

中央アジア大規模灌漑農地における土壤塩性化の実態

舟川晋也、小崎隆 (京都大学農学研究科)

はじめに

アラル海流域における灌漑農業は、そのピーク時には灌漑面積が740万ha(1990年)に達し、当該地域の第一次産業の主力を担っていた。これらは、水稻を主作とするものと、綿花耕作を中心とするものに大別されるが、前者が主としてデルタ周辺などの比較低地に展開されてきたのに対し、後者は河川上流域から下流域まで広く分布している。

他の多くの灌漑農業と同様に、本地域においても土壤塩性化の進行は度々警告されてきたが(Khakimov 1981、Razanov 1984など)、その実態についてはいまだ明らかにされているとは言い難い。今日では、旧ソ連邦解体後の経済情勢の悪化もあって、灌漑水の不足や排水不良による土壤塩性化は加速されているものと見られる。土壤塩性化によるさらなる荒廃地の拡大を防ぐためには、大規模灌漑農業下における水や塩類の動態を理解し、これを適切に制御することが必要である。本稿では、これらカザフスタン・ウズベキスタン両国の綿花圃場における土壤塩性化の実態について、範囲の限られたケーススタディではあるが概観したうえで、その対策について論じる。

塩類土壌とは

可能蒸発散量が降水量を上回る乾燥地・半乾燥地では、土壌あるいは土壌母材中の可溶性塩類が洗脱されがたく、土壌表層近くに残存するケースが多い。このような気候条件下で農業生産を行う場合、作物生育に必要な水分を確保するために、地下水あるいは河川水などを用いて灌漑を行うのが通例である。しかしながら乾燥地における灌漑農業においては、溶存塩濃度が高い灌漑水からの耕地への直接的な塩の添加、あるいは灌漑による地下水位の上昇に伴う土壌下層からの塩類の供給によって、表層土壌に塩類が集積し、農業生産の継続が困難となる場合がしばしばある。

灌漑を行いつつ耕地への塩類集積を避けることは、持続的な乾燥地農業の展開に必須な条件であるが、長期的に見てこれを可能とするような灌漑

あるいは耕作における技術的対応は、地域毎の地質や耕地の立地条件、作付け作物種、経済的条件などの違いを反映して多様である。一般的には灌漑/排水量のバランスの適切な設定(多量灌水・塩の洗浄・多量排水を伴う除塩型の灌漑技術、あるいはドリップ灌漑など灌水・塩添加を最小とするような技術など)、土壌中の塩組成の改善(Na塩集積土壌に対する石膏の施用)、灌漑水質の改善などを通して、塩害発生の回避が図られることが多い。世界の塩類土壌の分布、その農業利用の実態、あるいは塩害回避のための対策の詳細については、成書を参照されたい(Szabolcs 1986; Abrol et al. 1988; 日本土壌肥料学会 1991)。

塩類土壌は、作物の生育に悪影響を及ぼすほどの可溶性塩類(特にNa塩)を含んだ土壌である。例えば米国農務省では、土壌の飽和抽出液の電気伝導度(EC)および土壌の交換性ナトリウム率(exchangeable sodium percentage (ESP) = 交換性Na / CEC × 100)に基づいて、これを以下のように分類している。

塩性土壌(saline soil): EC > 4 mS/cm、ESP < 15%、pH < 8.5。

アルカリ土壌(alkali soil): EC < 4 mS/cm、ESP > 15%、pH > 8.5。

塩性・アルカリ土壌(saline-alkali soil): EC > 4 mS/cm、ESP > 15%、pH > 8.5。

筆者らのこれまでの調査によれば、中央アジア南部の灌漑農業地帯に分布するのは、主として上記の塩性土壌であり、アルカリ土壌の分布する面積はごく限られているようである。

中央アジア大規模灌漑農地における土壤塩性化の実態

1. 調査農場の概要

カザフスタン共和国南部とウズベキスタン共和国全域、それに未調査ではあるがトルクメニスタン共和国では、現在大規模灌漑による綿花および穀類の生産が広く行われている。これら大規模灌漑農業は、その灌漑様式・輪作体系の違いから、水稻作を含む灌漑農業と綿花作中心の灌漑農業

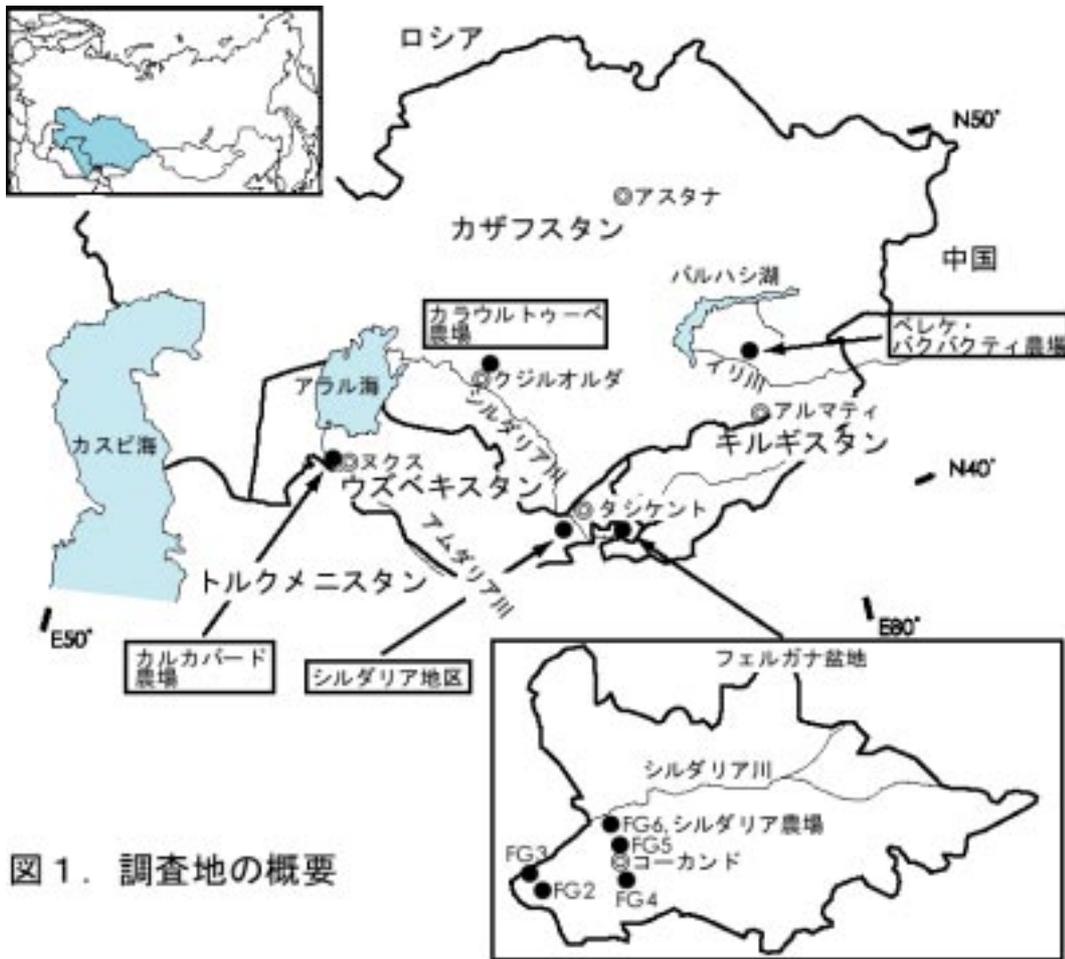


図 1. 調査地の概要

に、大きくは二分される。

本稿では、1992年以降筆者らが行ってきた一連の現地調査の代表例として、イリ川下流域バカナス地方のベレケ農場、シル・ダリア下流域クジルオルダ地区のカラウルトゥーベ農場、シル・ダリア上流部のフェルガナ盆地、同じく中流域左岸のシル・ダリア地区、アム・ダリア最下流域のヌクス地区のカルカバード農場の5地域における土壌塩性化の実態について論じる(図1)。前2者では水稲を含む作付けが、また後3者では綿花中心の作付けが行われている。

ベレケ農場: アルマティの北方250 kmのイリ川扇状地の中に位置している。年平均降水量は150 mm、年平均気温は9℃である。農場は1979年に開かれ、水稲作2年を含む4年輪作体系をとっている。すなわち1・2年目には圃場を湛水して水稲を、3年目に大麦を、3年目から4年目にかけてアルファルファを栽培する。水稲耕作期間の灌漑水量は3,000-4,000 mmである。畑作圃場では直接灌水されることはないが、常時高いレベルにある地下水によって水分補給がなされている。

またこの農場からの排水は一本の水路に集められ、イリ川へと戻されている。なお本文中で紹介するバクバクティ農場における耕作状況は、一輪作周期が6年(水稲3年・畑作3年)であることを除けば、ベレケ農場とほぼ同様である。

カラウルトゥーベ農場: シル・ダリア下流域右岸の都市クジルオルダ近郊に位置している。ここでも水稲作中心の輪作体系をとっており、7年1サイクルの輪作のうち3年は水稲作である。農場からの排水は、農場はずれの低地に池として集められ、後は自然の蒸発に任されている。現地での観察によれば、農場自体が周囲よりも若干低いところに位置しているためか、排水路の水に流れがなく溜まっている状態であり、排水網がほとんど機能していないように見受けられた。

フェルガナ地区: 古くから灌漑による綿花栽培が行われている地域である。盆地の北側をシル・ダリアが東から西へ向かって流れ、シル・ダリア南側が広い沖積地になっている。盆地全体は、南から北へ、また東から西へごく緩い傾斜をもって下がっている。降水量は100-200 mm程度である。

表1. 灌漑水および灌漑排水の化学組成

	電気伝導度 (EC) (dS m ⁻¹)	Na	Mg	Ca	Cl	SO ₄	陽イオン 含量	陰イオン 含量	Na吸着比 (SAR) (mmol L ⁻¹) ^{1/2}
		----- (mmolc L ⁻¹) -----							
ベレケ農場									
イリ川からの灌漑水	0.60	1.6	1.6	2.5	1.0	2.2	5.8	5.9	1.1
農場からの灌漑排水	0.85	3.2	2.4	3.4	1.4	3.5	9.1	9.2	1.9
カラウルトゥーベ農場									
シルダリア川からの灌漑水	1.64	5.9	5.2	4.5	2.5	11.5	15.8	16.3	2.7
農場からの灌漑排水	4.44	24.3	19.2	14.0	10.9	37.8	57.6	53.3	6.0
フェルガナ地区									
ソー川(シルダリアの支流)からの灌漑水 (FG2とFG4)	0.32	0.3	0.8	2.2	0.1	1.4	3.4	3.4	0.3
シルダリア川からの灌漑水 (FG3、FG6とシルダリア農場)	1.34	4.3	4.5	5.9	2.2	9.5	14.8	14.6	1.9
盆地全域からのシルダリア川への主灌漑排水	2.89	9.4	11.3	13.2	4.6	27.3	34.4	34.5	2.7
シルダリア地区									
シルダリア川からの灌漑水	1.34	3.7	4.5	5.4	1.9	8.7	13.7	13.0	1.7
地域からの主灌漑排水	2.38	8.9	8.4	9.6	3.9	20.2	27.1	27.1	3.0
カルカバード農場									
アムダリア川からの灌漑水	1.35	6.7	3.8	4.8	7.5	9.5	15.5	17.1	3.2

綿花農場では水稲耕作地のように湛水されることはなく、年間およそ 800 mm の灌漑水で畝間灌漑が行われる。ただしこれ以外に、除塩のため、耕作前に水のかけ流しが行われることがある。この地域の地下水位は 1.5 m 程度と概して高く、水稲耕作農場と同様に、排水はやや深く掘られた排水路へ直接なされており、原則としてシル・ダリアへ流されている。

シル・ダリア地区：シル・ダリア中流左岸域のカザフスタン・ウズベキスタン両国にまたがる、綿花作中心の地域である。年平均降水量および年平均気温は、もっとも近い都市であるタシケントでのデータによれば、それぞれ約 430 mm、14 °C である。ただし農場での降水量は、この値よりはるかに大分小さくなるであろう。この地域の灌漑水路は互いにかなり離れており(一筆の圃場が広い)、また排水は、地下水を井戸からポンプで汲み上げる垂直式排水であった。ただ近年の経済的困難のため、排水設備の修理がなされず、また燃料(電力)が調達できないため排水ポンプを満足に稼働させられない結果、不十分な排水に起因する地下水位の上昇および土壌塩性化の進行が広く見られるという。

ヌクス地区：アム・ダリア最下流域に位置し、水稲耕作区と綿花耕作区が混在する地域である。年平均降水量は 100 mm 程度である。最下流にあるためか、本地域の圃場には灌漑水が十分に供給されない、という声がよく聞かれた。本稿で取り扱うカルカバード農場は、ヌクスの町よりアム・

ダリア本流を超えて数 km 進んだところの、アム・ダリア左岸の比較的低位に位置している。

これらの農場において採取した土壌試料および灌漑水・灌漑排水の化学組成を中心に以下論じてゆく。

2. 灌漑水および灌漑排水の水質

灌漑水の水質については、イリ川水系の方がシル・ダリア水系およびアム・ダリア水系よりも良好である(表 1)。EC とナトリウム吸着比(SAR)を用いた米国農務省の灌漑水の水質評価基準によれば(U.S. Salinity Laboratory Staff 1954)、イリ川(ベレケ農場)やシル・ダリア支流(フェルガナ地区の一部)より導入された灌漑水が C2-S1 (塩性害中・アルカリ害弱)であるのに対して、シル・ダリア本流(フェルガナ地区、シル・ダリア地区)、アム・ダリア本流(ヌクス地区)からの灌漑水では C3-S1 (塩性害強・アルカリ害弱)である。

調査を行ったいずれの地域においても、灌漑水に対して排水で EC、SAR の増加が顕著であり、灌漑水 圃場 排水の水の流れの中で、蒸発散に伴う濃縮あるいは地下水・土壌深層からの Na の移動が起こっていることが考えられる。また水稲耕作農場であるカラウルトゥーベ農場の排水の EC、SAR はベレケ農場に比べてはるかに高く、土壌中に多量の Na 塩が蓄積されていることを示している。ここからシル・ダリア下流域のカラウルトゥーベ農場の農業生産基盤が危険な状況にあることがうかがわれる。

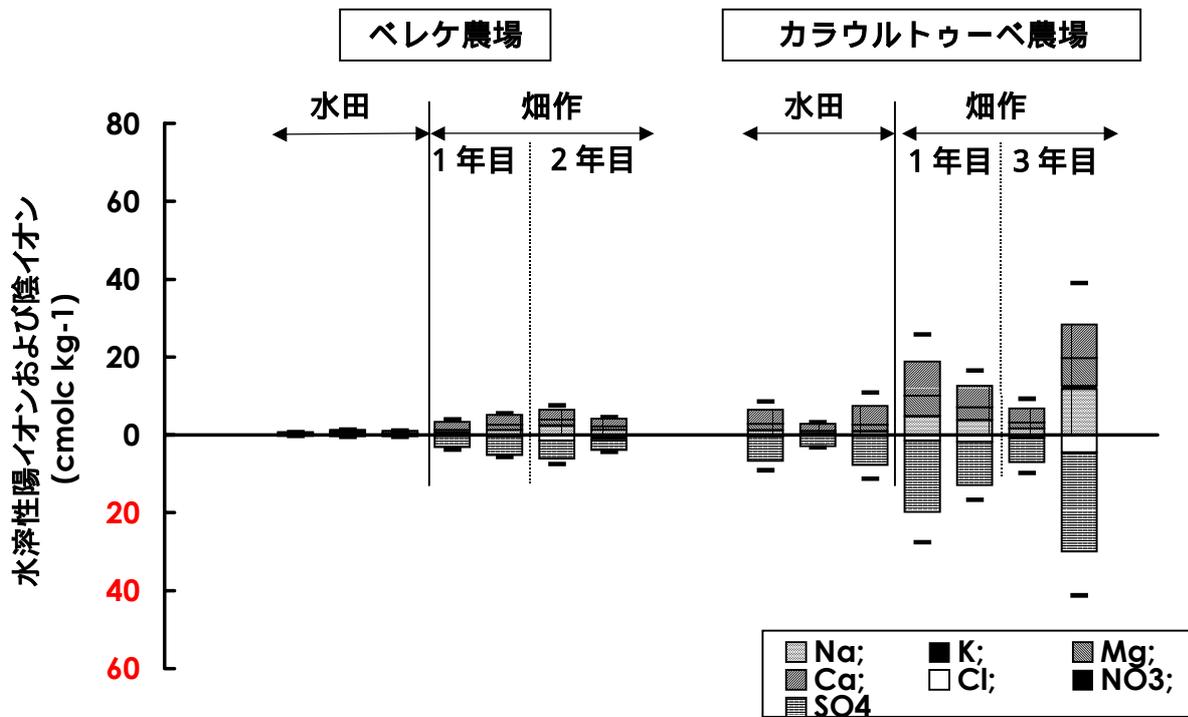


図2. 水稲を含む輪作体系各ステージの表層土壌における水溶性塩類含量

3 水稲耕作を含む輪作体系における塩類の動態

1) 水稲耕作期

ベレケ農場およびカラウルトゥーベ農場の輪作中各ステージにおける表層土壌中の水溶性塩類含量を図2に示す。ベレケ農場では、水稲耕作期間

中の集積塩量の減少が明らかであり、湛水による土壌からの塩の洗脱が有効に機能していることがわかる。これは、除塩のために水稲耕作を行うような輪作体系において一般的に観察される事実と一致する(Gardner and Brooks 1957; Oster 1984)。

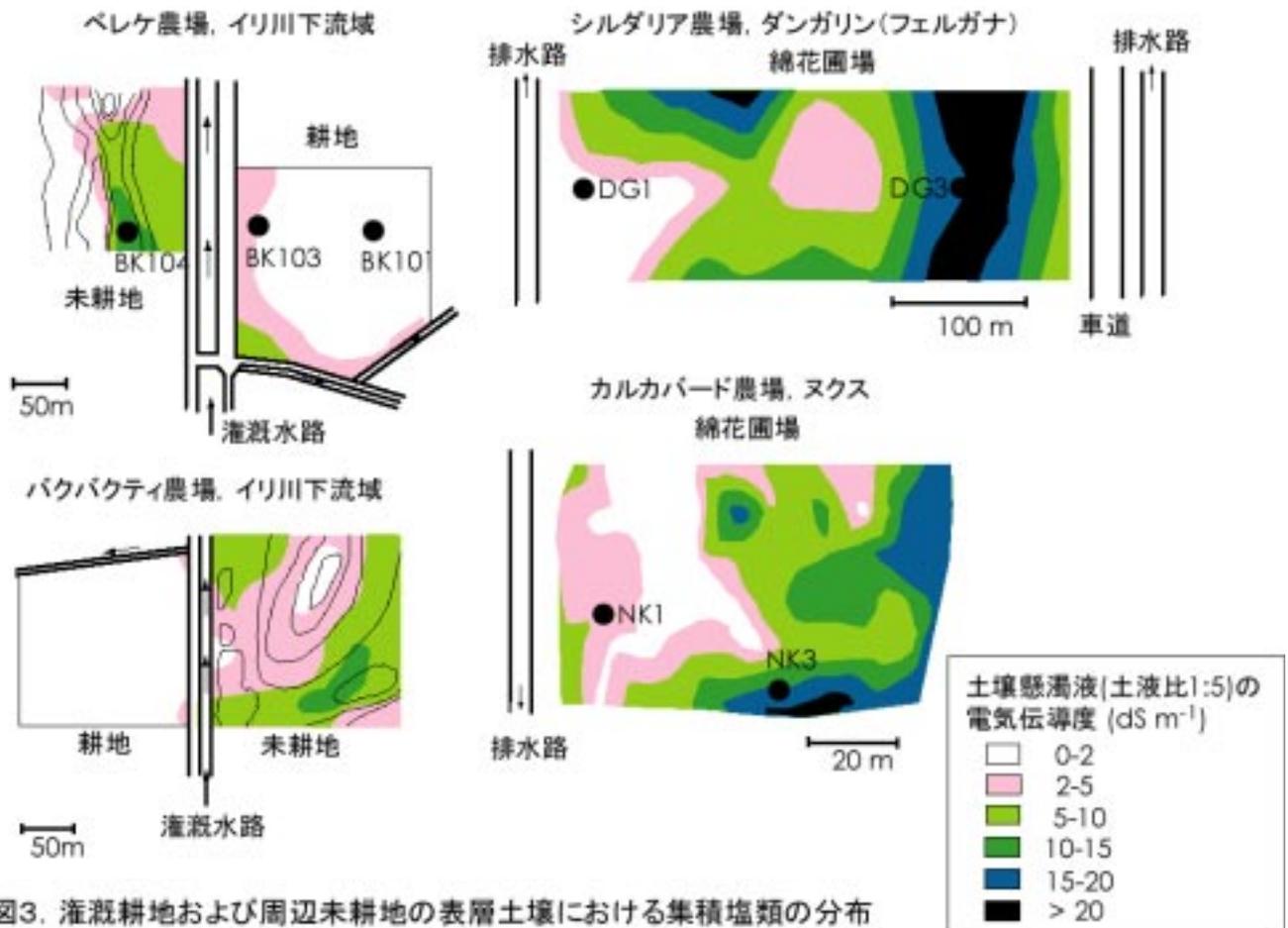


図3. 灌漑耕地および周辺未耕地の表層土壌における集積塩類の分布

一方カラウルトゥーベ農場の水田においては、ベレケ水田と比べて多量の塩が土壌中に残存していることから、おそらく地形的要因による排水不良および水質の悪いシル・ダリアからの灌漑水という条件により、湛水期の除塩が満足に行われていないものと見られる。

2) 畑作期

一方畑作期における土壌断面への塩集積程度も、ベレケ農場と比べてカラウルトゥーベ農場では大きい。ベレケ農場の輪作各ステージ圃場における土壌中の平均塩蓄積量に基づいて、畑作期における表層土壌への塩集積速度を試算してみれば、畑地転換後一年目にCa塩を中心として約 $45 \text{ kmol ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、地下水位の下がる二年目にはより可動性に富むNa塩を中心として約 $15 \text{ kmol ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と急速に進むようである。しかしながらカラウルトゥーベ農場では、土壌中における塩含量と輪作システムとの関係があまりはっきりせず、むしろ地形条件による排水の良否など他の要因の影響が大きいのではないかとと思われる。

3) 耕地および周辺未耕地土壌表層における集積塩の分布

図3左側にイリ川下流域に位置するベレケ農場およびバクバクティ農場耕地(ただし畑作期間中)・隣接未耕地表層土壌における集積塩含量の平面分布について、土壌懸濁液(土液比1:5)のEC

を指標として示した。耕地においては、灌漑水路沿いに若干の塩集積が見られるものの、一定期間毎に行われる水田耕作による除塩を反映して、塩集積はそれほど深刻ではない。むしろそのような除塩が行われない、隣接未耕地の低地部(高地下水水位部)における塩集積が顕著である。

4) 土壌断面内の塩類の分布

図4に、ベレケおよびカラウルトゥーベ農場耕地・未耕地土壌中の水溶性塩類と石膏含量の断面内分布を、土壌の粒度組成とあわせて示した。耕地(BK101, BK103, KR11)および周辺未耕地(BK104, KR01)ではいずれの地点でも、下層から表層に向かって水溶性塩類および石膏含量の増加傾向が見られるが、その程度は未耕地で特に大きい。これは、畑作期間における深層から表層への土壌水・溶存成分の動きを反映しているが、特に中溶解性の石膏(CaSO_4 ; $K_{sp} = 2.3 \times 10^{-5}$)は、いったん集積されれば水稲耕作に伴う除塩後も残存すると期待され、中～長期的な水の動態を知るのにより手がかりを与えてくれるものと思われる。このような、水稲耕作圃場周辺に見られる土壌断面内の石膏の分布様式を、地下水による表層集積型と見ることができよう。一方灌漑水の影響のないBK105では、下層の比較的粘質な層位に石膏および水溶性塩類の集積が見られるが、これは後述するような綿花栽培圃場における石膏洗脱型断面内分布と類似する。

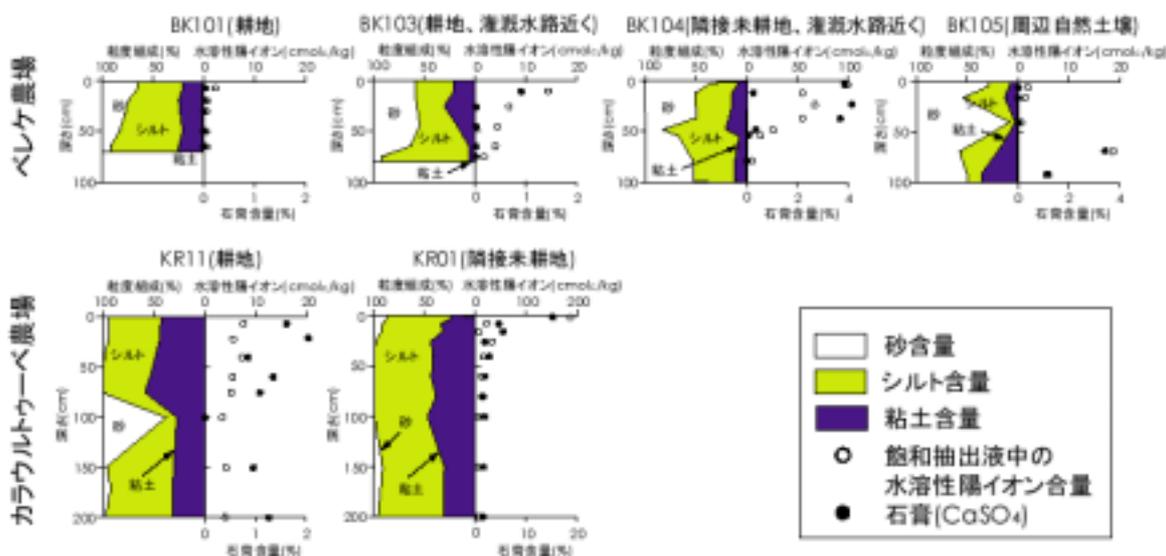


図4. 水田輪作農場畑作圃場および隣接未耕地の土壌中における水溶性陽イオンおよび石膏の断面内分布

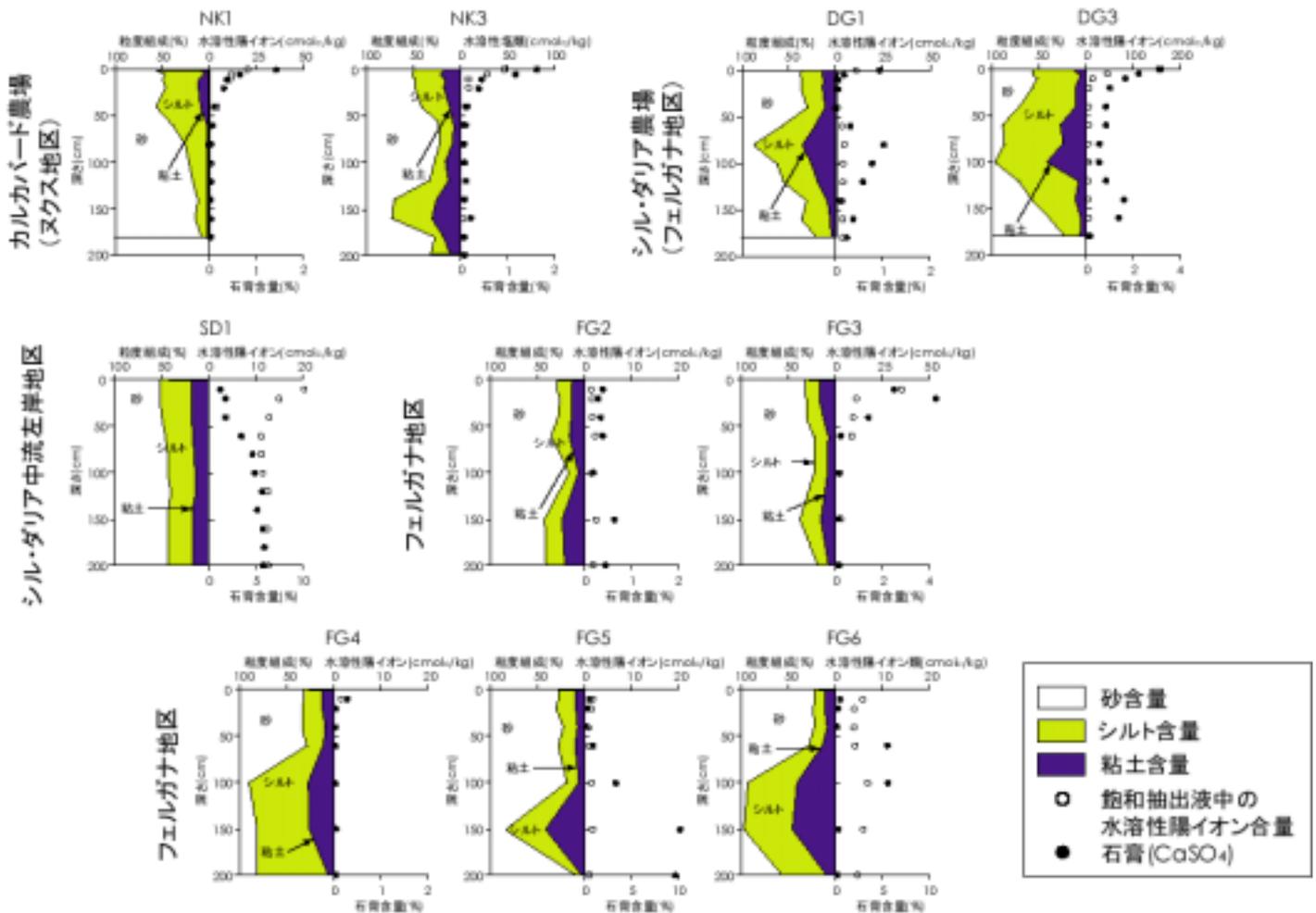


図5. 綿花耕作圃場の中における水溶性陽イオンおよび石膏の断面内分布

5) 水稲耕作を含む輪作体系の現状と課題

ここまで見てきたように、砂漠気候下における水稲作中心の灌漑農業の存立は、豊富な灌漑水の利用および耕地の良好な排水を前提とした水稲耕作期の除塩機能に依存したものであるといえる。ベレケ農場、バクバクティ農場などイリ川下流域やチムセント南部地域では、湛水期の除塩が十分行われているようである。これらの例と比べて、ここで調査したのは一農場のみであるが、排水が十分に機能しなくなりつつあるクジルオルダ地区の状況は、かなり危険なものであると思われる。

4. 綿花栽培圃場における塩類集積の実態

1) 綿花圃場土壌表層における集積塩の分布

図3右側に、フェルガナ地区シル・ダリア農場とヌクス地区カルカバード農場の表層土壌における集積塩含量の平面分布について、土壌懸濁液(1:5)のECを指標として示した。ここに示したのは塩害の激しい圃場の例であるが、いずれの圃場においても、排水路より離れるに従って土壌の塩

集積は顕著に進む。ECが 10 dS m^{-1} を超える範囲では、現地調査時にも綿花はほとんど枯死した状態であった。排水路の有効な範囲は、カルカバード農場において数十m、シル・ダリア農場において百m以上と、地域によって異なるようであり、基礎調査に基づいた適切な間隔での排水路の設定が望まれる。

2) 綿花圃場の土壌中における水溶性塩類および石膏の動態

図5にヌクス地区、フェルガナ地区、およびシル・ダリア地区より採取した土壌における、水溶性塩類、石膏、ならびに土性の断面内分布を示す。図中1段目の4断面は、図3分布図中のNK1, NK3, DG1, DG3に相当し、二段目左はシル・ダリア地区の代表断面である。また二段目右から三段目にかけてはフェルガナ盆地において広域的に採取した断面であり、FG2 FG3、FG4 FG5 FG6の順にシル・ダリア本流沿いの相対的な低所へ移行する。

ヌクス地区カルカバード農場では、断面内における水溶性塩類・石膏の分布が、先に見た水稻輪作圃場の土壌と類似した表層集積型を示す。フェルガナ盆地シル・ダリア本流近くのFG3も同様である。これは、水あるいは溶存成分の移動において、上方へのものが卓越することを示す。すなわち河川近くの比較的低位に位置するこれらの圃場は、常に高い地下水位によって潜在的な塩性化の危険にさらされているといえる。先に見たようにカルカバード農場において排水路の効果の及ぶ距離が比較的短かったのも、もともと地下水の上方移動のポテンシャルが高いというこの地域の事情を反映しているのかもしれない。

フェルガナ盆地の土壌については、断面内の石膏の分布形態に基づいて以下のような分類が可能である。すなわち、河川に対して比較的高所に位置するFG4のような石膏完全洗脱型、中間地域に位置し、断面内の細粒質な層位に石膏集積をもつ石膏粘質層集積型(FG2, FG5, FG6, DG1)、先述したような、比較的低位に位置し土壌最表層に石膏集積を示す石膏表層集積型、である。は、現状では土壌塩性化の心配が少ない良好な圃場であり、実際にフェルガナ盆地でも百年以上昔から持続的な生産を挙げてきた圃場は、このような比較的高位の地域に多いようである。逆に については、ヌクス地区カルカバード農場と共通するが、かなり狭い間隔で排水路を入れるなどの対応策が必要であろう。

シル・ダリア地区では、SD1に見られるような、土壌断面を通して、石膏が多量に存在し水溶性塩類も相当量含まれる例が多く見られる。これはいわば石膏非洗脱型とも呼べるものであろう。おそらく、本地域はシル・ダリアに対する比高が高いため、灌漑水を遠方のタジキスタン領内から引かなければならず、慢性的に灌漑水量が不足であった、という事情が反映されているものと思われる。下層からの塩供給が心配されるため、強制的な垂直式排水の継続は是非とも必要であろう。

3) 綿花耕作の現状と課題

まず、灌漑排水網の整備・維持が、綿花耕作を続ける最低限の条件であろう。そのために要する労力は土性や塩含量、灌漑水質、立地などの条件によって異なるようである。また近年の経済事情の悪化に伴い、灌漑水の供給、排水網の維持など、灌漑農業をめぐる状況がかなり悪化しているもの

と見られるが、特に排水条件の劣悪化は、地域によっては急速な土壌塩性化をもたらさしめる要因として危惧される。

・ おわりに

ここまで見てきたように、現在中央アジアの灌漑農業は特に排水の確保の面で大きな問題を抱えている。灌漑水の多量使用と良好な排水の確保を前提条件とする水稻耕作では、まさに多量の灌漑水を使用してきたがゆえに地域の地下水位が上昇し、畑作期間の土壌塩性化が加速されると同時に、排水性の低下から湛水期の除塩が機能しなくなるという、カラウルトゥーベ農場のような危機的な状況が現れつつある。また湛水・除塩の行われない周辺未耕地では、継続的な土壌塩性化により極端に多量の塩が蓄積されている例が見られ、農場周辺に居住する人々の生活環境の不可逆的な劣化が危惧される。

一方綿花栽培地域では、例えばヌクス地方やフェルガナ盆地の比較的低位で、地下水上昇型の土壌塩性化が見られる。もともとの立地条件を考慮した上で、適切な間隔での灌漑排水網を整備することが望まれる。また排水が不十分なシル・ダリア中流左岸地域では、土壌中に多量の塩が集積している例がしばしば見られ、今後の経済情勢の悪化や耕作形態の多様化に伴う灌漑/排水システムの変化により、急速な土壌塩性化が引き起こされる可能性がある。

これら沙漠の大規模灌漑農業は、地域農民によって伝統的に行われてきたというよりは、旧ソビエト連邦体制下の社会的・経済的要請によって展開されてきた側面が強いものである。これら社会・経済的条件が激変しつつある今日、この灌漑農業をどのようにより持続的なものに変えていくかを再考してみる必要がある。とりわけ今後環境保全の面から灌漑水使用の節減を求める声が強まる中で、いかに水資源を有効に利用しながら灌漑耕地の塩性化を防ぐかが最重要課題であるといえる。対策として、灌漑効率の改善、排水設備の修復・完備に加えて、耕地の整理・農業生産の集約化が求められる局面がくるかもしれない。さらに一般化するというならば、当該地域の灌漑農業のように多量の灌漑水使用を前提とした農業では、その立地の選定と長期的な排水の確保により多くの注意が払われるべきだと筆者らは考えている。

引用文献

- Abrol, I.P., Yadav, J.S.P., and Massoud, F.I. 1988: Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin 39. FAO Rome
- Gardner, W.R. and Brooks, R.H. 1957: A descriptive theory of leaching. Soil Sci. 83, 295-304
- Khakimov, F.I. 1989: Soil Melioration conditions of desertification of deltas. pp.218
- 日本土壌肥料学会 1991:塩集積土壌と農業。博友社、東京
- 日本ペドロロジー学会 1997:土壌調査ハンドブック - 改訂版 -、博友社、東京
- Oster, J.D. 1984: Leaching for salinity control. In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (Eds.), Soil Salinity under Irrigation. Processes and Management. Springer-Verlag, Berlin, pp. 175-189
- Szabolcs, I. 1986: Agronomic and ecological impact of irrigation on soil and water salinity. *In* Advances in Soil Science, 4, p.189-218
- Razanov, B.G. 1984: Principles of the doctrine on the environment. pp.273, IGU, Moscow
- U.S. Salinity Laboratory Staff 1954: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.Dept. Agri. Handbook 60, p.460