

# 第1章 序論

## 1-1. 沙漠化の現状

### 1-1-1. 沙漠と沙漠化

現在、乾燥地域の面積は、世界の陸地の 3 分の 1 に達する。乾燥地域は乾燥の程度によって、極乾燥地（極沙漠）7%、乾燥地（真沙漠）11%、半乾燥地（半沙漠）15%の 3 種類に分類される。極乾燥地、乾燥地の面積はそれぞれ約 980 万  $\text{km}^2$ 、1,600 万  $\text{km}^2$  である。オアシスや一部の乾燥地の樹林を除けば、極乾燥地では植生が全くない、あるいはあっても極めて少ない。乾燥地では、季節的に草は育つものの樹木が育たない。また半乾燥地は 2,300 万  $\text{km}^2$  を占め、その気候はステップやサバンナである。草や背の低い樹木が育ち、降雨に依存した農業が主に行われている。

通常、我々が「沙漠」としてイメージするのは、極乾燥地と乾燥地の景観であろう。

「沙漠」は、地球の自転やエネルギーの循環に伴う大気の循環、地形の配置、寒流の存在などの自然的条件によって、地球上のひとつの生態的な土地の存在形態として、あるべき所にあるべき姿であり、その多くは、まず赤道付近の熱帯多雨地帯をはさんで、南北二つの回帰線を中心とした中緯度高圧帯にベルト状に分布している。この緯度では、赤道地帯に多雨をもたらした後の乾燥した空気が下降し、乾燥地帯が形成される。また、沙漠は大陸の西岸に分布し、そこから東に広がる傾向が見られるが、これは大陸の西側の海岸を極側から赤道方向へ流れる寒流上では水分含量の多い大気が生まれず、暖められても雨にはならないためである。そのほか、雨陰沙漠では、海から湿った空気が陸地に流れ込んでも、高い山や山脈に遮られ、風上側に降雨や雪をもたらすが、そこを越え乾燥した空気はフェーン現象となって風下側に乾燥をもたらす。さらに、海から遠すぎて湿った空気が到達できない内陸沙漠がある。

一方、「沙漠化」を議論する場合は、極乾燥地がその対象から除かれ、乾性半湿润地約 1,300 万  $\text{km}^2$  が加えられる。「沙漠化」の定義は、これまで国際機関によって発表されており、1977 年国連砂漠化防止会議では、「土地の持つ生物生産力の減退ないし破壊であり、終局的には沙漠のような状態をもたらすもの」と定義された。こ

の定義は、「本来沙漠でなかった所が沙漠になってしまう」ということに大きな意味があった。しかしその後、意味が曖昧で混乱を招いたとして、1990 年には「沙漠化・土地荒廃とは、乾燥、半乾燥および乾性半湿潤地域における不適当な人間活動に基づく荒廃現象」と定義し直され、人為的に作り出される現象との意味づけが明確にされた。近年最も広範囲に引用されているのが、1992 年にリオデジャネイロで開催された国連環境開発会議(UNCED)で提唱された下記の定義である。

「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」(UNEP, 1992)

この定義に従えば、沙漠化とは土地つまり土壌の劣化を示すことになる。ここでいう土壌の劣化とは、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およびそれらの複合的な要因による劣化」を指す。

上述の定義からも明らかなように沙漠化の要因は、自然要因と人為的要因に分けられる。自然要因としては、例えば長期的気候変動として長周期の温暖化や火山の噴火による日光の遮断、さらに短期的な気候変動として干ばつが挙げられる。一方、人為的要因では、過放牧による植生の破壊、過剰な森林伐採、過剰耕作による表土の地力および収量の低下、過剰灌漑のような不適切な水利用による塩害の発生および戦争破壊などがあり、これら自然要因と人為的要因が複雑に絡み合い、沙漠化へと結びついている。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が、これはその生産性に依存する世界人口の 1/6 にもあたる人間の食料が奪われることを意味する。この問題には飢餓や人間の生死も係わってくることから、状況の悪化を放置できない。

「沙漠」と「沙漠化」の進行を時間スケールで見た場合、沙漠の成因は千年および万年といった非常に長い期間を要して進行するのに対して、沙漠化は 10 年単位とその時間スケールは極めて短く、沙漠と比べて進行速度が非常に速い。このことは、人為的インパクトが生態的な許容量を大きく越えていることを証明している。例えば人為的インパクトの大きさを数値で表すと、沙漠化した 45 の地域に対する原因調査の結果、自然的要因に起因した例が 13%、人為的要因が 87%という報告がある(UNCOD, 1977)。

また、「乾燥地域」の定義についても検討すると、乾燥地域は、UNEP(国連環境計画, 1997)で乾燥度を判定するために用いられる乾燥度指数 AI から分類できる。乾

乾燥指数は平均年間降水量  $P$  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。特に  $0.50 < AI < 0.65$  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。このほか、古典的ではあるが利用価値が失われていないものとして、年降水量と年平均気温から求められる乾燥指数から地域を区分する方法(de Martonne, 1926)や年平均気温から乾燥限界を算出し、年降水量と比較して乾燥地域の区分を行う方法(Köppen, 1931)がある(山本ら, 1988)。

### 1-1-2. 沙漠化と塩類集積

先にも述べたように、土壌の塩類集積は沙漠化の人為的要因のひとつである。塩類集積は半乾燥地域の降雨依存農地や乾燥地域、半乾燥地域の灌漑地域、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多く発生している。その割合に関しては、世界に約 2 億 7 千万 ha ある灌漑面積の約 7~10%の農地が塩類集積によって劣化していると見積もられている(FAO, 2003)。一般にこれらの農地は生産性の高い優良農地であり、それが失われることは他の生産性の低い放牧地などの農用地が失われるよりも影響が大きい。そして激しい塩類の集積により、100 万 ha を越える農地が毎年耕作放棄されている(八丁・筒井, 1998)。

降雨や灌漑によって土壌表面に水が加えられると、水は土壌表面や土壌内の塩類を溶解しながら浸透し、土壌中に保持され、一部は地下水にまで流入する。一方、乾燥・半乾燥地域では、降雨量に比べ蒸発量が上回るため、蒸発さらには乾燥が進むに従い土壌表層でのポテンシャル勾配が大きくなり、それに加えて生じる毛管力の作用により、地中の塩分を含んだ土壌溶液は上向きに上昇する。その結果、土壌表層での塩類集積が生じ、それによって引き起こされる土壌溶液の浸透圧の上昇による植物の水の吸収阻害、植物体内の塩含有率の上昇による生理障害、土壌の物理性悪化による生育障害が、塩害の直接的な原因となっている。また、乾燥・半乾燥地、乾性半湿潤地において植物は、乾燥や塩類に対する耐性の限界近くで生息および生長しているので、わずかの環境の変化が荒廃へとつながる。従って、乾燥地における塩害は荒廃へとつながる十分な要因となる。

また、乾燥地における地下水等は、多量の塩分を含んでいることが多く、灌漑によっては土壌表層だけでなく樹木・作物の根群域に塩分が集中することがある。そのため緑化・農業的開発利用によって、かえって沙漠化をもたらす危険がある。その対策としては、暗渠による排水やチューブウェルの設置による圃場の地下水位上昇防止など排水システムをしっかりと備えることや、貯水池や土水路からの漏水防止が挙げられるが、費用の面から経済的に困難な点が多い。

以上のような塩害地では、作物の生育が阻害され収量が減少する。植物がなくなると植物の根による土壌の保持力が減少し、水食や風食を受けやすくなるため、自然環境下にある農地では土壌侵食を招くことになり土地が沙漠化する。一方、乾燥地や半乾燥地であっても、生産性の高い灌漑農業によって水と塩をコントロールしさえすれば食糧を生産できる場所が多い。

こうした塩害は乾燥地にだけに限った問題ではない。日本においては施設農業下でも、塩害は大きな問題である。ハウス内の環境は、降水を遮断し、その内部の温度を高温に保つという点で乾燥地の環境条件に近い。そのため土壌・植物体からの蒸発散量が土壌に加えられる灌水量よりも常に上回っている。さらにハウスのような集約的な農業では、安全率を見込んだ過剰な施肥が行われる。その結果、土壌内に植物が吸収しきれない余分な塩類が投入されることになる。これらの環境条件が重なり塩類集積を引き起こす要因となっている。

以上のように、塩類集積は塩害を引き起こし、植物の生育さらには食糧生産にも多大な影響を及ぼすことから、早急な塩類集積および塩害の対策が望まれる。

本研究では、土壌劣化の中でも、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壌塩類化の修復を目指した、技術的対応を研究の目的としている。

### 1-1-3. 沙漠化防止と塩類集積への取り組み

沙漠化や塩類集積による森林や農地の消失は、乾燥・半乾燥地域および乾性半湿润地域の多くが抱える大きな問題である。これらの地域のうち、特に途上国において発生している問題に対して、我が国の ODA 政策でも様々な事業を展開している。ここでは、沙漠化防止と塩類集積に対する我が国の取り組みについて述べる。

### 1) 我が国の砂漠化防止協力

途上国における環境問題は、途上国自身の開発の基盤を揺るがす問題であると同時に、地球環境にも大きな影響を及ぼす。また、地球全体の持続可能な開発に大きな影響を持つ気候変動問題においても、人口増加や経済成長に伴った途上国の温室効果ガス排出量の増大が予想されており、途上国における対策も重要な課題である。さらに貧困と環境問題は相互に大きな関連を持つ。これは、貧困が環境問題の要因となる側面がある一方で、貧困層は、大気汚染、自然災害等による影響を受けやすいことによる。従って、ODA を通じて、環境問題への対応を含め、途上国の「持続的な開発」に対する支援を進めていくことは、貧困削減の観点からも不可欠である。以上のような背景から、日本は環境分野への支援を ODA 中期政策においても重点課題のひとつとして位置づけている。

日本の環境 ODA は、1997 年 6 月の国連環境開発特別総会(UNGASS)で発表した「21 世紀に向けた環境開発支援構想(ISD)」に基づいて実施されている。ISD の理念を表 1-1 に示した。環境 ODA 実績は、例えば 1999 年度の場合、ODA 全体の 33.5%を占める 5,357 億円に上った。

表 1-1 ISD の基本理念

人類の安全保障	環境破壊は人類生存の脅威となりうる広い意味での安全保障の問題である。
自助努力	途上国が第一義的な責任と役割を担って主体的に取り組むことが重要であり、援助国はこうした自助努力を支援する。
持続可能な開発	途上国が持続可能な開発の観点から発展していくために、その国の経済的・社会的状態を勘案しつつ環境協力を実施する。

ISD の行動計画の項目に挙げられている「自然環境保全」には生物多様性保全構想、珊瑚礁保全ネットワークに続き、持続可能な森林経営の推進・砂漠化防止協力の強化がうたわれており、昨今の日本の ODA では森林保全および砂漠化防止に対して様々な協力が行われている(表 1-2)。

さらに、途上国における環境意識の向上を図り、環境対策への自発的な取り組みを根付かせることが重要であり、そのためには非政府団体(NGO)等による地域に密着

した活動が有効である。現在でも環境分野では様々な NGO が活躍しているが、さらにその活動を強化していくことが期待される。ODA においても草の根無償資金協力や NGO 事業補助金等により、こうした NGO との連携強化・支援に取り組んでいる。

表 1-2 森林保全および砂漠化防止に関する国際協力の案件例

国 名	協力形態	案件名
中国	(プロ技)	寧夏森林保護研究計画
インドネシア	(プロ技)	森林火災予防計画
	(無)	国立公園森林火災跡地回復計画
ラオス	(無)	造林センター建設計画
マレーシア	(プロ技)	サワラク木材有効利用供給計画
タイ	(プロ技)	造林普及計画
ブルキナ・ファソ	(無)	地方苗畑改修計画
	(開)	コモエ県森林管理計画
ケニア	(プロ技)	半乾燥地社会林業普及モデル開発計画
マリ	(開)	セグー地方南部砂漠化防止計画
セネガル	(無)	沿岸地域植林計画
チュニジア	(有)	総合植林計画
ブラジル	(草の根)	アマゾン森林保存および森林再生研究計画
協力形態	(無)無償資金協力, (有)有償資金協力, (開)開発調査 (プロ技)プロジェクト方式技術協力, (草の根)草の根無償資金協力	

## 2) 塩類集積問題に係わる ODA 事業

土壌の塩類集積に関しては、ODA 事業の中でもいくつかの調査が行われている。例えば東北タイでは調査の中で、塩害地の分級や、リモートセンシングと乾季の現地調査により塩害地図の作成が行われたほか、塩害の発生・拡大機構が分析され、塩害対策技術の確立および普及への手順、塩害地における作物安定生産技術としての耐塩性植物の導入と栽培方法の改善がマニュアルとしてまとめられた。また、ドミニカ共和国で行われた「塩類土壌改良計画長期調査」は、塩類土壌の改良および除塩後の作物栽培と水管理に係る技術の確立を目的とした予備調査である。この調査では、土壌が作物栽培可能な状態となるリーチング用水量が決定され、対象地域における灌漑計画の提案が行われた。アルゼンチン国ブエノス・アイレス州コロラド河流域では、塩類集積の現状分析を行い、土壌保全の問題と対策についての提言がなされた。これらのほか、乾燥地農業に関する調査として「乾燥地農業開発に関する基礎調

査報告書」(国際協力事業団, 1977)などがある。

これまで乾燥地域および塩害地域において実施された日本の技術協力のうち、主な案件について表 1-3にまとめた。

表 1-3 乾燥地域・塩害地域における日本の技術協力

調査名	対象国	調査期間	概要
乾燥地域農業基礎調査	インド UAE クウェート エジプト	1976/02/15～ 1976/03/15	中近東、アフリカ地域の自然条件、経済・社会条件および農業の実態を把握して今後協力すべき開発手法に関する基礎的調査研究を行なうことを目的とし、対象国に関する農業開発の現状・現在進行中のプロジェクトの概要が明らかにされた。
乾燥地域農業基礎調査	インド イラン	1976/10/10～ 1976/11/09	中近東、アフリカ地域等の乾燥地域の自然条件および農業の実態等を調査し、今後協力すべき開発手法に関する基礎的調査研究を行なうことを目的とし、1976 年の基礎調査を踏まえ、農業と塩類の問題、水利開発に伴う社会的経済諸問題等に関する見解、提言を行なった。
コロラド河流域開発協力基礎二次調査	アルゼンチン	1981/08/19～ 1981/09/12	ブエノス・アイレス州コロラド河流域開発公社の有するサンアドルフオ地区 3,500ha の開発協力に対する可能性調査が 1979 年 11 月に基礎一次調査として行なわれ、それに基づき同地区 600ha において野菜、穀類、永年作物等の灌漑栽培試験事業を実現するための開発基本構想を策定した。同地区の塩類土壌は容易に除塩可能で、野菜類も日本的なものを選定する方が有利であること等が判明し、栽培試験を含む事業計画が策定された。
塩類土壌改良計画長期調査	ドミニカ共和国	1987/09/05～ 1987/11/18	ネイバ地区の開発にあたって、「塩類土壌の改良」および「除塩後の作物栽培と水管理」に係る技術の確立を目的とした予備調査である。ネイバ地区 26,000ha のうち、地下水源の利用を考慮した第一次開発予定の 7,000ha を対象に広域水収支・灌漑排水、地質・地下水、土壌・水質に関する調査が行なわれ、小規模から大規模にわたる開発案への提言がなされた。
東北タイ塩害地域農村総合開発計画	タイ	1990～1991	コンケン市南西のファイ・ヤイ川およびファイ・ブラ・ナオ川流域約 320km <sup>2</sup> を対象として、塩害地域の農業保全および農村開発を目的とした四農村総合開発計画マスタープランが策定され、パイロット地区におけるフィージビリティ調査が実施された。

(国際協力事業団年報: 1976, 1977, 1982, 1991 より抜粋)

これら塩類集積に関する調査は、その多くが農業開発計画に伴う事前調査として実施されており、対象地域の抱えている塩類集積問題を分析し、農業生産性を向上させる方法を模索、検討している。しかしながら、各調査で掲げられた目標は乾燥・半乾燥地域における農業開発手法の基礎的研究や土壌改良手法、作物栽培技術の

確立のための計画立案が中心であり、具体的成果の点では決して十分とはいえず、また塩類集積を沙漠化の一要因として捉え、乾燥・半乾燥地域における塩類集積の抑止を目的とした調査の例はほとんどなく、その他の援助スキームの活用例もない。

短い時間オーダーで沙漠化が進行することを考えれば、沙漠化に結びつくような塩害を早期の段階で抑止し、飢餓や貧困およびそれらによって引き起こされる様々な社会問題への発展を未然に防ぐためにも、ODA 事業において塩類集積問題により積極的に取り組むことが期待される。



## 1-2. 土壌の塩類集積

### 1-2-1. 塩類集積土壌の特性

土壌断面に、特に植物の生産に関係する表層から根群域にかけて、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)で評価されることが多い。図 1-1の分類(Brady and Weil, 1999)では EC を、水を加えてペースト状になった土壌試料からの抽出溶液の電導度である  $EC_e$  で表し、 $EC_e$  値 4(dS/m)を塩類土壌と非塩類土壌の境界値としている。加えて、 $EC_e=4$ (dS/m)かつ  $SAR=13$  以上の土壌を、塩類・ナトリウム質土壌と定義している。同じ  $EC_e$  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。 $EC_e>14$ (dS/m)では、ほぼすべての植物が生育不可能となる。

### 1-2-2. 塩類集積の機構

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。

塩類集積発生要因の相互関係を図 1-2に示し、以下に代表的な塩類集積の発生に関連する要因を列記した。

#### 1) 降水量および蒸発散量

塩類集積が発生する地域は、一部湿潤地域も含まれるが、そのほとん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っている。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、可能蒸発散量が大きな地域では、既に述べたように、土壌表層ほどポテンシャル勾配が大きく、土壌

溶液の上昇移動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地域(乾燥度指数  $AI > 1.0$ )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起こらない。

我が国で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、土壌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。逆に平均年間降水量が可能蒸発散を下回る地域では、土壌中の塩は溶脱されることなく保持されるが、灌漑が繰り返しなされる、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。

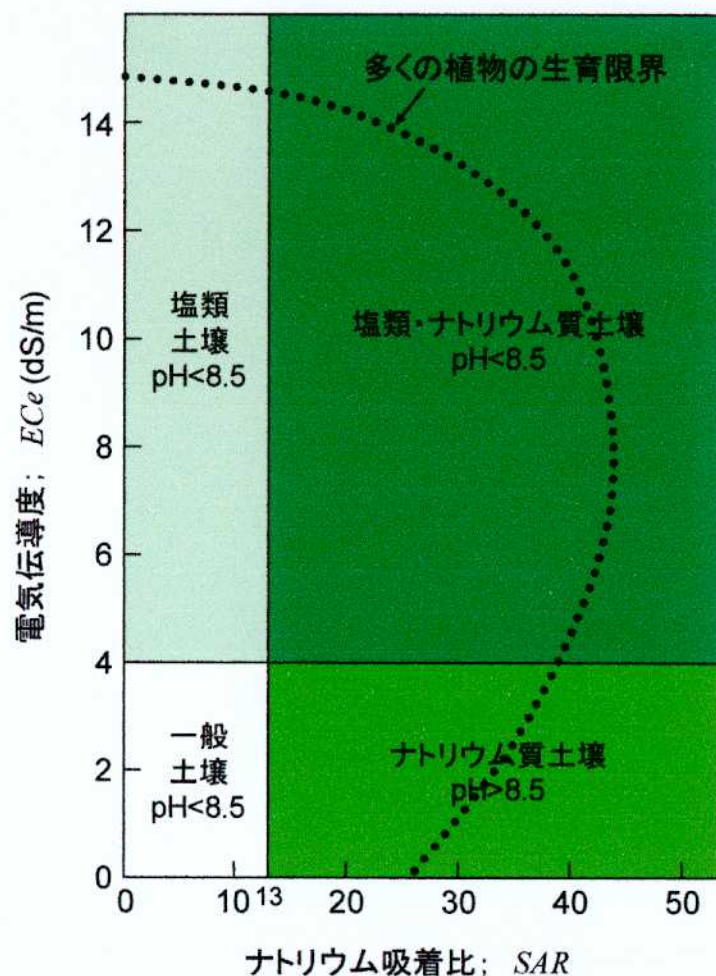


図 1-1 塩類土壌・ナトリウム質土壌分類ダイヤグラム (Brady, N.C., Weil, R.R., 1999)

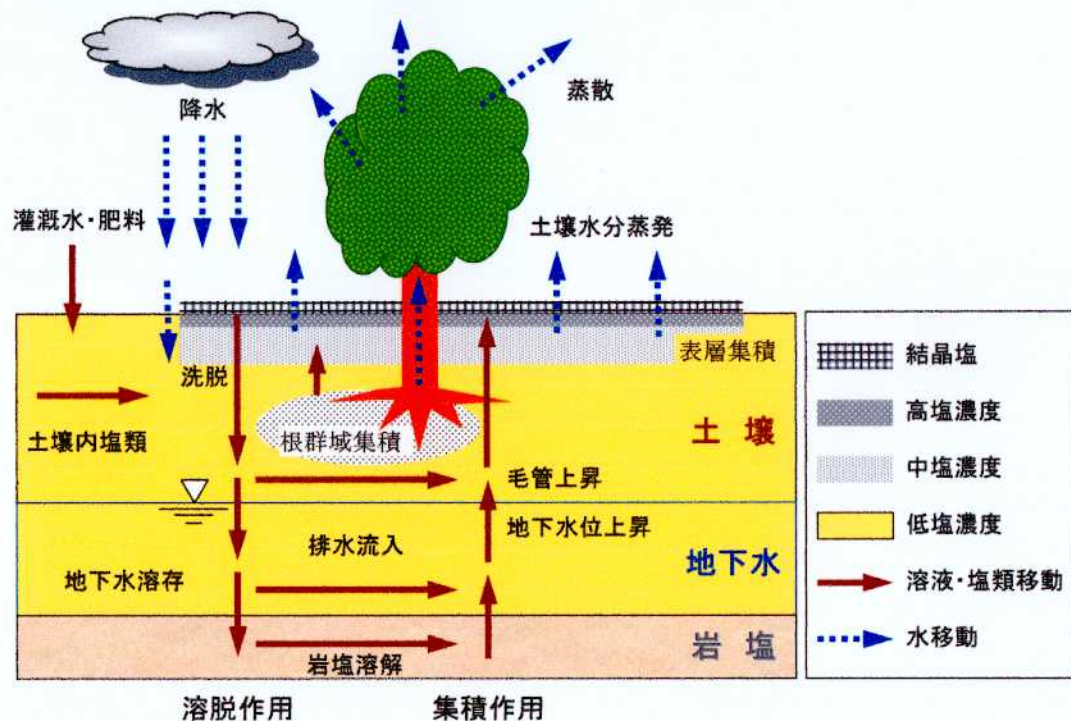


図 1-2 塩類の循環 (安部, 1998 を一部改変)

## 2) 灌漑水量および水質

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、灌漑を行う度に塩類集積が進むこととなる。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、および上流耕作地の塩分の溶解などによって、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。

また、かつては海底であった地域は、土壌中に多量の塩を含んでいるため、灌漑がきっかけとなる塩類集積が頻発している。例えばインド亜大陸北部のガンジス平原は、かつてテーチス海を中心にあったヒマラヤ山脈から流出した土砂が堆積して形成された。ガンジス平原には、Soil Taxonomy によって分類される土壌 Inceptisols が分布し、そこに含まれる塩類濃度は高く、その地下水の塩類濃度も高い (Muthiah, 1987; 阿江・有原, 1991)。

米国農務省(USDA)では、灌漑水を塩源とする塩類集積を防ぐために灌漑水質に関する基準を設けており、塩類化の危険の程度は EC 値で表 1-4のように分類されている。

表 1-4 灌漑水の基準(USDA ハンドブック, No.60 を改変)

25℃時の EC 値 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	塩類濃度障害
100～250	「低」
250～750	「中」
750～2250	「高」
2250 以上	「極高」

(10000 $\mu\text{S}$ =1dS)

### 3) 地下水位

地下水位が高くなる要因として、もともと自然条件として地下水位が高い場合もあるが、圃場での過剰な灌漑や不効率な灌漑および排水路、灌漑水路からの漏水が圃場内や末端低位部での地下水位を上昇させ、湛水被害を生じ、湿害とともに塩害へとつながることが多い。また、大量の灌漑水供給および大型トラクター等の踏圧が要因で作土直下に堅い盤層が形成され、盤層部位に形成された停滞水によって圃場内地下水位が上昇する。この一時的な地下水位により、地下水位面からの毛管水が表層土まで連結し、地表面での激しい蒸発散による吸引力で毛管水の上昇が促進され、土壤水に伴って可溶性塩類の表層への移動・集積が起こる。

さらに、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ひとつとなる。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壤水の鉛直上方への移動が促進される。

以上のことから、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ことが分かる。ただし、溶脱作用を促進させるために多量の灌水を行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。



### 1-2-3. 塩類集積対策

前述したように、塩類集積土壌では植物の生育が大きく阻害される。従って、植物が生長するためには、その阻害要因を改善する必要がある。そのための対策としては、塩類集積を抑制することや塩類の溶脱作用を促進させることのほかに、作物の品種選定、耐塩性の強化などの方法が挙げられる。

#### 1) 塩類集積の抑制

塩類集積の抑制には、塩類集積を未然に防ぐための予防対策が重要となる。塩類集積の予防対策としては、人為的な塩の投入の抑制と塩類集積作用の阻止が挙げられる。

肥料や灌漑水に濃度の高い塩類が含まれている場合、それらは人為的な塩源となるが、塩投入の抑制のためには、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。例えば単収の多い品種の場合には、肥料の多投が条件であることが多く、単収の多い品種の導入に伴って肥料を多投する傾向が増大してきた。農薬も同様に、過剰に投与された場合にはやはり塩源となる可能性がある。従って、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。他方、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、さらには膜分離法などが考えられるが、いずれも  $1\text{m}^3$  当り 200 円～600 円程度とコストが高く、現実的とはいえない。

集積作用の阻止のためには、鉛直上向き方向の土壌溶液の移動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が、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。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、一定の地下に不透水性のシートを敷設する方法がある。また、途中で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、また費用と比較して耐用年数が短い事などの問題点がある。また、一般的に地下水位の上昇を阻止するために、暗渠排水、機械排水や排水路システムなどの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となる。そ

のほか、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、根群域周辺の土壌塩をドリップ灌漑等で再分配・低塩濃度化するなどの方法が考えられるが、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、蒸発散が進むに従い、塩が再度集積することになる。

## 2) 塩類の溶脱作用の促進

塩害発生後の処理対策としては塩類の溶脱作用の促進が挙げられる。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、土壌表面へ灌水して土壌中の塩類を溶かし、塩類を含んだ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非常に有効な方法である。また土木的な手法として、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ひとつの方法といえる。

これら塩類集積後の処理対策以外にも、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は、表層の集積した塩類を削り取る Scraping 法や表土を剥ぎ取って塩類の集積した部分を水で洗い流す Flushing 法、土中の塩を吸収しやすい植物を植え、刈り取りによって植物が吸収した塩を排除する Cleaning Crop 法などがある(FAO, 1988)。しかしながら、いずれの方法も問題がある。例えば Cleaning Crop 法は、植物による環境修復技術(ファイトレメディエーション)のひとつであるが、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困難である。

これら様々な塩害対策のうち、これまで幅広く研究およ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(鈴木清, 1978)。塩性排水の処理さえ適切に行われれば、系外への塩排出効果は大きく、処理対策として有効性が高い一方で、適用上の技術的制限や問題点を抱えている。この点に関しては後述する。

## 3) 作物の品種選定および耐塩性の強化

作物は、種類によってその耐塩性に差異があり、数ある作物の種類の中には他より

も比較的耐塩性に優れたものもある。Maas and Hoffman(1977)によれば、果樹や蔬菜よりも畑作物や飼料作物の方が、耐塩性に優れている傾向にある。

塩害が生じている地域では、塩害の抑制対策と平行して、より耐塩性の高い作物の選定、栽培方法について検討することが重要である。また、同じ作物でも品種間で耐塩性に差異があるため、より耐塩性の高い品種を選定することも必要である。作物別の耐塩性について図 1-3に示す。

現在では、様々な作物の品種改良が行われ、また遺伝子技術も応用されている。これらの技術を用い、作物の耐塩性を強化することによって、より劣悪な塩害条件下でも栽培できる作物を作り出すことが可能であると思われる。例えば、塩害耐性についてはアルミニウムの特異的な排除システムやファイトケラチン様のキレート物質の誘導的合成による無毒化などが、耐性機構として明らかになっている(Delhaize and dan Ryan, 1995; Kochian, 1995)。

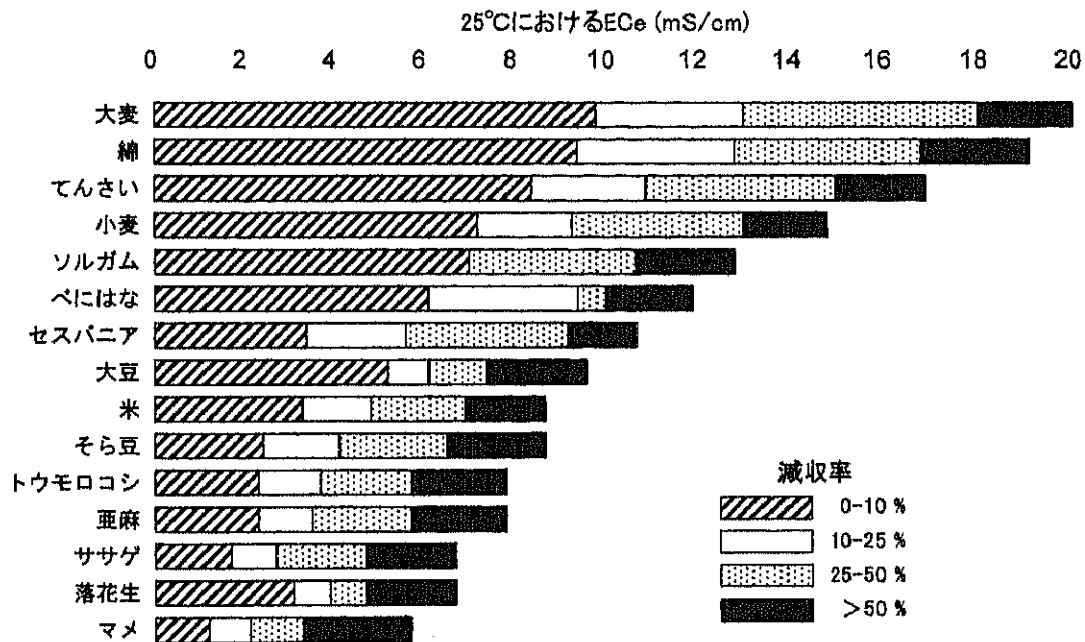


図 1-3 作物別の耐塩性 (Maas, E.V. and Hoffman, G.J., 1977)

また、高塩濃度ストレスによって起こる細胞内の塩濃度の上昇を防ぐため、マンニトール、ピニトールなどのポリオールやプロリン、4級アンモニウムであるベタインが、適

合溶質として細胞質に蓄積することも知られている(Gorham *et al.*, 1985; Hanson and Hitz, 1982). これらの基礎研究をもとに, ストレス蛋白質や適合溶質のような耐性獲得に重要な物質の合成や, その制御に関与する遺伝子の検索や遺伝子操作による形質転換も始められている. 例えば, 遺伝子操作によってマンニトールの合成能を付与することによって, タバコの塩化ナトリウムに対する耐性が上昇したという報告もあり(Tarczynski *et al.*, 1993), 今後の成果が期待される. このように, 耐塩性が高くて利用価値の高い作物を作り出すことも, 塩害を克服するひとつの対策であると考えられる.



### 1-3. 集積塩類の除去

#### 1-3-1. Leaching 法

Leaching 法の原理については先に述べたとおりであるが、その模式図を図 1-4に示した。一般的に Leaching 法によって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場合を想定している。

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 *et al.*, 1980)。Leaching 法には、散水灌漑や畝間灌漑による方法もあり、特に散水灌漑は土壤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問題もある(Tanji, 1990)。

また Leaching 法では、低塩濃度の水の確保や排水システムの設置など、高度な灌漑排水技術が必要となる。乾燥地では一般に Leaching 法に適した低塩濃度の水の確保は難しく、特に河川水や湖沼水などを利用している地域では、下流に行くほど塩濃度が上昇する。また、土壌内の排水が適切に行われない場合には、地下水位を高め、毛管上昇を促進する可能性があるほか、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、周辺環境に負荷を与えるなどの問題も考えられるため、その適用には十分に留意しなくてはならない。さらに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。

#### 1-3-2. Dehydration 法

Leaching 法に対して、さらに合理的か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(Abe, 1995)。Dehydration 法と Leaching 法の除塩概念の相違については図 1-4にとりまとめたように、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。

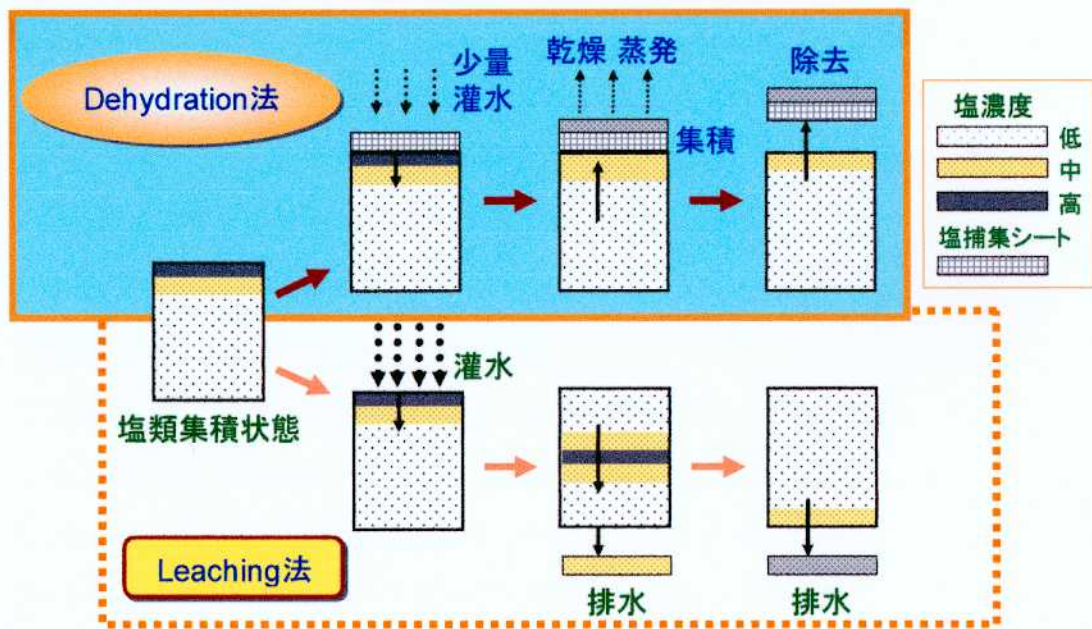


図 1-4 Leaching 法と Dehydration 法の模式図 (桑畠, 安部ら, 2001)

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、シート上から土壌内部に集積した塩類を溶解するの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こる。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。Leaching 法と比較した場合の Dehydration 法の長所には、必要とされる水量が極端に少なくて済むこと、除塩に必要な水の塩濃度が高くても使用可能であること、特別な排水処理施設が不要なため、適用コストが安価であること、周辺環境への負荷がないことが挙げられる。

上述した Dehydration 法の除塩過程を踏まえ、その技術システムの改良を進めるためには、①浸潤速度と毛管上昇速度を考慮した最適除塩用水量、②除塩効果の見込める除塩用水濃度、③土壌中の塩類を効果的に溶解させる灌漑方法、④様々な適用条件下で除塩効果の予測が可能な数値モデルの開発、⑤捕集能力の高い捕集材の改良・開発、などの検討が必要となる。

### 1-3-3. Dehydration 法に関する既往の研究

これまでの Dehydration 法の研究では、以下に述べるように Leaching 法との比較、最適除塩用水量やより除塩効果の高い灌漑方法、除塩用水濃度が明らかにされた。

#### 1) Dehydration 法と Leaching 法の比較

Dehydration 法と Leaching 法との比較研究(安部ら, 2000)によれば、一定の条件下においては Leaching 法での除塩が不可能な除塩用水量( $50 \sim 150 \text{cm}^3$ )であっても、Dehydration 法では除塩が可能であり、Leaching 法では除塩に必要な用水量の確保の条件が厳しい乾燥・半乾燥地で有効な除塩方法となる可能性を持っていることが分かった。

#### 2) 高塩濃度除塩用水と Dehydration 法

安部ら(1999)によれば、使用される除塩用水の塩濃度が海水と同程度の 3.5%であっても、Dehydration 法では除塩効果を示している。また、除塩回数が増すに従い累計除塩量は増加するが、下方への再分配が発生することから、除塩用水利用効率を最大化するには、1 回の灌水量を少なくする必要があることが分かった。

標準砂を用いたカラム実験では、蒸発強度と塩捕集率の関係について、蒸発の旺盛な恒率蒸発期よりもむしろ蒸発強度の減少期である減率蒸発期において、塩捕集率は急激な増加傾向を示すことが分かった。

#### 3) 灌水流束と除塩効率

除塩用水の灌水流束が速ければ、湛水灌漑に近い初期含水比分布となる。そのため蒸発が旺盛になり、結果として除塩率が急激に下がる。従って、含水比と透水係数との関係から、初期含水比を抑えるような灌水流束を設定する必要がある。標準砂を用いたカラム実験では、灌水流束が除塩効果に影響を及ぼすことが判明し、灌水条件が除塩効率を左右する重要な要素であることが分かった。

以上の Dehydration 法に関するこれまでの研究では、豊浦標準砂を用いたカラム

実験が行われてきた。しかしながら、実際の塩害地域の土壌を考えると、その気象条件や土壌物理性は様々である。Dehydration 法は対象土壌の物理性で除塩効率が大きく変化することから、今後は多様な環境条件下で、より除塩効率の高い方法を検討することが必要となる。そのためには、土性の相異と Dehydration 法の除塩効率の関係だけでなく、異なる環境条件下でも Dehydration 法による除塩効率を予測する数値モデルの開発および集積塩類の捕集能力の優れた捕集材の改良・開発が重要となる。

## 1-4. 研究目的

本論では、これまでの Dehydration 法のカラム実験による研究成果を踏まえ、さらに様々な条件下での Dehydration 法の適用可能性や改良方法を探るために、土性の違いが Dehydration 法に与える影響を検討するほか、Dehydration 法の研究を進める上で有用となる水と溶質移動に関する数値モデルの適用可能性の検証を目的とした。また、将来 Dehydration 法が実証試験段階に移行する際に期待できる除塩効果や予想される問題点等についての検討も行った。

第 2 章では、標準砂に一定割合の粘土を混入した供試土を用い、土性の異なる供試土に Dehydration 法を適用した場合に、その除塩効率にどのような影響が現れるのかを、カラム実験を通じて考察した。

第 3 章では、Dehydration 法を適用した場合に、その各過程における塩移動予測を行うために数値モデルを適用し、実験結果と解析結果の比較を行うことで Dehydration 法における数値モデルの適用可能性を検討した。ここでは、捕集シート（医療用ガーゼ）および供試土の水分移動特性を実際に測定し、多孔質体であるガーゼを土層のひとつとみなして、解析を行った。

第 4 章では、捕集材としてこれまで多く用いられてきた医療用ガーゼの代わりに、水分保持能がより高い土壌を捕集材として用いた実験を行うとともに、第 3 章で検討した数値モデルを併用しながら、捕集材の改良・開発を行う上で、考慮すべき事項の検討を行った。

第 5 章では、既往の Dehydration 法の研究成果から、実際の圃場を想定した場合に期待できる除塩効果を、Leaching 法と比較しながら検討するとともに、実証試験を行う上での今後の課題についての提言を行った。