

G-2 中央アジア塩類集積土壌の回復技術の確立に関する研究
(2) 塩類集積土壌の除塩技術及び二次塩類集積防止の研究

研究代表者 国際農林水産業研究センター海外情報部 松井重雄

(委託先) 鳥取大学乾燥地研究センター 北村義信

平成8—10年度合計予算額 104,194千円
(平成10年度予算額 20,735千円)

[要旨]本研究では、カザフスタン共和国クジルオルダ州の、水稻作を中心とする8圃式輪作体系がとられているコルホーズを対象に、現地実験を通して二次的塩類集積の発生原因とプロセスを解明し、それを防止するための水管理対策について検討を行った。まず、地表水、地下水の水質特性を明らかにするとともに、灌漑ブロックレベルでの広域水収支、塩分収支を調査し、その実態を解明した。また、水稻栽培における湛水状態が土壌中の水分ポテンシャル、塩分動態に及ぼす影響について、灌漑期間を通じて観測した。さらに、8圃式輪作体系が塩類集積に及ぼす影響について明らかにするため、水稻区から休閑区等畑状態の圃場への水移動と塩分移動を、灌漑期間を通じて調査した。このほか、田面均平度の実態とそれに伴う圃場管理用水量の増大、水路からの漏水量の実態等を明らかにした。

- 1)地表水(河川水、灌漑水、圃場湛水、排水)の一連の観測結果から、EC値とTDSの関係を求めたところ、明瞭な線形関係($TDS=753.5 \cdot EC$)が得られた。
- 2)広域水収支および塩分収支調査から、大量の水消費が行われていること、塩分の残留がブロック内およびその周辺で認められ、年々累積していること、さらに作付けパターンの前年に対する変化が、塩分収支に大きく影響すること、等が明らかとなった。
- 3)圃場面湛水は、より深い層の塩分を上方へ拡散させ、浅い層の塩分濃度を高めるため、リーチング効果はあまり期待できないことが明らかになった。
- 4)水稻区からの浸透水は、排水路の下を通過して畑作区へ移動し、その地下水位を高めている。そのことが畑作区への塩分集積を加速させていると考えられる。したがって、現整備水準のもとでは、灌漑ブロック内での8圃式輪作体系の適用は、望ましくない。

[キーワード] 二次的塩類集積、広域水管理、水収支、塩分収支、8圃式輪作体系

1. 序

乾燥地に位置する灌漑農地の塩類集積は、気候特性、土壌条件だけでなく、その地域の自然的・人為的な水環境の及ぼす影響がかなり大きく作用している。人為的な影響によって生起する灌漑地の塩類集積を、二次的塩類集積という。この二次的塩類集積は、灌漑損失が多く、効率の悪い灌漑システムほど生起しやすく、さらにそこで行われる水管理が不適切であれば、この傾向はより助長される。

シルダリア川の下流域では、1960年代から河川沿いに農地が開発され、灌漑農業が大規模に展開されてきた。特に、クジルオルダ地域では、水稻作を中心とした作付体系が一般的で、国および地域経済にとっても重要な位置を占めている。水稻はもっとも水消費量の多い作物であるため、その作付面積の増加につれて、灌漑取水量が急激に増加している。灌漑農地からの排水量も増え、そのことが河川水の塩分濃度を急激に高めている。このため、シルダリア川下流域の塩分濃度は、ここ30年間に0.4-0.6 g/lから1.3-2.0 g/lに上昇している。

さらに、過剰で非効率的な水使用により、この地域では灌漑農地の二次的塩類集積が起こって

いる。アラル海流域の灌漑農地における灌漑効率は低く、平均約60%と見積もられている²⁾。このことは、取水量の少なくとも40%が、圃場へ到達する前に、損失してしまうことを意味しており、主に土水路からの漏水による。これらの用水損失は、地下水位を上昇させ、ウォーターロギング（湛水害、あるいは過湿害であるが、ここでは以下、湛水害と呼ぶ）と塩害の原因となっている。農地の塩類集積は、この地域の耕作放棄農地の増大と、環境劣化を招いている。

これらの問題の一部は、大規模水路灌漑システムのもとでの粗雑な水管理に起因している。したがって、水管理の適正化は、この地域の二次的塩類集積の防止と持続可能な農業を展開していく上で、もっとも基本となる。

この研究では、シルダリア川下流域のカザフスタン・クジルオルダ州に位置するコルホーズ（集団農場）を対象に、実際の灌漑ブロックレベルにおける水管理の実態、水・塩分収支、圃場レベルでの水・塩分動態を現地実験によって解明し、問題点を明らかにするとともに、それらを解決する方策について考察した。

2. 研究目的

本サブ課題においては、6項目について解明および検討する必要がある。それぞれの目的は、以下のとおりである。

（1）地表水、地下水の水質特性

研究対象地域（農場）およびその周辺の地表水（河川・灌漑水、圃場湛水、排水）と地下水について、塩分濃度など水質を調査し、その特性を明らかにする。特に、塩分収支の解明に不可欠な、電気伝導度（EC）と全可溶性塩類（TDS）の関係を求める。

（2）灌漑ブロックレベルでの水管理とそれに伴う塩類集積

研究対象地域（農場）の地表（水路）灌漑システム、排水システムの状況およびその水管理の実態を把握し、かつ水利・水文・気象環境を広域的にとらえ、その水収支と塩分収支を明らかにする。これをもとに農場における水消費機構を解明し、用水損失と地下水位上昇の関係、塩類集積機構を明らかにする。

（3）輪作体系が灌漑ブロック内での水・塩移動に及ぼす影響

灌漑期間における水稲区－排水路－畑作区（休閑区）間の水移動、塩分移動の実態を現地調査により明らかにし、同一ブロック内で行う水稲区、牧草区の輪作体系が、ブロック内あるいはその周辺地域の湛水害や塩類集積に及ぼす影響を解明する。

（4）水路損失の定量的評価

灌漑水路からの漏水については、以前から貴重な水資源の損失としての問題だけでなく、湛水害、塩害など周辺の環境に及ぼす悪影響の甚大さが指摘されていた。しかしながら、漏水量の実測が困難なことから、概して定性的な評価しか行われていないのが実状である。この研究では、水路からの漏水量を定量的に評価するため、灌漑ブロックへの給水路を対象に漏水の程度を明らかにする。

（5）圃場均平度の実態と水管理への影響

対象地域では、大型機械による耕作を前提として、大区画に整備された圃場が一般的である。非常に大区画であり、かつ機械による均平作業の精度が悪いため、均平度は高くない。この研究では、均平度の実状を明らかにし、それが水管理に及ぼす影響を明らかにする。

（6）水管理の改善に向けての提案

上記の各調査研究の結果を総合し、二次的塩類集積を防止する上でとるべき水管理対策について検討し、提案を行う。

3. 研究対象地区の概要

研究対象とする農場は、シルダリア川の河口（アラル海）から約350 km上流の右岸に位置する旧ソ連時代の集団農場で、その全体面積は19,200 haである。このうち、農地は10%にあたる1,900 haであり、分散的に分布している。農地の分布状況から、農地開発は主に灌漑水の供給が容易で、かつ比較的平坦な地形のところにおいて優先的に行われてきたと推測される。比較的起伏があり、水供給が困難なところは開発されないで、放置されている。同農場では、農地として利

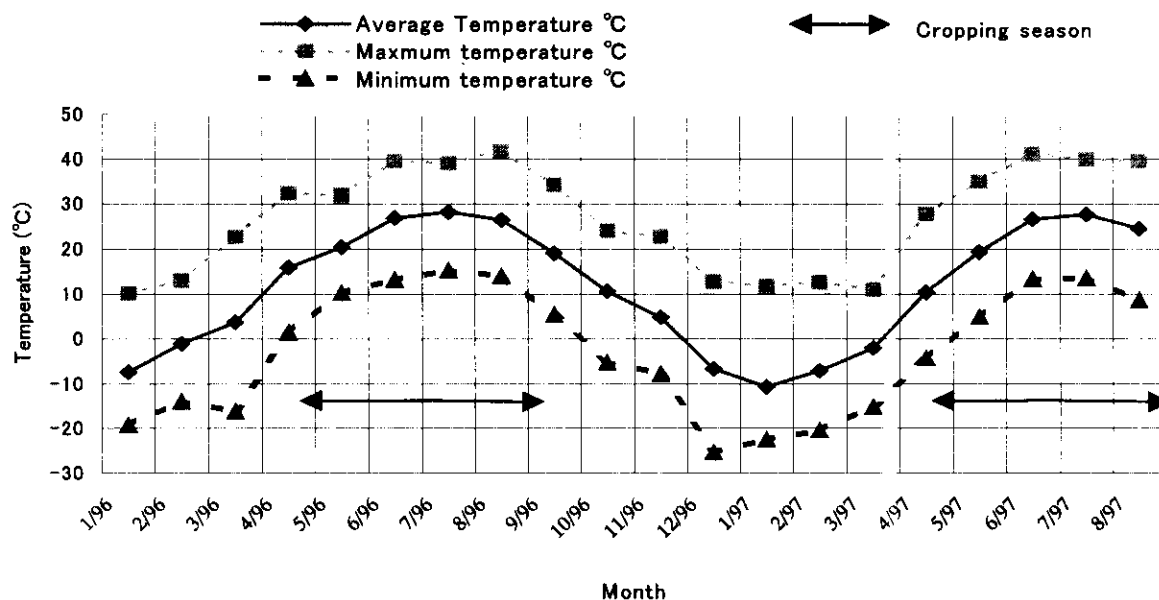
用されたことのある土地の3割強（整備農地の）に当たる約600 haが、耕作されないで放棄されている。

灌漑水は、約50 km上流でシルダリア川から取水され、アイテク水路と呼ばれる素堀りの幹線水路を経て、農場への主要給水路であるコムニズム水路に分水される。シルダリア川に隣接しながら、50 kmも上流で取水するのは、重力灌漑に必要な水頭を得るためである。このことが、灌漑効率を低下させている1つの理由である。

(1) 気候特性

この地区は海洋から遠く離れているため、極端な大陸性気候を呈する。高緯度(北緯45°)にも関わらず、夏は極端に暑く、平均気温は27℃、最高気温は40℃を超える。冬は極端に寒冷で、平均気温は-5℃、最低気温は-25℃を下回る。年降水量は平均120mmであり、降水は春と秋に偏っている。夏には降雨がほとんどなく、極端に乾燥する。乾燥度指数は0.06であるため、「乾燥」に分類されるが、「極乾燥」にきわめて近い。

気候的制約から、この地域の水稲を基準にした作付体系にとって、灌漑は必須条件である。水稲の正常な生長のためには、気温が10℃を割らないようにする必要がある。初期生育段階の低温は、水稲の成熟期が遅延する。特に、幼穂分化期の低温は、水稲に有害で不稔の原因になる。したがって、気温の観点から、作付シーズンは、4月下旬から9月上旬に設定する必要がある。



Temperature and cropping season (1996-97)

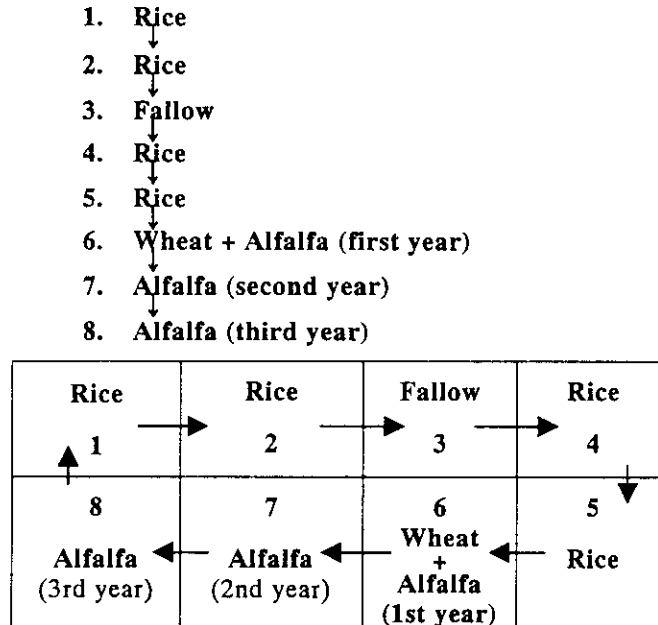
図1 気温の年変化と水稲作付シーズン

(2) 作付システム

クジルオルダ地域では、ここ数10年にわたり、8年輪作システムが採用されてきた。特に、1つの灌漑ブロックを8輪作区に分け輪作を行う方式が、一般的である。ここでは、その方式を8圃式輪作システムと呼ぶことにする。この作付システムでは、作付の順番は、1-2年目：水稲、3年目：休閑、4-5年目：水稲、6年目：小麦+被覆作物としてアルファルファ、7年目：アルファルファ、8年目：アルファルファである。したがって、1つの灌漑ブロック面積のほぼ50%で、水稲が作付されることになる。このシステムにおいては、水稲作付時に失われた土壌肥沃度を、アルファルファの作付に伴う窒素固定によって回復することができ、同時にアルファルファ作付区への水補給は、隣接する水稲作付区からの浸透水で賄えるという利点が強調されており、ソ連水稲研究所の研究者によって推奨され、この地域の農民に受け入れられてきた。カザフスタンのほとんどの水稲作付地域では、この作付体系が、農地開発の設計および施工の基本とされてきた。

したがって、この輪作体系のもとでは、灌漑面積の約半分が水稲作へ割り当てられ、残りの約半分は牧草区あるいは休閑区など畑状態に保たれる。

しかしながら、このシステムは、水稲区に隣接する畑作区あるいはブロック外の隣接地に湛水害や塩類集積を生起させる可能性を有している。この農場では、比較的早く開発され、数10年間にわたり8年輪作システムが行われてきた2つの灌漑ブロック（すなわち、メチェットとサルタバ）では、塩類集積によりかなりの農地が耕作放棄されている。そのような灌漑ブロックでは、最近8圃式輪作システムは実施されておらず、新しい作付形態が取られている。新しい作付形態は、8年輪作システムであることには変わりはないが、1つの灌漑ブロック全体で同一作物が栽培される。唯一比較的新しく開発されたイエルタイ・ブロックだけが、本来の8圃式輪作システムを実施している。現在のところイエルタイ・ブロックには、耕作放棄農地がほとんど出現していないが、このままこのシステムが運用されれば、放棄農地は将来的に増加していくと予想される。



Eight-year crop rotation in a irrigation block

図2 8圃式輪作システム

4. 研究内容

(1) 地表水、地下水の水質特性

① 研究方法

研究対象地域（農場）およびその周辺の地表水と地下水について、水質特性を明らかにするため、3年間にわたり現地にて採水を行い、それを日本に持ち帰って分析した。分析項目は、電気伝導度（EC）、pH、各種可溶性塩類とその合計（TDS）であり、ナトリウム吸着比（SAR）は計算により求めた。なお、各種可溶性塩類について、陽イオンの分析には原子吸光光度計、陰イオンの分析にはイオンクロマトグラフィーを用いた。

② 結果・考察

研究対象地域（農場）およびその周辺の水質について、一連の分析結果を地表水と地下水に分けて整理したものを表1に示す。地表水はさらに河川・灌漑水、水稲区の湛水、それに排水の3つに分けて整理した。また、表の右端には国連食糧農業機関（FAO）が灌漑水として適当と評価している範囲を示す³⁾。地表水のEC値は、1.3~4.4 dS m⁻¹（平均2.6 dS m⁻¹）であるが、細かくみれば河川水・灌漑水は1.3~2.9 dS m⁻¹、湛水は1.8~3.1 dS m⁻¹、排水は2.6~4.4 dS m⁻¹と下流に行くにしたがって徐々に高くなっている。TDSについてもほぼ同じような傾向がみられ、地表水の範囲は955~4143 mgL⁻¹となり、河川・灌漑水は955~2151 mgL⁻¹、湛水は1384~2337 mgL⁻¹、排水は2053~4143 mgL⁻¹となる。したがって、河川・灌漑水については、EC、TDS およびその他のパラメータとも、FAOの示す適当水質の範囲内にある。湛水についても若干範囲を超えるものの、

ほぼ適当と見なせる。しかし、湛水を停留状態で維持した場合、水質悪化の可能性があるので注意を要する。排水については、ほとんど適当な水質の範囲を外れており、そのまま再利用することは不可能である。地表水の SAR については、2.5~6.1 の範囲にあり、FAO の示す適正範囲内にある。

表1 シルダリア下流域における水質特性

Parameter	Units	Water quality in and around Shamenov Kolkhoz				Usual range for irrigation (FAO, etc.)
		Surface water			Groundwater	
		River & irrigation canal water	Ponded water in rice fields	Drainage water	Cultivated & Abandoned fields	
EC	dS m ⁻¹	1.31-2.88 (1.78)	1.84-3.06	2.63-4.40 (3.42)	4.13-73.00 (22.9)	0-3
TDS	mg L ⁻¹	955-2151 (1285)	1384-2337	2053-4143 (2620)	2765-86360	0-2000
Ca ²⁺	me L ⁻¹	4.6-9.3	6.2-9.1	8.4-19.2	20.3-29.1	0-20
Mg ²⁺	me L ⁻¹	5.6-11.3	7.3-12.7	11.6-18.3	20.8-437.0	0-5
Na ⁺	me L ⁻¹	5.9-17.0	7.7-15.1	13.1-20.9	17.3-982.6	0-40
CO ₃ ²⁻	me L ⁻¹	-	-	-	-	0-0.1
HCO ₃ ⁻	me L ⁻¹	-	-	-	-	0-10
Cl ⁻	me L ⁻¹	4.5-12.2	6.0-13.1	12.6-25.1	26.0-795.9	0-30
SO ₄ ²⁻	me L ⁻¹	11.2-22.4	14.0-24.9	23.7-43.7	13.6-633.5	0-20
K ⁺	me L ⁻¹	0.1-0.3	0.2-0.3	0.2-0.5	0.6-3.2	0-2
pH	me L ⁻¹	7.6-8.14	7.75-7.94	7.62-8.10	7.42-8.14	6.0-8.5
SAR		2.46-6.08	2.70-5.36	4.13-5.04	3.68-129.36	0-15
Mg ²⁺ /Ca ²⁺		1.05-1.44	1.10-1.72	0.95-1.63	0.90-15.90	0-1

一方、地下水は非常に塩性が強く、EC 値は 4.1~73dS m⁻¹ (平均 22.9dS m⁻¹) と約 10 倍高くなっている。TDS も 2765~86360 と大きな値を呈しており、灌漑水としての利用は不可能である。特に、耕作地に比べ、放棄農地の地下水の水質が大幅に悪く、海水よりも高い塩分濃度を示すところも多い。SAR についても、大幅に FAO の示す適正範囲を超えている。また、同一圃場内においても、地下水の塩分濃度には大きな場所的変動がみられる。表 2 はメチェットの放棄圃場において約 20~30m 間隔に設置した地下水観測井の水質を示すが、大きな差異がみられる。この理由として、地下水流動の速度の違いが考えられる。このことは、下層土の土性とも密接に関係している。すなわち、表 2 の No. 1 と No. 2 の下層土の土性は粘質であり、地下水流が停滞しているため、土壌中の塩分が溶出して、塩分濃度が高くなっていると考えられる。一方、No. 3 と No. 4 の下層土は砂質土であり、地下水流動が活発であるため、塩分濃度が低くなっていると考えられる。

pH 値は、地表水、地下水ともに 7.5~8.2 (平均 7.8) とほぼ同じ傾向を呈している。その値は高めではあるが、一応 FAO の示す適正範囲内にある。

可溶性塩の種類としては、地表水、地下水ともに、陽イオンでは Na⁺、Mg²⁺、陰イオンでは SO₄²⁻、Cl⁻が多い。地表水の場合、全陽イオンに占める割合は Na⁺が一番多く 39%、次いで Mg²⁺が 34%、Ca²⁺が 27%、K⁺が 1%となっている。また、マグネシウムとカルシウムの比 (Mg²⁺/Ca²⁺) が 1.0 以上と高く、作物のカルシウム欠乏を来しやすい水質と言える。陰イオンの場合、SO₄²⁻が 66%と 2/3 を占め、Cl⁻が残りの 1/3 を占めている。

地下水の場合、陽イオンでは Na⁺が圧倒的に多く 67%、Mg²⁺が 26%、Ca²⁺が残り 7%を占める。陰イオンでは SO₄²⁻が 53%、Cl⁻が 47%となる。地表水と比べて地下水では Na⁺と Cl⁻の比率が大幅に増えているが、これは集積した塩、特に NaCl などが溶出したためと考えられる。

表 2 同一耕作放棄圃場における地下水の塩分濃度の差異

Location No. *	pH	EC (dSm ⁻¹)	Cations(meqL ⁻¹)					Anions(meqL ⁻¹)				SAR
			Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Total	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Total	
No. 1	7.64	63.3	821.6	4.0	410.0	25.3	1331.8	716.8	692.9	0	1409.7	78.8
No. 2	7.61	52.7	750.9	4.3	328.3	26.1	1109.5	625.6	608.1	0	1233.7	79.8
No. 3	8.01	13.9	100.6	0.2	78.0	20.1	198.9	68.7	143.8	0	212.5	20.3
No. 4	8.06	4.4	52.8	0.1	23.1	24.9	100.9	28.6	70.1	0	98.7	15.2

* 位置的關係：北隣の放棄圃場～本放棄圃場 (No.1-No.2-No.3-No.4) ～南隣のアルファルファ作付圃場

地表水（河川水，灌漑水，圃場湛水，排水）の一連の観測結果から，EC値とTDSの関係を求めたところ，下記のように明瞭な線形関係が得られた。

$$TDS=753.5EC \quad (R^2=0.9812) \quad \text{---- (1a)}$$

$$TDS=816.0EC-169.97 \quad (R^2=0.9873) \quad \text{---- (1b)}$$

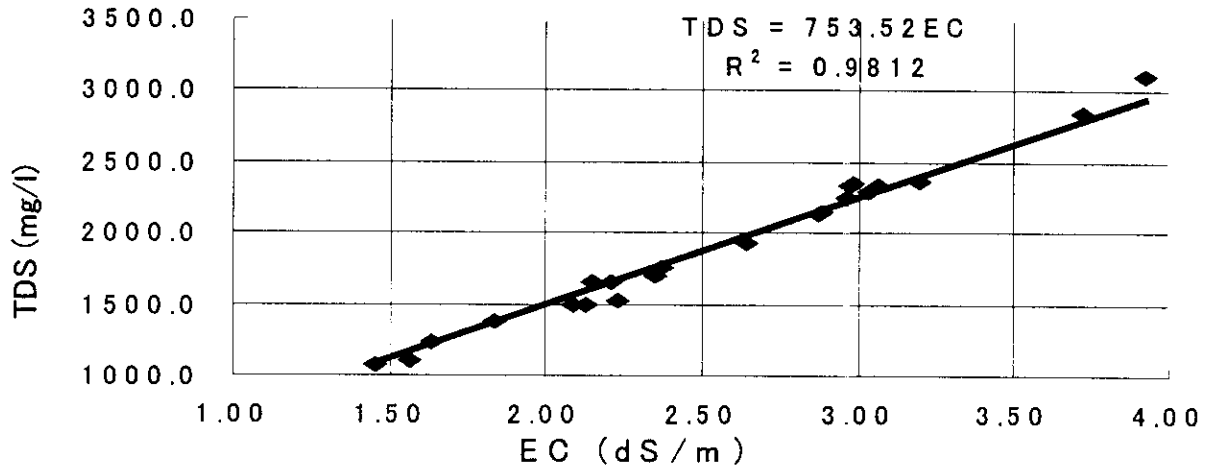


Fig. 1 Relationship between EC and TDS

図3 地表水のEC値とTDSの関係

地下水の場合も，次のような線形関係が認められ，その係数は地表水における上式係数のほぼ1.5倍になる。

$$TDS=1137.5EC \quad (R^2=0.9812) \quad \text{---- (2a)}$$

$$TDS=1207.7EC-3072.7 \quad (R^2=0.9873) \quad \text{---- (2b)}$$

(2) 灌漑ブロックレベルでの水管理とそれに伴う塩類集積

① 研究方法

イエルタイ・ブロックを対象に，ブロックレベルでの水管理の実態を明らかにする。イエルタイ・ブロックへの水補給は，本農場の幹線水路からイエルタイ水路を経て導かれる。また，排水は，ブロック中央を走る排水路を経て，シルダリア川の支流へ排除される。したがって，用排水系統がはっきりしており，基本的にはイエルタイ用水路始点の流量と，排水路末端の流量を継続観測することにより，ブロック全体の水収支を把握する。なお，一部イエルタイ水路から，ジャラガシ市街の街路樹への水補給が，1週間から10日間隔に行われるが，量的に少ないこと，水路の流量観測は街路樹への分水が行われていないときに実施すること等から，影響は微小と判断され，考慮に入れなかった。

ブロックでの塩分収支は，流量観測に合わせて各観測点の塩分濃度を測定することにより，計算することができる。なお，塩分濃度は，EC値を観測によって求め，先に求めた地表水のEC値とTDSの関係式を適用して，TDS値に換算する。塩分収支は，下記の式を適用して解析した。

$$\begin{aligned} \Delta Sa &= WrSr + WiSi + Wg_1Sg_1 - WdSd - Wg_2Sg_2 - P_s \\ &= WrSr + WiSi - WdSd - WpSp - P_s \end{aligned} \quad \text{---- (3)}$$

ここで， Sa = 対象地域の塩分総量の変化，

W = 水量 (水深換算)，

S = 塩分濃度，

P_s = 収穫作物により吸収された塩分量，

$WpSp$ = 浸透水により対象地域から流出する塩分量，

$$WpSp = Wg_2Sg_2 - Wg_1Sg_1,$$

サフィックスの持つ意味:

- r = 雨水,
- i = 灌漑水,
- d = 排水,
- g₁ = 地下水流入,
- g₂ = 地下水流出,
- p = 浸透水.

ここで、 W_r と P_i をゼロと見なすことにより、 ΔSa は次式のように単純化できる。

$$\Delta Sa \cong WiSi - WdSd - WpSp \quad \text{----- (4)}$$

したがって、 Wi , Si , Wd および Sd を把握することにより、 ΔSa と $WpSp$ の合計値 ($\Delta Sa + WpSp$) を求めることができる。 $(\Delta Sa + WpSp)$ は、対象地域の塩分量の変化と、対象地域の灌漑排水管理に伴う地下水流出に起因する周辺地域の塩分量の変化の合計と見なすことができる。また、さきに求めた地表水のTDSとECの関係((1a)式、あるいは(1b)式)を用いて、 Si と Sd はECの観測値から計算することができる。

これらの調査解析をもとに、水管理および作付システムが塩類集積に及ぼす影響を広域的に明らかにする。

②結果・考察

ア. 広域水収支

(ア) 1997年の作付状況および水収支

1997年においては、全作付面積716haのうち、水稻は384ha、アルファルファは332haであった。水稻区の灌漑期間は、4月26日～8月25日の122日間(水収支対象期間は、ブロックからの流出が完了する128日間)であった。しかしながら、観測の準備期間が十分取れなかったため、水収支の観測は5月19日～8月16日の90日間について行った。この間降雨はまったく観測されなかった。この間の水収支については、表3に示す。

観測を行った90日間においては、総取入水量は $18.062 \times 10^6 \text{ m}^3$ (灌漑期間換算: $24.484 \times 10^6 \text{ m}^3 = 6376 \text{ mm}$)で、このうち49.5%の $8.942 \times 10^6 \text{ m}^3$ (灌漑期間換算: $12.121 \times 10^6 \text{ m}^3 = 3156 \text{ mm}$)が消費され、残りの50.5%の $9.120 \times 10^6 \text{ m}^3$ (灌漑期間換算: $12.363 \times 10^6 \text{ m}^3 = 3220 \text{ mm}$)が排水されている。これをブロック面積に対する水深で表示すれば、取水量約 28.0 mm d^{-1} 、消費水量 13.9 mm d^{-1} 、排水量 14.1 mm d^{-1} となる。また、水稻区面積に対する水深で示せば、取水量が約 52.3 mm d^{-1} 、消費水量が 25.9 mm d^{-1} 弱、排水量が 26.4 mm d^{-1} 強となる。この結果、乾燥地でありながら大量の取水、消費、排水がブロックで行われていることが明らかとなった。

(イ) 1998年の作付状況および水収支

1998年においては、716haのうち、水稻は537ha、アルファルファは70haにそれぞれ作付され、残り109haは休閑とされた。この年の灌漑期間は112日間で、5月1日に開始され、8月20日に終了した。ただし、水収支の対象期間は、ブロックからの流出が止まった8月31日までの123日間とし、全期間を通して観測を行った。なお、この年はブロックの東端部59haの作付が、前年のアルファルファから水稻に変換されたことにより、この部分から地区外への流出がみられたため、流出量と塩分濃度の観測を行った。

1998年の全期間123日間における水収支の状況は、表3に示すとおりである。この間、総取入水量は $21.621 \times 10^6 \text{ m}^3$ で、このうち56.1%の $12.126 \times 10^6 \text{ m}^3$ が消費され、残りの43.9%の $9.495 \times 10^6 \text{ m}^3$ が排水されている。これをブロック面積に対する水深で表示すれば、取水量約 3562 mm (29.0 mm d^{-1})、消費水量 1998 mm (16.3 mm d^{-1})、排水量 1564 mm (12.7 mm d^{-1})となる。また、水稻区面積に対する水深で示せば、取水量が 4026 mm (32.7 mm d^{-1})、消費水量が 2258 mm (18.4 mm d^{-1})、排水量が 1768 mm (14.4 mm d^{-1})となる。なお、ここで示した消費水量は、水稻区と牧草区の消費水量だ

けでなく、水路損失、耕地周辺部への地下水流出等を含む。今後、この消費内訳を定量的に明らかにする必要がある。

(ウ) 作付パターンと水管理、水収支の関係

a) 作付面積と灌漑水量

1997年と1998年を比較した場合、作付状況に大幅な変化がみられた。すなわち、1998年には水稲作付面積が、1997年の1.4倍と大幅に増えた。アルファルファ区への灌漑は、シーズンの初めに1度行うだけで、その後は基本的に灌漑しない。したがって、灌漑ブロックへの灌漑水量は、水稲作付面積によってほぼ決まるはずである。単純な計算では、1998年の取水量は1997年のその1.4倍になるはずであるが、平均取水量は1997年が $2.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であるのに対し、1998年は $2.23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とほぼ同じ値を示している。また、用水路水位は、ほぼ上限状態（通水能力のほぼ限界状態）を保って、圃場へ給水されているのが、両年とも灌漑期間を通じて確認された。このことから、灌漑ブロックへは、作物の必要水量を満たし、かつ、用水路の通水能力いっぱいの水量が灌漑用水として給水されていると判断される。この背景には、満水状態で給水することの必要性あるいはそれを是認する条件があるわけで、以下のような点が考えられる。

- ・平坦な地形のもとで、重力灌漑を行うのに必要な水頭を確保するため
- ・圃場での深水湛水を維持するため
- ・水路の搬送損失を補うため
- ・水利費が非常に安価（ 1000 m^3 当たり56.3テゲ' ≈ 0.704 ドル）で、節水努力が希薄

したがって、水稲作付面積が少ないほど、単位取水量は多くなる。1998年の水稲面積当たり取水量が4026mmであるのに対し、1997年のその推定値は6376mmと非常に高くなる。シルダリア下流域における水稲の取水量は、一般に非常に高くなっているが、その理由は上記のような背景によるものと考えられる。

表3 イエルタイプブロックにおける水・塩分収支

Water Balance	Area (ha)	Irrigated (x1,000m ³)	Consumed (x1,000m ³)	Drained (x1,000m ³)	Period
1997	Rice fields: 384	18,062 [24,484] 4704mm(52.3mm/d) [6376mm(50.2mm/d)]	8,942 [12,121] 2329mm(25.9mm/d) [3156mm(24.8mm/d)]	9,120 [12,363] 2375mm(26.4mm/d) [3220mm(25.4mm/d)]	5/19-8/16 (90days) [4/26-8/31 (128days)]
1998	Rice fields: 537	21,621 4026mm(32.7mm/d)	12,126 2258mm(18.4mm/d)	9,495 1768mm(14.4mm)	5/1-8/31 (123days)
Salt Balance	Area (ha)	Salt Inflow (ton)	Salt Remained (ton)	Salt Outflow (ton)	Period
1997	Cultivated: 716	24,719 34.5 t/ha 384 kg/ha/d	3,259 4.6 t/ha 51 kg/ha/d	21,460 30.0 t/ha 333 kg/ha/d	5/19 - 8/16 (90 days)
1998	Cultivated: 716	24,923 34.8 t/ha 283 kg/ha/d	409 0.6 t/ha 5 kg/ha/d	24,514 34.2 t/ha 278 kg/ha/d	5/1 - 8/31 (123 days)

* [] for 1997 water balance : estimated values for whole season based on extrapolation using observed data

b) 消費水量および排水量

表3に示す消費水量は、水稲区からの蒸発散量と地下水流出（隣接畑作区、ブロック外への地下水流出で、最終的に排水路へ還ってこないもの）だけでなく、畑作区への灌水、用水路からの漏水量も含まれる。イエルタイ・ブロックの用水路システムからの漏水量は、後述のように取水量の27.7%と推定されるので、表3の消費水量から畑作区への灌水量と水路損失を分離して、両年の水稲区での消費内訳を整理してみれば、表4のようになる。ここで、水路損失は排水路へ流出しないで、地下水流出すると仮定して見積もった。④は水稲区での蒸発散量と地下水流出の合計量である。これを1日当たりに換算すると、約9.3(9.1~9.5) mm d⁻¹になる。蒸発散量は実測できなかったが、約7 mm d⁻¹と見積もれば、地下水流出は約2.3 mm d⁻¹程度となる。一方、排水量は両年でまったく異なっており、圃場への取水量の差がそのまま排水量の差となっている。すな

わち、水稻区の水口から入った水量のうち、圃場内で実質的に使われる水量（約 9.3 mm d⁻¹）を差し引いた水量が、水尻からの地表排水量と浸透後排水路へ流出する地下排水量となる。現地の状況から、排水量は圧倒的に地表排水が多いと判断される。

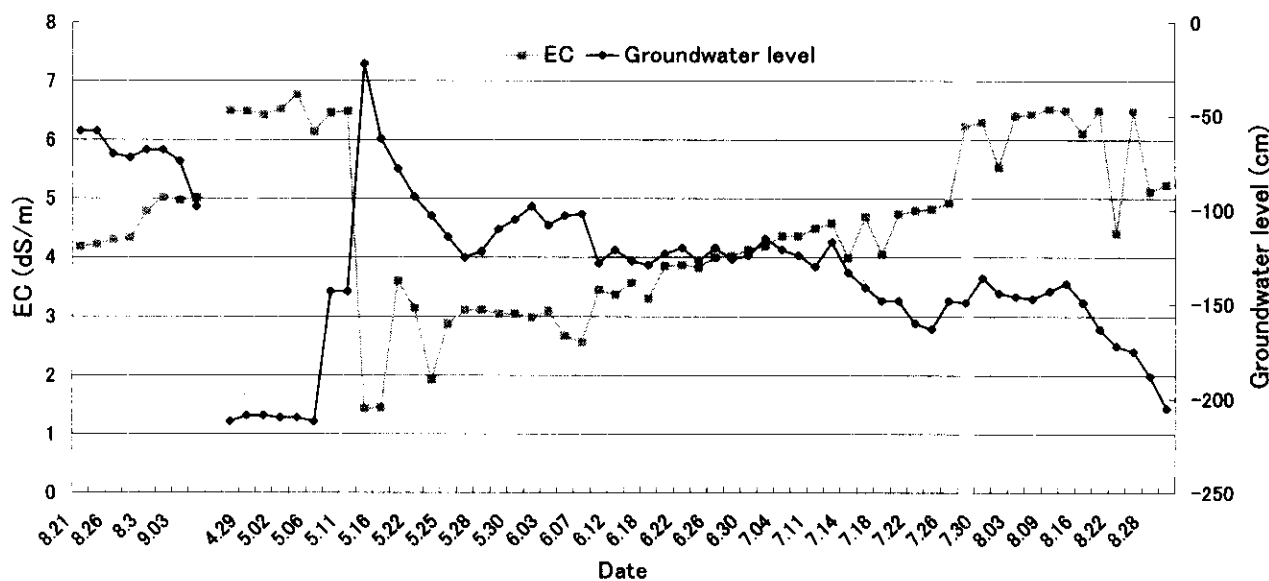
表4 イエルタイ・ブロックにおける水稻区の水消費内訳 (mm)

Year	Period of water balance	Withdrawal at canal head ①	Canal losses ②=①x0.277	Field intake ③=①-②	Field consumption ④ (mm d ⁻¹)	Drained ⑤ (mm d ⁻¹)
1997	128 days	6136	1700	4436 (34.7)	1216 (9.5)	3220 (25.2)
1998	123 days	3990	1105	2885 (23.5)	1117 (9.1)	1768 (14.4)

イ. 広域塩分収支

(ア) 1997年の塩分収支

1997年5月19日～8月16日の90日間における塩分収支の結果は、表3に示す。これによれば、流入塩分総量は 24719 ton (34.5 t ha⁻¹ or 384 kg ha⁻¹ d⁻¹)にのぼり、このうち 21460 ton (30.0 t ha⁻¹ or 333 kg ha⁻¹ d⁻¹)は排水路を経てブロック外に流出し、残り 3259 ton (4.6 t ha⁻¹ or 51 kg ha⁻¹ d⁻¹)がブロック内、あるいはその周辺に留まることが明らかとなった。この年は、灌漑期間をすべてカバーした調査が行えなかったが、調査期間においては大量の塩分が排除されないで残留することが、明らかとなった。この塩分の残留箇所は、常時リーチングされている水稻区ではなく、ブロック周辺地域および地下水補給される畑作区の地下水位上方の毛管補給される土層に集中的に集積するものと考えられる。このことは、水田区に隣接する牧草区における地下水位とその EC 値の変動状況（図4）からも推測できる。



Change of groundwater level and EC in upland field adjacent to rice field (1996-97)

図4 牧草区における地下水位と EC 値の変動状況 (1996-97)

(イ) 1998年の塩分収支

1998年5月1日～8月31日の123日間における塩分収支は、灌漑期間を完全にカバーしたものである。この間の流入塩分総量は 24923 ton (34.8 t ha⁻¹ or 283 kg ha⁻¹ d⁻¹)であり、このうち 24514 ton (34.2 t ha⁻¹ or 278 kg ha⁻¹ d⁻¹)はブロック外への流出、残りの 409 ton (0.6 t ha⁻¹ or 5 kg ha⁻¹ d⁻¹)が残留した。

(ウ) 作付パターンと塩分収支の関係

1997年と1998年における塩分収支の違いは、1998年においては灌漑水源であるシルダリア川

の水質が、1997年よりも若干よかったこと、日平均取水量も1997年に比べ少なかったこと等、が挙げられる。さらに重要なことは、前年に対する作付けパターンの変化が塩分収支に大きく影響することである。すなわち、1997年の作付けでは前年の畑状態から水田状態に転じた農地面積が少なく、畑状態の農地に集積した塩分が排除される機会が少なかった。これに対し、1998年においては前年の畑状態から水田状態に転じた農地面積が多く、畑状態の農地に集積した塩分が排除される機会が多かった。このことが、1998年の残留塩分量を少なくさせた主要因と考えられる。

(3) 輪作体系が灌漑ブロック内での水・塩移動に及ぼす影響

① 研究方法

同一ブロック内での水稲と牧草の輪作体系が、ブロック内あるいはその周辺地域の塩類集積に及ぼす影響の解明については、水田区に隣接する畑状態区の地下水位とその塩分濃度の変動状況を調査してその傾向を把握する。支線排水路をはさんで立地する水稲区と、休閑区の2圃場を選び、地下水位、水分ポテンシャル、水質等の測定を行った。地下水、水分ポテンシャルの測定には、直径50mmの塩ビ管を用いた。地下水位測定管には、下端より1mまでパイプ側面に小孔をあけて、水が浸入しやすくし、開口部を含めて不織布で巻き、さらにその周辺をフィルター材の砂礫で被った。水分ポテンシャル測定管は、各土層の圧力面が測定できるように、孔あけ加工はせず、パイプの底部からのみフィルターを通して、水が入るようにした。排水路には量水標を設置して水位を測定し、同時にEC値も測定した。観測は灌漑開始前から灌漑終了後地下水位がほぼ安定するまで継続して行った。

② 結果・考察

ア. 水稲区における地表湛水が土壌中の塩分移動に及ぼす影響

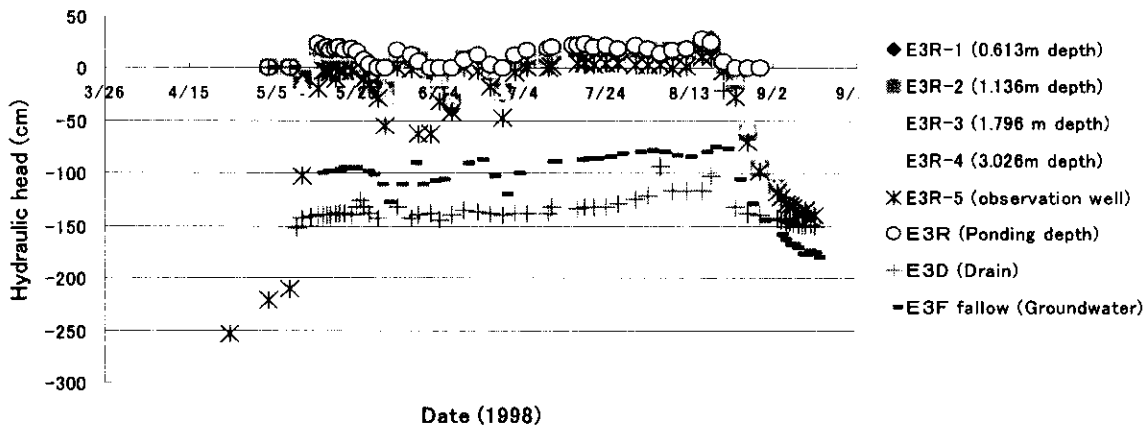
イエルタイプブロックの水田状態にある調査圃場において、深さ別の土中水圧と塩分濃度を継続して測定した。その結果を図5および図6に示す。土壌中の水移動は、灌漑開始から終了までの全期間において、土壌表面から深層に向かっていくことが確認された。土中水の塩分濃度の観測から、調査圃場においては、土壌面から約180cmのところ塩分の集積層があることが示唆された。深さ300cmの土中水の塩分濃度は、灌漑前、灌漑期間を通じてほぼ変化が見られなかった。これに対し、浅い層(深さ60cm)では、灌漑開始直後高いEC値を示していたが、急速に低下し、灌漑水とほぼ同じ水準に達した。しかし、その後徐々に高い値を示し始め、ある水準に達して後は、横ばい状態となった。このことから、前年度浅い層に集積した塩分は、灌漑開始とともに洗浄され、下方へ移動するが、その後下層土が飽和され、水移動速度が鈍ると、より深い層の塩分が拡散して、上方へ移動し、浅い層の塩分濃度を高めると考えられる。従来、圃場を水田状態に保つことは、土壌中に集積した塩分の洗浄に効果的であるとされていたが、それは灌漑初期に浸潤状態での水移動が起こっているときだけで、すべての土壌間隙が飽和されてしまえば、拡散現象により塩分は逆に浅い層へも移動することが示唆された。したがって、湛水は掛流し状態で管理する必要があり、そのことが用水消費量を増大させる一因となっている。水稲作を行うことは、地中に集積している塩分を、浅い層まで移動させることもあり得るわけで、翌年その圃場を畑状態に保てば、一挙に塩分は表層まで上昇するという事態も起こり得る。

収穫後の水稲区圃場において、よくスポット状に塩分の集積しているところが観察されるが、これらのところでは灌漑期の湛水時にも下層の塩類が常時土壌表面まで拡散していると考えられる。特に、透水性のよい土壌が、部分的に表層から下層まで連続しているところでは、灌漑期間を通じて塩分が拡散により下方から土壌表面へ上昇するため、水稲の生育が悪く、収穫が著しく低下する。

イ. 水稲区-休閑区間の水・塩分移動と排水路の機能

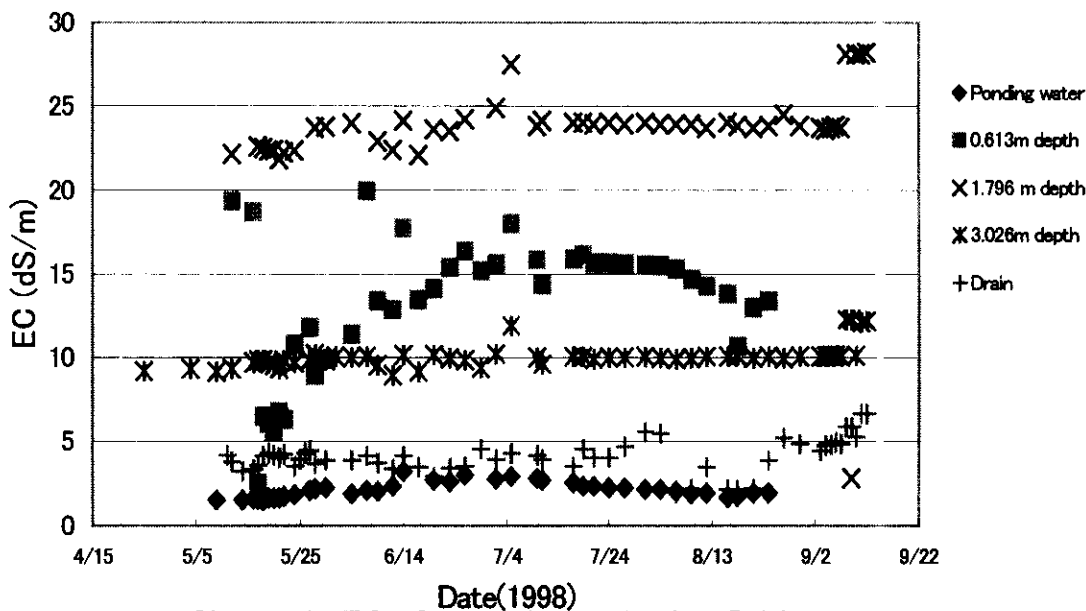
同一の灌漑ブロックにおいて、排水路をはさんで立地する水稲区と、休閑区の地下水位を排水路水位の変化と合わせて、継続的に観測した。その結果、休閑区の地下水位は、排水路を隔てた反対側水稲区の湛水位に、敏感に反応していることが判明した(図5)。このことは、排水路があるにも関わらず、水稲区の湛水は畑作・休閑区の地下水位を上昇させ、塩類集積を導くことを示唆している。このため、同一灌漑ブロックでの輪作は、2次的塩類集積を防止する上で、好ましくない。なお、排水路があるにも関わらず、このような現象が起こるのは、排水路の両岸が農道

として利用されて締め固めが進み、水稻区からの浸透水が遮断され、地下排水がほとんど機能していないことによる。なお、水稻区からの浸透水は排水路の下を通過して休閑区へ移動していると考えられる。この状態が水稻作の溶脱効果を低下させる主要因である。



Change of hydraulic pressure in E3R and E3F plots

図5 水稻区の土壤水分ポテンシャルと隣接休閑区の地下水位の変化



Change in EC of groundwater in rice field

図6 水稻区と隣接休閑区の地下水のEC値

(4) 圃場均平度の実態と水管理への影響

① 研究方法

中央アジアの耕区は一般に大規模で、そのサイズはイエルタイ・ブロックの場合、0.8~3.5 ha (平均 2.2 ha)である。したがって、すべての農作業は機械により行われる。まず播種に先立ち、トラクターにプラウを牽引して耕起作業を行い、次いで碎土器を牽引して碎土作業、その後撥土板による均平作業が行われ、播種、そして仕上げとして、ローラーを牽引して覆土が行われる。初期灌漑はその後行われる。すなわち、ローラーを牽引した後の圃場面の地形が、灌漑期間を通じて

ほぼ維持され、それに応じた圃場水管理が行われることになる。

ここでは、ブロック内の平均的な2耕区を選び、水準測量により圃場面の均平度を求めた。そして、1つの耕区については、均平状況が湛水深管理に及ぼす影響について、考察を行った。なお、水準測量は、1つの耕区については10 m間隔、もう一方については20 m間隔で行った。また、アゼに沿って圃場内溝が掘られているので、この部分は均平度の検討範囲からはずした。

②結果・考察

イエルタイブロックにおける平均的な2つの耕区（面積：2.4 ha および 1.8 ha）を対象に、田面の均平状況を調査した。その結果、前者は耕区内に-15.4～+14.9 cmもの高低差があり、標準偏差は6.46 cmであった。後者の高低差は、-17.9～+16.6 cm（標準偏差6.85 cm）であった。一般的に、適正な水管理を行うためには、一筆の高低差±5.0 cm以内の均平度が必要とされるが、両耕区とも大幅にこの基準を超過している。図7は、前者の圃場の最高土壌面標高と最低土壌面標高、それに灌漑期間における湛水深の変化の関係を示す。この図から、湛水深管理は最も高い部分を基準に行われており、必然的に深水状態をもたらし、用水量の増大につながっていることが分かる。

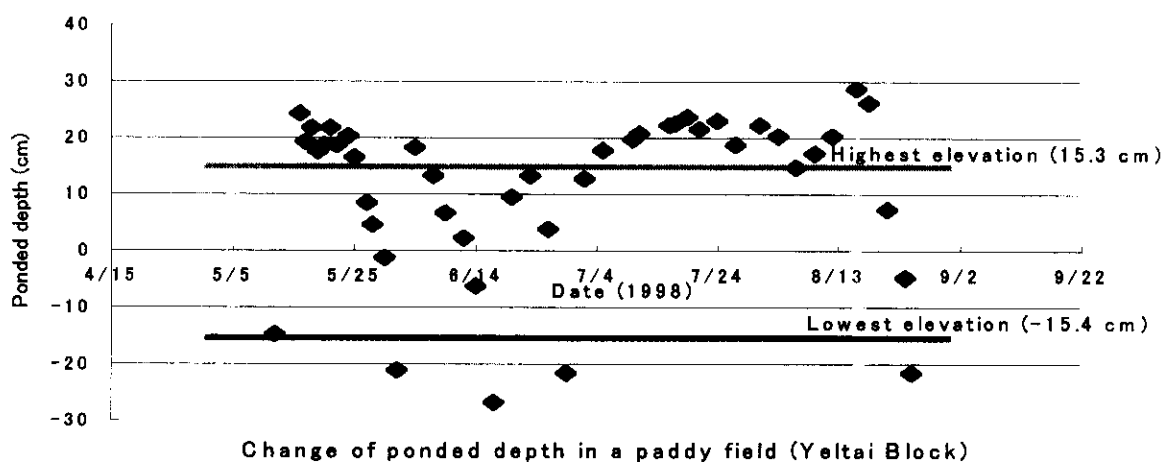


図7 圃場の均平状況と湛水深の変化の関係

(5) 水路損失の定量的評価

①研究方法

イエルタイ・ブロックの基幹用水路において、流入と流出がまったくない2 km区間を選定し、その区間における損失量を実測により求めることとした。まず、その区間の上流端と下流端に水位観測および流量観測点を決め、量水標を設置した。灌漑期間の流況が安定した時期を選んで、流量観測を上下流端で数回行った。そして得られた両地点の流量を統計的に処理し、下流側流量を上流川流量で表した。

②結果・考察

上記2 km区間の上下流端における流量の観測値は、表5のとおりである。上流端流量（ Q_{in} ）と下流端流量（ Q_{out} ）の関係については、単に両者の平均値の比を求めるのではなく、定数項を0とした回帰分析により求めた。その結果、調査対象水路における水路損失率は、下記に示すように1 kmあたり約5.79%と求まった。例えば、この状態で10 km用水を流下させるとすれば、約45%の水が損失し、55%に減少してしまう。50 km流下させれば、わずか5%の水しか残らない。表5の測定結果から、 Q_{in} と Q_{out} の関係を求めれば、次式のようなになる。

$$Q_{out}=0.8875Q_{in} (r^2=0.7745)$$

また、水路損失率の算定式は、次式で算定できる。

$$L_n=\{1.0-(Q_{out}/Q_{in})^{1/L}\} \times 100 (\%/km)$$

この区間の場合、水路損失率は次のように計算できる。

$$L_n=\{1.0-(0.8875)^{1/2}\} \times 100=5.79 (\%/km)$$

したがって、L km先の流量 Q_{out} は、次式で計算できる。

$$Q_{out}=Q_{in} \times (0.9421)^L$$

表5 水路ロス測定区間流量

測定日	上流側流量 Qin (m ³ /s)	下流側流量 Qout (m ³ /s)
1998/6/5	1.2148	1.1318
1998/6/15	1.8192	1.8017
1998/6/25	1.5813	1.3698
1998/7/6	1.8982	1.8153
1998/7/15	1.3562	1.2077
1998/7/25	1.7945	1.5204
1998/8/5	1.8456	1.5296
1998/8/15	1.8003	1.4441
Ave.	1.6638	1.4776

イエルタイ・ブロックは、大きく北側と南側のサブブロックに分かれており、各サブブロックは東側と西側のサブサブブロックに分かれている。したがって、用水系統は、南北の支線に別れ、さらに各サブブロックで、東西の二次支線に分かれる。ここで、先に求めた調査対象区間の水路損失率が、他の区間にも適用できると仮定し、8回の観測で得た3点の実測流量（取入口、南北分岐直後、北ブロック支線の二次支線への分岐直前）の平均値を用いて、圃場用水路を除く二次支線までの水路損失を試算した。この試算において、各水稲作付圃場への灌漑水量（圃場用水路への分水量）は、サブブロック内で均等に面積比率に応じて配分されるものと仮定している。この結果、イエルタイ水路取水口から二次支線まで（圃場用水路への分水直前まで）の水路損失は、27.7%と計算された。表4における水路損失は、この計算値を用いて計算したものである。

(6) 水管理の改善に向けての提案

上記の一連の研究から、シルダリア川下流域で普及している水稲を基本とした作付システムにおける、二次的塩類集積の形成機構が明らかになった。まず、その前段として、ウォーターロギングが起り、次の段階として塩類集積が始まるというのが、一般的なプロセスである。その根本的な原因のほとんどは、水・土壌管理に関することで、次のように要約できよう。

- a. 用水路からの大量の漏水
- b. 用水路の機能の低さに起因する大量の用水管理損失
- c. 排水路系の機能と管理の劣悪さ
- d. 広域水収支、塩収支の不均衡
- e. 水稲作付区への過剰灌漑
- f. 8圃式輪作体系の運用
- g. 粗雑な圃場管理と水管理
- h. TDSが1000 mgL⁻¹を超える河川水（灌漑用水）

したがって、これらの問題を解決することが、そのまま二次塩類集積防止対策となる。もちろんこれらの原因は、互いに関連し合っていたり、その背景には自然環境の制約に起因する場合が多いので、総合的な対策が基本となる。

①水路損失の軽減とウォーターロギング対策

水路からの大量の漏水の問題は、水路が土水路であるという構造上の問題のほかに、一般に送水距離が長いという要因も挙げられるが、これは地形が平坦なため重力灌漑を行うためには避けられない点である。また、シルダリア川は河床勾配が緩やかで、しかも河状係数（最大流量と最小流量の比）が大きいため、非常に蛇行し易いという特性を有している。そのため、送水距離が長くなっても、地形的に流況が安定したところに取水施設を設置しなければならないという制約も加わる。したがって、この問題の対策としては、次案のような施設の改良等投資を伴う対策が中心となるので、投資効率を前提とした評価が必要である。

- ・ポンプ灌漑を導入し、より近いところに水源を設置して、水路延長を極力短くする。
- ・重力灌漑を適用する場合は、目的地にできるだけ近く、かつ安定的な取水ができるよう取水施設を整備する。
- ・土水路のライニングもしくはパイプライン化（ポンプ灌漑の場合）
- ・ライニングが経済的に困難な場合は、施工時に破碎転圧工法など漏水を抑制する工法を採用する。
- ・土水路の場合、堆砂や雑草、水草、浮遊ごみ等により、著しく水路粗度が高くなり、通水能力が落ちる。そうなると必要水量を灌漑地域へ送水するのに、それ以上の取水が必要となり、漏水量の増加につながる。したがって、定期的な水路の管理が重要である。
- ・水路からの漏水に伴うウォーターロギングを抑止する方法として、バイオ排水の導入が考えられる。これは、水路沿いに緩衝帯をもうけ、そこに樹木を植林して漏水を吸引させることにより、地下水位を下げることである。この方法は地域の環境改善効果等も期待できる。対象樹木としては、ポプラなどが考えられる。

②用水路の管理施設の整備と管理技術の高度化

用水路の機能の低さに起因する用水管理損失の問題は、①とも密接に関わっており、一体的に対策を検討する必要がある。最大の問題は、水路中の流水をコントロールするためのゲートが、分岐点、分水点など最低限必要なところに、設置されていないか、もしくは設置されていても、老朽化していてほとんど機能していないことである。実際、調査対象農場では、水路の止水は大変な作業であり、その都度ブルドーザーで周辺の土砂を流水中に投入・盛土して簡易堰を作って行っていた。このことが、水路中の堆砂の原因となり、水路漏水を増加させる一因となっている。また、ゲートがないことにより、灌漑に必要な水量の他に、圃場への給水に必要な水頭を得るために、管理用水を上乗せして送水しており、灌漑効率を著しく低くしている。この実態は、上述の灌漑ブロックでの水収支調査の結果からも確認されている。この問題は、適切な箇所にしっかりした水位制御用ゲートを設置し、適正に管理することにより、大幅に改善できると考えられる。また、適正な管理を行うには、農民の理解と組織的な体制の整備が前提となる。

③排水路系の機能、管理体制の改善

排水路系の機能と管理の劣悪さは、灌漑ブロックでの水収支、塩収支の均衡を崩し、塩類をブロック内に集積させることになる。二次的塩類集積を防止するもっとも基本的な概念は、ブロック内に塩分が流入したら、それに相当する塩分量をブロックから排除し、全体的なバランスを保つことである。そのためには、排水路系の機能を向上させ、そしてその機能を低下させない適正な管理が必要である。特に、現在の排水路は堆砂がひどく、機能低下が著しい。排水路の塩分濃度（EC：2.6-4.4dSm⁻¹）の状況からも、地下排水が機能しているようには見受けられない。イエルタイ・ブロックは、農場内でもっとも排水システムがしっかりしており、圃場排水路の底標高は、圃場面標高より約1.8 m低くなっている。しかしながら、非灌漑期の地下水位は圃場面から約2.5 mであることを考えると、水路底標高をさらに0.7 m程度下げるのが望ましい。他のブロックについては、大規模な浚渫が必要である。また、排水路の両岸が農道として利用され、締め固めが進んでいることも、水稻区からの浸透水を遮断するため、地下排水の機能を大きく損ねている。この改善のためには、堤防（農道）の下に適度な間隔でパイプを埋設する等して、圃場からの浸透水の排水路への流出を促進する必要がある。

暗渠排水の採用は、土壤中の塩類を効率的に除去できる点で有効であるが、この地域の経済力から考えてコスト的に問題がある。また、高濃度の塩類が大量に土壤中に集積しているところで暗渠を敷設する場合には、それらの塩類が大量に流出することになり、下流域の水質を悪化させることになるので、十分な注意が必要である。今後、排水対策は下流域への影響を十分に検討した上で、決定すべきであり、その地区外への排出口の管理が重要になる。将来的に、灌漑ブロック単位でしっかりとした排水管理池を排水施設の末端に整備し、河川へ排水する際の水質基準を定める等の対策を、流域（関係国）全体で検討していく必要がある。

④圃場管理（水・土壌管理）の改善

上記 e.~g.は、互いに関連した問題であり、一体的に対策を検討する必要がある。これらを改良するためには、次のような改良案が考えられる。

- ・現在行われている8圃式輪作体系を、灌漑ブロック単位の8年輪作体系に変更する。同一ブロック内での水稲（湛水）区と畑作・休閑区の混在状態は、二次的塩類集積に拍車をかけることになる。したがって、同一ブロック内では、何れかに統一して作付を行うことが望ましい。
- ・圃場面の均平度を極力高めること。一般に、この地域では水稲のための湛水深を深く管理する傾向がある。これは倒伏防止、夜間の保温等栽培上の必要からきている面もあるが、均平作業の粗雑さから生じた、水のかかりにくい高位部の湛水に起因する面もある。したがって、均平作業の精度が上がれば、そのことにより湛水深を低く抑えることが可能となり、圃場での水適用効率は向上する。また、そのことにより水路の維持すべき水頭を少し下げることが可能となり、水路損失も改善される。
- ・塩分濃度の高い土壌での水稲作は、下層の可溶性塩類を上層に拡散させる傾向がある。したがって、このような土壌では水稲作は本質的に望ましくない。すなわち、湛水して止め水状態にしておくと、下方の塩分の影響で湛水の塩分濃度が高くなってしまふ。これを防ぐためには、掛流しの状態を維持する必要がある。このことが水稲作付区への過剰灌漑を必然的に誘発することになる。この地域の農地の土壌中には、もともと塩分の集積層が存在していたと考えられ、基本的には水稲作は避けるべきであろう。しかしながら、この地域の経済において米は重要な位置を占めており、農民の米に対する執着は非常に強いことから、水稲作を否定することは、非現実的である。水稲作を是認した上での節水管理を、強化していく必要がある。1つの方法として、代掻きや床締め等の浸透抑制工法が考えられるが、移流による塩分の下向きのフラックスと、拡散による上向きのフラックスが土性ごとにどう変化するかを、事前に明らかにしておかなければならない。今後、この点を数値実験等で明らかにし、代掻き等の効果を定量的に明らかにする必要がある。また、下層に塩類が集積している圃場で、部分的に透水性のよい土性が表面から塩類集積層まで連続的に存在する場合、可溶性塩類がそこから湧出するため、作物に被害を及ぼす。このようなところでは、その土壌を粘質土と置換あるいは混合して、透水性を下げる等の対策が必要である。
- ・農民の水に対する価値感を是正する必要がある。水価があまりにも安価過ぎる。農民の節水努力を促す適正な水価に改正すべきである。

⑤流域の水利用者間の取水、排水に関する国際協定の締結

実際、この対策がもっとも重要で急を要する事項と考えられる。TDSが 1000 mgL^{-1} を超える河川水（灌漑用水）を大量に灌漑農地へ供給することは、そのまま大量の塩類を農地へ供給することであり、塩類集積の直接的原因となっている。河川水の塩分濃度は、下流側ほど高くなっており、それは河川水が上流側から繰り返し反復利用されてきたことによる。上流側での取水が大量であるほど、また排水量が多く、その塩分濃度が高いほど、下流側の水質は劣悪になる。したがって、流域関係国が共存していくためには、早急に取水と排水についての細かい規定を協議して、協定を取り交わし、それに基づいた適切な流域水資源管理を行う必要がある。

5. 本研究により得られた成果

本研究で得られた成果を整理すれば、次のとおりである。

- 1) 二次的塩類集積が問題になっているシルダリア川下流域における、地表水、地下水の水質特性が明らかになった。特に、地表水においては、河川水、灌漑水、圃場湛水、排水ごとにその特徴が明らかになった。また、EC値とTDSの間に明瞭な線形関係が認められた。
- 2) 広域水収支および塩分収支調査から、その実態が明らかとなった。大量の水消費が行われていること、そしてその量は作物の必要水量ではなく、用水路の送水能力で決まること、塩分の残留がブロック内およびその周辺で認められ、年々累積していること、さらに作付けパターンの前年に対する変化が、塩分収支に大きく影響すること、等が明らかとなった。
- 3) 下層に塩類集積土壌、あるいは塩性の高い地下水が存在する圃場での水稲作による湛水は、より深い層の塩分を上方へ拡散させ、浅い層の塩分濃度を高めるため、リーチング効果は期待できないことが明らかになった。また、湛水の塩分濃度の上昇を抑えるため、灌漑水は掛け流しの状態で絶えず補給する必要がある。そのことが大量取水の主な原因となっている。
- 4) 排水路への地下排水がほとんど機能していない。これは、排水路の両岸が農道として利用され

ているため、締め固めが進んだことによる。水稻区からの浸透水は、排水路の下を通過して畑作区へ移動し、その地下水位を高めている。そのことが畑作区への塩分集積を加速させていると考えられる。したがって、現整備水準のもとでは、灌漑ブロック内での8圃式輪作体系の適用は、望ましくない。

5) 田面均平度の実態とそれに伴う圃場管理用水量の増大、水路からの漏水量の実態等が明らかになった。

6) これら一連の研究から、水管理に起因する二次的塩類集積の形成機構が明らかになった。さらに、その成果をもとに二次塩類集積防止のための水管理改善対策を提案した。

引用文献

- 1) Dmitriev, L. N. (1995) : The problem of agricultural crop diversity in the lower part of the Syr Darya Basin, International Symposium on Land and Water Management of the Aral Sea Basin, JSIDRE.
- 2) Micklin, P. P. (1991) : The water management crisis in Soviet Central Asia, Center for Russian and East European Studies, University of Pittsburgh, 120p.
- 3) FAO (1989) : Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper, 29 (Rev.1), p.8.

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ①大庭達哉, 北村義信, 矢野友久 : 第52回農業土木学会中国四国支部講演会 (1997)
「乾燥地水田灌漑地域の広域水動態—カザフスタン・クジルオルダ州のホルホースの事例—」
- ②北村義信, 矢野友久, 大庭達哉 : 平成10年度農業土木学会大会講演会 (1998)
「乾燥地の輪作灌漑農地における広域水収支と塩分収支—カザフスタン・クジルオルダ州における事例—」
- ③北村義信, 矢野友久, 安田繁 : 第10回日本沙漠学会学術大会 (1999)
「乾燥地の水稻作付農地における水・塩動態」
- ④安田繁, 北村義信, 矢野友久 : 平成11年度農業土木学会大会講演会 (1999)
「乾燥地の輪作灌漑農地における広域水・塩収支について」(予定)

(2) 論文発表

- ① Wang, S., Kitamura, Y. and Yano, T. (1998) : Salt accumulation and reclamation of soils in Kzyl-Orda, Kazakstan, Proc. International, Symposium on Arid Region Soil, Izmir/Turkey, pp.120-125.
- ② Kitamura, Y., Yano, T. Yasuda, S. and Oba, T. : Water and salt balance in an irrigation block under rice-based cropping system in Central Asia - Research on water management to prevent secondary salinization in arid land (I) -, Trans. Of JSIDRE (投稿予定)
- ③ Kitamura, Y., Yano, T. and Yasuda, S. : Water and salt behavior in rice fields of salt-affected soils under flood irrigation - Research on water management to prevent secondary salinization in arid land (II) -, Trans. Of JSIDRE (投稿予定)