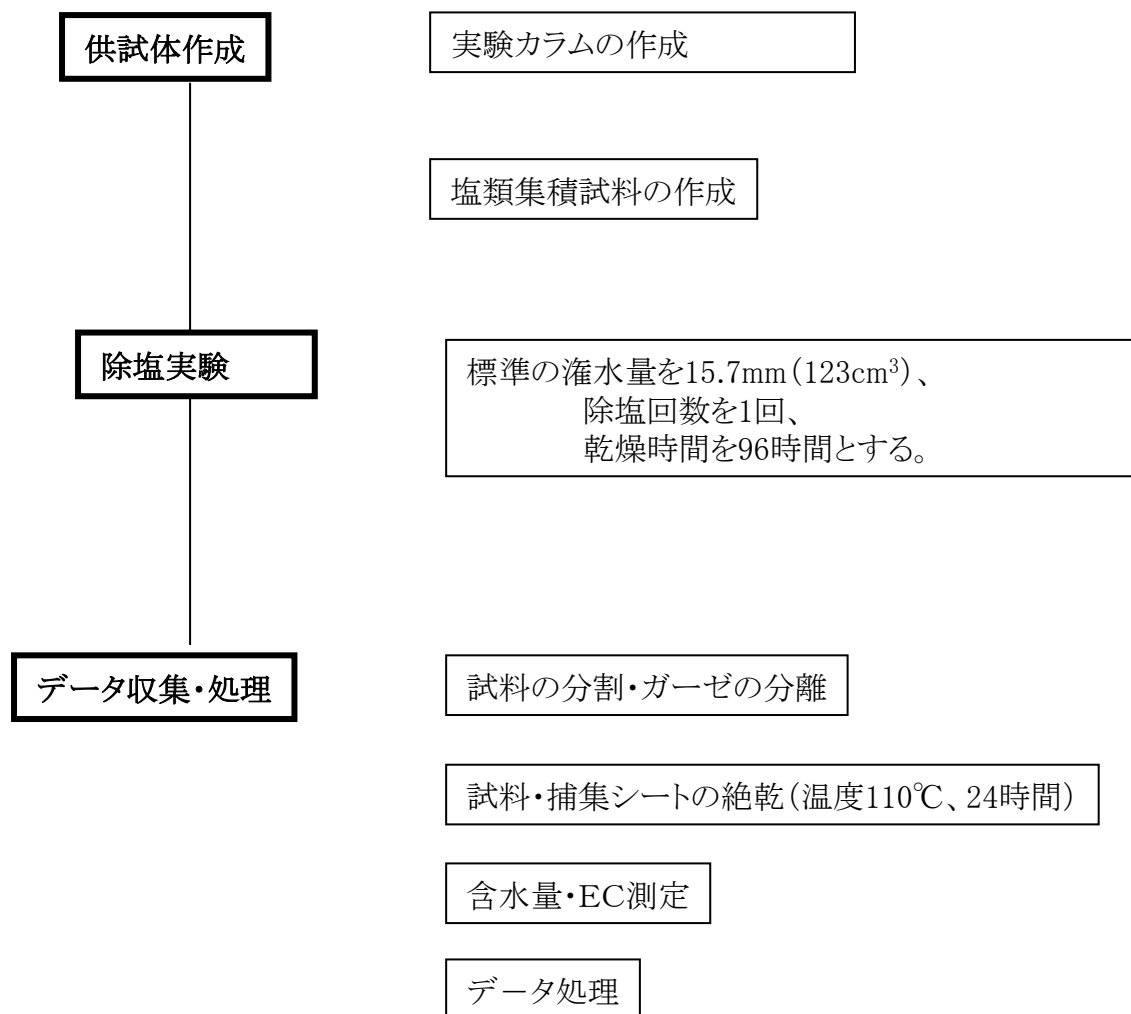


図 3-1 実験の手順

1) 供試体の作成

実験装置を図 3-2 に示した。カラムは内径 10.0cm、厚さ 0.5cm、高さ 1.0 cm のアクリル製円筒 10 個をテープで繋ぎ合わせ、底部には濾紙(東洋濾紙社製 2 種、直径 11.0cm) とランダムに孔をあけたアクリル製多孔板(直径 10.0cm) を敷いた。充填密度は最密と最疎の平均値とした。豊浦標準砂および供試体の物理性を表 3-2 に示した。

実験カラムの下半分には豊浦標準砂のみを、上半分には、豊浦標準砂に KC 1 を混入し、これを塩類集積供試体とした。豊浦標準砂は、純水で、塩類濃度 $2 \sim 3 \mu\text{S/cm}$ まで洗浄した後、 110°C で 24 時間、炉乾させた後、冷暗所で常温保存したものを用いた。筆者らの塩類集積の除去に関するこれまでの実験では、下方から塩を含む溶液を湿潤飽和させたのち、乾燥させ、塩類集積状態を再現した試料を利用する事が多い(例えば安部、1983、1992)。今回は、水と塩分の挙動を正確に見るために、攪拌混入方式を採用した。この方式は、塩類分布、含水率分布にばらつきが少なく、また、下半分に塩を含まないため、塩の移動に関して、変数ごとの違いが明瞭化しやすいという特性も有している。留意点としては、湿潤飽和試料は、すでに一定程度の毛管水や吸着水を有しているのに比べ、攪拌混入方式は、ほぼ気乾状態の砂を用いているため、毛管水や吸着水はほとんど含まない。そのため、この二つの方式間の初期条件には、透水係数や、マトリックポテンシャルに違いがある。

塩類は KC 1 で代表させた。その理由として、KC 1 は代表的な集積塩類の一つであり、塩類量の測定に電気伝導度を用いるので、一価イオン一種類であるほうが容易に置換が行えること、今後同一条件で一定割合の粘土を混入した供試体を利用する場合、塩に NaCl を用いた場合に発生するナトリウムコロイドの発生を考慮しなくてよいこと等による。KC 1 の混入量 41.14g は、基本となる灌水量 15.7mm、KC 1 濃度 3.5%、除塩用水が 20°C の場合、除塩用水に溶解可能な塩量から算出された。

表 3-2 標準砂の物理性、カラムへの充填密度

< 豊浦標準砂 >		
土粒子の単位体積質量	(g/cm ³)	2.63
飽和透水係数	(cm/s)	2.1X10 ⁻²
粒度組成		100～420 μ mの砂分100%
< 供試体 >		
供試体の充填質量	(g)	1198.6
供試体の土柱体積	(cm ³)	785.4
供試体の単位体積質量	(g/cm ³)	1.526
間隙率	(%)	42
間隙体積	(cm ³)	329.9

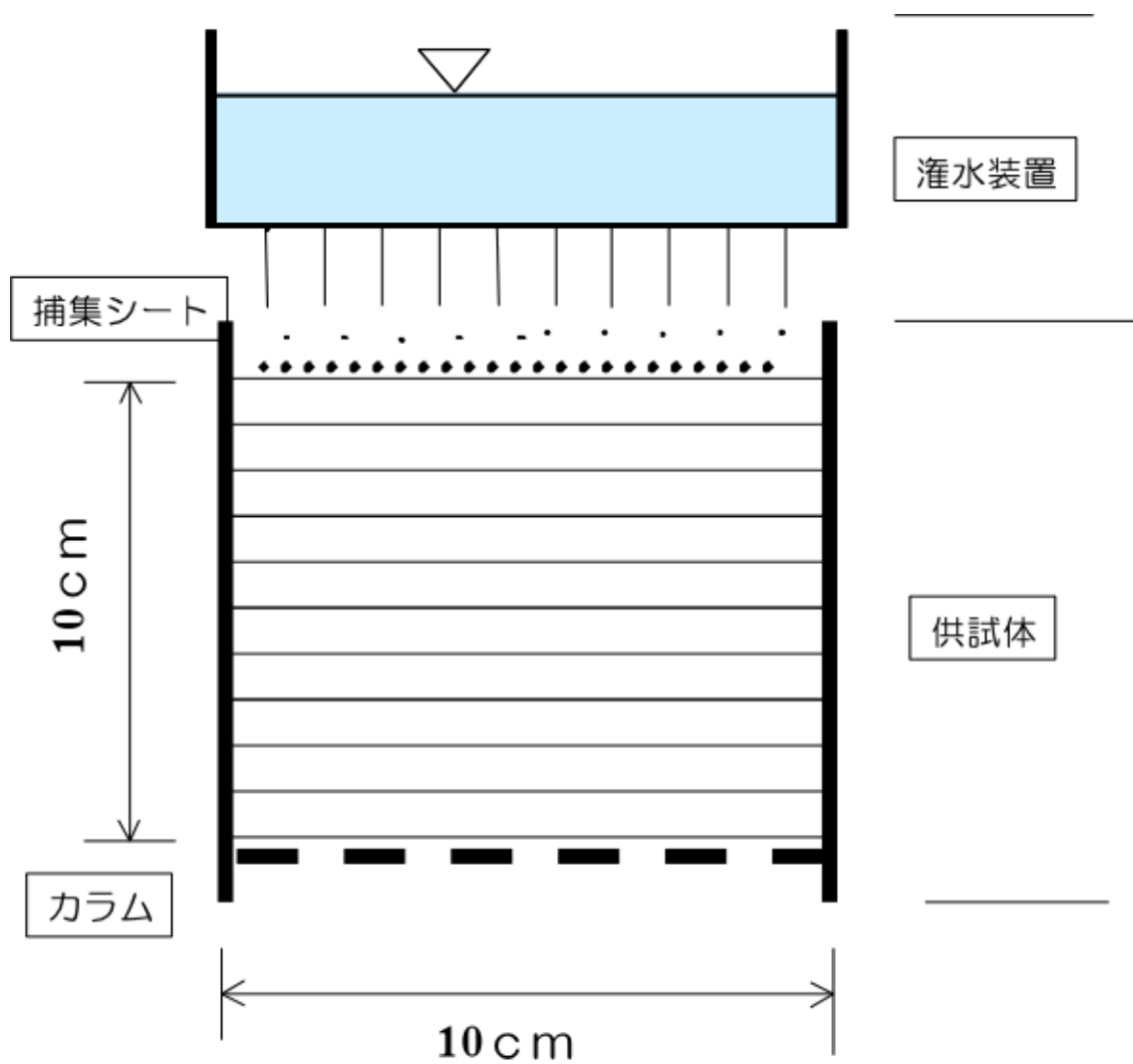


図 3-2 実験装置(単位 cm)

2) 除塩用水濃度の設定

除塩用水の塩類濃度は 3.5%とした。これは、本実験が、海水による塩類除去可能性を一つの目標としているため、海水の塩類濃度に合わせた。

3) 塩類捕集シートの選定

塩類捕集材を土壌表面にセットした。捕集材は、安部らの研究結果(沙漠研究 2 19-27 1992) から、天然繊維製品で塩類の吸着効率が高い医療用ガーゼ(東栄衛材株式会社製矢羽十字印) を五枚重ねにしたシート状のものを用了。

4) 除塩作業

塩類集積供試体に対し、3.5%KC1 溶液を土壌表面に灌水し除塩処理を行った。除塩回数が 2 回以上の場合については、それぞれの除塩作業毎にガーゼを交換した。塩類集積供試体の土壌表面に塩類捕集シートを設置したのち、除塩用水を灌水した。設置後に灌水する目的として、シートが湿りシートと土壌との密着性が向上し、土壌溶液のシートへの移動が促進されるためである。灌水にあたっては、灌水装置を用了。灌水装置には、図 3-2 に示すように、内径 10.0cm、高さ 5.0cm のアクリル円筒の底面に、厚さ 1.5cm のアクリル板を接着したものを用了、作成した。底面には、ランダムに 41 個の孔を空け、孔に注射針 41 本をパテで接着した。灌水装置の利用は、ビーカー等で直接流し込む方法に比べて、散水浸潤をおこさせるようになり、塩類捕集シートと供試体土壌表面との密着性を高められ、灌水時間を制御できるため、灌水流量もコントロールできる。灌水装置を用了事で、土壌への湿潤曲線は湛水浸潤と違い、灌水時間が短い場合の散水浸潤曲線となることを目指した。

この灌水装置を土壌表面から 10.0cm のところに針先がくるように設置し、あらかじめ計量した除塩用水を静かに流し込んだ。あらかじめ計量した除塩用水を流したことから、灌水量の違いによって、灌水流量に変化が生じるが、灌水流量の変化による除塩率の変化は実験開始当初それほど大きな影響を及ぼすとは思われなかったため、水位を一定にして灌水流量を一定にする方法を採用せず、この方法を用了。

本論では、灌水流束を、

$$q=V/At \quad \cdots(1)$$

q：灌水流束

V：灌水装置への除塩用水投入量(cm³)

A：灌水装置底面積 (cm²)

t：灌水時間(s)

と定義する.

恒温恒湿槽内の乾燥条件は、オーストラリア西部の乾燥地域の夏季水面からの可能蒸発量が 13mm/day(4745mm/year)となる環境を想定した.乾燥時間は、表 2 に示すとおり、96 時間を基本時間とした.これまでの実験から、土壌表層と塩類捕集シートとの間に液状水の移動が停止するのが、96 時間と確認されていたためである(安部ら、1999).

乾燥時間については、除塩用水量 15.7mm、除塩用水濃度 3.5%、の条件下で、さらに 12、24、48、72、84、96、144 時間を設定した. 供試体の側面からの熱の影響を極力取り除くためにカラム側面に発泡スチロールを二重に巻きつけて断熱した.

5) 分割試料の含水量および EC の測定

図 3-3 は除塩実験が終了した供試体である。ガーゼ表面とリード部分にも塩が集積している。この供試体を深さ 1cm 毎に分割し湿土質量を計測した後、24 時間絶乾させた。絶乾後の土壌の質量を再び計測して、含水量を算出した。その後、絶乾土壌に絶乾土壌質量の 2 倍の純水を加え、よく攪拌して土壌懸濁液に塩類を抽出させた後、電気伝導度を測定することで塩濃度を測定した。土壌の塩類濃度の測定には、土壌溶液を抽出して、その電気伝導度を測定する方法と、乾土の 2 倍量もしくは 5 倍量の純水を加え振とうし、土壌懸濁溶液とし、その電気伝導度を測定する方法が一般的である。前者の方式がより精緻な方法であるが、本実験では、供試体に含まれる塩濃度量も高く、微小な誤差に実験結果が影響されにくいため、2 倍量の純水を加える方式(天谷ら、1982)を採用した。

塩類捕集シートは土壌表面から剥離させ、質量を計測した後絶乾させ、質量測定後 200cm³ の純水を加えて電気伝導度を測定した。

電気伝導度の値を KC 1 濃度に変換し、その KC 1 濃度、溶液量から各層の体積当たりの塩類絶対量を算出した。



捕集された塩の状態
1回灌水(15.7mm)のち、96時間乾燥後

図 3-3 捕集された塩の状態写真

3.3 実験結果および考察

1) 除塩回数と除塩率

乾燥時間 96 時間、1 回ごと灌水量 15.7mm での灌水回数または、総灌水量を増加させた場合の、塩捕集量、除塩率の変化を図 3-4 に示した。灌水回数又は総灌水量を増やすことによって、同一供試体から除塩された塩量の総和である、累積塩捕集量は比例的に増加した。一方で、1 回ごとの除塩率を見ると、回を重ねるごとに、除塩用水の利用効率が減衰した。図 3-4 の除塩率の算出方法は、塩類を溶かす能力を持つ(溶解ポテンシャルが高い)除塩用水を利用することを前提として、

$$D = C_c / C_0 \times 100 \quad \dots (2)$$

D : 除塩率(%)

C_c : 修正塩捕集量(g)

C₀ : 初期含有塩量(g) × 100

とした。塩捕集量には、実際の塩捕集量から、除塩用水に含まれる塩量を減じた、修正塩捕集量を用いた。

2 回目以降は、分母の初期含有塩量は、直前の除塩までで取り除かれた塩の量を減じた値を用いて計算している。よって、

$$D = C_c / C_i \times 100 \quad \dots (3)$$

D : 除塩率(%)

C_c : 修正塩捕集量(g)

C_i : 供試体含有塩量(g)

となる。

安部らのこれまでの実験結果から、除塩率の減衰の主要な原因は供試体カラム下方への再分配である可能性が高いため、各除塩回数についての、供試体カラム深さ含水比を表した図 6 を作成した。

ここで、含水比は、

$$w = w_w / w_s \times 100 \cdots (4)$$

w : 含水比(%)

w_w : カラム深さ 1cm ごとの含水量(g)

w_s : カラム深さ 1cm ごとの土壌乾重(g)

と定義した.分母については、表 3-1 の供試体の充填質量を 10 で除した値、119.8 g を用いた

図 3-5 に示すとおり除塩回数が 3 回目以降、総灌水量が 47.1mm を越えると、灌水された土壌水が、カラム内で過剰となり、一部の土壌水が 6cm 以下のカラム下方へ向けて再分配された.除塩回数 2 回目まではカラム深さが深くなるに従い含水比が減少しているが、3 回目以降は、逆にカラム深さが深くなるに従い、含水比が増加している.カラム下部の土壌水が引き上げには、主に蒸発力、および土壌断面の含水比(D.hillel、1972)が関係してくる.カラム深さ 8 cm ~ 10cm にたまつた除塩用水を起源とする土壌水は、深さ 1 ~ 7 cm の含水比が低いことから、鉛直上方への土壌水の移動が、1 回目、2 回目に比べより困難になっている.一方で、乾燥時間を長くし、温度、湿度の条件設定を変えるなどして蒸発力を高めれば、重力に対抗して引き上げることは可能である.

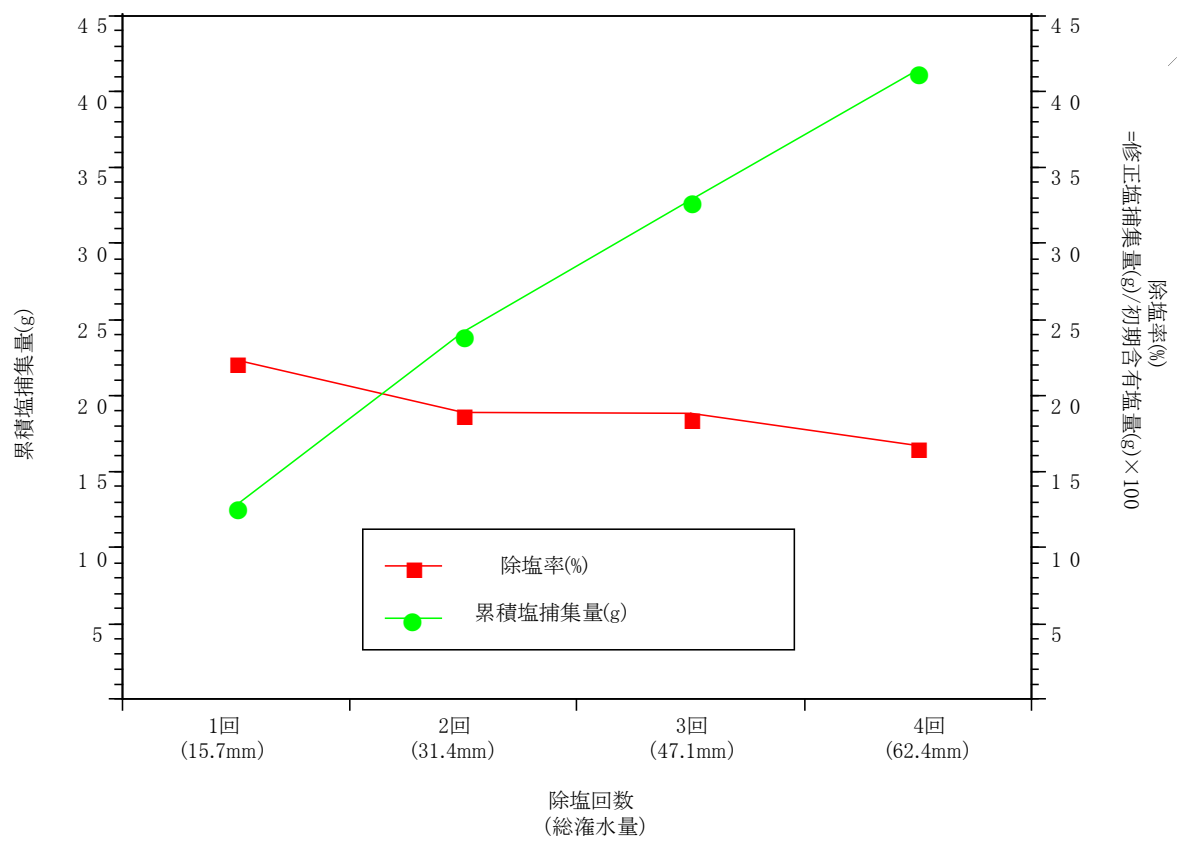


図 3-4 除塩回数と累積塩捕集量・除塩率

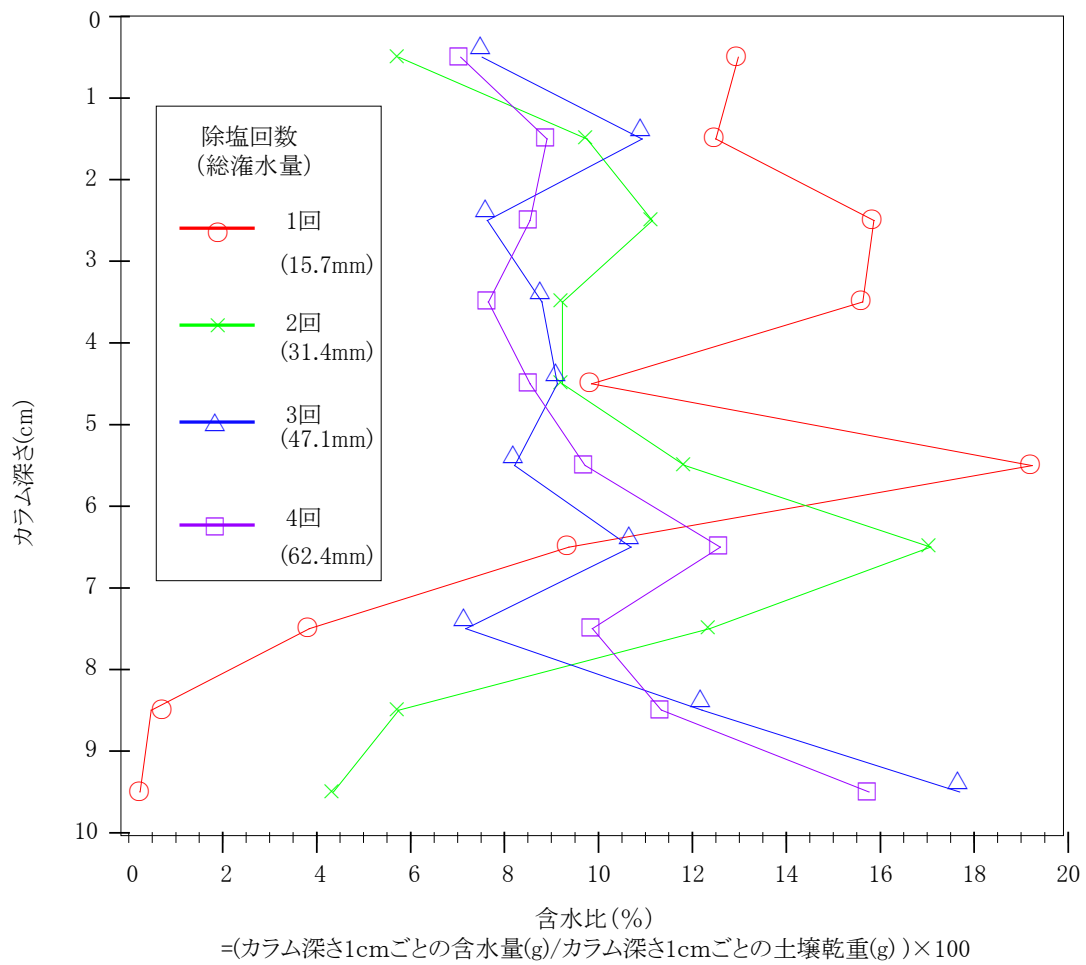


図 3-5 灌水回数ごとの土壌含水比

2) 除塩用水灌水量と除塩用水利用効率

Dehydration 法の除塩率は、10cm カラム高で、排水が発生しない灌水量 31.4mm から、灌水量を減じるに従い除塩率は向上し、7.9mm で Dehydration 法として最も高い除塩率を示した(安部ら：1999).灌水量 7.9mm で、除塩用水塩濃度、0.2% の場合、塩類集積状態を再現した供試体での実験で、70%の除塩率が得られた.本実験では、灌水量 7.9mm 以下にさらに灌水量設定して、除塩率が最高となる灌水量を求めた.本実験での供試体は、供試体に含まれる塩分量と塩分分布が、塩類集積状態を再現した供試体に比べ塩分量が約 4 倍量含まれているため、除塩率だけで比較すると、灌水量が多いほど除塩率が高く表示されてしまう.そこで、本実験では、灌水された除塩用水がどれだけ効率良く塩の捕集に利用されているかを表す指標として、除塩用水利用効率の概念を導入し、検討を行なった.除塩用水利用効率は、修正塩捕集量を、塩を捕集するために用いられた除塩用水量で除したものである.

$$E=Cc/Iq \cdots(5)$$

E：除塩用水利用効率(g/mm)

Cc：修正塩捕集量(g)

Iq：除塩用水量(mm)

図 3-6 に示すとおり、1 回当りの灌水量を変数として、それぞれの灌水量当たりの除塩用水利用効率でみれば、灌水量 15.7mm から 7.9mm を経て 6.3mm まで、灌水量が減じるに従い、除塩用水利用効率は増加した.しかし、その後灌水量 4.7mm では灌水量 6.3mm に比べてわずかに除塩用水利用効率は減衰した.このことから、7.9mm の灌水量よりさらに少ない灌水量 6.3mm 近辺が除塩用水の利用効率が最も高いと判断できる.

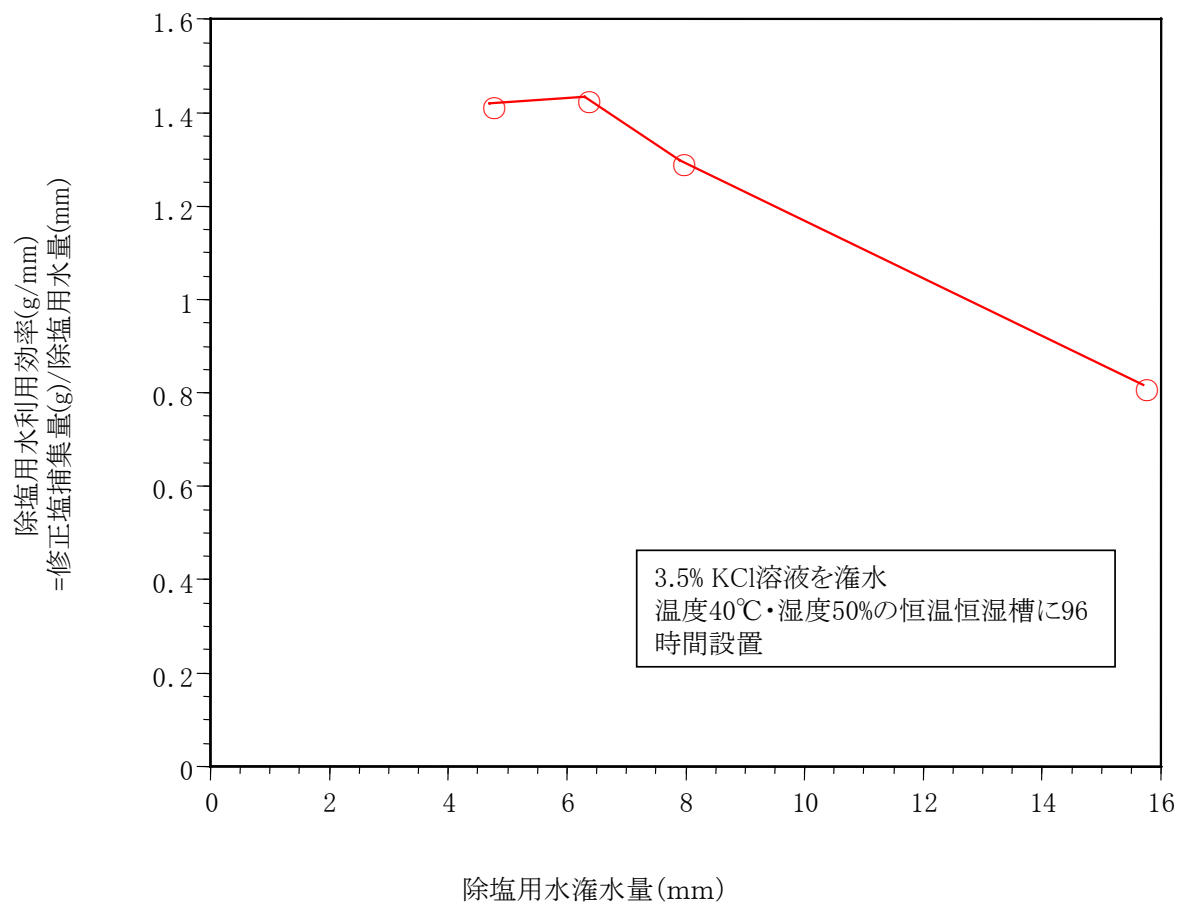


図 3-6 灌水量と除塩用水利用効率

灌水量 15.7mm の場合と、それ以下の灌水量の除塩用水利用効率差異の発生原因について、各灌水量のカラム深さと含塩比との関係を表した図 3-7 のグラフで検討した。15.7mm 灌水量の場合、含塩比はもともと塩を含んでいなかった 8cm 近辺で 19%となっている。この塩の動きから、灌水された除塩用水の一部が蒸発力によって上昇しきれずに、排水を起こしたと仮定できる。排水に伴ってカラム深さ 8cm への塩集積もなされた。つまり、灌水された除塩用水が、塩の土壌表面への集積に全て使い切れずに排水されてしまうため、除塩用水利用効率が灌水量 15.7mm の場合、他の灌水量より相対的に低くなったと判断できる。灌水量 7.9mm と、灌水量 6.3mm 間の利用効率の違いも同様に排水の発生で説明可能である。カラム深さ 6cm では、灌水量 6.3mm の含塩比が 2%未満であるのに対して、灌水量 7.9mm では、6%と約 3 倍の量の塩が存在している。このことから、深さ 6cm 以下への排水が、7.9mm でも起こっていることが推測できる。灌水量 4.7mm と 6.3mm の違いは、灌水量 7.9mm、15.7mm と 6.3mm との差異に比べ小さい。カラム深さ 6cm 以下への排水が発生しない灌水量 6.3mm 以下では、除塩利用効率はゆるやかに減衰していくと予測できる。特に、灌水量 4.7mm、6.3mm、7.9mm 間の除塩用水灌水量の違いによる除塩用水利用効率の差異について考察を進めるために、除塩用水の灌水速度(mm/s) と、除塩用水が 20℃で理論的に溶解が可能な塩量(国立天文台、1999)である除塩用水可能溶解塩量の 2 変数をとった図 3-8 を作成した。

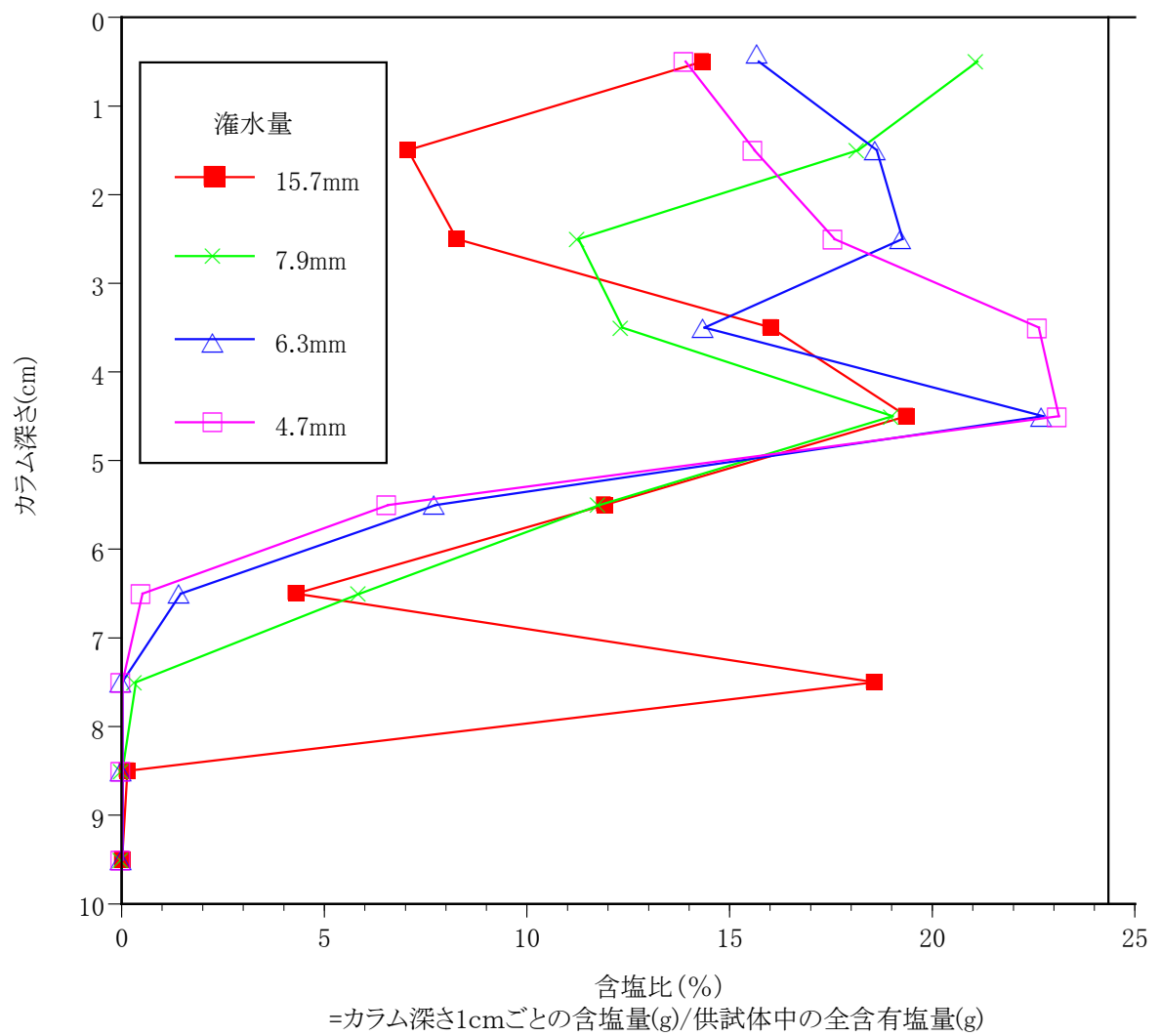


図 3-7 灌水量ごとの供試体含塩比

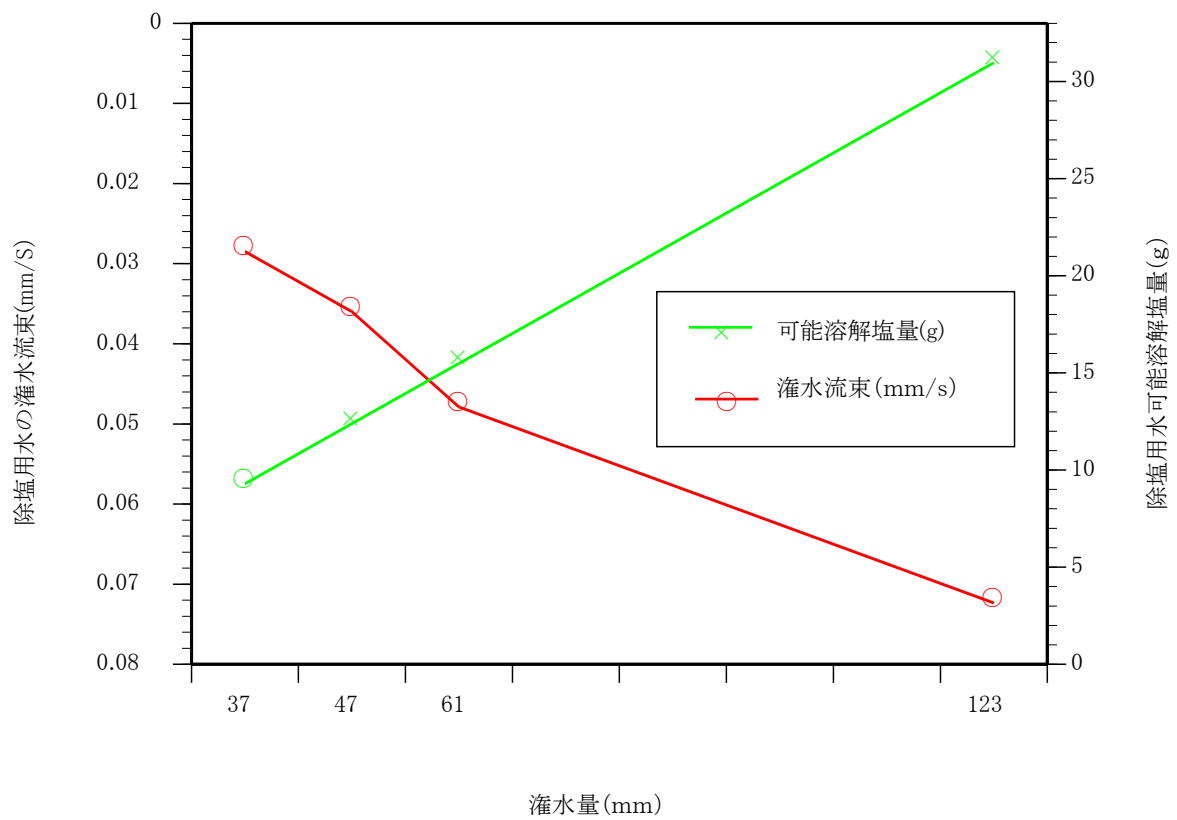
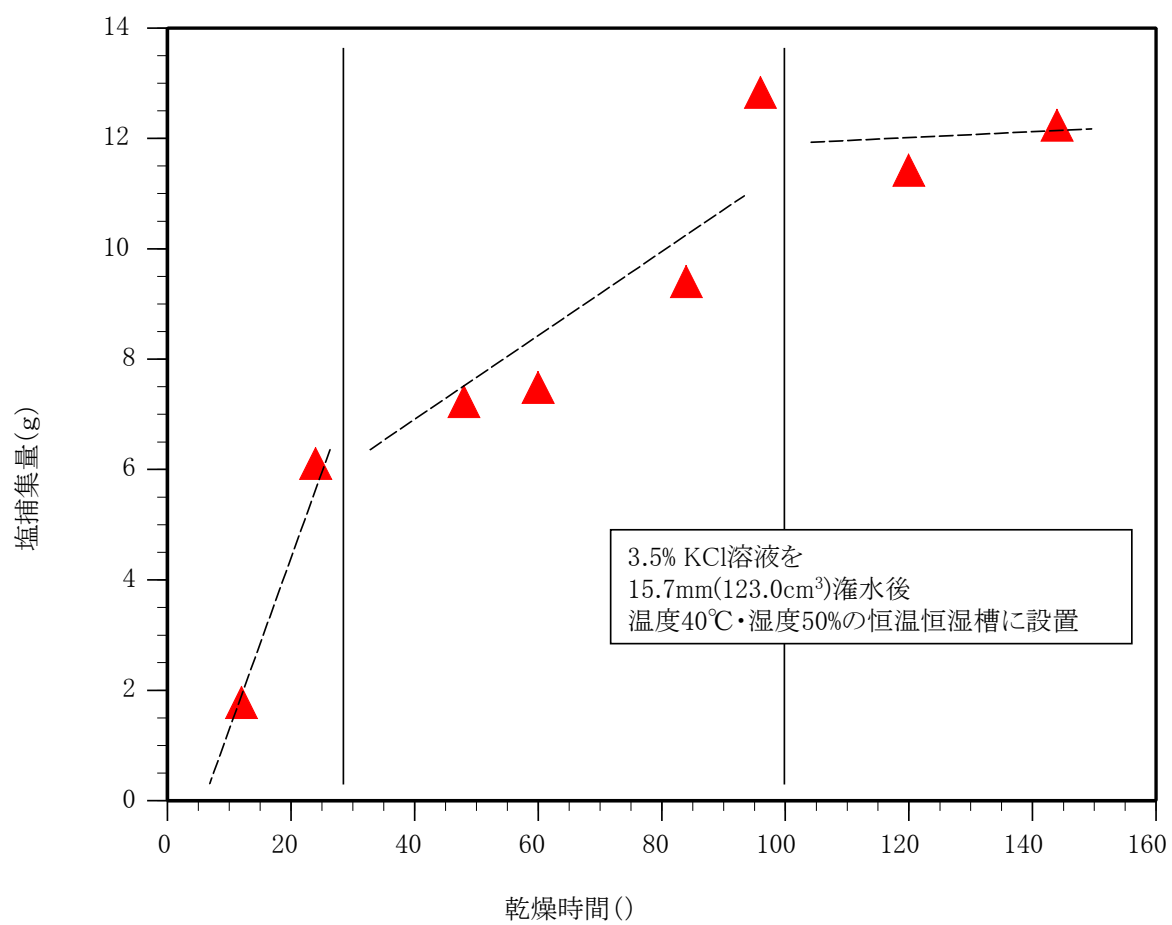


図 3-8 灌水量ごとの除塩用水灌水流束と可能溶解塩量

今回の実験の条件設定では、灌水装置に、あらかじめ決められた除塩用水量を注ぐため、灌水流速は除塩用水量によって決定される。所定の除塩用水量が少ないほど灌水流束は減少する。灌水流束が早く、かつ灌水量が多い場合、少ない場合に比べ、今回の灌水流束の範囲内であれば鉛直下方への除塩用水の浸透が相対的に早くなり、カラム深さ 6cm 以下への排水も促される可能性が高い。そのため、集積可能な塩の量が減少し、除塩用水量当りの塩溶解量は減少する。一方、除塩用水量が少なければ、溶解可能な塩量の絶対値は減少する。つまり、この 2 変数間では、トレードオフの関係が成り立ち、どこかに、塩捕集量を最大化させる均衡点の存在が予想される。よって、6cm 以下への排水が発生せず、灌水量 6.3mm 以下の除塩用水量では、灌水流速と溶解可能塩量との均衡点が 6.3mm 近辺に存在すると仮定した場合、4.7mm が 6.3mm に比べて塩捕集量が少ない事実を説明できる。以上の点から、大規模な排水が発生しない一定の灌水量以下の除塩用水利用効率は、灌水量と同時に灌水流束も考慮に入れる必要があることがわかった。灌水量 15.7mm のカラム深さ 6cm 以下への排水発生は、灌水流束の違いではなく、単純に灌水量そのものが多いことが原因と思われる。

3) 乾燥時間と塩捕集量の関係

本実験の基本条件である、KC1 濃度 3.5% の除塩用水を灌水量 15.7mm、除塩回数 1 回の灌水を行なった供試体について、恒温恒湿槽への設置した時間を乾燥時間とし、各乾燥時間と塩捕集量(g) との関係を図 3-9 に示した。乾燥時間と塩捕集量との関係は、直線的に増えるのではなく、急激な塩捕集量の上昇を示す時間、と緩慢な塩捕集量の上昇がなされる時間、さらに、塩捕集量が一定値に達する時間の 3 つに分類できる。まず、0 時間～24 時間で、急激に塩捕集量が増加し、その後、96 時間までに捕集量がほぼ一定した傾きで緩慢に上昇、その後 96 時間以降は、ほぼ一定値に達する。



乾燥時間と塩捕集量(同一除塩用水量条件下)

図 3-9 乾燥時間と塩捕集量

乾燥時間と塩捕集量の関係は、供試体からの蒸発の乾燥時間ごとの変化を観察する必要がある。図 3-10 に、各乾燥時間の供試体カラム深さごと含水比のグラフを示した。乾燥時間 12 時間のカラム深さ 1～5cm の含水比分布傾向は、24～84 時間に比べて 4%～6% 高い。逆に、6～10cm では乾燥時間 24 時間と比べると各深さで 2～4% 低い。このことから、乾燥開始から 24 時間までは、主に、カラム深さ 1～5cm の土壌水の一部は、下方へ再分配され、一部は鉛直上方へ移動し土壌表面から蒸発したとみなせる。また、含水比の減少傾向からみて、24 時間までに旺盛な蒸発が行なわれたとみなせる。

より詳細な蒸発の状態変化を知るために、灌水量、除塩用水濃度等同一条件設定で行なわれた、乾燥時間と蒸発強度の関係を示す図 3-11 を作成した。図 3-11 からは、旺盛な蒸発が 10 時間まで続き、続いて、10 時間～24 時間までに、蒸発強度が急速に減衰し、24 時間以降は、緩慢に蒸発が進んでいくという 3 つの過程を経ていることがわかる。この蒸発過程は、典型的な裸地からの蒸発曲線とみなすことができる(D.Hillel, 1998)Hillel の分類に従えば、最初の旺盛な蒸発期であるⅠ期は蒸発強度が恒率段階にある恒率蒸発期であり、Ⅱ期は、蒸発強度が急激に減率する段階にある減率蒸発期、Ⅲ期は同じく減率蒸発期ではあるが、緩慢に減率する段階である。図 3-9 と図 3-11 の比較から、塩捕集量と蒸発強度との関係を見ると、恒率蒸発は 10 時間で終了し、蒸発過程の第Ⅱ期は 10 時間～30 時間までとなり、塩捕集量の増加率の急激な上昇の 12 時間から 24 時間とほぼ一致する。このことから塩捕集量の増加率の急激な上昇は恒率蒸発が終了した後から開始されているとも言える。

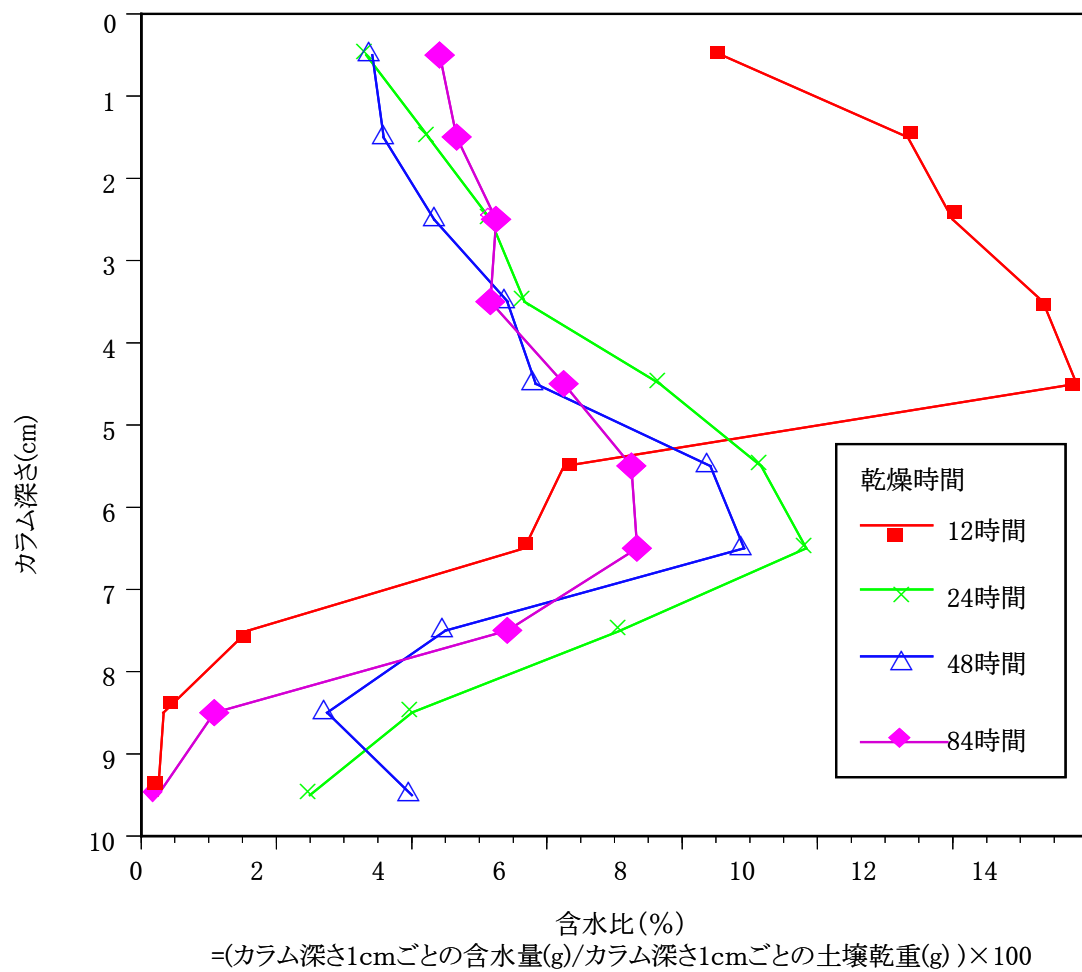


図 3-10 乾燥時間別カラム深さ別含水比

また、蒸発過程の第Ⅲ期は、蒸発については、30 時間以降であるが、塩捕集量の増加率減退は、24～96 時間までである。以上乾燥時間ごと蒸発と塩捕集量との関係をまとめると、恒率蒸発期は、蒸発が優越するため、むしろ塩の集積は進まず、蒸発の第Ⅱ期の急激な減率蒸発期にいたって、図 3-10 に見られるように、カラム深さ 1～5cm の塩を溶解した土壌水が鉛直上方に移動し、集積が盛んになり、塩の捕集量も急激に増加する。蒸発が第Ⅲ期に移行すると、塩の捕集量の増加率も緩慢になる。塩捕集量の増加ペースは 96 時間を境に、さらに緩慢になっているが、蒸発の第Ⅲ期では 96 時間前後で蒸発強度を測定していないため、判然としないが、蒸発強度と塩捕集量との以上の関連性を見る限り、第Ⅲ期においても 30 時間と 50 時間がほぼ同じ蒸発強度で、110 時間は蒸発強度が約半分であることから、96 時間前後に蒸発強度の減少ペースが大きくなっている可能性も考えられる。

今回は乾燥時間 144 時間を事件の条件設定の上限とした。乾燥時間を 144 時間以上に設定することで、図 3-9 のグラフの傾向から見て、さらに塩が捕集される可能性もある。しかし、急激な塩捕集量の向上は予想しにくい。その理由として、除塩作業終了後の捕集シートの観察を通じて、捕集シートと供試体表層との間に集積した塩が、一種のクラスト構造を形成することがあげられる。このクラストが形成されると、水蒸気移動は起こっても、土壌溶液の移動は阻まれる可能性が高い。また、図 3-9 で、84～96 時間の塩捕集量の増加率も急激とみなすこともできる。しかし、96 時間以降の塩捕集量が 96 時間よりも低いことから見て、本実験における 96 時間の塩捕集量は、高めに値が出てしまったと見ることができる。この原因としては、実験開始段階で考慮に入れていなかった、灌水流束の影響が出てしまったものと推察できる。96 時間については、若干灌水流束が遅い装置を使っていたため、値にブレが生じたと思われる。

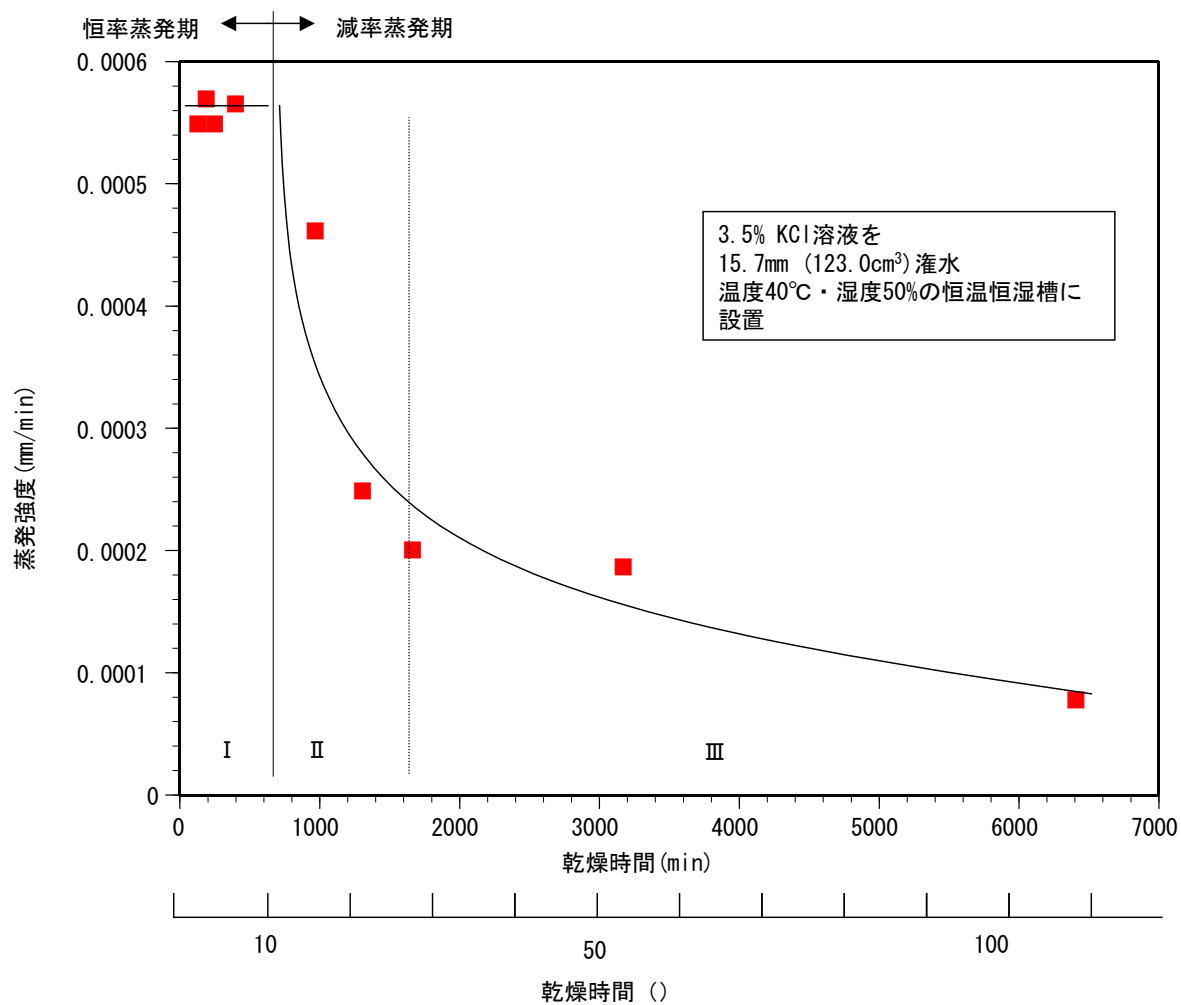


図 3-11 乾燥時間と蒸発強度

3.4 結論

本実験結果をまとめると、除塩回数については、回数増加による累積除塩量は向上するが、灌水 1 回当たりの除塩率は減衰することがわかった。また、除塩回数が増加するに従い下方への排水が発生することがわかった。

除塩用水灌水量については、灌水量 6.3mm で除塩用水利用効率が最大となることがわかった。この結果から、塩類集積状態を再現した試料においても、灌水量 6.3mm で除塩率が最大とは言えず、この点については、さらなる検証が必要である。除塩用水利用効率を最大化するためには、鉛直下方への排水を防ぐことが重要であり、そのための条件として、1 回あたりの灌水量を少なくする、灌水流量を制御することが必要であることがわかった。

乾燥時間と塩捕集量との関係については、初期に捕集量が急増し、その後はやや塩捕集量の増加ペースが減退し、続いて増加率が停滞していった。蒸発強度と乾燥時間の関係では、蒸発強度と塩捕集率にタイムラグがあることから、塩捕集量の急激な増加期は恒率蒸発期間終了後、蒸発強度の急激な減少期にむしろ時間的には相当することがわかった。

本実験結果から、今後現場レベルへ応用していくための基本条件を提案する。Dehydration 法の除塩用水利用効率を高め、除塩率を向上させるためには、灌水された除塩用水がほぼ 100%塩集積に利用されることが理想である。そのためには、塩除去のために目的とする土壌深さ以下への排水の発生を防ぐ必要がある。目的とする土壌深さ以下への排水の発生を防ぐ灌水量を決定するに当たっては、蒸発条件、除塩対象となる土性や土層条件、土壌の初期含水比および透水係数、灌水もしくは散水などの灌水方法、除塩処理時間、灌水流量が決定要因としてあげられる。また、複数回の灌水が、除塩率を向上させることから見て、目的とする土壌深さ以下に排水が発生しないように、1 回あたりの灌水量を減らす、灌水回数増加ごとに 1 回当たりの灌水量を減らす、除塩処理操作ごとに、一定時間を置くなどが考えられる。今回の実験では高塩濃度(3.5%)の除塩用水を用いて実験を行なった。供試体の含塩量や分布についても、モデル的な条件設定をした。このような厳しい条件設定下では、農耕が可能になるまでに含塩量をさげることはできないが、海水でも理論的には除塩が可能であることが実証された。

また、灌水流束が、除塩率に及ぼす影響が大きいことから、灌水方法の検討も含めて、除塩率と灌水流束との関係についての検討が必要である。

第 4 章 灌水装置と除塩効率

4.1 目的

本章では、除塩率に影響すると予想される条件のなかから、特に灌水方法に焦点を絞って、除塩率向上のための必要条件を検討した。特に、灌水流束と除塩率との関係は、これまでのカラム実験でも、問題となっており、除塩率を決定する重要な因子と推定できる。灌水流束をコントロールするため、新たに複数個の灌水装置を用意した。また、灌水流速とともに、灌水装置の一定底面積当りの孔密度を様々に変えて実験を行った。これによって、孔密度と除塩率との関係も探ることとした。

ここで、本章において頻繁に用いた、孔密度について改めて定義する。

孔密度=灌水装置の孔数/灌水装置底面積(cm^2)

4.2 実験方法

本実験においても、基本的にこれまでの Dehydration 法の実験室レベルのカラムを利用する実験方法を踏襲したが、既存の方法に加えて、灌水流束をコントロールするため、新たに複数個の灌水装置を用意した。図 4-1 に本実験の手順を示した。

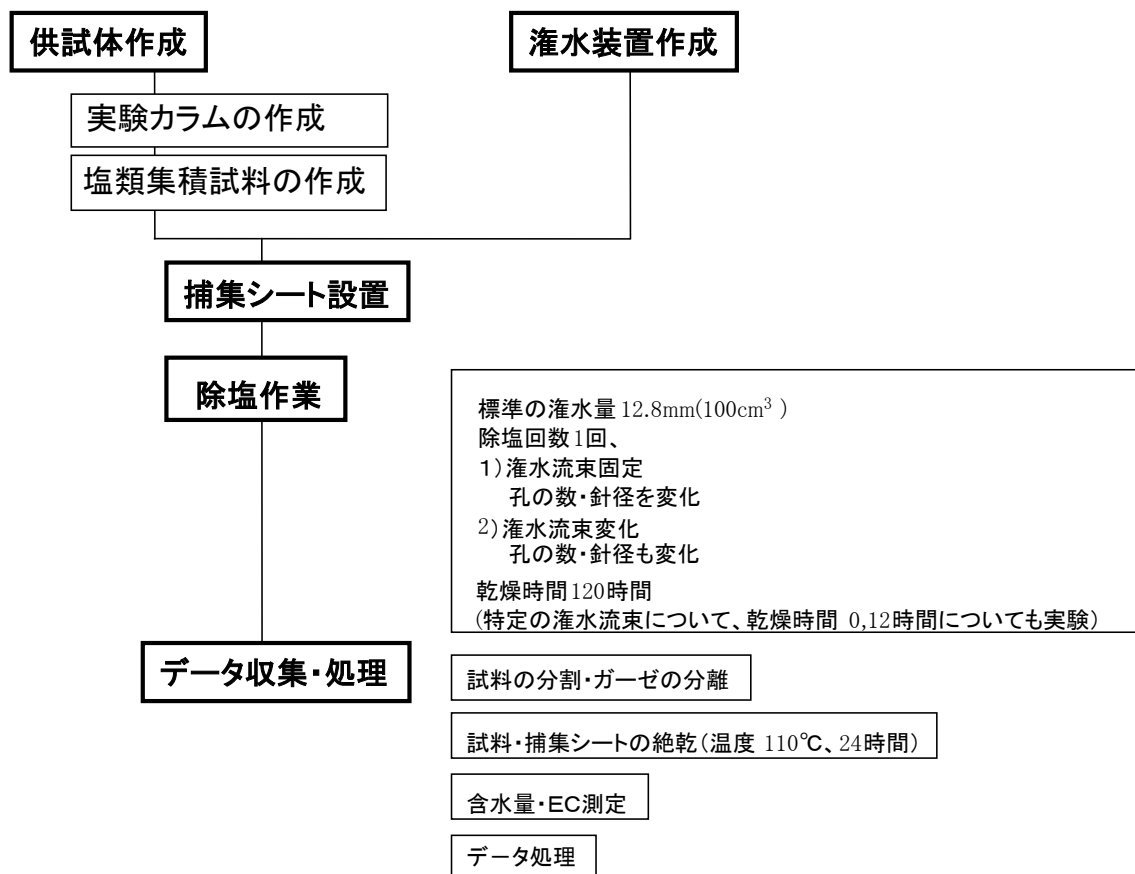


図 4-1 実験手順

1) 供試体の作成

供試体は、第 3 章の実験装置と同じ形状のものを用いた。供試体は図 4-2 に示した。カラムは内径 10.0cm、厚さ 0.5cm、高さ 1.0 cm のアクリル製円筒 10 個をテープで繋ぎ合わせ、底部には濾紙（東洋濾紙社製 2 種、直径 11.0cm）とランダムに孔をあけたアクリル製多孔板（直径 10.0cm）を敷いた。充填密度は最密と最疎の平均の値とした。豊浦標準砂および供試体の物理性は表 3-2 に示した。実験カラムの下半分には豊浦標準砂（599.4 g）のみを、上半分には、豊浦標準砂（599.4 g）に KCL（41.14 g）をまぜ、十分に攪拌した混合物を充填した。このカラムを塩類集積供試体とした。

本章で取り扱う実験でも、塩と水分の挙動を詳細に検討するために攪拌混入方式を採用した。攪拌混入方式は、塩類分布、含水率分布にばらつきが少ないという利点がある。また、下半分に塩を含まないため、塩の移動に関して、変数ごとの違いが明瞭化しやすいという特性も有している。塩類は KC 1 で代表させた。KC 1 の混入量は、前回のカラム実験（桑畠・安部、2001）との連続性を確保するため、前回と同じ 41.14g とした。

また、豊浦標準砂を用いた供試体の水分特性曲線を図 4-3 に、体積含水率と透水係数との関係を示す θ -K 曲線を図 4-4 に示した。図 4-3 及び 4-4 は、表 4-2、豊浦標準砂の van genuchten パラメーターをシミュレーションプログラム RETC(U. S. Salinity laboratory)に入力することで作成した。

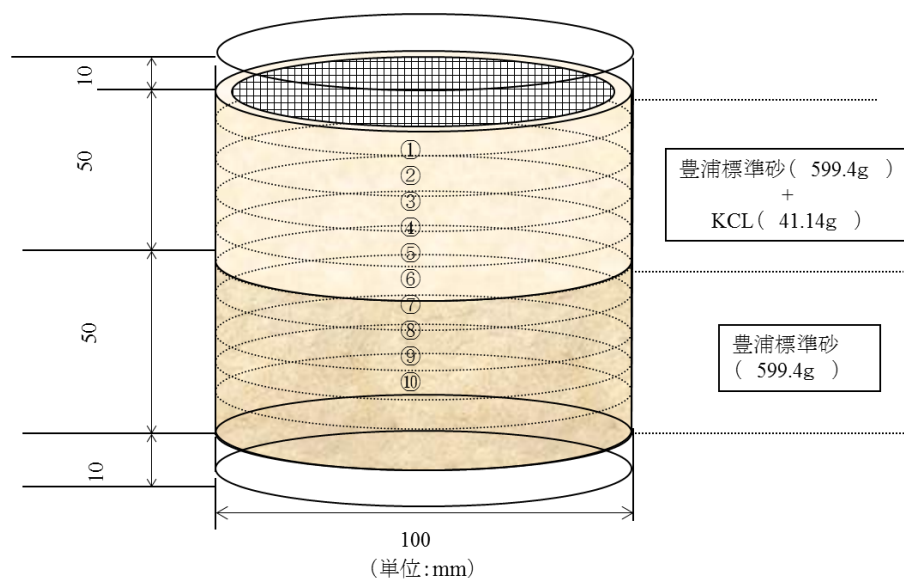


図 4-2 供試体

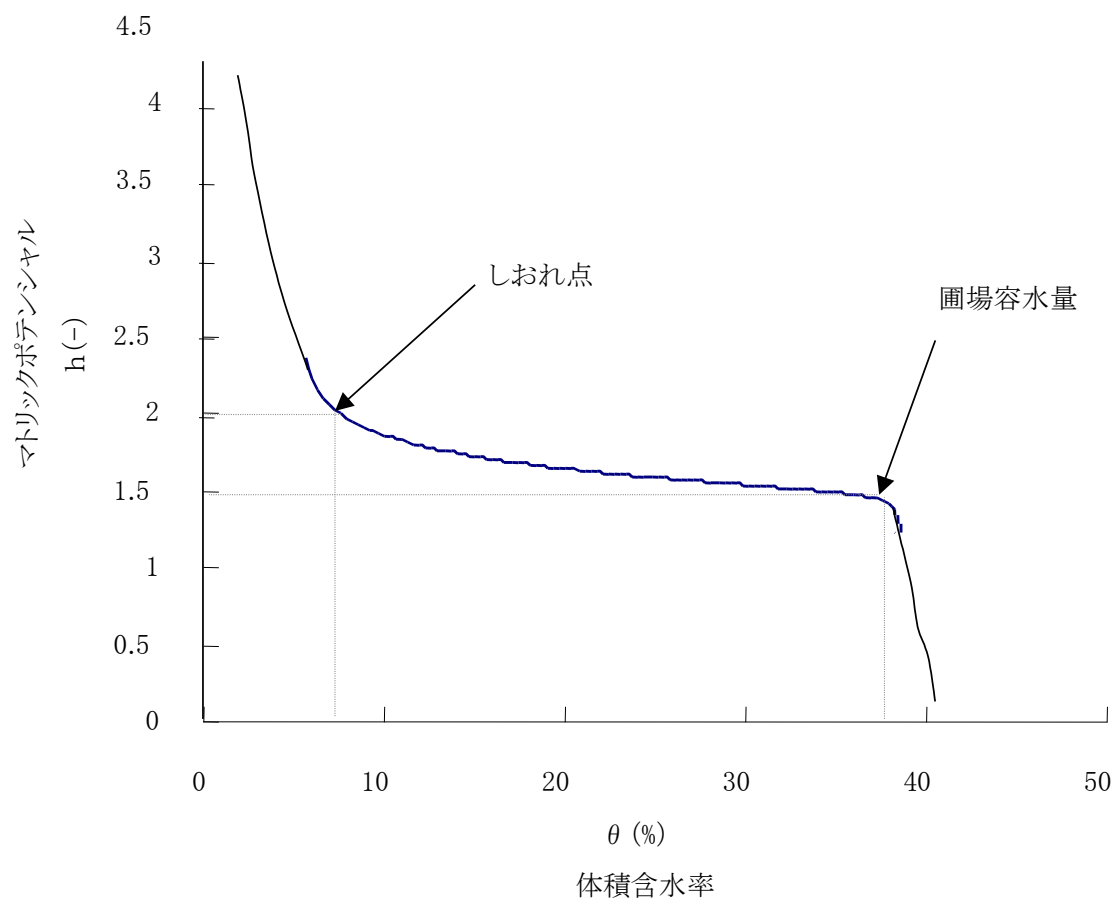


図 4-3 水分特性曲線

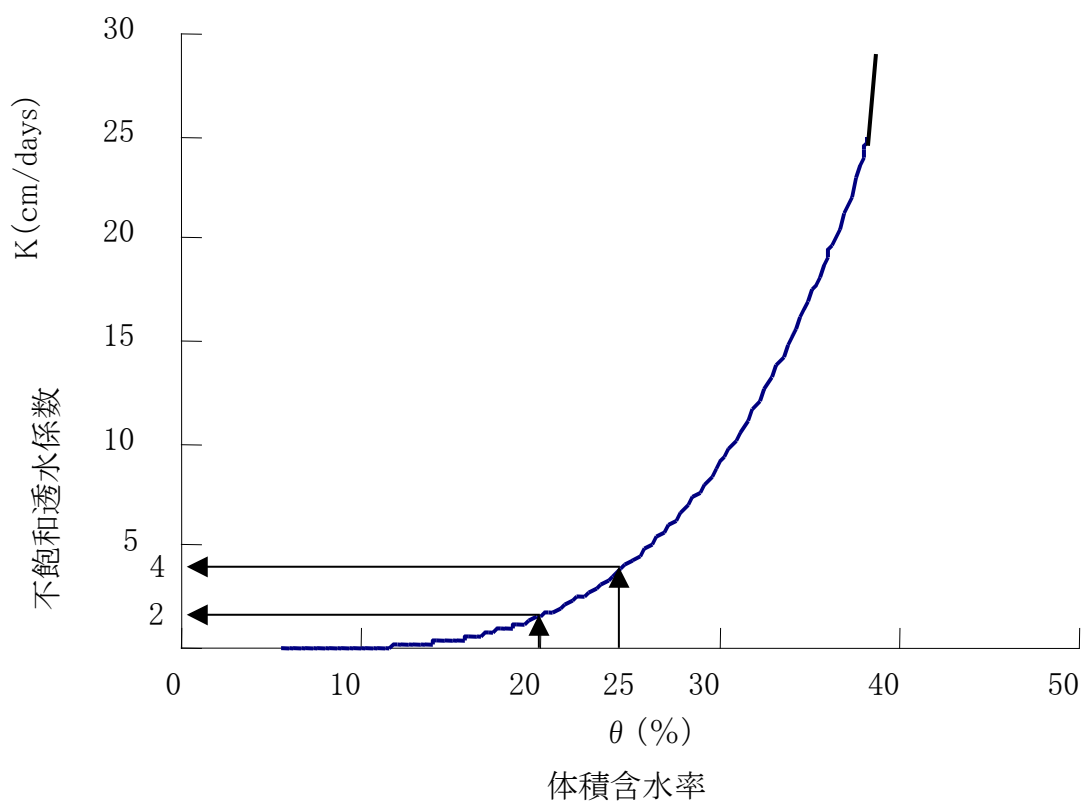


圖 4-4 θ - K 曲線

2) 灌水装置の作成

まず、内径 100mm、厚さ 4mm のアクリル円筒を、200mm に切断し、一方の面に、同様に内径 10cm、厚さ 25mm の発泡スチロールをはめ込んだものを複数個用意した。発泡スチロールとアクリル円筒の接触面は、水漏れしないように、防水パテを塗った。次に、灌水装置の発泡スチロール部分に、内側から、針(テルモ製)を外側に向かって刺し、横から見て灌水装置内側の発泡スチロール面に、針の低部が見えなくなるまで十分に押し込んだ。

灌水時の流束をコントロールするために、灌水装置に用いる針の径を 0.4mm、0.8mm、1.2mm の 3 種類用意した。灌水装置底面の孔については、それぞれの針の径について、それぞれ 9、18、27 の孔が開いている灌水装置を作成した。針径 1.2mm については、さらに 3、10、41、60 の孔をもつ灌水装置を作成した。表 4-1 に孔数と、針径をまとめた。図 4-5 に灌水装置を示した。

3) 塩類捕集シートの選定

塩類捕集材を土壌表面にセットした。捕集材は、安部らの研究結果(沙漠研究 2 19-27 1992) から、天然繊維製品で塩類の吸着効率が高い医療用ガーゼ(東栄衛材株式会社製矢羽十字印) を五枚重ねにしたシート状のものをを用いた。

表 4-1 灌水装置と除塩用水初期投入量及び時間

< 針径 >							
針の外径	(mm)	0.4		0.8		1.2	
< 孔数 >							
		3	9	10	18	27	41 60
< 除塩用水初期投入量 >							
	(mm)						1.91～6.37
	(cm ³)						150～500
< 投入時間 >							
	(s)						45～4500

表 4-2 van genuchten パラメーター

θ_r	θ_s	n	α	K_s
【cm ³ /cm ³ 】	【cm ³ /cm ³ 】	【-】	【1/cm】	【cm/days】
0.045	0.430	2.680	0.145	24.960

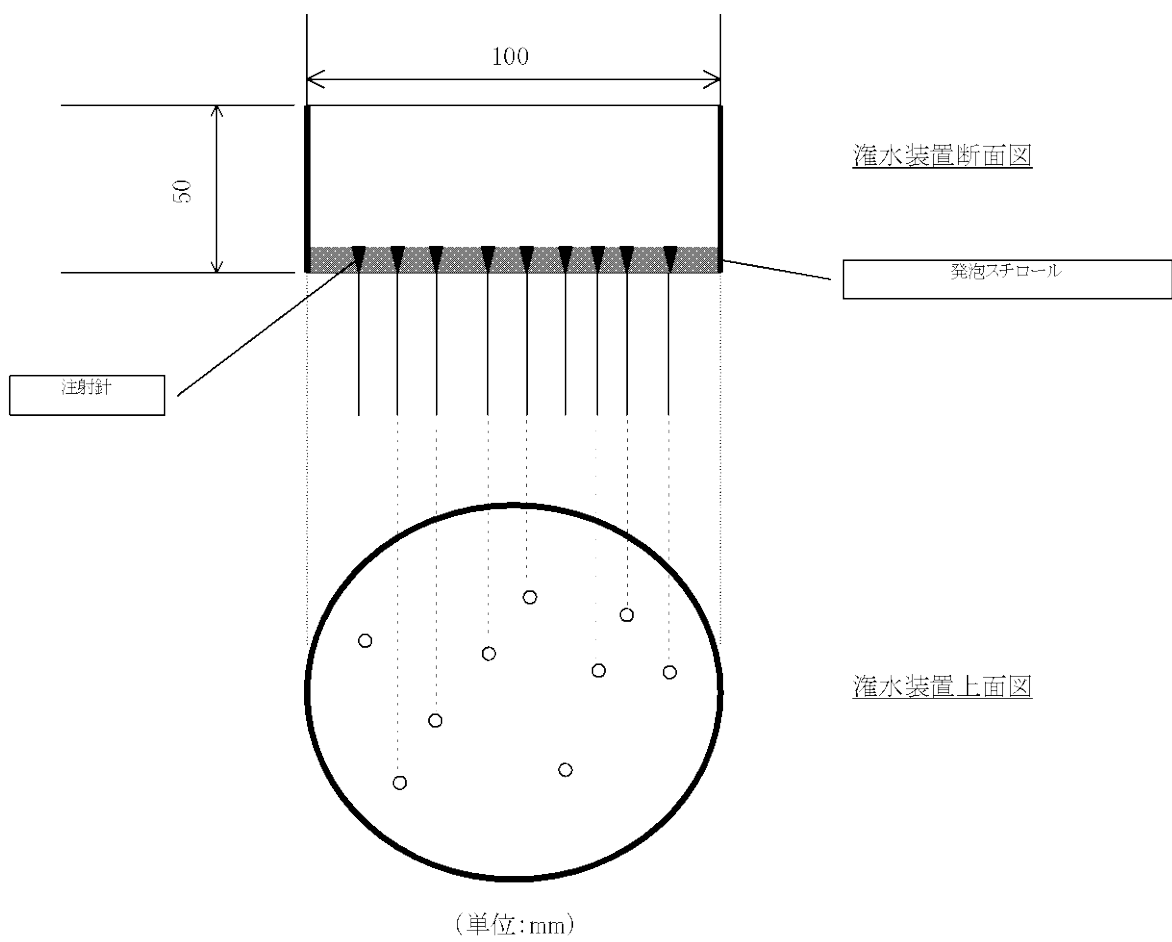


図 4-5 灌水装置(模式図)

4) 灌水流束の調整

灌水流束は、針径、底面積あたりの孔の数、灌水装置の水頭高さ、つまり除塩用水初期投入量に規定される。除塩用水初期投入量については、求める灌水流束を得るために、表 4-1 に表すように 1.91~6.37mm(150~500cm³)の範囲で選択した。投入時間は、それぞれ 45~4500(s)を要した。以上の 3 要素を組み合わせることで、灌水流束を $2.8 \times 10^{-4} \sim 348.2 \times 10^{-4}$ cm/s に調整した。灌水流束は、実際の灌水前にあらかじめ計測した。具体的には、各灌水装置につき、それぞれ、6.37mm(500cm³)の除塩用水を投入し、7.9mm(50.0cm³)灌水毎の経過時間を測定した。針中に空気などの混入が生じると空気が混入した針は、除塩用水を通しにくくなるため、灌水直後、スポイトで空気を吸い取り、流束の一定化を図った。

5) 除塩実験の実施

かくはん混入方式によって作成した塩類集積試料に対し、前出の灌水装置を用いて KC1 溶液を土壌表面に灌水することで除塩処理を行った。

KCL 溶液の濃度は、これまで、海水と同濃度の 3.5% KCL 溶液であったが、今回の実験については、灌水流束と除塩率の関係に重点を置いて検討を進めるため、灌漑水質として利用できる限界値の 0.2% KCL 溶液とした。除塩用水量は 12.8mm (100.0cm³) とした。

供試体の土壌表面に塩類捕集シートを設置したのち、電子秤上にセットし、供試体を乗せた状態で秤量をゼロに修正した。灌水装置を、電子秤上にある供試体の土壌表面から高さ 10.0cm のところに針先がくるように設置した。その後、灌水装置に求める灌水流束を得るための初期除塩用水量を静かに流し込んだ。均等に灌水できるように時々供試体を回しながら灌水し、電子秤が 100.0cm³ 値を示した時点ですばやく灌水を中止した。同時に、灌水直後から、灌水時間の計測を開始し、灌水終了時に所要時間を計測する。

塩類捕集シートを設置した後に灌水するのは、シートを湿らせることによってシートと土壌との密着性を向上させ、土壌溶液のシートへの移動を促すためである。

この灌水装置は、ビーカー等で直接流し込む方法に比べて、より均等に灌水が

可能であり、塩類捕集シートと供試体土壌表面との密着度を高めることができる。

灌水を行なった供試体を乾球温度 40℃、湿球温度 30.3℃、相対湿度 50%、飽差 3.92hPa の乾燥条件に設定した恒温恒湿槽(プログラム低温度恒温恒湿槽、株式会社二葉科学製 GLMP-6255) 内に 120 時間静置し、除塩作業を行なった。供試体側面への熱の影響を緩和させる為にカラム側面に発泡スチロールを二重に巻きつけて断熱した。恒温恒湿槽内の乾燥環境条件は、裸地からの蒸発量が 13mm/day(4745mm/year) となる環境に設定した。これはオーストラリア西部の乾燥地域の夏季を模したものである。本実験では、乾燥時間は、120 時間を基本時間とした。これまでの実験から、本カラム条件で、土壌表層と塩類捕集シートとの間に液状水の移動が停止するのが、ほぼ 100 時間以上と確認されているためである。また、基本時間以外に、灌水流束 $64.3 \times 10^{-4}(\text{mm/s})$ 、 $199.8 \times 10^{-4}(\text{mm/s})$ それぞれについて、乾燥時間 0 時間及び 12 時間の場合についても実験を行なった。乾燥時間 0 時間の設定は、灌水直後の塩類・水分の分布を知るために、12 時間の設定は、これまでのカラムの蒸発条件から、恒率蒸発が終了した時間時の塩類・水分の分布を知るために設定した。

6) 分割試料の含水量および EC の測定

除塩実験が終了した供試体を深さ 1cm 毎に分割し湿土質量を計測した後、24 時間絶乾させた。絶乾後の土壌の質量を再び計測して、含水量を算出した。その後、実験室で一般的に塩分測定に用いられる、絶乾土壌に絶乾土壌質量の 2 倍の純水を加え、よくかくはんし塩類を抽出させた後、電気伝導度を測定する方法を用いた(Brady N.C. Weil R.R : 1999)。

塩類捕集シートは土壌表面から剥離させ、質量を計測した後絶乾させ、質量測定後 200cm³ の純水を加えて電気伝導度を測定した。

電気伝導度の値を KC 1 濃度に変換し、その KC 1 濃度、溶液量から各層の体積当たりの塩類の絶対量を算出した。また、除塩実験終了後の土壌層深さごとの体積含水率と KC 1 量の分布を求めた。

4.3 実験結果および考察

1) 灌水流束と除塩率の関係

図 4-6 に灌水流束と除塩率の関係を示した.

灌水流束 $q(\text{cm/s})$ は

$$q=V/At\cdots(1)$$

V : 実際に供試体へ灌水した体積(cm^3)

A : 灌水装置底面積(cm^2)

t : 灌水時間(s)

と定義する.

除塩率 $D(\%)$ は

$$D=C_c/C_0\times 100\cdots(2)$$

C_c : 修正塩捕集量(g)

(実際の塩捕集量から除塩用水に含まれる塩量を減じた量)

C_0 : 供試体含有塩量(g)

とした.

図 4-6 から、灌水流束と除塩率には全体的に負の相関が見られた.灌水流束が $100.0\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 以下から急激に除塩率は高くなることが傾向として見られた.灌水流束と除塩率との相関性が発生した原因を検討するため、除塩作業後の各供試体を分割し、灌水流束 $100.0\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 以下に 4 点を取り、各灌水流束の、カラム上部(0~5cm)及び下部(6~10cm)、捕集シートそれぞれの含塩比を示した図 6 を作成した.図 4-7 から、灌水流束が小さくなると、塩捕集量が大きくなる傾向が確認できた.同時に、灌水流束が小さくなるとカラム下部への再配分が促進している傾向も確認できた.

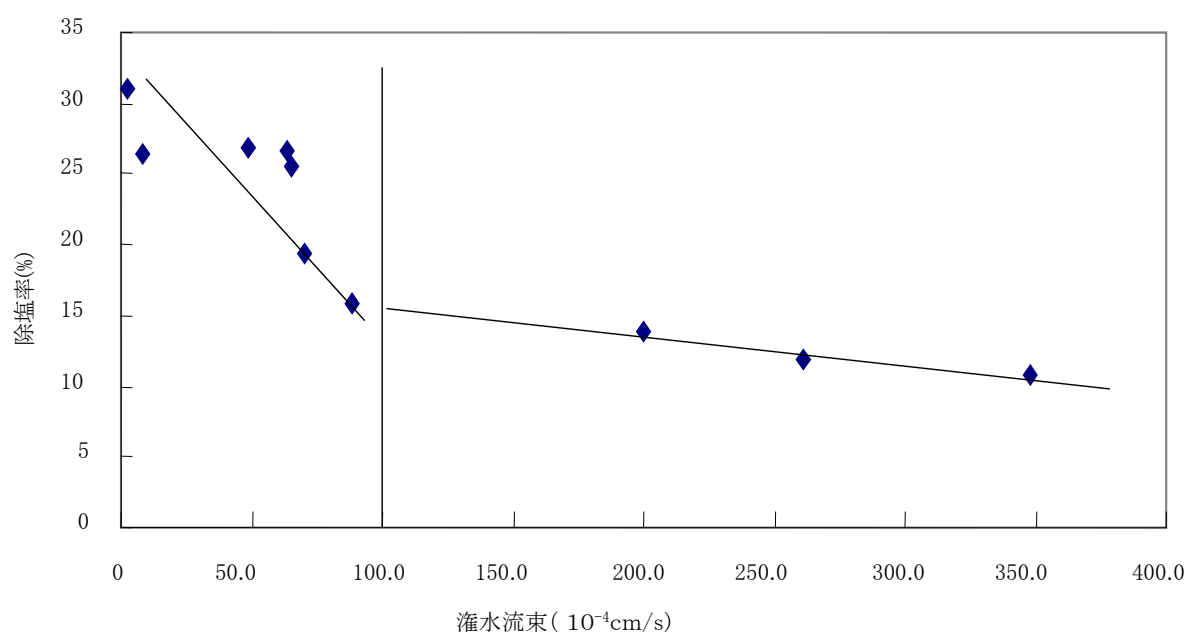


図 4-6 灌水流量と除塩率-

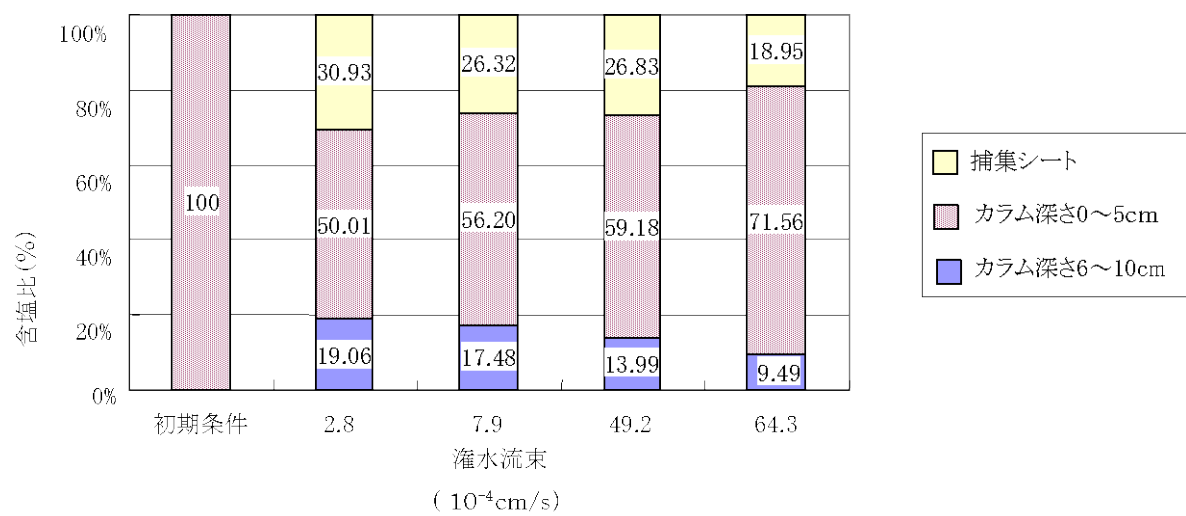


図 4-7 灌水流束ごと捕集シート・カラム上部・下部別含塩比

2) 除塩処理後の含塩比と含水比分布

図 4-7 に加えて、それぞれの灌水流束のカラム深さごと含塩比を測定した図 4-8 を作成した。図 4-8 の初期含塩比分布と、除塩処理後の含塩比分布を比較すると、初期含塩の一部は上方へと向い、捕集シートで捕集され、残りは下方へ移動したことがわかる。蒸発力によって上方へ移動した塩除塩され、下方へ移動した塩は、下端に達することなくカラム中に滞留している。全体としては、下方への再分配が進まない灌水量を設定したため、上方への移動が、下方への移動より旺盛であった。カラム深さ 4~5cm 地点が、各灌水流束の違いが最も顕著である。本供試体は、最も速い灌水流束($64.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)、2 番目に速い灌水流束($49.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)では約 20%の含塩比である。

一方、4 点で最も遅い灌水流束($2.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)、2 番目に遅い灌水流束($7.9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)では、含塩比がいずれも 8%、9%と前二者に比べ半分以下の含塩比になっている。

カラム深さ 1~2cm では、灌水流束が速いほど含塩比が低くなっており、カラム深さ 4~5cm の含塩比の傾向と全く逆の傾向を示している。カラム深さ 7cm 以下でも同様に、灌水流束が遅いほど含塩比が高い。

しかし、塩の絶対量から言って、最も顕著な違いを示しているのはカラム深さ 4~5cm であり、この範囲での含塩比の違いが、除塩率の違いに関係していると思われる。このことを、さらに検討するため、カラム深さごと含水比を検討する。

図 4-9 は、図 4-7、4-8 で用いた 4 点の灌水流束のカラム深さごと含水比である。図 8 から、全体として、灌水流束が速いほど、各層における含水比は小さくなる傾向が見られる。同量の除塩用水量を灌水しながら、含水比に差が出たことから、灌水流束が速いほど蒸発量が多く、蒸発が旺盛であったと判断することが可能である。より詳細に各層の含水比を検討すると、灌水流束が速い 2 点のカラム深さ 6cm~8cm の含水比がほぼ 0%であるのに比べて、遅い 2 点の灌水流束の含水比は 3~4%となっている。図 4-8 でも、カラム深さ 6cm 以下で、灌水流束が速い 2 点の含塩比がほぼ 0%で、遅い 2 点の灌水流束では含塩比が 7~9cm にかけて含塩比が 4%であった。図 4-8 と図 4-9 の含水比分布と含塩比分布から、遅い 2 点の灌水流束では、カラム深さ 6cm 以下への塩類を溶解した土壌水の再分配が起こったとい

えよう.一方、カラム深さ 1~5cm では、灌水流束の速い順、つまり除塩率の低い順に含水比が小さくなっている.実際の蒸発量で比較すると、灌水流束が速い 2 点の除塩作業終了後の蒸発量(g)は、灌水流束 $49.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ では 81.3 g、 $64.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、では 85.9 g、灌水流束が遅い 2 つの蒸発量は、 $2.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ では 61.7 g、 $7.9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ では 63.7 g であった.これらの現象をまとめると、設定した 4 点の灌水流束条件範囲では、除塩処理後の含塩比・含水比分布に限定すると、蒸発が抑制され、再分配が促進された場合のほうが、蒸発が促進され、再分配が抑制された場合より、除塩率が高いという結果が得られた.

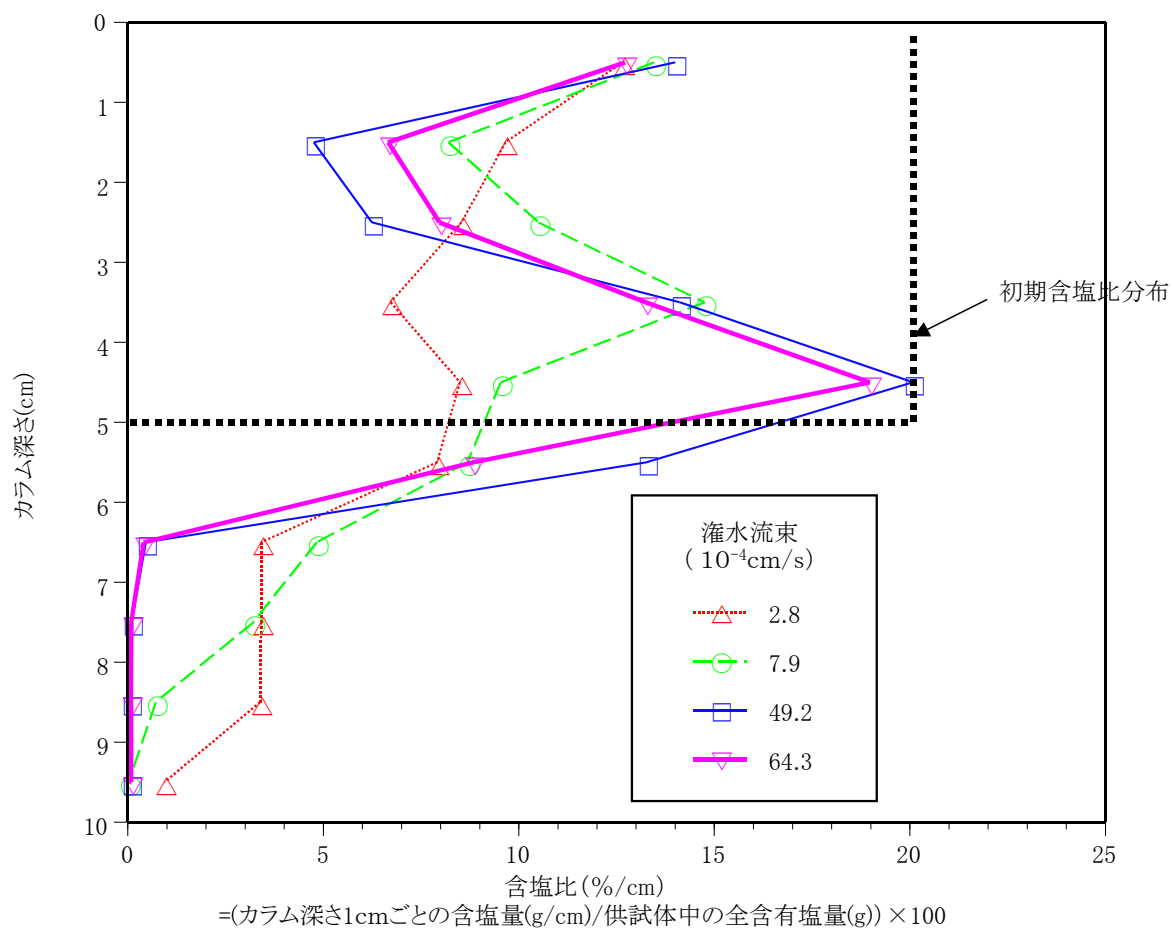


図 4-8 灌水流束ごとカラム深さ(cm)別含塩比(%/cm)

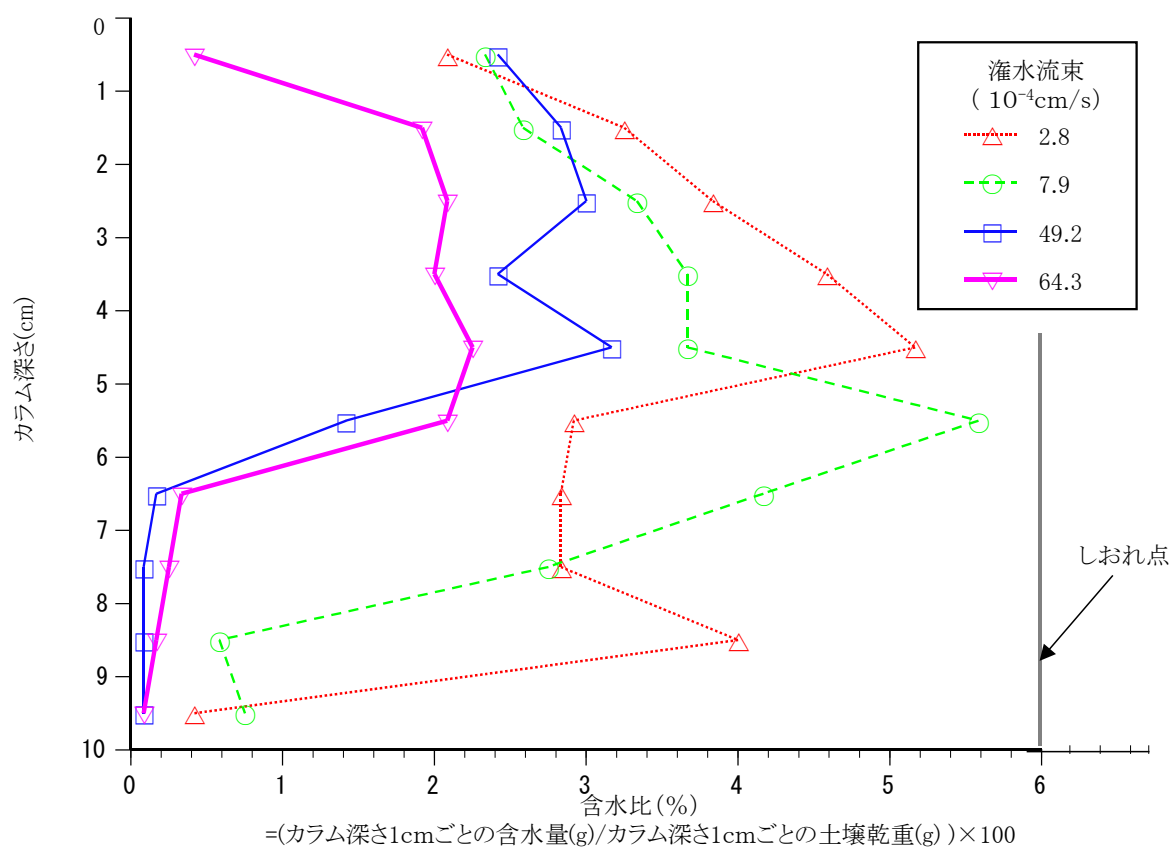


図 4-9 灌水流束ごとカラム深さ(cm)別含水比(%)

3) 初期含水比・含塩比と除塩率

時間的・空間的にマクロスケールで考えた場合、蒸発が促進され、再分配が抑制された場合のほうが、除塩率が高くなる印象を抱きやすい。しかし、図 4-8 および図 4-9 から、塩捕集率の変化は、灌水量の多寡よりも、灌水流束の違いにより起こる含水比分布、含塩比分布の変化との関連が要因としては大きいと考えるほうが、本実験条件下では合理的な説明が可能となる。よって、図 4-6 から、より明瞭に除塩率の差異がある 2 点として、新たに灌水流束 $64.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (以下灌水流束 A) 及び、 $261.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (以下灌水流束 B) を選び、乾燥 0 時間、12 時間、120 時間後のそれぞれの供試体について、カラム深さごとの含水比分布である図 4-10、含塩比分布である図 4-11 を作成し、さらに検討した。

図 4-10 によれば、乾燥時間 0 時間つまり灌水直後の灌水流束 A の含水比は、深さ 1~6cm まで 10~15%、8cm 地点でも 3% あり、灌水が深さ 9cm まで分布している。灌水流束 B では、深さ 1 から 4cm まで含水比は 15~25%、5cm 地点で 2%、6cm 以下にはほとんど 0% であり、灌水がカラム上部に集中しており、深さ 3~5cm にかけて急激に減少している。灌水流束の違いによって、初期含水比分布の違いについては、本供試体条件における含水比と透水係数(K)との関係を示した図 4-4 でより詳細な検討が可能となる。灌水流束 B では、灌水流束 A に比べ、いち早く供試体上方の含水比が上昇する。図 4-4 から、透水係数 K は体積含水率あるいは含水比が 20% から 25% とわずか 5% 上昇するだけで、2(cm/days) から 4 へと約 2 倍になる。図 4-10 から、カラム深さ 1~3cm までは、灌水流束 B は含水比が 20~25% であり、体積含水率に換算すると 15~20% となる。一方灌水流束 A は、同じカラム深さ 1~3cm で 15% 前後、体積含水率で、11% 前後である。体積含水率が高ければそれだけ、透水係数は大きくなり、浸透においては、鉛直下方ばかりでなく、水平方向への浸透も盛んになる。ちょうど図 4-4 から、本供試体の場合体積含水率が 12% を超えたあたりから、急速に透水係数が大きくなるため、灌水流束 B ではカラム深さ 1~3cm で灌水流束 A に比べて、5~10% 大きい含水比をもつと推察できる。図 4-11 から、同様に灌水流束 B が A に比べ、乾燥時間 0 時間におけるカラム深さ 1cm までの含塩比が 10% 小さいことから、水平方向への浸透がより盛んであったことが理解できる。

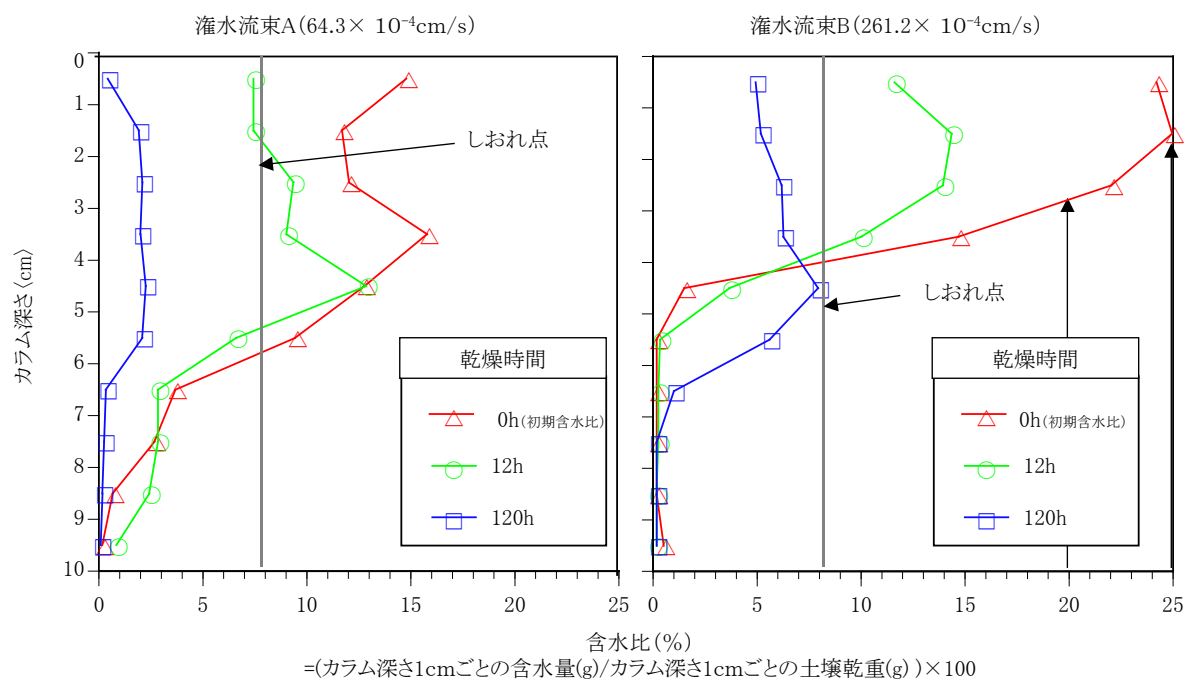


図 4-10 灌水流束別乾燥時間とカラム深さ(cm)含水比(%)

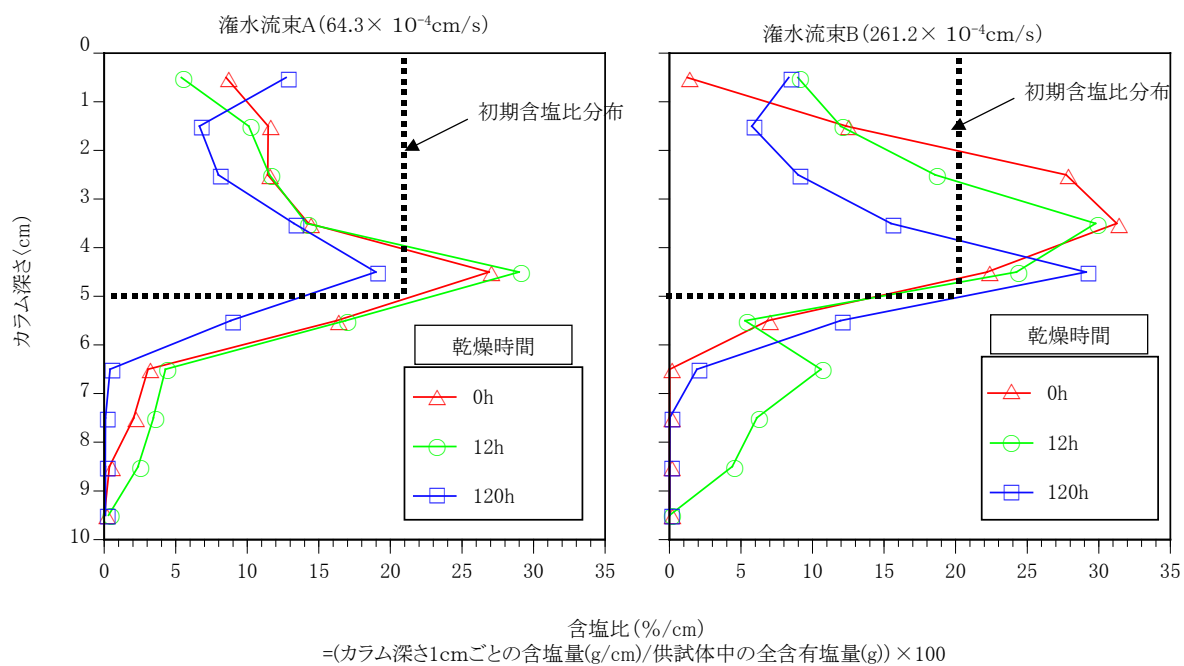


図 4-11 灌水流束別乾燥時間とカラム深さ(cm)別含塩比(%/cm)

4) 初期含水比と蒸発強度との関係

初期含水比分布と蒸発と関係をより詳細に検討するために、灌水流束 A 及び、灌水流束 B の乾燥開始から 14 時間までの蒸発強度について測定した図 4-12 を作成した。

図 4-12 から、本カラム条件及び灌水条件において、恒率蒸発期は乾燥開始から 3 時間までと考えられる。この恒率蒸発期では、同じ灌水量でありながら、灌水流束 B が、灌水流束 A より蒸発が明らかに旺盛である。

この傾向は減率蒸発期に入っても継続し、ほぼ 7 時間まで続く。蒸発強度及び蒸発量に大きな差異が生ずる要因として第一に考えられるのが、灌水直後のカラム深さ方向への含水比の分布形状である。カラム上方の含水比が高いほど、蒸発開始からの蒸発が促進すると考えられる。供試体は、灌水後速やかに恒温恒室槽に設置されるため、灌水直後から蒸発を開始する。これは、図 4-10 で灌水流束 B では、灌水直後から 12 時間までカラム深さ 1~4cm の含水比が、いずれも 10~15% 減と、灌水流束 A の同じ層が 4~8% 減に比べて減少量が大きいことからわかる。初期含水比が大きいほど蒸発量が多いことは、図 4-3 の本供試体の水分特性曲線及び、図 4-10 の初期含水比分布から説明できる。蒸発に際しては、十分に大きい乾燥環境の場合、土壌水の圃場容水量(体積含水率 38%)以上では、マトリックポテンシャルが 1.5 以下と低いため、蒸発が容易に行われ旺盛となる。体積含水率が低くなるに従い、マトリックポテンシャルが高くなるため、同一エネルギー条件下、つまり同じ乾燥環境条件でも蒸発量は減少していくことになる。しおれ点(体積含水率 8%)以下では、マトリックポテンシャルが 2 を越え、急激なペースでマトリックポテンシャルが高くなっていくため、さらに蒸発が困難となる。ここで、図 9 を見ると、灌水流束 B では、しおれ点以上の土壌水がカラム上方、特にカラム深さ 1~3cm に量的に多く、これらの土壌水はマトリックポテンシャルが低いために、一定エネルギーを加えた場合、マトリックポテンシャルが高い場合に比べ、カラム深さ 1~3cm では特に、灌水流束 A に比べてより蒸発しやすい土壌水が多いことがわかる。これだけ旺盛な蒸発が行なわれながら、恒率蒸発が行なわれた期間を含む乾燥時間 12 時間時点で、除塩量はそれぞれ、灌水流束 A で 1.04 g、灌水流束 B が 1.21 g と、120 時間後の除塩量の 21.4%、9.5%にとどまった。この

原因として、12 時間までは、蒸発が優先して、下方から上方への土壌水に溶解した塩類の上昇が 12 時間以後に比べ抑制されたと考えられる。乾燥時間ごとのカラム深さ方向への含塩比の分布形状を示した図 4-11 を見ると、灌水流束 A では、乾燥時間 0 時間と 12 時間の含塩比曲線はほぼ一致した。灌水流束 B では、カラム深さ 0～1cm で乾燥時間 12 時間では、10%増加し、2～3cm では逆に 12～13% 減少した。このことから、塩の上方への移動が起こったとみなせる。どちらの場合でも、塩類の減少はカラム深さ 3cm までに限定されており、塩類の上方への移動もこの範囲でのみ起こったと考えてもよい。

乾燥時間 0 時間での含塩比のピークは、それぞれ灌水流束 B がカラム深さ 3～4cm、灌水流束 A が 4～5cm 付近と、むしろ 4cm 以下に存在している。塩類は灌水直後に灌水の下方移動に伴って速やかに移動したためである。もし、塩類が、カラム深さ 1～3cm に存在していれば、蒸発に伴い塩捕集率は増加する可能性も高いが、灌水によって、いち早く塩類は 4cm 以下へ移動してしまうため、塩類の集積が抑制されたものと思われる。一方、恒率蒸発終了後である乾燥時間 12 時間から 120 時間までは、カラム深さ 3cm 以下から上方への塩類の移動が旺盛になる。上方移動が旺盛になれば、除塩量も増加する。筆者らのこれまでの実験から、減率蒸発期に移行してから除塩率は昂進することがわかっているが、その原因は以上のような理由と思われる。灌水流束 B は、灌水流束 A に比べ、カラム深さ 3cm までの土壌水がいち早く蒸発してしまうため、減率蒸発期に移行してから、土壌の上方移動に関与する土壌水の絶対量が不足することと、減率蒸発期にはいった乾燥時間 12 時間以降も含水比分布のピークがカラム深さ 1～2cm であり、含塩比分布のピークのカラム深さ 3～4cm より上方にあることによって、塩類を上方に移動させる土壌水の量が少なくなることから、120 時間後の除塩量に差が生じたと考えられる。以上のことをまとめると、速い灌水流束 B は遅い灌水流束 A より灌水直後の含水比分布がカラム上方で大きいため、恒率蒸発期の蒸発が促進される一方、減率蒸発期には、塩類を上方へ移動させる土壌水が相対的に少なくなることにより、塩捕集量は減少する。

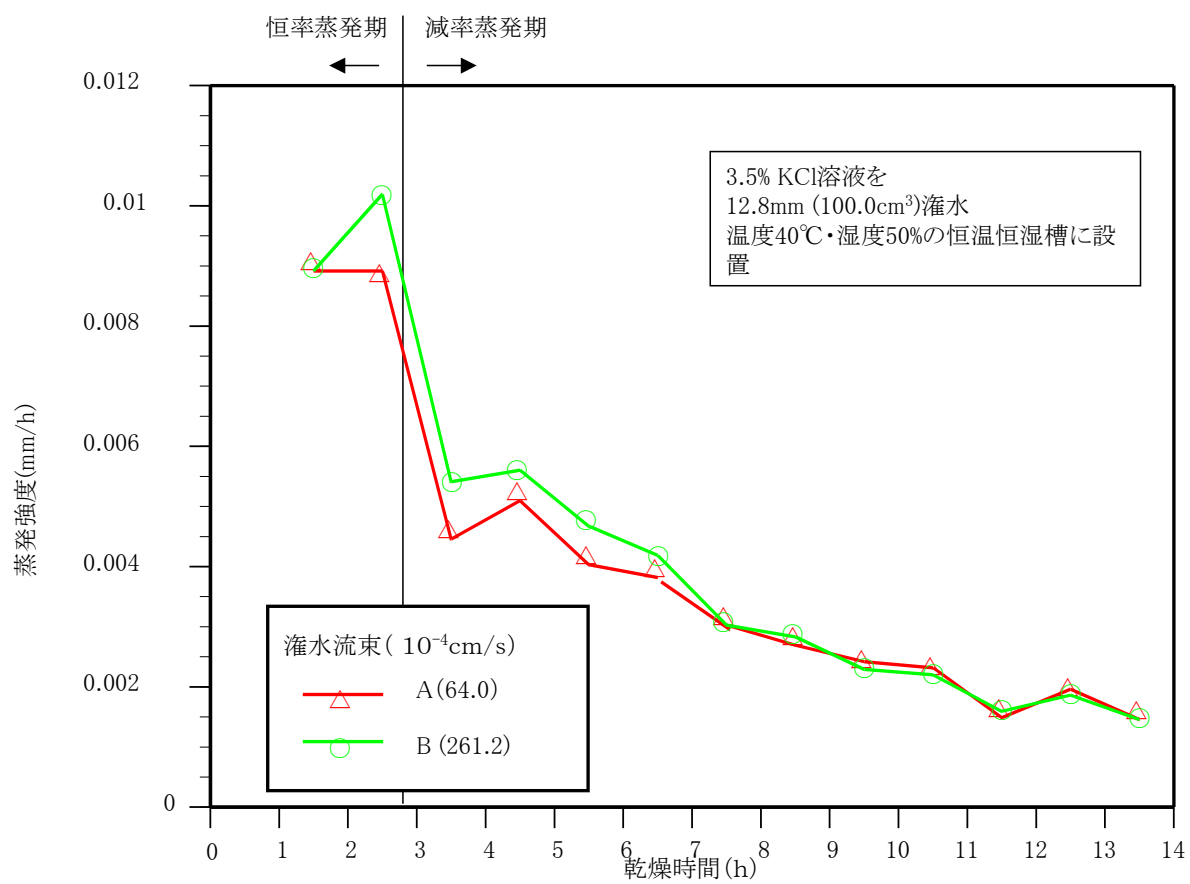


図 4-12 灌水流束別蒸発時間ごとと蒸発強度(mm/h)

5) 孔密度と除塩率との関係

供試体に集積する塩を効率良く溶かすためには、灌水装置底面積あたりの孔の数を増やすことが、方策として考えられる。一定面積、つまり、灌水装置の底面積（ 78.5cm^2 ）にどれだけ灌水用の孔が存在するか、その孔の密度と、除塩率との関係を探ったのが、図 4-13 と図 4-14 である。図 4-13 では除塩率に変化を生じさせる要因となる灌水流束をほぼ一定値に固定した上で、孔の数をそれぞれ、3、9、18 と 3 の倍数で設定し、変化させた。この結果をみると、孔数 3 の場合は、9、18 に比べ、除塩率では低くなった。しかし、差異は 1 % 弱であることから、孔密度要因の除塩率の変化に及ぼす影響は、限定的である。一方図 4-14 では、灌水流束をコントロールしていないため、孔の数が増え、孔密度は大きくなるにつれて、除塩率も低下している。本実験装置では、孔の数 9、41 及び 60 間で、灌水流束をほぼ一定にすることが不可能であったため、このような結果となった。よって、図 4-14 から、除塩率と灌水流速との負の相関関係が改めて確認されたが、孔密度と灌水流束の関係については、はっきりした結果は得られなかった。灌水流束を一定とするためには、針径をより細くする必要があるが、針径を細くすることで、針中の毛管力が強くなり、重力移動のみでは、灌水が針中で停止し、灌水が不可能となるため、針中の毛管力に対抗するよう、灌水に圧力を加える必要性が発生する。以後は、灌水装置を工夫するなどして、同一灌水流束で、孔数を増やす実験が今後の課題である。

図 4-15 および図 4-16 で、孔数（3、9、18）ごとの含塩比および含水率に対する変化を調べたところ、孔数 9 と 18 の場合に、含塩比のグラフではほぼ傾向性が一致し、含水率のグラフでも 1cm 地点を除きほぼ同じ含水率を示した一方孔数 3 の場合は、含塩率については、表面から 5cm 地点で、含塩率が、9、18 に比べ少し低く、含水率については、カラム深さ 7~8cm 地点が、高くなっている。孔数 3 の場合、水みちが形成され、そこから、カラム下層まで除塩用水が浸透していくため、集積や蒸発に使われにくい土壌水が相対的に増加するものと思われる。今回の灌水流束条件下では、孔数 9 以上については、孔密度と除塩率には、強い相関が見られなかった。

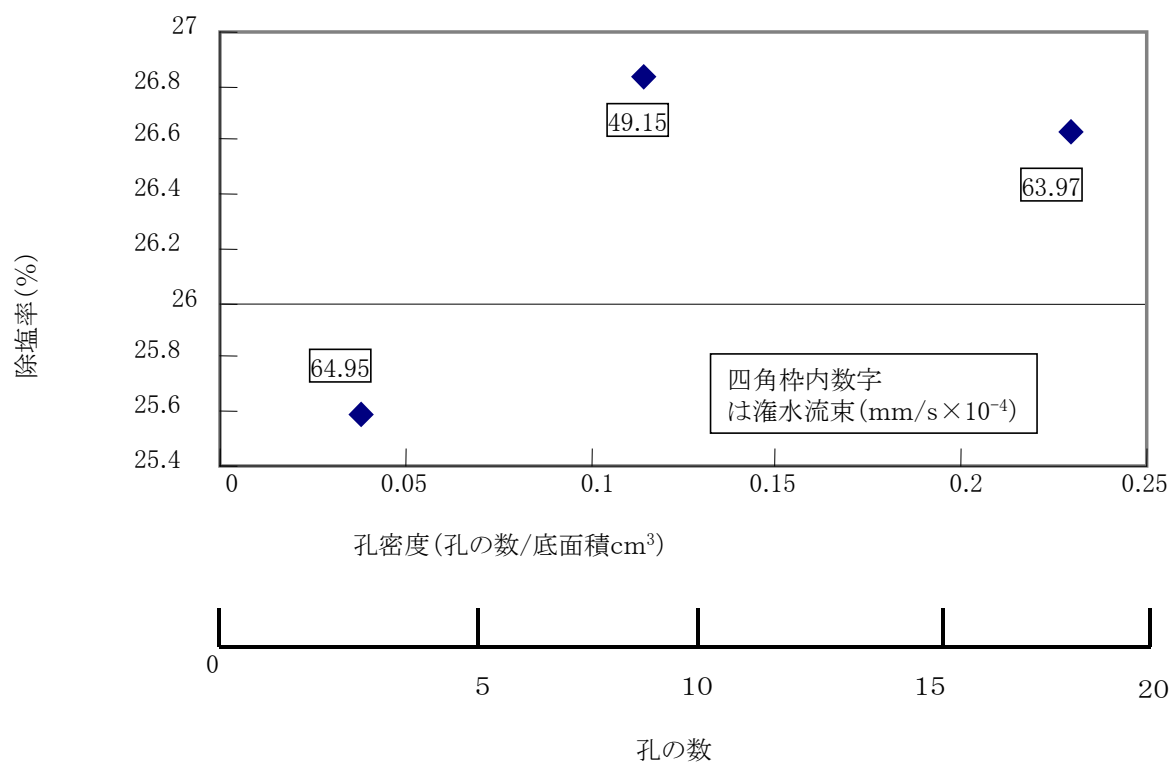


図 4-13 孔密度と除塩率(流束一定)

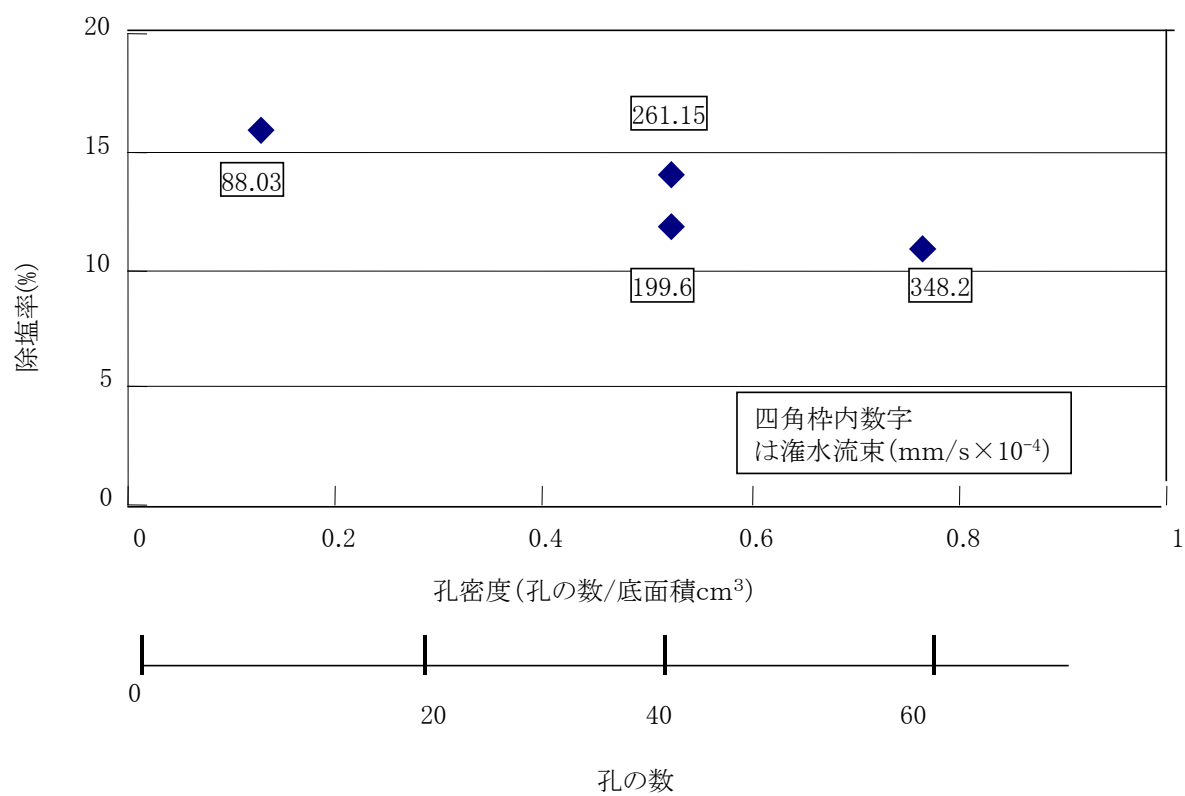


図 4-14 孔密度と除塩率(灌水流束一定でない)

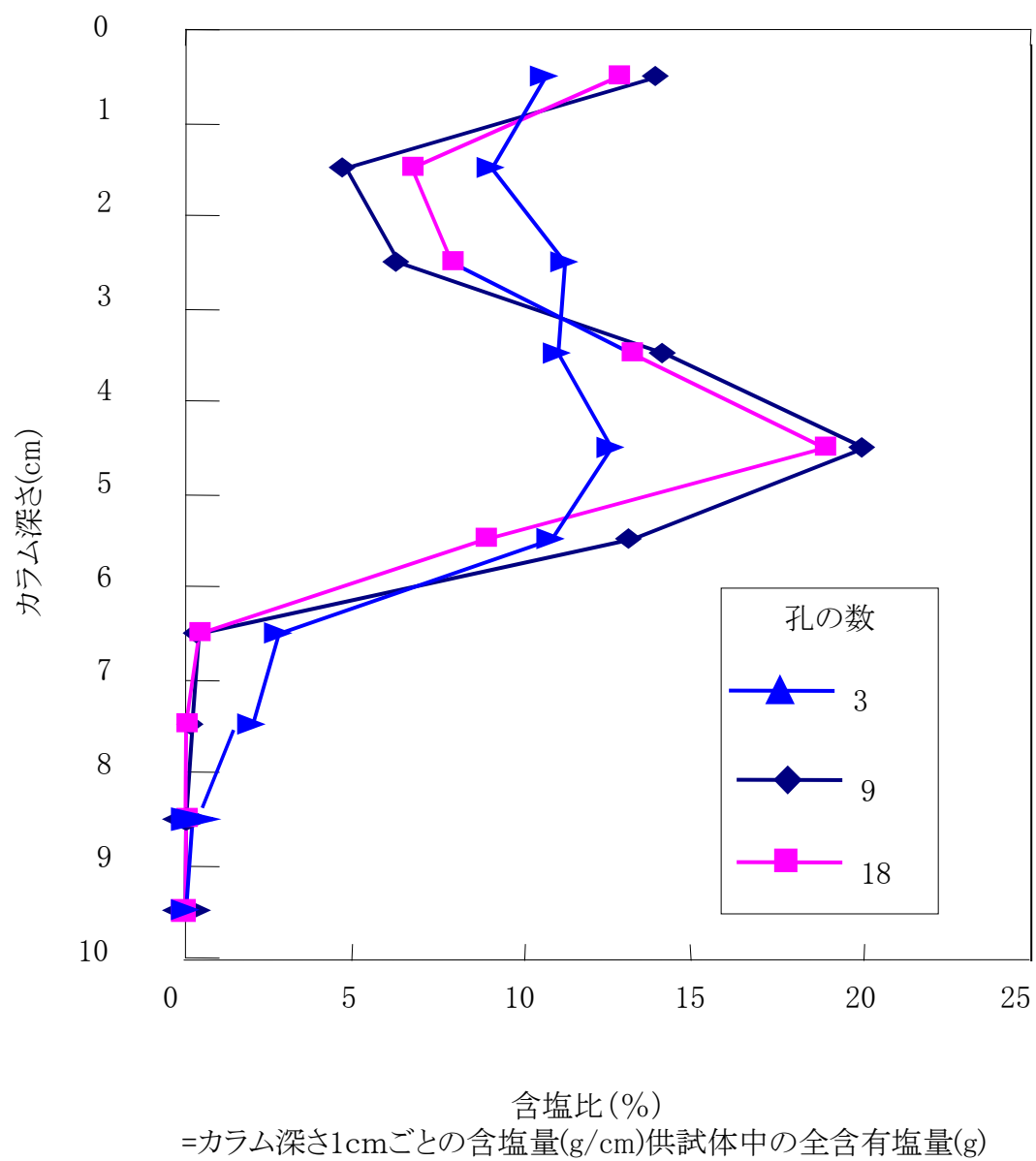


図 4-15 含塩比と孔の数

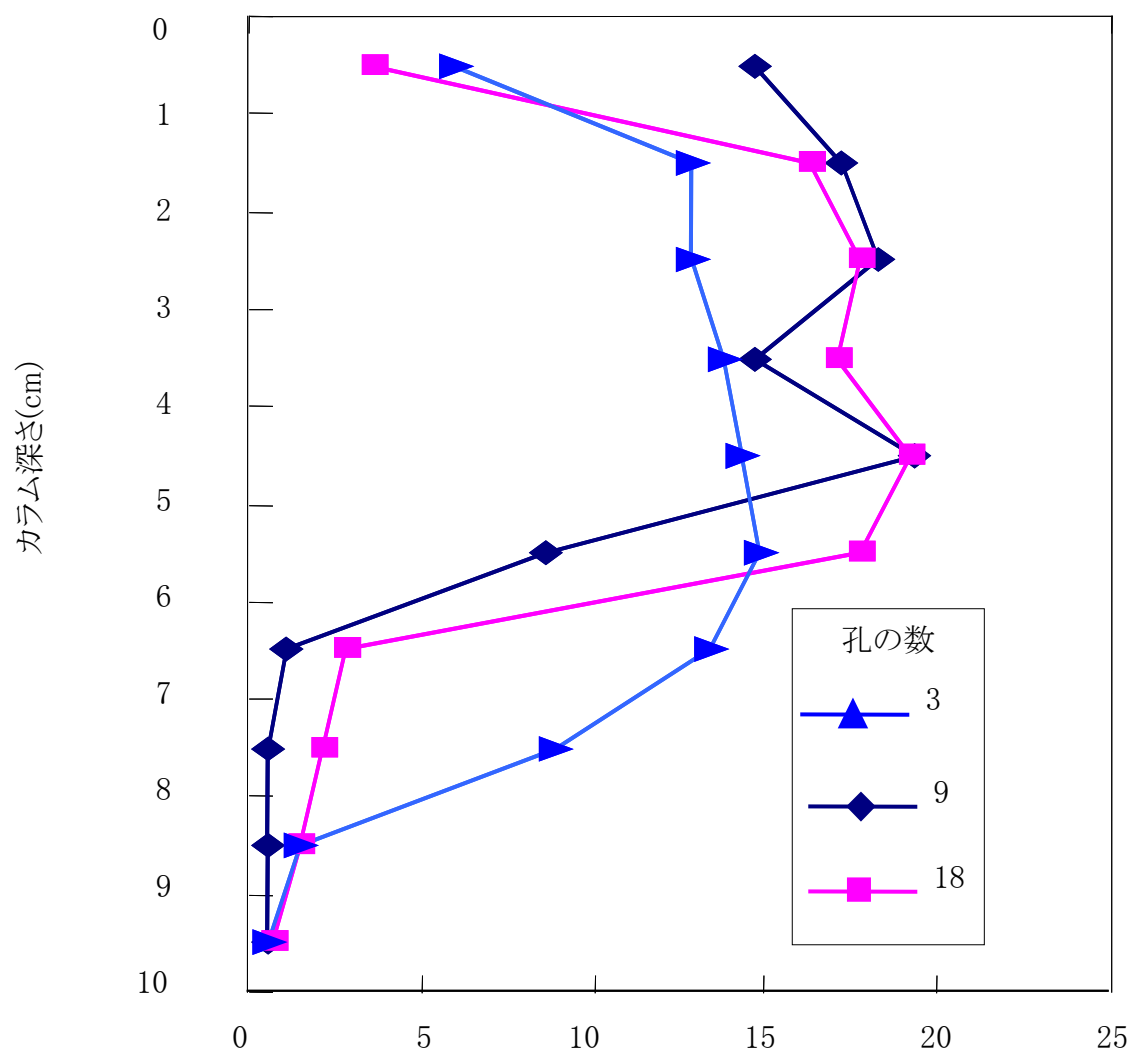


図 4-16 含水率と孔の数

6) Dehydration 実験での溶質・水分挙動

カラム内の、溶質や水分の挙動から得られた結果を、一般化し、現地への応用にあたっての示唆を与えるためにも、本実験の条件設定下でのシミュレーションモデル設定及び数値解析が必要である。しかし、特に本論で取り扱ったカラム条件では、供試体内の塩類が攪拌混入されており、初期状態として供試体内部に固体として存在しているため、移流分散方程式の吸収項の扱いが面倒となり、安定性のある結果が得にくい。

よって、初期状態として、あらかじめ固体塩が上層に含まれているという状態の供試体に灌水するというケースを想定して、シミュレーションを考えるのではなく、均一で定常状態にある供試体の初期条件を想定して、そこに灌水した場合、水分と塩分がどのように挙動するかを通じて、Dehydration 法における、溶質と水分の挙動の一般化を試みる。

まず、Dehydration 法における、塩分と水分の変化の大枠を概観するために Bresler(1972)が行った数値解析を参照する。Bresler は、次式に基づき、灌漑時の動的な塩収支を取り扱った。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^z [c(z,t)\theta(z,t)] dz = q(0,t)c_0(t) - q(z,t)c(z,t) \quad \cdots(6)$$

ここで、 q ：フラックス、 θ ：体積含水率、 c ：塩濃度、 z ：深さ、 t ：時間

c_0 ：灌漑水中の塩濃度である。式(6)に様々な初期・境界条件を設定することで、数値的に、 $c(z, t)$ を解いた。

図 4-17、及び図 4-18 に、実際に Bresler(1972)が、野外での浸透・再分配・蒸発それぞれの過程における、塩含量及び水分含量について数値計算を行った結果を示した。

塩分と水分の挙動は、Dehydration 法の場合、次の 3 つの段階で分類して考えると理解しやすく、また一般的とも言える。浸透過程、再分配過程、蒸発過程である。

i) 浸透過程

図 4-17 及び図 4-18 それぞれの塩と水分の浸透過程に代表的に示されるように、水分の浸透前線付近に、塩分のピークが存在する。Bresler の数値解析による分析

では、初期状態として、塩分濃度も均質であることを想定している。一方 Dehydration 法で、攪拌混入方式で塩を含む場合も、上層はほぼ均質な塩分含量であることと、ちょうど、塩を含む層に、浸透時の浸透前線が達する量の灌水を行っているため、図 5-1 及び 5-2 とほぼ同じ挙動を示す。このことは、灌水流束の違いによって、若干変化があるが、第 4 章の図 4-10 と図 4-11 の 0h 時の含水比と含塩比のグラフの形状が、図 4-17 及び図 4-18 と相似形であること、つまり浸透前線付近に塩の最大値が存在することと、水分は浸透前線に向けて表層からほぼ均一な含水比であるのに比べ、含塩比については、表層から浸透前線に向けて急激に含塩比が増加し、浸透前線から急激に減少する形状を見ても、了解できる。特に Bresler の数値解析が、境界条件としておそらく灌水が、湛水状態を想定しているため、灌水流束がより湛水状態に近い、灌水流束 B の場合が灌水流束 A の場合に比べて、より近い形状を示している。

Bresler のフィールド条件下での数値解析結果と、Dehydration 法のカラム実験との浸透過程での一定の相似性を確認の上、さらに、Toride(1993)の塩移動についての解析解を利用して、浸透過程における、塩分の移動を、拡散係数 D と、灌水流束 v の違いによってどのような変化を生じるかをさらに検討する。

Toride の塩移動に関する解析解は、均質で定常状態にある供試体に対して、一定濃度の塩を含む溶液を浸透させる状態を前提として、構成されている。まず、1次元の定常流れにおける CDE(移流分散式)として、以下のように定義できる。

$$R \frac{\partial c_t}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_r}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_r}{\partial x} \dots (7)$$

ただし、 R : 遅れ要因 C_r : 塩分濃度(ML^{-3})、 D : 拡散係数(L^2T^{-1})
 v : 流束(LT^{-1})、 x : 距離(L)、 t : 時間(T)である。

ここで、初期条件と境界条件を始点から終点までが有限の場合と、半無限の場合とについて定義する。

$$c_{c,r}(x,0) = f(x) \dots (8)$$

$$v_r(0,t) - D \frac{\partial c_r(0,t)}{\partial x} = v g(t) \dots (9)$$

$$\frac{\partial c_r}{\partial x}(\ell, t) = 0 \quad \cdots (10)$$

$$\frac{\partial c_r}{\partial x}(\infty, t) = 0 \quad \cdots (11)$$

また、

$$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < x_1 \\ 1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & x_2 \leq x < \infty \end{cases} \quad \cdots (12)$$

$$c^{SI}(x, t) = \psi(x, t; x_1) - \psi(x, t; x_2) \quad \cdots (13)$$

ここで、SI は、半無限を表す。

(7)～(13)の解析解は、

$$\begin{aligned} \psi(x, t; x_i) = & 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{R(x - x_i) - vt}{\sqrt{4DRt}} \right] \\ & - \sqrt{\frac{v^2 t}{\pi DR}} \exp \left(\frac{vx}{D} - \frac{[R(x + x_i) + vt]^2}{4DRt} \right) \\ & + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v(x + x_i)}{D} + \frac{v^2 t}{DR} \right] \\ & \times \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{R(x + x_i) + vt}{\sqrt{4DRt}} \right] \end{aligned}$$

となる。

この解析解について、Dとvの値をそれぞれ変化させて得られたのが、図4-19、4-20である。図4-19から、Dが同一の場合、Vつまり灌水流束が早いほど、浸透も早い事がわかる。また、図4-20から、Dが大きいほど、同一時間の塩の分布が広がる事がわかる。

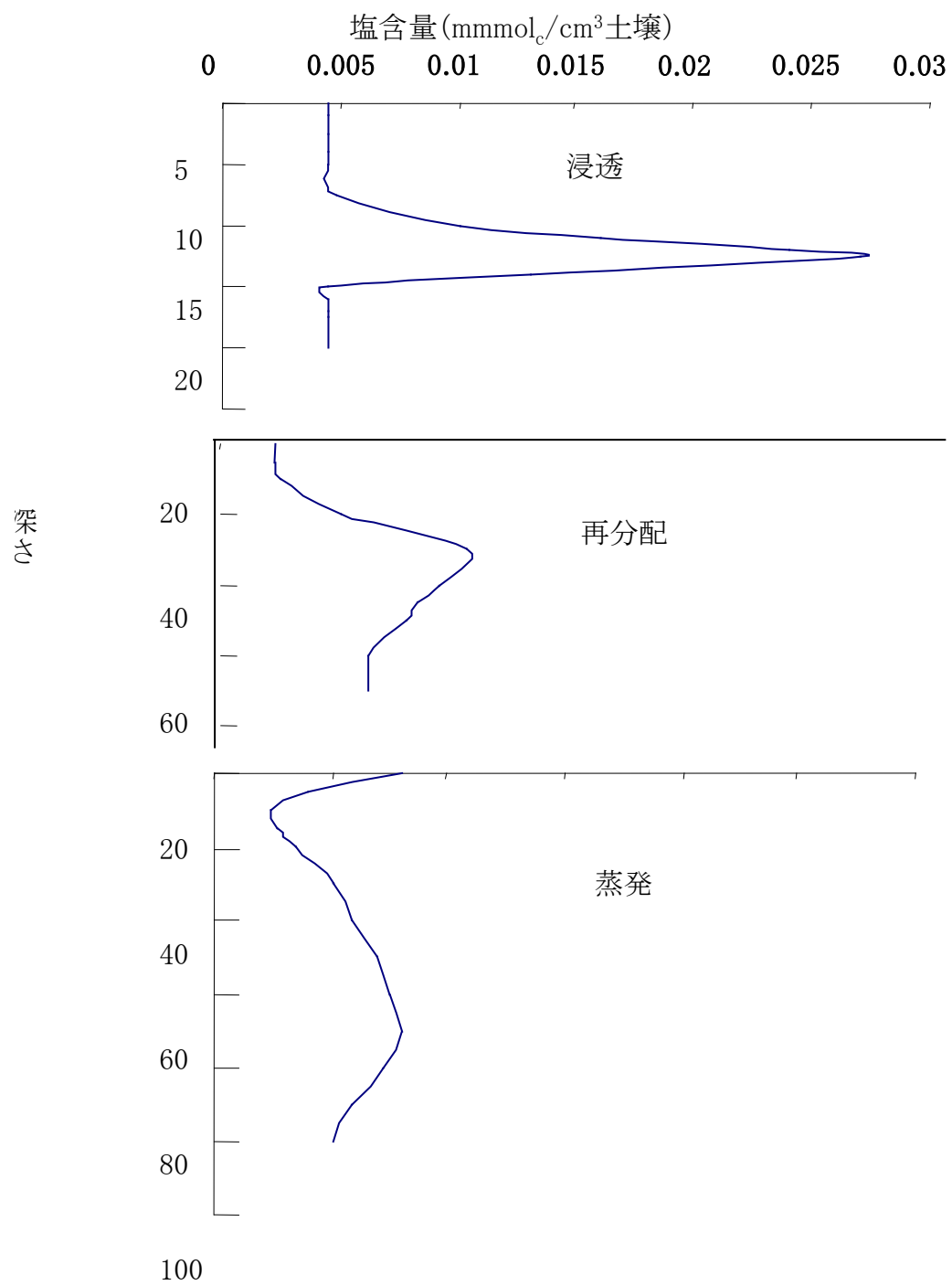


図 4-17 野外での浸透・再分配・蒸発それぞれの過程における塩含量

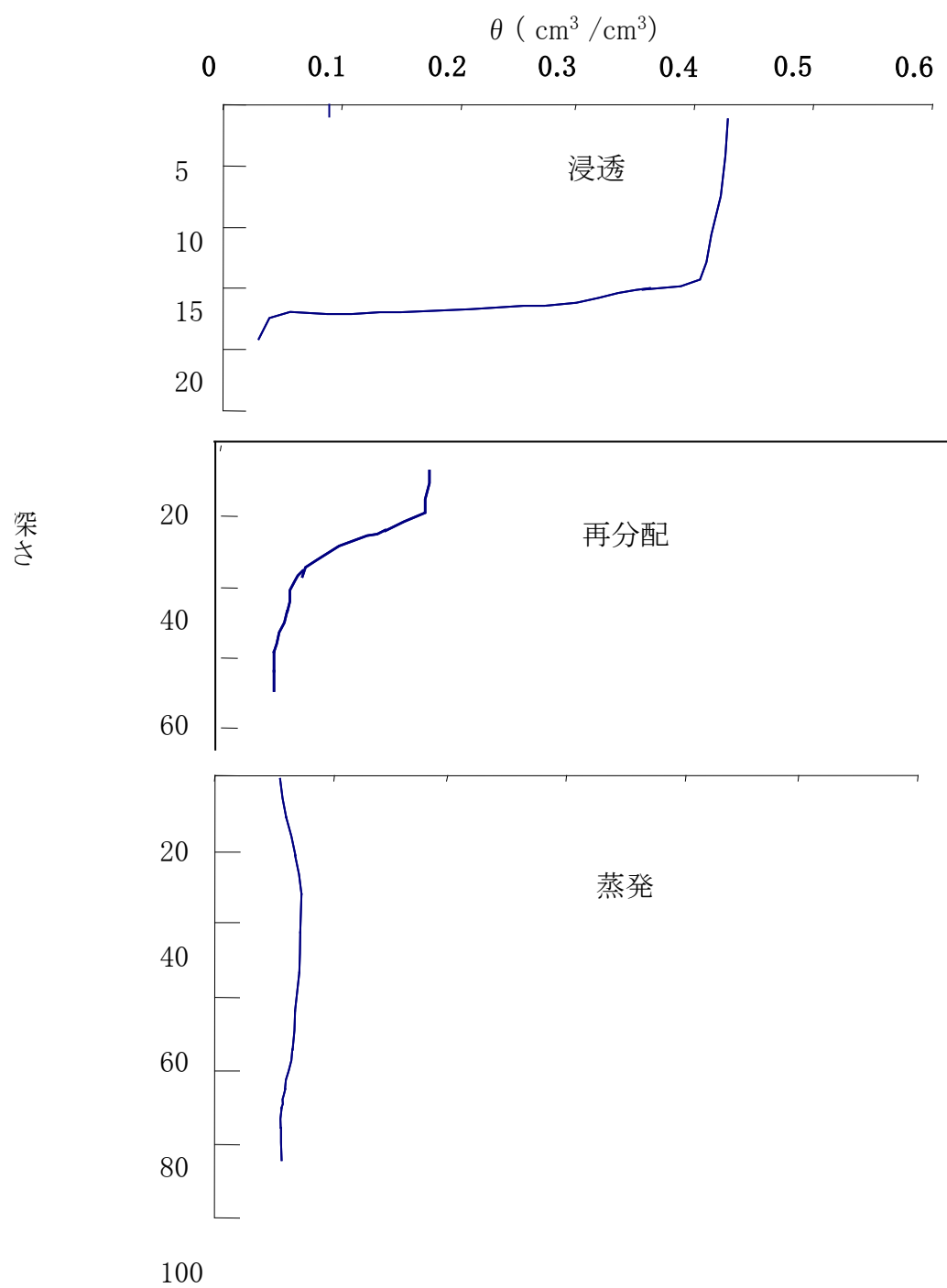
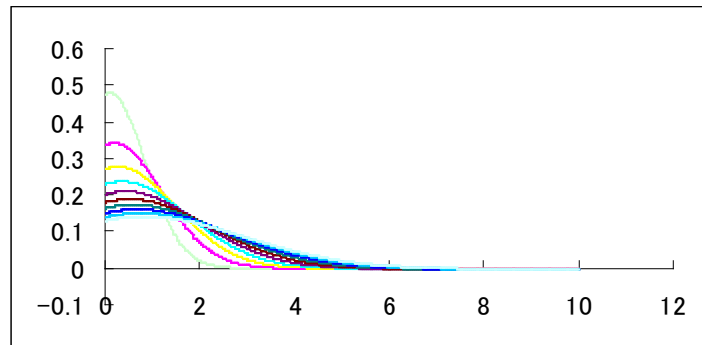
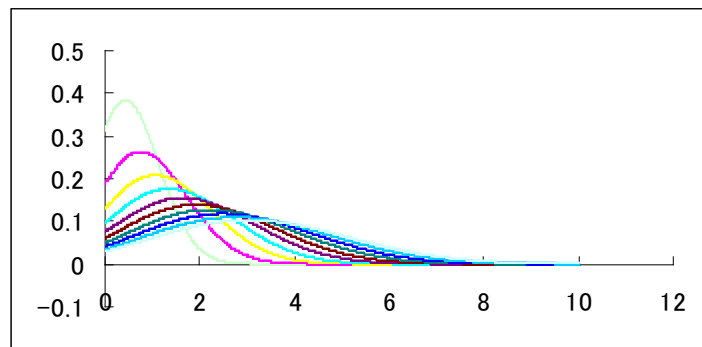


図 4-18 野外での浸透・再分配・蒸発それぞれの過程における水分含量

$D=0.5$
 $v=0.1$



$D=0.5$
 $v=5$



$D=0.5$
 $v=10$

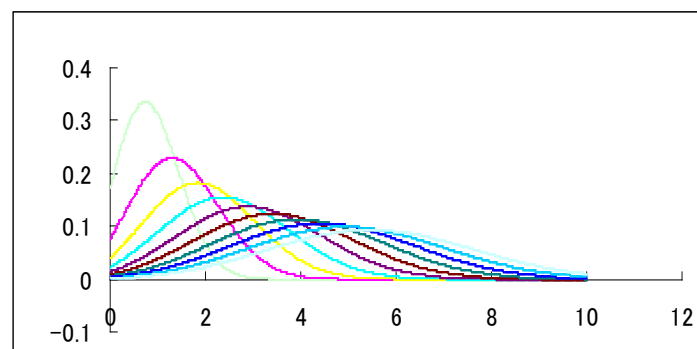
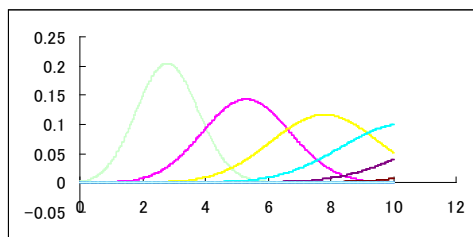
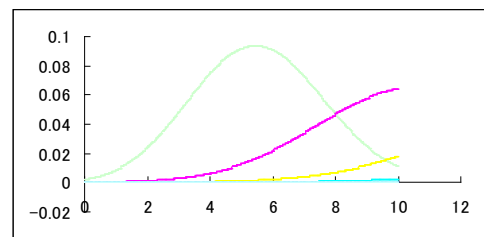


図 4-19 $D=0.5$ 、 $V=0.1$ 、 5 、 10 の場合の含塩比分布

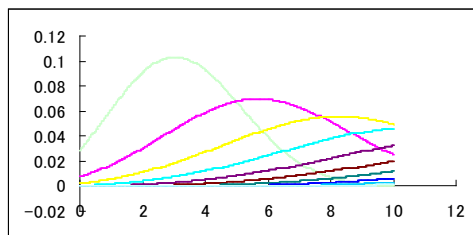
$D=0.5$
 $v=5$



$D=0.5$
 $v=10$



$D=5$
 $v=5$



$D=5$
 $v=10$

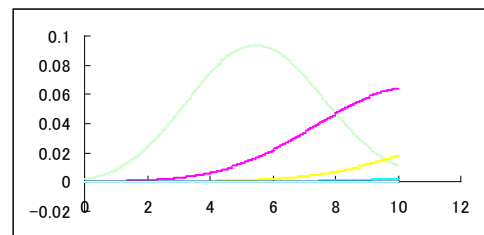


図 4-20 $D=0.5$ 、 5 について、 $V=5$ および 10 の場合の含塩比分布

ii)再分配過程

再分配過程については、図 4-10 及び、4-11 の 12h 後の形状と、図 4-17 および 4-18 の形状が相似形である。特に含塩比については、再分配過程では、含塩比のピーク値が、減少していることと、蒸発時にみられるような土壌表層へ向けて塩が集積する様子は見られない。含水比については、上層ほど、含水比の減少率が大きい傾向が一般的に見られる。

iii)蒸発過程

蒸発過程では、図 4-10 を見ると、まず 1~5cm の含水比が、12~120 時間にかけて、蒸発に伴って減少していく。この蒸発過程で、図 4-11 に見られるように 5cm 付近の塩は鉛直上方に運ばれる。一方で、カラム深さ 0 から 1cm にかけては、むしろ含塩比が上に行くに従って増加する。これは、図 4-17 と同様の挙動であるといえる。一方含水比分布についても、図 4-18 に見られるような含水比の形状に図 4-10 も 120 時間後には達していることがわかる。

以上、Bresler の数値解析と、図 4-10 及び 4-11 との比較を中心に塩と水分の挙動を比較しながら検討した。この 2 者の比較に限定すれば、Dehydration 法の操作によって、起こっている塩と水分の移動に関する挙動は、浸透・再分配・蒸発に分類し比較検討が可能であることがわかる。

4.4 結論

灌水流束と除塩率とは、本カラム実験条件下において、一定の灌水流束の範囲で負の相関関係が見られた。図 4-6 を確認すると、灌水流束 $100 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を境に急激に傾向が変化している。除塩率変化の原因としては、これまで見てきたように灌水流束の相違による、灌水流束直後の含水比分布の急激な、あるいは質的な変化が考えられる。本実験では散水灌漑を生じさせるための灌水装置を用いたため、初期含水比分布はいずれの灌水流束の場合でも、含水比が不飽和状態であった。湛水灌漑の含水比分布では、土壌表面から湿潤前線まで、飽和状態が続き湿潤前線から急激に含水比が低下する。本実験では、最も速い灌水流束 B($261.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)は散水灌漑であるが、図 4-10 の初期含水比の形状は、湿潤前線の形状など、湛水灌漑に近い形状を示している。一方灌水流束 A($64.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)は、湿潤前線が明確でないなど、散水灌漑の含水比分布といえる。これらのことを総合すると、灌水による初期含水比分布形状が、湛水灌漑により近い含水比分布、つまりカラム深さ 0cm に含水比の最大値があり、最大値が湿潤前線まで続くような含水比形状になると、蒸発が旺盛になり、結果として急激に、除塩率が下がって行くと言える。その灌水流束とは、図 4-4 に示されるように、カラム深さ 0~1cm の初期含水比が、透水係数 K が急激に変化する含水比 15%以上を有するようになる灌水流束と考えられる。図 4-10 から、そうした灌水流束は、灌水流束 A と灌水流束 B の間に存在する可能性がある。よって、本実験条件でより効率的な除塩を考えるならば、特にカラム深さ 0~2cm 程度の初期含水比を 15%以下に抑制することで、深さ 0~2cm での水平方向への浸透を抑制することが重要であると言えよう。

フィールドレベルでは、乾燥地・半乾燥地での灌水の効率利用の原則として「恒率段階の蒸発抑制」(D.Hillel: 1971, 1998)が提唱されている。この原則によれば、蒸発の恒率段階ではマルチなどをして、なるべく蒸発を抑制することが、塩類集積を防ぎ、土壌水の土壌内部の保持に有効であるとされている。

Dehydration 法においても、灌水流束のコントロールによる「恒率段階の蒸発抑制」が塩捕集率を高めるための条件として重要であることが、実験室内でのカラム実験で確認された。

本実験を通じて、Dehydration 法における灌水流束と除塩率との関係について、

そのメカニズムも含めてある程度明らかにすることができた. 今後は、供試体に粘土分を混入させた場合、塩に NaCl などを用いた場合における Dehydration 法の有効性の検討が必要である.

おわりに

(1) まとめ

本論文を通じて、現実の塩類集積の特定部分だけを取りだし、それ以外の変数を排除して、カラムを利用した実験室でのモデル実験を実施し、Dehydration法のメカニズムの把握と実現可能性を検討してきた。その結果、あくまでもカラム実験では非常に有効な除塩方法であることが確認できた。除塩が効率よく行なわれる条件として、除塩用水量については排水を生じない量。また、除塩用水量については排水が発生しない量から、全く灌水を行なわない場合の間に除塩用水利用効率が最大化する灌水量の存在が確認された。海水と同じ塩濃度の除塩用水(3.5%NaCl及びKC1水溶液)での除塩可能性も確認された。灌水方法を工夫することでさらなる除塩の可能性が確認できた。乾燥時間については、時間効率を考慮に入れなければ、長ければ長いほど除塩率は向上する。また、ガーゼ表面に塩類が集積しなくとも、上方への塩の集積は確実に進むため、一定時間後、Dehydration法による灌水を追加して行なえば、さらに塩の除去は可能となる。灌水回数は、灌水回数を増やすことで、さらなる除塩の可能性も確認された。しかし、回数を増やせば除塩率向上するが、総灌水量も増大するため、下方への再分配が発生し、除塩率が減衰することに留意が必要である。灌水流動は言本実験条件の範囲内では、遅いほど除塩率は向上するが、除塩率の伸びは頭打ちになることが確認された。

また、灌水流動の速度に限らず、灌水直後の初期含水比の形状が、その後の蒸発、さらには塩集積に関係することは土性の違いに関わらずDehydration法を検討する上での基礎的な考慮条件となると考えられる。

海水濃度と同じ塩濃度でも、除塩の可能性がモデル実験レベルで確認できたことで、水不足に悩む海に近い乾燥地での除塩の可能性を示唆することができたと言えよう。

(2) 除塩率向上のための条件

本実験条件下で得られた結果から、除塩率向上のための条件をまとめた。

i) 灌水時多くの塩を溶解させる

第1の条件としては、塩が土壌水中に溶解されなくては、鉛直上方へ運ばれず、集積も不可能である。より多くの塩を溶解させるためには、灌水流束を一定速度以下とする。

ii) 溶解塩は、一定のカラム深さ以上にとどめる

溶解した塩は、一定のカラム深さまでにとどまることが望ましい。カラム深さが一定の深さ以下に達した塩は、本論の蒸発条件では、上方への移動は起こりにくくむしろ下方へ再分配される。塩を一定深さ以下に運ばないためには、1回当りの灌水量を、一定以下に抑制し、連続除塩回数を一定回数以下、かつ、灌水流束を一定速度以下とすることが条件である。

iii) 溶解塩の鉛直上方移動を促進する

除塩率が高い場合、低い場合に比べ、カラム中の塩の動きは、塩類が最も滞留している深さに蓄積した溶解塩が、鉛直上方への移動に伴って減少する割合が大きい。よって、より多くの溶解塩を上方に移動させることで、除塩率は向上する。そのためには、恒率蒸発期の蒸発を抑制することが必要であり、つまり、灌水直後の含水比が、上方で大きく下方にしたがって減少するのではなく、比較的含水比分布が均等になるように灌水することが必要である。蒸発の抑制は、塩類の上方への輸送を促す土壌水を増やすことになるからである。

(3) 今後の展開

i) 溶解塩量の定量的な把握

塩の溶解は、除塩用水を灌水時初期含有塩量に対してどの程度溶解するのか、また、土壌水は鉛直上方向に再分配時にも塩を溶解するか定量的に把握する。

ii) 蒸発及び塩の集積との関係を明らかにする

蒸発と塩の集積の関係については、ある程度仮説を立てることができたが、さらに実験することで、蒸発と塩の集積の相互関係を見極める。

iii) 植物栽培可能な塩濃度条件で実験

本論では、主に、Dehydration 法が理論的に成立するか否かについて検討してきた。これまでの実験を通じてその有効性が確認されつつあるので、今後は低濃度の除塩用水を用いて、さらに耕作可能なレベルまで塩を除去するという方法も検討する。

iv) 土壌汚染への適応可能性を探る

本論では、主に乾燥地での集積塩類の除去に焦点をしばって実験考察をすすめたが、今後は重金属等で汚染された、乾燥地以外の土壌についても応用の可能性を探る。

例えば、溶媒として、今回は水溶液を用いたが、より揮発性の高い溶媒を利用することによって、多種多様な物質の溶解が可能となる。また、コスト的に見合えば、灌水後に、地表面を人工的に暖めて、蒸発を促すことも考えられる。捕集シートについても、綿ガーゼ以外にも、検討の余地を残している。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、テーマ設定から、投稿論文指導、研究指導を始め、あらゆる面において、筑波大学農林工学系安部征雄教授の絶大なるご支援とご協力をいただいた。この場を借りて、深く感謝の意を表す。

また、筑波大学農林工学系 安田裕助教授には、実験結果の考察について重要なご示唆をいただいた。

本論文の審査にあたっては、さらに、筑波大学応用生物化学系 田中秀夫教授、農林工学系 木村俊範教授には貴重なご意見、ご指導をいただいた。

また、筑波大学農林工学系 横田誠司技官には、実験についてのご助力や、貴重なアドバイスをいつもいただいた。乾燥地工学研究室、農学研究科、仲谷知世氏、内藤大嗣氏には、実験の協力、論文作成など様々な機会にご協力をいただいた。その他研究室の方々に、貴重なご意見をいただいた。

博士課程への進学をご自身の不利も顧みず許諾して下さった、岡田邦彦財団法人松下政経塾塾頭にも、心より感謝申しあげる。

今回博士課程に進むことに快諾してくれ、常に支えてくれた、妻や子供にも改めて感謝申し上げる。

上記の方々にこころより感謝の意を表す。

参考文献

- Abe、Y.(1995) Removal of Salt and Excess Water from Soils Using Evaporative Force.Journal of Arid Land Studies 5S : 163-166.
- Bresler、E. McNeal、B.L. Carter、D.L. (1982) : Saline and Sodic Soils、Springer-Verlag、p.86-91、
- Brady N.C.Weil R.R(1999) : The Nature and Properties of Soils.Prentice Hall
- Dregne、H.E、(1991) : Global Status of Desertification IN : Annals of Arid Zones 30(3) .
- FAO / UNESCO (1973) : IRRIGATION / DRAINAGE AND SALINITY.HUTCHINSON&CO.LTD、US.
- FAO(1988) Salt-affected soils and their management
- FAO(1993) : Soil Loss Accelerating Worldwide.
- Gardner、W.R. Brooks、R.H. (1956) : A Descriptive theory of leaching. Soil Sci.83 : 295-304.
- Ghassemi、F. et al.(1995) : Salinisation of Land and Water Resources : University of New South Wales Press.Sydney
- Hillel、D.(1971) : Soil and Water. AcademicPress
- Hillel、D.(1971) : Soil and Water. AcademicPress
- Hillel、D.(1998) : Environmental Soil Physics. AcademicPress
- Hillel、D.岩田進午監修(1993) : 「土壤物理学概論-土と水の科学-」養賢堂.
- Kendall H.W.、and D.Pimentel(1994)Constraints on the Expansion of the Global Food Supply Ambio23(3) : 198-205
- Kendall H.W.、and D.Pimentel(1994)Constraints on the Expansion of the Global Food Supply Ambio23(3) : 198-205
- Keren、R.(1990) : Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers : 413-
- Richards、L.A.(1954) : Diagnosis and improvement of saline alkali soils.

- Agriculture Handbook60、 U.S. Government Printing Office.
- Seckler 、 D.(1996) New Era of Water Resources Management : From”Dry”to”Wet”Water Savings.Issues in Agriculture 8.The World Bank.
- SHAINBERG、 I. and SHALTHEVET、 J(1984) : Soil salinity under irrigation. Supringer : 175-218.
- Tanji 、 K.K. 編 (1990) : Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers : 54、 413-415
- under irrigation. Supringer : 175-218.
- Van Genuchten and Wierrenga (1974) : Simulation of one-dimensional solute transport in porous media. NM State Univ.Agric.Exp.Stn.Bull628
- van Genuchten、 et.al.(1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U.S.Salinity Laboratory
- 安部征雄(1983) : 飽和供試体の乾燥過程における塩類集積形態.「農業土木学会論文集」 106 : 71-77
- 安部征雄、山口智治、横田誠司、大塚義之、井伊博行 (1992) : 土壌表層に集積する塩類の捕集法.「沙漠研究」 2 : 19-27.
- 安部征雄(1993)「日本でなぜ沙漠か」と沙漠工学の役割.「沙漠研究」 3 : 158-162
- 安部征雄、仲谷知世、桑島健也、横田誠司(1999) 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、 147-156
- 天谷孝夫、永堀金造、橋本強(1982) : 除塩の進行過程に関するモデル実験.「農業土木学会論集」 102 : 15-24
- 井伊博行、大塚義之、小川哲夫、安部征雄、山口智治(1993) : ペーパーロールを用いた土壌の塩類捕集方法に関する実験的研究.「沙漠研究」 3 : 1-7
- 遠藤勲、安部征雄、小島紀徳編著(1998) : 「沙漠工学」、p128
- 小野信一(1994) : ハウス栽培における土壌の塩類集積回避法.「農業及び園芸」 69(8) : 46-50
- 環境庁 国立環境研究所 地球環境研究センター(1997) : Data Book of DESERTIFICATION/LAND GRADATION

関東ハウス土壤研究グループ(1966) : ハウス土壤の塩類測定法.「農業及び園芸」
41-1 : 61-63.

桑畠健也、仲谷知世、安部征雄(2001)高濃度塩水を用いた Dehydration 法による
集積塩類除去に関する研究.「沙漠研究」11-1 : 53-62.

国立天文台編(1999) : 理科年表 : 451.

鈴木清(1978) : 『乾燥地域の水利と開発戦略』日本イリゲーションクラブ.

中野政詩(1988) : 蒸発に伴う土壤の水分、塩分、熱の移動.「土の物理性」58 :
30-39.

中野政詩(1991) : 『土の物質移動学』東京大学出版会.

長堀金造、天谷孝夫、高橋強(1982) : 干拓ヘドロの基礎的諸特性と除塩機構に
ついて.「農業土木学会論文集」101 : 15-25.

仲谷知世(1999) Dehydration 法における塩類捕集シートの評価

松本聰(1980) : 感オス血に於ける水利用と塩類集積.「地理学評論」61-2 : 155-169

山口智治、安部征雄、横田誠司、大塚義之、井伊博行(1996) : 土壤塩類捕集材の
性能に及ぼす環境条件と土性の影響.「農業施設」27-3 : 111-11.