

塩類化の現状と除塩技術

Salinization Status and Salt Removal Techniques

井 上 光 弘 (いのうえ みつひろ)

鳥取大学教授 乾燥地研究センター

1. はじめに

人口増加に伴って、食糧危機、水資源の枯渇、エネルギー不足、環境悪化などの深刻な問題が発生している。その中で土地の劣化、とりわけ塩類化の問題は世界100ヶ国以上で発生し¹⁾、塩性化とソーダ質化が進行している。塩類化は世界の農業生産を減少させる主要因の一つである。通常の灌漑や作物管理法では土中の過剰な塩分濃度を経時的に減少できない²⁾。持続的農業のために実現可能な塩類化の予防対策が急務である。ここでは、塩類化の原因、塩類化の現状、塩類集積の軽減、塩類化の予防対策、塩類集積地の除塩技術について解説する。

2. 塩類化の原因

塩類化は、土中水の移動と塩の組成と量に規制され、土の母材や地下水位、天候によって大きく影響される。自然界に分布する塩類土は、土を構成する鉱物、降雨などによる自然的要因と、不適切な灌漑と水管理システムなどの人為的要因に分けることができる。

2.1 自然的要因

岩石の物理的・化学的風化作用で土の母材が生成され、微生物などによって分解されて土が生成される。化学的風化では雨水は大气中の二酸化炭素を含み、弱酸性の炭酸となり岩石を分解する。粘土鉱物など土の負荷電に吸着されているナトリウム (Na^+)、カルシウム (Ca^{2+})、マグネシウム (Mg^{2+})、カリウム (K^+) などの主要な交換性陽イオンが水に溶けて移動し、陰イオンと結合して塩化物 (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 など)、硫酸塩 (K_2SO_4 , CaSO_4 など)、炭酸塩 (Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , MgCO_3 など) などの塩になる。これらの塩の溶解度は温度に依存するが、20℃の場合を示すと、塩化カルシウム74.5>塩化マグネシウム54.6>塩化ナトリウム35.9>硫酸マグネシウム25.5>炭酸ナトリウム21.5>硫酸ナトリウム19.5>硫酸カルシウム(石膏)0.21>水酸化カルシウム0.17>炭酸カルシウム 6.5×10^{-3} (g/100 mL) の順に小さくなる。つまり、土中を塩が移動する場合、溶解度の低いイオンは移動しにくい。例えば、乾燥地の断面調査の結果から、溶解度が低い炭酸カルシウムの集積層は白色に沈積しているの、容易に確認でき、降水量が多いほど深層に集積する⁴⁾ことが報告されている。

このように自然界の土の生成過程や塩の溶解度の相違、降雨条件などによって塩類化の分布が規定される。また、

降水量が少なく上向きの土中水の流れが卓越する乾燥地では、蒸発によって土中水から塩が析出し集積する。この時、蒸発能や地下水位が高いほど、また粘土含量や水分量が多いほど、塩類化が進行する。さらに、古代に海底にあったものが隆起して乾燥し岩塩を産出する土地もある。その他、海岸に近い土地では、台風や強風による海水の飛散侵入、津波による低平地への海水侵入、地震に起因する土地の沈下による海水侵入などの自然災害も塩類化の自然的要因になる。

2.2 人為的要因

人口増加に伴う食糧確保のため、近年、農業の環境変化が著しい。例えば、1960～2000年に世界人口は2倍、品種改良や灌漑・施肥導入、耕地面積の増大で穀類は2.5倍、灌漑面積は1.8倍に増加した。全世界水需要の70%を占める農業用水の水需要は1.9倍に増加し、全農地面積(15億 ha)の約18%を占める灌漑農地で全食糧の40%を生産している。その結果、過剰な灌漑によって地下水が枯渇し、灌漑水の水質が低下し、排水不良と蒸発によって塩類集積が進行して、塩害による作物収量が低下し、塩類化によって最終的に農地を放棄している。

塩類化の人為的要因の事例を列举すると、①良質な灌漑水であっても、過剰灌漑によって深層地盤の塩を含む地下水位が上昇、②河川の下流側で、上流と比較して塩分濃度が高い灌漑水を供給、③ハウス栽培で長年に渡って肥料を施与、④灌漑水路が土水路の場合、送水に伴い水路からの漏水が著しく周辺の地下水位の上昇によるウォーターロギング(湛水湿害)、⑤水盤灌漑や畝間灌漑のような地表灌漑では、地下浸透水の停滞によって圃場内の地下水位が上昇、⑥大型トラクター等の導入によって、作土層直下で踏圧による耕盤層が形成され、排水不良による作土層の水分量が多くなって蒸発量が増加、⑦広域森林地帯の大規模な伐採によって、森林の根による吸水が停止して地下水位が上昇し、裸地化した大地で蒸発量が増加、⑧計画リーチング(溶脱)水量の不足によって土中の塩分濃度が増加、⑨リーチングによって根群域の塩分濃度は低下したが、周辺や下流側では塩分濃度が高くなった地下水を灌漑、⑩工業廃水や農地の排水などが灌漑用水に混ざり、塩分を含む水を灌漑、など世界中で塩類化は進行している。農地の塩害は、灌漑そのものが塩を与えているという認識がないことに起因する。例えば、中国黄河中流部の灌漑水のように、電気伝導度が1 dS/m(塩0.5 g/Lに相当)、年間灌漑水量が1 000

mm（日灌漑水量 3 mm 以下）を 100 年間灌漑すると、塩の密度が 2 g/cm^3 であるとして、一面に 2.5 cm の白い塩を堆積させる計算になる。さらに肥料も塩なので、施肥も考慮すると相当量の塩を圃場に供給することになる。

3. 塩類化の現状

塩類化を地盤の病気に例えると、病気には診断と治療が必要で、診断とは塩類化の状態を把握することで塩類化リスク評価法⁵⁾の確立が必要である。

3.1 塩類土の分類

塩類土 (salt affected soil) は、塩性土 (saline soil, pHe が 8.5 未満, ECe が 4 dS/m 以上, ESP が 15% 未満), ソーダ質土 (sodic soil, pHe が 8.5 以上, ECe が 4 dS/m 未満, ESP が 15% 以上), 塩性ソーダ質土 (saline-sodic soil, pHe が 8.5 未満, ECe が 4 dS/m 以上, ESP が 15% 以上) に分類される³⁾。ここで、pHe は土の飽和抽出溶液の pH 値, ECe は土の飽和抽出溶液の電気伝導度, ESP は陽イオン交換容量に対するナトリウム吸着量の割合を表す交換性ナトリウム率である。塩性土に対してはリーチングを行い、ソーダ質土に対してはカルシウム資材を添加し、透水性を改良するなど、塩類土の種類によって、塩類化防止の対処方法が異なるので、あらかじめ塩類土の分類が必要である。

3.2 塩分濃度の測定

土中水の塩分濃度は、以下に列挙するような電気伝導度を測定することによって意味が異なる。①溶液採取装置を土中に挿入して負圧をかけて溶液を直接吸引採取し電気伝導度 (ECw) を測定する。②土を採取して、ペースト状になるまで蒸留水を加え、減圧濾過あるいは遠心分離で前処理して飽和抽出液の電気伝導度 (ECe) を測定する。③土を採取して、その土の乾燥重量の 5 倍の蒸留水を加えて、1:5 抽出液の電気伝導度 ($EC_{1:5}$) を測定する。④4 極センサーや TDR センサーを不飽和土に挿入して、みかけの電気伝導度 (ECa) を測定する³⁾。植物の根の吸収や塩害の原因を考えるとときには、①の方法で測定した ECw が直接関係するが、相対的には日本では③の方法、米国では②の方法で土が診断され、塩類土の分類は ECe で評価される。オーストラリアでは、飛行機やヘリコプターに空中電磁探査装置を付けて深さ方向まで三次元的に解析可能な広域大地の塩類化状況を把握できる技術 (Airborne Electromagnetics for Salinity and Groundwater Mapping) が確立している⁶⁾。

3.3 海外の塩類化の現状

元来、人間は塩分濃度が高い土地で生活していない。四大文明の発祥の地、メソポタミア文明はチグリス・ユーフラテス川の恵みと肥沃な土地で古代農牧畜業が栄えた。しかし、民族間の争い、森林伐採や不適切な灌漑によって塩類化が進行し、繁栄は衰退していった。また、インダス文明も同様に、河川の氾濫、ウォーターロギングによる塩類化で衰退していった。最近では、1960 年代の旧ソビエト連邦時代の中央アジアの大規模農地開発

後、不適切な灌漑と水管理システムによって、カザフスタンにおける農地の塩類化⁷⁾は著しく、アラル海の縮小の問題⁸⁾は有名である。また、メキシコ⁵⁾や中国、オーストラリア⁶⁾でも塩類化は問題になっていて、世界的に除塩対策が急務である。

4. 塩類集積の軽減と予防対策

治療には、塩類集積が発生しないように、あるいは塩類化が進行しないように予防する対策が必要である。

塩類化機構は、①地下水位が上昇し、土中水が液相から気相へ変化する蒸発過程に伴って、地表面付近の塩分濃度が高くなり、塩が析出して集積する場合、②灌漑や施肥など長期間に、あるいは災害など短期間に系外から塩が侵入して集積する場合がある。①の場合は上向きの、②の場合は下向きの塩の移動である。

4.1 上向きの塩移動

下方から上向きの塩移動の場合、塩類集積の軽減と塩類化の防止対策は、基本的に地下水位を上昇させないこと、毛管上昇を抑制して蒸発を軽減することである。具体的には、①地下水位を低下させる対策として、明渠 (排水溝) や暗渠による土木的排水、井戸に設置した揚水ポンプによる機械的排水、ポプラなど根の吸水による生物的排水、などがある。②蒸発を軽減して、上向きの土中水の移動を少なくする対策として、ワラ、枯れ葉、礫、砂などを地表面に敷いて蒸発量を軽減するマルチング⁹⁾、③作土層の毛管上昇を遮断するために深く耕し乾燥層を地表面に形成させる伝統的な深耕法、④作土層と地下水面の間に礫層などを敷き、毛管上昇を遮断するキャピラリーバリアの埋設¹⁰⁾などの土木的対策がある。

4.2 下向きの塩移動

上方から下向きの塩移動の場合、代表的なものに降雨と灌漑がある。作土層の塩分濃度が上昇しないようにリーチング (洗脱) 水量として、作物に必要な消費水量 (ET_c) に、作土層から下方への排水量 (D) を加えて、灌漑水量 (I_r) とする。つまり、 ET_c よりも余分に作土層の塩分を下方に洗い流すための洗脱水量を加えるのである。ここで、作土層に入る灌漑水の塩分濃度 (EC_i) と作土層から下方への排水の塩分濃度 (EC_d) を測定し、灌漑中の塩の凝結、溶解、根による吸収を無視した単純な一次元の塩収支を考える。上記の電気伝導度は土中水の電解質濃度 (mol/L) と比例するので、作土層に入る塩は I_r と EC_i の積、作土層から出る塩は D と EC_d の積に比例し、もし、作土層に入る塩と出る塩を等しくすれば、作土層の塩分濃度を高くしないように管理できる。この考え方で、リーチング計画では、灌漑排水量に対する計画水量の比をリーチング要水量 ($LR = D/I_r$) と定義し、リーチング時の灌漑水量を

$$I_r = ET_c / (1 - LR) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で決定する³⁾と、塩類集積を予防できる。この場合、重要なことは、リーチングに伴って地下水位が上昇しないように、地盤の排水を十分に行うことである。特に粘質土の場合には暗渠排水が効果的である。また、塩をわず

論 説

かでも含む灌漑水を節水することが持続的農業のために重要である。

さらに、系外から塩が侵入する対策事例として、①台風や強風による海水の飛散侵入に対する防潮堤や防風林、②用水路の漏水に伴う周辺地下水の上昇を軽減するための用水路のライニング、③高塩分濃度の工業廃水や農業排水の侵入を防止するための用水路と排水路の分離など有効な土木的対策がある。

5. 塩類集積地の除塩技術

治療には、塩類集積地を除塩して農地を回復する対策が必要である。乾燥地では、農地の地表面に塩の結晶が集積し、これが「塩類集積地」という土地が多く観察される。このような塩類集積地を回復するための水理的、化学的、生物的、土木工学的な除塩技術を紹介する。

5.1 水理的除塩技術（リーチング）

リーチングは作物に必要な消費水量以上に多くの除塩のための水量が必要で、乾燥地では水資源枯渇の問題が生じる。今、塩類集積地で、リーチングによって溶解塩を下方に移動させるとき、どれくらいの時間がかかるかを考えてみよう。地下水が浅いと非灌漑期に再び塩類化するので、地下水が十分に深いこと、土中で塩の吸着がなく、拡散分散による塩移動が小さく、定常的な下向きの一次元流れを仮定すると、塩の下方への流れは移流が支配的になり、単純な式で塩の到達時間 (t) を計算できる。つまり、塩の移動は土中水の平均速度 (v) に依存し、到達時間 (t) と平均速度 (v) の積が到達距離 (L) であり、単位時間に単位面積を横切る量として定義されるフラックス (q) は、平均体積含水率 (θ) と平均速度 (v) の積であるので、到達時間は、

$$t = L \times \theta / q \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。この式は簡便な塩の移流速度の計算に役立つ。例えば、年降水量（リーチングを含めた灌漑水量を加算）が1 500 mm、年蒸発散量が1 250 mm、地下水位が深さ20 m、バイドスゾーン（地表面から地下水までの不飽和帯）の平均体積含水率が0.25 m³/m³であれば、地下水までの塩の到達時間は20年となる¹¹⁾。つまり、20 mの距離を塩が移動するのに20年かかるという結果である。もちろん、この計算は年間のリーチング量、灌漑水量、降水量に依存する。年降水量が3 000 mmであれば、到達時間は2.86年になり、地下水が深い場合、大量の灌漑水を導入できる条件下では塩を下方へ除去できる。

リーチングは、系外から十分な水を確保できること、地下水位を上昇させないように明渠や暗渠などの排水を完備すること、浸透性を維持することなどの条件が前提である。しかし、実際には、水資源の枯渇、低平地の排水不良、地下水位上昇や下流側農地の塩分濃度の増加による農地の二次的塩類化の問題が多い。

5.2 化学的除塩技術（ソーダ質土の改良）

塩類集積地の土が塩性土かソーダ質土かによって、除塩対策は異なる。塩類化の進行は、①強い日射エネルギーに関連した蒸発による濃縮、②可溶性塩類の溶解度に関連した選択的な無機塩の沈殿、③降雨や灌漑の強度と累積量、④土性と土の構造、などの要素に強く依存している。また、前述の溶解度の関係から、塩類集積の現象としては、炭酸カルシウムから最初に沈殿し、降雨や灌漑による希釈で塩化物から溶解し、リーチング過程でもソーダ質化は進行し、ナトリウムを含む塩が下方へ流亡してソーダ質土の形成に関与する。

ナトリウムを多く含むソーダ質土は、強アルカリ性を呈し主に低平地に分布し、コロイド物質の分散や粘土の膨潤によって透水性と通気性が悪くなり、塩クラストが地表面に形成されるなど、リーチング効果は期待できない。さらに、強アルカリ性のために耐塩性植物も繁茂しないという過酷な生態環境になる。このソーダ質土の改良は、吸着されたナトリウムをカルシウムと置換するために、石膏 (CaSO₄·2H₂O)、塩化カルシウム (CaCl₂·2H₂O) などの水溶性のカルシウム資材を土に施与して透水性を改良し、その後に、真水ではなくて、ある程度塩を含んだ灌漑水でリーチングを行うことが奨励されている⁵⁾。透水性を改善するために、排水不良の粘土層では、深耕や耕盤層破碎のような物理的改良が有効である。

5.3 生物的除塩技術（ファイトレメデーション）

粘土含量など土の種類に依存するが、リーチングは多くの水がマクロポアを通過して、作土層の除塩は十分ではない。近年、安価なファイトレメデーション（植物による環境修復）が多くの発展途上国で注目されている。その特徴は、①耐アルカリ性植物によるソーダ質化の軽減、②植物根が作土層を貫通することによる浸透性の改善、③石膏などのカルシウム資材の施与では作土層の施与部位（表層20 cm程度）しか改良されないが、ソルガムやスーダングラスなどの植物を利用すると、根の到達する深い部位まで広範囲の土層改良、④耐塩性の灌木移植後、土層調査の結果、深さ1.2 mまでの土層で電気伝導度・イオン濃度が低下した除塩効果¹²⁾、⑤経済的に有用な耐塩性植物による塩害の持続的防止、などである。

植物の塩害発生機構⁴⁾は、①土中水の塩類の浸透圧による植物の水分吸収阻害で生育が抑制される（浸透圧ストレス）、②過剰なナトリウムイオンやマグネシウムイオンによる生理障害（イオンストレス）、③土中の粘土粒子に吸着したイオンがナトリウムイオンと置換し排水性が著しく低下して根腐れを起こす（生理障害）などがある。植物は発芽期に塩に敏感で、耐塩性があっても生育は遅い。耐塩性植物は、マングローブのようにすでに発芽した胎生種子で繁殖する（生態的機構）、アカザ科の植物のように塩を葉の表面の毛に蓄積させて毛を脱落させ体外に塩を除去する（形態的機構）、ヨシのように根がナトリウム吸収を抑制する、タマリクスのように吸収した塩を特定の組織（塩腺）から排出する、葉肉細胞の巨大な液胞にナトリウムを貯留する（生理的機構）などの種々の機構で塩害を防いでいる³⁾。収量が10～15%減少するが、ECeが8～12 dS/m程度で収穫が期待できる有用植物には、ワタ、テンサイ（サトウダイコン）、

アイスプラント、アッケシソウ、オオムギ、テーブルビート、バーミューダグラス、コキア、ソルトグラスなどがあり、3～8 dS/m 程度でソルガム、ヒマワリ、スーダングラス、フダンソウなどがある³⁾。ここで有用植物とは、繊維生産、精油、食糧、牧畜用飼料（牧草に配合する）、野菜など人間に役立ち収入源になる植物である。アイスプラントはサラダに、アッケシソウはサラダやピクルスの材料に使用される。このような好塩性植物を除塩対策に採用する方法は経済的に成り立つ。ファイトレメデーションは、好塩性植物を生産することが目的ではなく、除塩によって農地を回復させて通常の作物を栽培することにあり、今後の土の管理が重要となる。

5.4 土木工学的除塩技術

白く結晶化した塩をリーチングで下方に流亡させると、地下水の塩分濃度が増加し、二次的塩類化を進行させる。そこで、いくつかの工学的除塩方法がある。

(1) 水資源が豊富な場合

河川から豊富な水資源を獲得できる条件であれば、排水性が悪い粘質土に効果がある方法で、①ポンプ圧送などによって地表面付近の塩を多量の流水で水平方向に洗い流し、下流端（圃場の水尻）まで表面流出させて塩を除去する（表面流出除去法、フラッシング法）、②2～3日間圃場を湛水状態にし、灌漑水に塩を十分に溶出させてから明渠（排水溝）に排水させ塩を除去する（表面溶出排水法）、排水性の良い土に効果がある方法で、③圃場に表面灌漑を行い、必要に応じて心土破碎や弾丸暗渠などで降下浸透と排水を促し、塩を除去する（リーチング法）などの方法がある。基本的には、除去した塩が隣接した圃場に侵入して二次的塩類化が生じないように、用排水分離を考慮することが肝要で、最終的に塩水湖に塩を集めて塩の生産などに役立てる。

(2) 水資源が乏しい場合

塩類集積地で鉛直方向に塩分濃度を測定すると、地表面近くの塩分濃度が著しく高く、蒸発によって部分的に塩が白く析出している。水資源が乏しい場合の除塩方法として、①塩クラストや塩分濃度が高い部位の土を土木機械的に除去する（表面剥離法、スクレイピング法）、②水で湿らせた捕集シート¹³⁾を地表面に敷き、塩を十分吸着捕獲してから系外に塩を除去する（塩吸着捕獲除去法、デハイドレーション法）、③白い集積塩をピンポイントで節水吸引によって塩を除去する¹⁴⁾（表層吸引溶脱法）、④地下水からの毛管上昇を遮断するためにキャピラリーバリアを敷き、塩を含まない作土層を客土する（毛管遮断土層改良法）などがある。

6. おわりに

広範囲の塩類集積地を農地として回復する除塩技術として、種々の方法を組み合わせて、経済的で持続的に実

現可能な方法を模索する必要がある。例えば、①土木工学的に表面剥離法で地表面に析出した塩を除去してからリーチングを行い、ファイトレメデーションによって土層を改良する。ここで、除去した塩の問題や二次的塩類化の問題を解決する必要がある。②塩類集積地の上に礫やリサイクル資材などのキャピラリーバリアを一面に敷いて上部に塩を含まない新しい作土層を客土する。ここで、キャピラリーバリア資材や新しい土の入手の問題を解決する必要がある。いずれにしても、塩類化の状況を非破壊センサーでモニターして土を診断すること、塩類化リスク評価法を確立すること、長期間の農地の塩収支を考慮し、それぞれの立地条件に適した除塩技術を採用することが肝要である。

参 考 文 献

- 1) Tanji, K. K. (Editor): Agricultural salinity assessment and management, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, No. 71, pp. 3～4, 1990.
- 2) Qadir, M., Ghafoor, A. and Murtaza, G.: Amelioration strategies for saline soils, *A review, Land Degradation & Development*, No. 11, pp. 501～521, 2000.
- 3) 山本太平編：4 乾燥地の塩類集積とその対策，乾燥地科学シリーズ3，「乾燥地の土地劣化とその対策」，古今書院，pp. 157～256, 2008.
- 4) 日本土壤肥料学会編，「塩集積土壌と農業」，博友社，pp. 16～17, 1991.
- 5) 山本定博：メキシコ・カリフォルニア半島コモンドゥ地域における灌漑農地の土壌塩類化の実態と要因解析，土壌の物理性，No. 115, pp. 31～35, 2010.
- 6) Palamara, D. R., Rodriguez, V. B., Kellett, J. and Macaulay, S.: Salt mapping in the Lower Macquarie, Australia, using airborne electromagnetic data, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 61, No. 3, pp. 613～623, 2009.
- 7) 北村義信・清水克之：カザフスタンにおける灌漑農地の塩類化の現状と対策，土壌の物理性，No. 115, pp. 37～41, 2010.
- 8) 筒井 暉：シリーズ「乾燥地の灌漑農業と水環境」，乾燥地における灌漑農業の進展と環境問題，水文・水資源学会誌，Vol. 11, No. 4, pp. 398～406, 1998.
- 9) 井上光弘：種々のマルチ材による土壌面蒸発抑制と温度環境，農業及び園芸，Vol. 82, No. 6, pp. 683～686, 2007.
- 10) Guo, G., Araya, K., Shibutani, Y., Zhang, H., Ohomiya, K. and Matsuda, J.: Improvement of salt-affected soils, Part 1, Interception of capillarity, *Biosystems Engineering*, Vol. 94, No. 1, pp. 139～150, 2006.
- 11) Hillel, D.: *Fundamentals of soil physics*, Academic Press, pp. 257～258, 1980.
- 12) Irshad, M., Inoue, M., Ashraf, M., Ahmad, Z. and Faridullah: The mitigation challenge of salt affected soils in Pakistan, *JFAE*, Vol. 5, No. 2, pp. 280～283, 2007.
- 13) 後藤有右・安倍征雄・藤巻晴行：Dehydration 法における数値モデルの適用可能性の検討，沙漠研究，15, pp. 125～138, 2005.
- 14) 猪迫耕二：特願2010-159887, 2010.

(原稿受理 2011.10.1)