

# メキシコ・カリフォルニア半島コモンドウ地域における灌漑農地の土壌塩類化の実態と要因解析

山本定博<sup>1</sup>

Influence of soil properties and irrigation water quality on soil salinization status of irrigated land in Comondu district in Baja California Sur, Mexico

Sadahito YAMAMOTO<sup>1</sup>

## 1. はじめに

日射が豊富な乾燥地域では作物生育の制限要因となる水と養分が適量与えられれば、高い乾物生産が期待できる。しかし、乾燥地における灌漑は諸刃の剣であり、その管理が適切でなければ土壌は塩類化を引き起こし、作物生産性が著しく損なわれ、最悪の場合、土地は不毛化してしまう。乾燥地における持続的な灌漑農業は、農地・水資源の適正な利用によって可能になり、そのためには、農地・水資源の現状を正しく評価する必要がある。

灌漑農地での塩類化過程は、自然の土壌塩類化過程と同様に水や塩の動態を規定する土壌の理化学的特性、土壌に作用する水の水質（塩濃度、組成）や量などに影響されるため、土壌に集積する塩の量と組成は一様ではない。いわゆる塩類土壌（salt affected soil）は、集積する塩の量と組成によって、塩性土壌（saline soil）とソーダ質土壌（sodic soil）に大別され、前者は多量の可溶性塩類の集積（飽和抽出溶液の電気伝導率（ $EC_e$ ）4以上）、後者は土壌交換基に吸着されたナトリウムの組成（交換性ナトリウム割合（ESP）15%以上）によって特長付けられる（United States Salinity Laboratory Staff, 1954）。この二つの土壌は、その理化学的特性はもとより、作物に対する影響、その管理・改良方法も大きく異なるため、農地の管理・改良法を確立するためには、まず塩類集積状況を知り、そのような状況を作り出した原因を明らかにする必要がある。すなわち、灌漑農地における土壌の塩類化を人為的な影響下で進行する土壌生成過程と捉えれば、その生成因子を探ることで、結果としての土壌塩類化の状態を説明でき、逆に、生成因子との関わりから、土壌塩類化の危険性を予測できると考える。

そこで、メキシコ合衆国北西部、カリフォルニア半島

南部に位置する灌漑農業地帯において、土壌塩類化の危険性と現状を土壌特性と灌漑管理の関係から説明するための簡易な土壌診断法を開発する研究を現在進めている（山本ら、2007）。当地は、年平均降水量が200 mm未滿の乾燥地であり、作物栽培には灌漑が必須であるが、河川など地表水として常時存在する水資源は無く、常時アクセス可能な水資源は地下水に限られている。過剰な地下水の取水が水質悪化と土壌塩類化の問題を引き起こしているが、湛水害の問題はほとんど無く、灌漑と塩類の集積の関係をシンプルに捉えられるサイトである。本報告では、基礎調査として行った灌漑農地の土壌塩類化の実態と塩類化要因としての土壌理化学性、灌漑水の水質との関連性について紹介する。

## 2. 調査地域の概要

メキシコ合衆国の北西部に位置するカリフォルニア半島は北アメリカ大陸西岸に南北にのびた細長い半島で、総延長は約1,300 kmあるが、幅は最も広い箇所でも200 km、狭いところでは40 kmしかない。カリフォルニア半島はアメリカ合衆国カリフォルニア州と接しており、

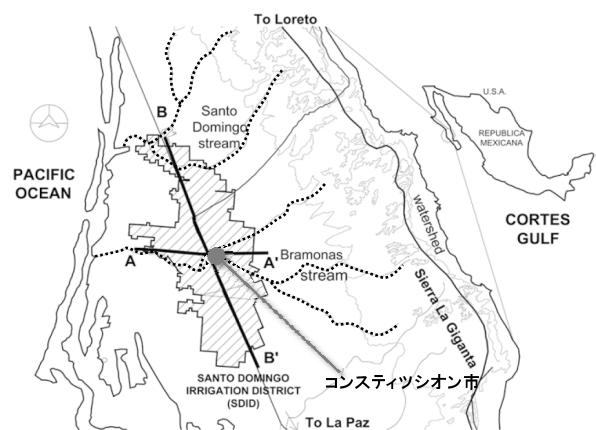


Fig. 1 コモンドウ地域。原図（Cardona et al., 2004）に加筆。点線で示した2本のワジが灌漑農地（斜線部）を横切って流れる。

Location of Comondu District in Baja California Sur, Mexico (Modified from Cardona et al., 2004). Two wadis shown by the dotted line cross and flow through irrigated farmland (slash part).

<sup>1</sup>School of Agricultural, Biological and Environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-minami, Tottori, 680-8553, Japan. Corresponding author: 山本定博, 鳥取大学農学部生物資源環境学科

2010年6月7日受稿 2010年6月25日受理

土壌の物理性 115号, 31-36 (2010)

キーワード: カリフォルニア半島, 灌漑, 地下水, 塩類土壌, 土壌塩性化

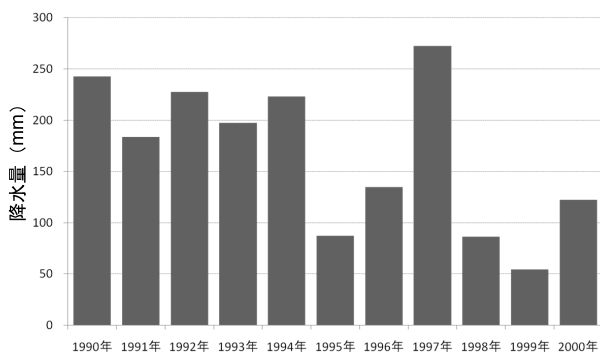


Fig. 2 年降水量 (コンスティツション市).  
Annual precipitation in Constitution city.

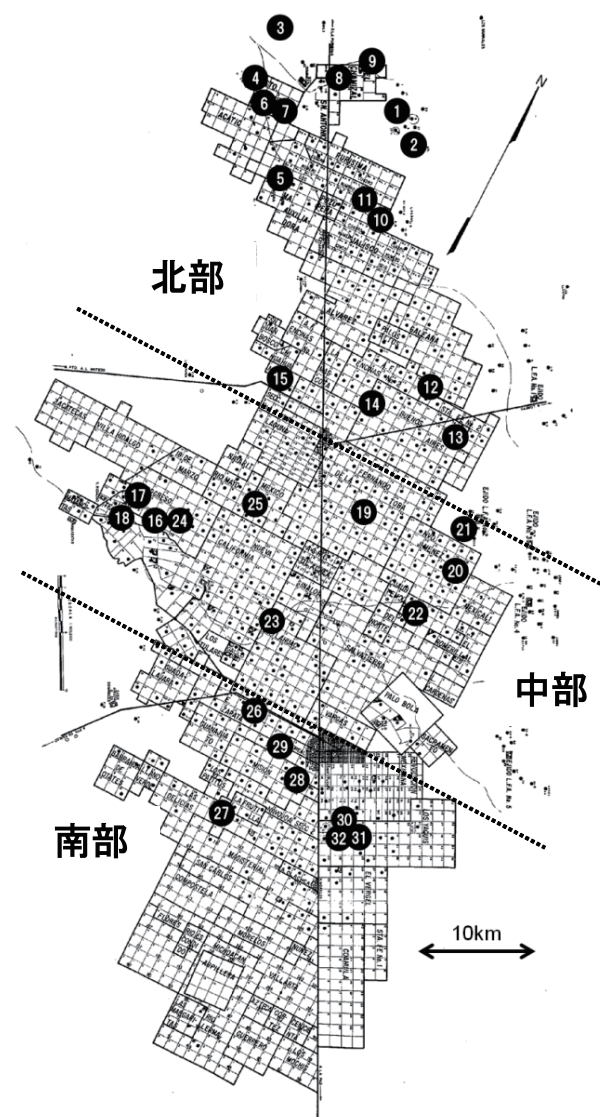


Fig. 3 サントドミンゴ灌漑地区内における調査地点.  
Soil and groundwater investigation points in the Santo Domingo irrigation scheme.

半島を縦断する国道が整備されていることから、農産物の輸出が盛んに行なわれている。調査対象のコモンドゥ地域はカリフォルニア半島南部の南バハカリフォルニア州に位置する半島最大の灌漑農業地帯である (Fig. 1)。栽培面積は約 600 km<sup>2</sup> あり、東側には山岳地帯があり、

そこから西側の太平洋までは緩やかな傾斜と平坦な土地 (扇状地) が広がり、そこに農地が集中している。

本地域の中央に位置するコンスティツション市の 1990 年から 2000 年の気象データによれば、167 mm の年平均降水量に対して蒸発量は約 12 倍 (2082 mm / 年) にも達する。降水は 8 月から 2 月に集中するが、年変動が大きく、年により年降水量には 54 mm ~ 272 mm もの幅があり、1 ~ 3 年に 1 回の頻度で豪雨がある (Fig. 2)。2006 年 10 月 24 日には 1 ~ 2 時間で 54 mm もの降水量があり、この地域の多くの農地が一時的に湛水した。気温は夏季に最高気温が 40 °C にも達し、冬季は最高気温 25 ~ 30 °C、最低気温 10 °C 以下になる。

当地では 1949 年以降、井戸を掘り地下水を水源とする灌漑農業が始まった (Cardona et al., 2004)。主要農作物は、アルファルファ、トウモロコシ、ササゲ、エジプトマメ (ひよこ豆)、小麦、ソルガム、トウガラシ、トマト、ジャガイモ、柑橘類などである。周期的な作物を除き、10 月 ~ 11 月頃に作付けが始まり、夏前に終了し、高温期の夏季が休閑期となる。

1956 年に 260 km<sup>2</sup> あった灌漑農地は 1990 年には 648 km<sup>2</sup> に拡大し、それに伴い多数の井戸が掘られ、膨大な量の水が取水された。1957 年 ~ 1996 年の間、この地域の地下水の年間涵養量 (1.8 億トン) の 2 倍以上の水が取水され、地下水位が 23 m も低下し、1957 年には海面上約 13 m にあった平均地下水面が、1996 年には海水面下 10 m に低下した。その結果、当地域の灌漑水には海水が混入し、水質が著しく悪化した。1992 年以降地下水の取水規制がかかり、取水量が大きく減少し、2004 年以降は自然涵養量以内の取水量となり、いくつかの井戸では地下水位の上昇が確認されている。しかし、平均地下水面は依然海水面以下にあり、現在ある 700 の井戸の内、水質が良好なものは 10 % 未満で、約 25 % は水質が極めて悪いクラスに分類されている。

コモンドゥ地域では、水盤灌漑、畝間灌漑など水利用効率の悪い重力灌漑が全灌漑面積の 60 ~ 70 % を占めている。現在はこれらの灌漑方式は禁止され、効率の良い灌漑方法 (点滴灌漑、マイクロスプリンクラー、センターピボット方式) に移行しつつあるが、コストの問題もあり急速な普及はしておらず、また灌漑方式を刷新しても、その機能を熟知せず、結果的に多量の水を灌漑している圃場が多く、節水意識はまだ低いのが現状である。合理的な水の利用は、地下水の量的・質的な回復を促すとともに、土壌塩類化の防止にもつながり、ひいては当地における持続的な農業生産を可能にする。地下水の状況に対しては、現地水利局の徹底した調査と管理が推進されている。しかし、灌漑農地の土壌状態の現状把握は十分とは言えず、農地の塩類化の現状を正確に捉え、その現状がもたらされている原因を明らかにする必要がある。そこで、塩類化のプロセスと灌漑との関係を明確にできれば、当地の農業生産の持続性向上に大きく貢献できると考える。

### 3. 現地調査と分析項目

調査したサントドミンゴ灌漑地区を Fig. 3 に示した。当地の圃場は 1 km × 1 km に区画されており、一区画が一農家に充てられ、1 区画におおよそ 1 つの割合で井戸（図中の黒い点）が存在する。2004 年、2005 年 11 月に灌漑地域全域を対象に、土壌と灌漑水（地下水）の調査と採取を行った。調査圃場の耕作歴は 40 年以上に及ぶ。灌漑地域を便宜的に北部、中部、南部の 3 つのエリアに区分し、土壌は 32 地点、地下水は 42 地点（土壌調査の 32 地点含む）から採取した。土壌試料はソールオーガを用いて深さ 1 m までの土壌を 20 cm 毎に採取した。また、塩類化において特徴的な 4 地点の土壌断面を 2006 年に詳細に調査した。土壌試料は、含水比、粒径組成、飽和抽出溶液の pH、EC（それぞれ  $pH_e$ 、 $EC_e$  とする）、可溶性塩類濃度を測定し、灌漑水は pH、EC（それぞれ  $pH_w$ 、 $EC_w$  とする）、溶存塩類濃度を測定した。

### 4. 灌漑水の水質

灌漑水の水質を USSL (1954) の基準に基づき評価した (Fig. 4)。当地の灌漑水はほとんどが  $EC > 0.75 \text{ dSm}^{-1}$  で、塩性害の危険性が強～極強に診断され、その水質は極めて不良であった。とくに北部地域の水質は極めて悪かった。灌漑水の EC の上昇に伴う SAR (ナトリウム吸着比) の上昇、ナトリウムイオン割合の上昇は、塩分濃度の上昇がナトリウム塩の付加によることを示しており、地形との関連も考慮すると海水の地下水脈への混入が水質に大きく影響していると考えられる。当地の灌漑水の塩分濃度は地形的要因の影響が大きく、当地域は東に位置する山脈から西側の太平洋に向かう緩斜面に位置し、また、北側に向かってもわずかに傾斜しており、標高が低く、海に近い北西部で高い塩分濃度が認められた。北部でも、東側の標高の高い地点の水質は良好であった。トリリニアダイアグラムによる解析の結果からも、北西部の低地をはじめ、標高の低い地点の地下水は海水が混入した地下水の領域に位置し、他の地下水は、河川水・伏流水および循環性地下水の多くが属する領域にあった。

### 5. 土壌の特徴

当地の土壌は、乾燥地を代表する土壌ともいえるカルシソル (IUSS Working Group WRB, 2006) であり、深さ 1 m までに固結した白色の炭酸カルシウム集積層 (ペトロカルシク層) が存在する。北西部ではこの集積層は明瞭ではなく、土壌孔隙内に局所的な炭酸カルシウムの濃縮箇所が認められ、炭酸カルシウムが溶脱されずに土層の浅い部位に残存、集積している乾燥地に特有の土壌断面形態を有している。土壌の土性は多様であり、砂壤土～砂質壤土～砂質土～軽塩土の範囲に分布した。すなわち、細砂 (0.02～0.2 mm) に富み、シルト (0.002～0.02 mm) が少なく、粘土 (0.002 mm 未満) 含量には 10%～60% もの幅があった (Fig. 5)。土壌の粒径組成は、東側の山麓近くほど粗粒になる傾向が認めら

れた。粘土画分の多少は、水などの影響を受けた母材の堆積様式の違いが反映されていると考えられるが、ワジとの距離等との明瞭な関係は認められなかった。未風乾土の含水比は 5～25% 程度で、粘土含量と比例関係にあった。最も塩類集積が激しい箇所を含むすべての調査地点で、深さ 1 m までに停滞水は確認されなかった。塩類集積の問題に直面にしている地域は、過剰な水を乾燥した大地に導入した結果、地域全体の地下水位を上昇させ、それが表層への塩類集積を引き起こしているが、カリフォルニア半島では灌漑に使える水量が大きく制限されているため、土壌下層に停滞水層ができるほど灌漑できないことが幸いしている。つまり、当地では、灌漑水からの塩の付加とその洗脱の過程が、土壌塩類化の進行と深く関わっており、塩類化過程を理解するポイントとなる。

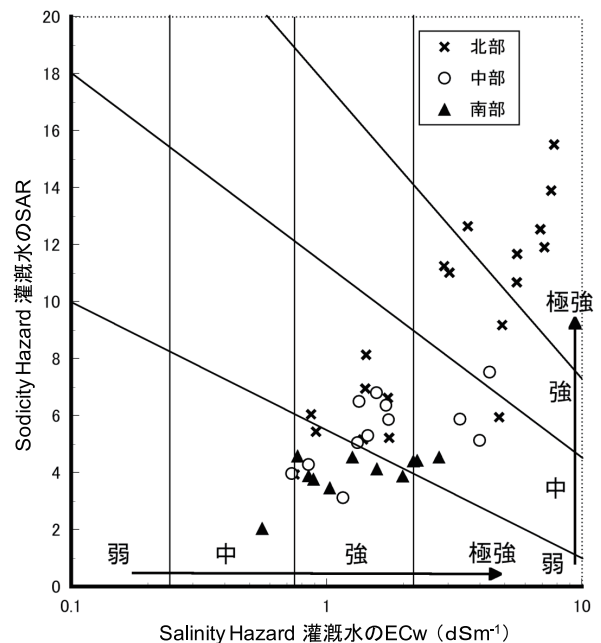


Fig. 4 灌漑水の水質。  
Groundwater quality.

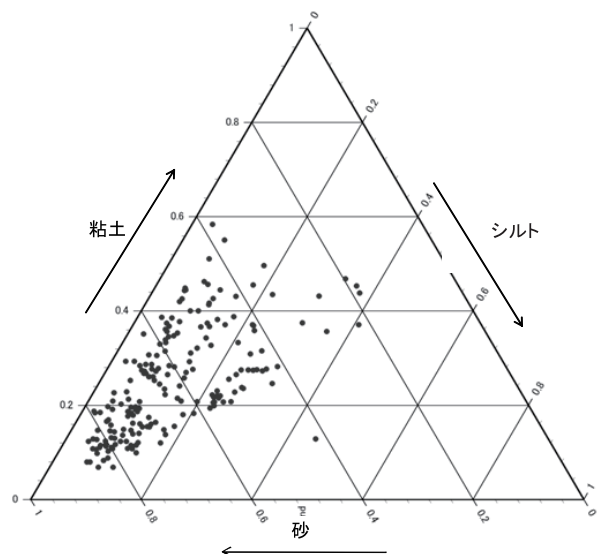


Fig. 5 灌漑農地の粒径組成。  
Composition of soil particles of irrigated farmland.

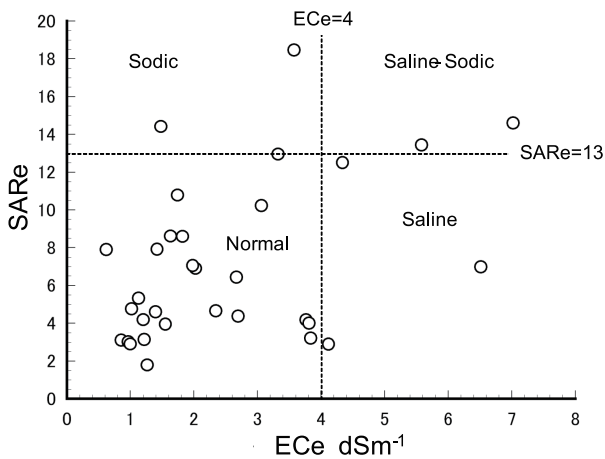


Fig. 6 表層土 (0 ~ 20 cm) の  $EC_e$  と  $SAR_e$  .  
Salinity and sodicity status of surface soils (0 ~ 20 cm) of irrigated farmland.

### 6. 土壌塩類化の現状

表層に塩クラストが形成されている圃場は認められなかったが、塩類集積によって作物の生育不良、収量減少が顕在化しており、とくに北部地域で顕著であった。休閒圃場が散見されたが灌漑水の不足が理由であった。表層 0 ~ 20cm の土壌塩類化の状況を飽和抽出溶液の  $EC_e$  と  $SAR_e$  (ナトリウム吸着比) によって評価すると、Fig. 6 のとおり、 $EC_e$  は  $0.62 \sim 7.02 \text{ dSm}^{-1}$  の範囲にあり、32 地点のうち 5 地点 (内北部 4 地点) が  $4 \text{ dSm}^{-1}$  を超え塩性土壌に判定され、 $SAR_e$  は  $1.8 \sim 18.5$  の範囲にあり、5 地点 (全て北部) が 13 以上となりソーダ質土壌に判定された。北部の 2 地点は塩性土壌、ソーダ質土壌の両者の基準を満たし、塩性ソーダ質土壌に判定された。塩性化、あるいはソーダ質化した圃場は、塩分濃度が高く、 $SAR$  の高い水を灌漑している北部地域に集中しており、塩性化圃場は深さ 1 m まで強度に塩性化していた。調査地点の半数以上は表層土の  $EC_e$  が  $2 \text{ dSm}^{-1}$  以下であり、当地の大半の灌漑農地の塩類化の現状は軽度なレ

ベルにあると診断できる。なお、表層土の  $pH_e$  は  $7.92 \sim 8.84$  の範囲にあり、ソーダ質化の指標となる 8.5 を超えたのは 4 地点であり東部の山側に位置する粗粒な土壌であった。

表層の塩類集積量が少なくても下層に多量の塩類が集積している地点、逆に下層の塩類集積量は少ないが、重碳酸ナトリウム主体の塩組成に変化し、強アルカリ性を呈する地点など、深さ 1 m までの断面内における塩類の分布は多様であった。深根性作物である果樹、アルファルファ等では、下層の塩類集積状態も重要であり、微量元素欠乏症が果樹に多発していることは、下層土でのソーダ質化の進行の影響も考えられる。当地域での塩類集積パターンは 3 つに類別できる (Fig. 7)。塩類が洗脱しやすく塩性化の程度が軽微なもの ( $pH$  は高くアルカリ性化が進行)、全層にわたり強度に塩性化しているもの、そして、塩類の洗脱が進みにくく下層に塩類の集積層を持つもの (下層の塩集積層の上部がソーダ質化していることが多い) である。最初のタイプは粗粒で透水性のよい土壌である。後者の 2 タイプは粘質な土壌で、灌漑水の塩濃度が高い場合に強度に塩性化する。すなわち、ウォーターロギングが生じていないため、灌漑水の水質 (すなわち付加される塩の量) とその洗脱特性が土壌中の塩類集積パターンに大きく影響する。

### 7. 土壌への塩類集積を促す要因としての灌漑水の水質と土壌特性

当地の土壌塩類化過程は、灌漑水の水質と扇状地上に位置する農地の土壌母材の堆積様式の影響を受けていると考えられる。Fig. 8 に示すように、灌漑水の塩分濃度 ( $EC_w$ ) が高いほど、表層の集積塩量が増える傾向 ( $r = 0.646$ ) があり、土壌への塩付加する要因として、灌漑水質の関与は大きい。灌漑水の  $EC_w$  が低くても、下層が粘質な場合、表層土に多量の塩類が集積する傾向が認められた。

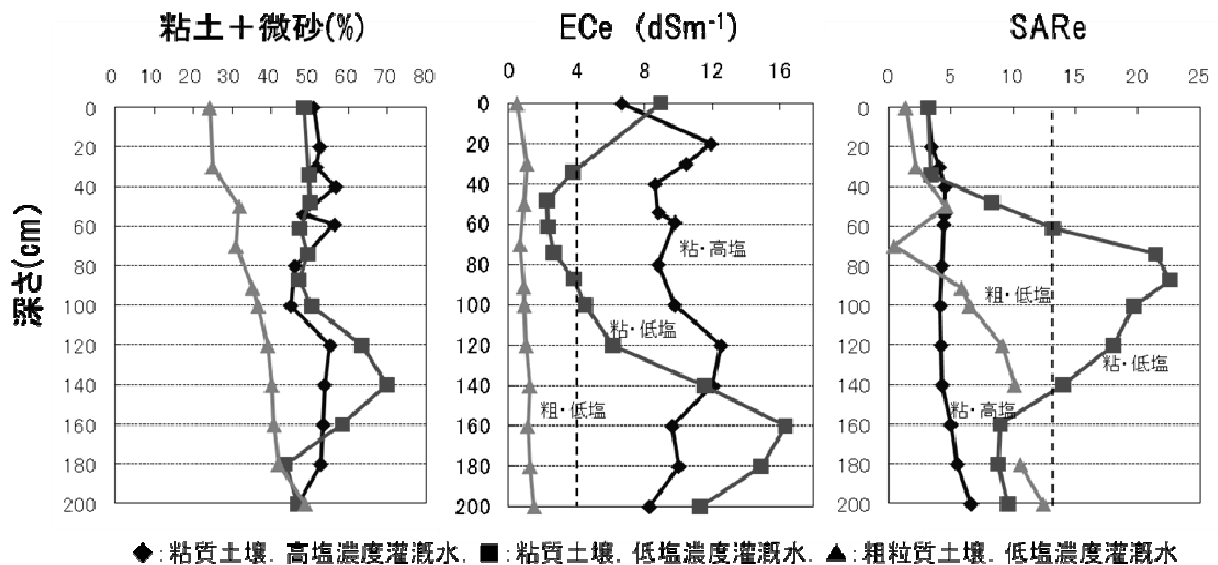


Fig. 7 調査地域における 3 つの特徴的な塩類集積パターン .  
Three characteristic profiles of salts accumulation to soil of irrigated farmland.

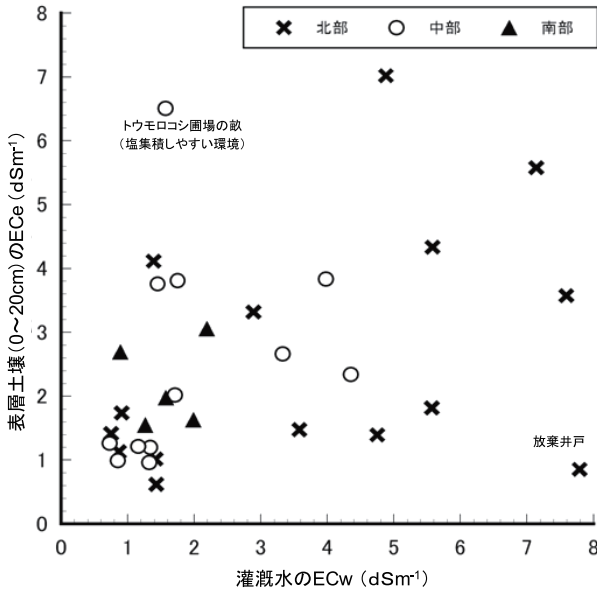


Fig. 8 表層土 (0 ~ 20 cm) の  $EC_e$  と灌漑水の  $EC_w$  .  
Relation between irrigation water salinity and topsoil salinity.

表層 20 cm に集積する可溶性塩類量 (表層 20 cm の  $EC_e$ ) を目的変数として、灌漑水の塩分濃度と土壌特性 (1 m までの 20 cm ごとの土性) を説明変数に重回帰分析を行った結果、土壌に付加される塩の給源としての灌漑水の塩分濃度の寄与が大きく、灌漑された水や塩類の土壌中における動きに影響する要因、すなわち、表層直下の土壌である次表層 (20 ~ 40 cm の部位) の特性も少なからず関与していることが示された。

$$EC_e(0-20(\text{cm})) = 0.140 \times \text{粘土}(20-40(\text{cm})) - 0.0922 \times \text{粗砂}(20-40(\text{cm})) + 0.611 \times EC_w \quad (1)$$

$$R = 0.677^{**}$$

$$= -0.185 \times \text{粗砂}(20-40(\text{cm})) + 0.569 \times EC_w \quad (2)$$

$$R = 0.668^{**}$$

$$= 0.190 \times \text{粘土}(20-40(\text{cm})) + 0.651 \times EC_w \quad (3)$$

$$R = 0.674^*$$

次表層の土壌特性との関連性が明確で無いのは、土性と透水性の関係が不明確だからである。粘質土壌には垂直方向に無数の亀裂が発達しており、透水性が比較的良好である可能性が高い。逆に、砂質土壌でも粒子間が細粒な粒子 (ナトリウムで分散性を高めた粘土など) で充填されれば、透水性は低下する。現地の土壌透水性を的確に評価することが今後の課題であるが、表層土の  $EC_e$  が高い断面は、次表層の粘土含量が相対的に高くなっており (Fig. 9)、(1) ~ (3) 式のように、灌漑水の塩分濃度が高く、次表層の透水性が悪いほど表層に塩類が集積しやすいことがわかる。次表層以下の透水性が良好な場合には塩類集積が抑制されるが、このような土壌では、塩類の洗脱が進行し、ソーダ質化の危険性が高くなる。

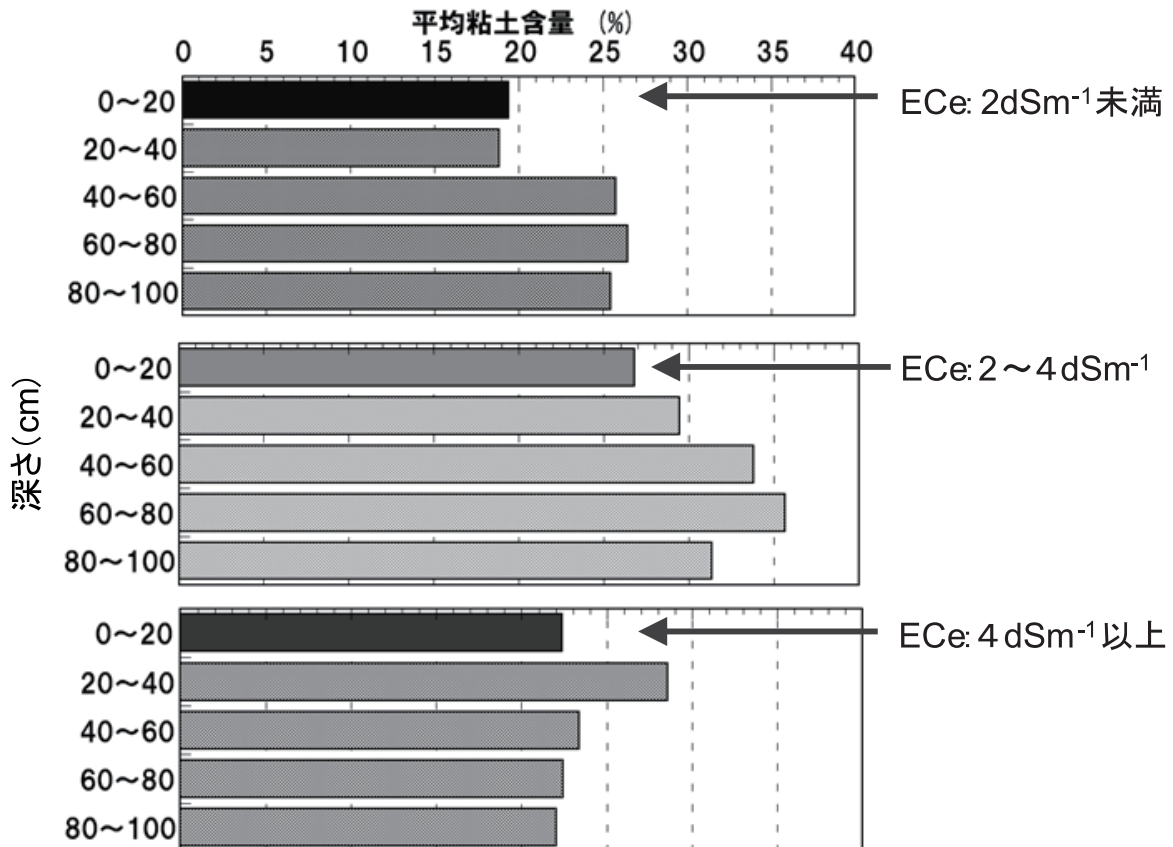


Fig. 9 表層土の塩類集積量別に見た土壌断面内の粘土含量の分布 .  
Average clay content distribution in soil profile of three groups characterized by status of topsoil salinity.

上記の重回帰式に従えば、当地では地下水からの塩供給がほぼ無視できるので、表層への塩類集積量は(4)式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{表層への塩類集積} \\ & = \text{灌漑水からの塩類の付加量} - \text{塩類の洗脱量} \quad (4) \end{aligned}$$

(4) 式の右辺の二つの項を分解すると以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{表層への塩類集積} \\ & = \text{灌漑水の塩類濃度} \times \text{灌漑水量} \\ & \quad - \text{排水の塩類濃度} \times \text{排水量} \quad (5) \\ & = \text{灌漑水の塩類濃度} \times \text{灌漑水量} \\ & \quad - \text{土壌の塩類洗脱特性} \end{aligned}$$

(5) 式に従えば、表層土の塩類集積抑制のためには、塩類の付加量を減らし、塩類の洗脱量を増やせばよく、最も効果的なのは、塩類付加量を減らすこと、すなわち、灌漑水量を減らすことである。灌漑水量の適正化によって、過剰な地下水の取水が是正され、地下水の水位と水質の回復も期待できる。なにより、圃場に付加される塩の量が相乗的に減少し、土壌塩性化のリスクを大きく軽減させることができる。節水が土壌、水資源の保全にもたらす効果は極めて大きい、農民の節水の意識は薄い。当地では、灌漑農地が湛水するほどの豪雨による除塩が定期的に生じており、適切な水管理が行われれば、持続性の高い灌漑農業が可能になると思われる。なお、ここでは塩類集積について言及したが、除塩過程ではソーダ質化が進行するため、ソーダ質化の抑制も考慮に入れた管理が必要である。なにより、貴重な水資源を持続的に利用し、農地の生産性を維持するためには生産者に節水の意義を伝え、実践に結びつけなければならない。当地の農民にとって塩害は最大関心事である。この点に着目

し、節水による塩類化の危険性の改善程度を定量的に示し、農民の水利用意識を改善する啓蒙ツールとして、簡便な土壌塩類化リスク評価法を開発中である。

## 8. まとめ

地下水に依存するコモンドゥ地域の灌漑農地の塩類集積は、灌漑水から付加される塩類の量と土壌中での動態に大きく影響されており、灌漑水の塩類濃度と土壌の透水性に関わる特性がその要因としてあげられた。これらの関係から、土壌への塩類集積量を減らすためには節水が最も効果的であることが示され、灌漑水量の適正化により過剰な地下水の取水が是正され、当地の水資源の量的、質的な改善が期待できる。

## 引用文献

- Cardona, A., Carrillo-Rivera, J.J., Huizar-Alvarez, R. and Graniel-Castro, E. (2004): Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology* 45: 350–366
- IUSS Working Group WRB (2006): World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports No. 103*. pp. 74–75, FAO, Rome.
- United States Salinity Laboratory Staff (1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, L.A. Richards, ed., USDA Agriculture Handbook, No. 60. pp. 7–33, Washington, D.C.
- 山本定博, 遠藤常嘉, 本名俊正, 鎌田妙子, 須江敏光, Ernest Diaz Libera and Martin Aguilar Garcia: スコア化による灌漑農地の土壌塩類化危険性評価方法の開発～メキシコ・カリフォルニア半島・カリサル村周辺灌漑農地の実態を踏まえて～, 乾燥地における土壌劣化機構の解明と持続的農業発展のための環境修復, 平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究 B) 研究成果報告書: 1–34, 2007.