

中央アジア塩類集積灌漑農地における
カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の適用性と効果に関する研究
(Studies on applicability and effect of shallow subsurface drainage
with cut-drain for salinized irrigated land in Central Asia)

奥田 幸夫

2019

目次

第1章 緒言.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 灌漑農業における塩類集積.....	1
1.1.2 持続可能な開発のための目標.....	3
1.1.3 灌漑農業の今後の見通し.....	3
1.1.4 土壌劣化と塩類集積.....	5
1.1.5 中央アジア乾燥地の灌漑開発と塩類集積.....	8
1.2 中央アジア乾燥地における塩類集積対策の研究.....	10
1.2.1 研究開発に携わる関係機関.....	10
1.2.2 塩類集積対策に関する研究内容.....	11
1.3 研究の目的.....	14
1.4 本論文の構成と概要.....	14
第2章 研究対象地域の概要.....	16
2.1 自然条件.....	16
2.1.1 地理的概要.....	16
2.1.2 気候.....	16
2.2 社会・行政.....	17
2.3 農業.....	18
2.3.1 農業の位置付け.....	18
2.3.2 農業生産構造.....	19
2.3.3 灌漑排水の整備.....	21
2.3.4 水利組織.....	22
2.4 塩類集積の現状と対策.....	23
2.4.1 現地政府の対策事業.....	23
2.4.2 塩害対策技術の構成.....	25
2.5 まとめ.....	30
第3章 三次水路レベルの水と塩分の観測.....	32
3.1 目的.....	32
3.2 ミルザバット地区 WCA の概要.....	32
3.3 分析方法.....	32
3.3.1 観測値の入手.....	32
3.3.2 分析方法.....	33
3.4 分析結果.....	34
3.4.1 WCA への水配分実績.....	34
3.4.2 綿花および小麦の栽培実績.....	36
3.4.3 土壌塩分濃度.....	37
3.4.4 地下水の水位および塩分濃度.....	39

3.4.5	土壌塩分濃度の影響因子の評価.....	42
3.4.6	垂直排水.....	44
3.5	まとめ.....	47
第4章	圃場レベルの水と塩分の観測.....	49
4.1	目的.....	49
4.2	研究対象圃場.....	49
4.3	調査・分析方法.....	52
4.3.1	調査・分析の内容.....	52
4.3.2	排水施設の調査方法.....	52
4.3.3	地下水・土壌の観測方法.....	53
4.4	調査・分析結果.....	54
4.4.1	排水施設の現状と問題点.....	54
4.4.2	排水路・暗渠排水と地下水の関係.....	59
4.4.3	排水路・暗渠排水と土壌塩分濃度との関係.....	64
4.4.4	地下水位と土壌塩分濃度のまとめ.....	66
4.4.5	水・塩分収支.....	67
4.4.6	垂直排水が地下水位に及ぼす影響.....	71
4.5	まとめ.....	76
第5章	カットドレーンを活用した浅層暗渠排水.....	78
5.1	カットドレーンの活用の背景.....	78
5.2	カットドレーンの概要.....	79
5.2.1	カットドレーンの開発経緯.....	79
5.2.2	湿潤な圃場における施工の効果.....	80
5.2.3	施工方法の特徴.....	80
5.3	乾燥地におけるカットドレーンの試行.....	82
5.3.1	導入事前評価.....	82
5.3.2	施工試験の結果.....	83
5.4	ウズベキスタンにおけるカットドレーンの施工性.....	84
5.4.1	研究の目的.....	84
5.4.2	研究対象圃場.....	85
5.5	試験方法.....	85
5.5.1	試験圃場の土壌の物理性試験.....	85
5.5.2	空洞成形に適した土壌水分状態の把握.....	86
5.6	試験結果.....	87
5.6.1	試験圃場の土壌の物理性.....	87
5.6.2	空洞成形に適した土壌水分状態.....	90
5.6.3	カットドレーンの施工深さ.....	93
5.7	まとめ.....	93
第6章	乾燥地におけるカットドレーン適用上の課題と対策.....	95
6.1	目的.....	95

6.2	乾燥地におけるカットドレーンの課題.....	95
6.2.1	空洞部の崩落.....	95
6.2.2	選択流抑制対策の必要性.....	98
6.3	選択流の浸透試験.....	99
6.3.1	試験目的.....	99
6.3.2	試験方法.....	99
6.3.3	試験結果と考察.....	99
6.4	選択流の発生抑制手法に関する試験.....	101
6.4.1	試験目的.....	101
6.4.2	試験方法.....	101
6.4.3	試験結果と考察.....	102
6.5	まとめ.....	107
第7章	低コスト浅層暗渠排水の除塩効果.....	109
7.1	試験目的.....	109
7.2	試験方法.....	109
7.2.1	試験圃場の概要.....	109
7.2.2	測定および評価方法.....	111
7.3	試験結果と考察.....	114
7.3.1	地下水位への影響.....	114
7.3.2	リーチング前後の水収支.....	115
7.3.3	リーチング前後の塩分収支.....	119
7.3.4	土壌塩分濃度への影響.....	121
7.3.5	綿花収量.....	122
7.4	まとめ.....	122
第8章	総合考察.....	124
8.1	ウズベキスタンにおける塩類集積リスク管理.....	125
8.2	圃場レベルから見た排水対策の現状とその効果.....	126
8.3	乾燥地におけるカットドレーンの適用性.....	128
8.4	カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の効果.....	129
8.5	浅層暗渠排水の導入上の留意点.....	130
8.6	排水対策に関する農家の認識.....	131
8.7	浅層暗渠排水の今後の研究課題.....	132
第9章	摘要.....	134
9.1	日本語摘要.....	134
9.2	英語摘要.....	136
	付属資料.....	139
	引用文献.....	144
	謝辞.....	151
	学位論文の基礎となる学会公表論文.....	152

図表一覧

第1章

Fig. 1-1	世界の穀物の収穫面積と生産量および人口の推移（1961年～2016年）	..4
Fig. 1-2	世界の農地面積の推移（1961年～2015年）	.....4
Fig. 1-3	世界の土壌劣化評価図	.....6
Fig. 1-4	世界の塩性土壌のタイプ・区分別分布	.....6
Fig. 1-5	世界の塩類土壌のタイプ別分布	.....7
Fig. 1-6	人為的要因による塩類化土壌のレベル別面積	.....8
Table 1-1	中央アジア地域の灌漑排水整備面積と塩類集積面積	.....10

第2章

Fig. 2-1	ウズベキスタンの灌漑農地と研究対象地域	.....16
Fig. 2-2	シルダリア州の気温と降水量（2006年～2015年）	.....17
Fig. 2-3	シルダリア州の行政区	.....18
Fig. 2-4	ウズベキスタンの地目別面積割合	.....19
Fig. 2-5	ウズベキスタンのフェルメル数と経営面積の変化（1997年～2011年）	...20
Fig. 2-6	シルダリア州のフェルメル数と経営面積の変化（2000年～2015年）	....21
Fig. 2-7	ウズベキスタンの灌漑農地面積の変化（1913年～2010年）	.....22
Fig. 2-8	用水路の管理状態の例	.....23
Fig. 2-9	ウズベキスタンの塩類集積率による区分図	.....24
Fig. 2-10	ウズベキスタン各州の土壌塩類集積区分別面積（2014年）	.....24
Fig. 2-11	シルダリア州各行政区の土壌塩類集積区分別面積（2014年）	.....25
Fig. 2-12	シルダリア州内の圃場に析出した塩類	.....25
Fig. 2-13	塩害と対策の構成	.....26
Fig. 2-14	シルダリア州の灌漑排水整備の変化（1975年～2007年）	.....27
Fig. 2-15	暗渠排水の建設と維持管理用機材	.....27
Fig. 2-16	シルダリア州の垂直排水施設	.....28
Fig. 2-17	垂直排水の施設数と電力消費量の変化（1970年～2002年）	.....29
Fig. 2-18	シルダリア州内のリーチングの実施状況	.....30
Table 2-1	シルダリア州のリーチング用水量	.....30
Table 2-2	シルダリア州の圃場勾配別リーチング区画規模	.....30

第3章

Fig. 3-1	シルダリア州の灌漑排水網	.....33
Fig. 3-2	ミルザバット地区のWCA区域	.....33
Fig. 3-3	ミルザバット地区の月別配分水量	.....35
Fig. 3-4	WCA別年配分水量	.....35

Fig. 3-5	WCA 別平均作物栽培面積率と収量.....	37
Fig. 3-6	HGME による土壌塩分濃度区分図.....	38
Fig. 3-7	土壌塩分濃度の変化（2012 年～2014 年）.....	38
Fig. 3-8	リーチング時の水配分と土壌 E _{Ce} の関係.....	39
Fig. 3-9	HGME による地下水位および地下水 TDS 区分図.....	40
Fig. 3-10	地下水位の変動（2012 年～2014 年）.....	41
Fig. 3-11	地下水塩分濃度の変動（2012 年～2014 年）.....	41
Fig. 3-12	リーチング時の水配分と土壌 E _{Ce} , 地下水位および地下水 TDS.....	43
Fig. 3-13	ミルザバット地区の垂直排水位置図.....	44
Fig. 3-14	垂直排水の月別電力消費量（2011 年～2014 年）.....	45
Fig. 3-15	電力消費量と地下水位（2012 年～2014 年）.....	45
Fig. 3-16	地下水下降期の電力消費量と水位変化の関係.....	46
Fig. 3-17	地下水上昇期の電力消費量と水位変化の関係.....	46
Fig. 3-18	垂直排水の電力消費量と地下水位の変化（2012 年）.....	47
Fig. 3-19	排水条件別の土壌 E _{Ce} 増減比（2012 年～2014 年）.....	47
Table 3-1	ミルザバット地区 WCA の概要（2013 年）.....	34
Table 3-2	10 月時点の土壌塩分濃度に関する重回帰分析（2012 年～2014 年）.....	43

第 4 章

Fig. 4-1	研究対象 WCA の位置図.....	50
Fig. 4-2	研究対象 WCA の用排水系統図.....	51
Fig. 4-3	Y 圃場周辺図と排水路縦断図.....	56
Fig. 4-4	B 圃場周辺図と排水路縦断図.....	57
Fig. 4-5	排水路の浚渫事業の様子.....	58
Fig. 4-6	選定した垂直排水位置図.....	58
Fig. 4-7	地下水位と Y 圃場周辺の塩分濃度の変化（2010 年～2012 年）.....	60
Fig. 4-8	地下水位と B 圃場周辺の塩分濃度の変化（2010 年～2012 年）.....	60
Fig. 4-9	Y 圃場の観測井位置図.....	61
Fig. 4-10	Y 圃場各地点の地下水位の年変化（2010 年 3 月～2011 年 2 月）.....	61
Fig. 4-11	B 圃場の観測井位置図.....	63
Fig. 4-12	B 圃場各地点の地下水位の年変化（2010 年 3 月～2011 年 2 月）.....	63
Fig. 4-13	吸水渠近傍の地下水位の横断図.....	64
Fig. 4-14	用排水路間の地下水位の縦断図.....	64
Fig. 4-15	Y 圃場各地点の土壌 TDS の変化（2009 年 12 月～2011 年 3 月）.....	65
Fig. 4-16	B 圃場各地点の土壌 TDS の変化（2009 年 12 月～2011 年 3 月）.....	66
Fig. 4-17	地下水位と土壌 E _{Ce} の関係.....	67
Fig. 4-18	Y 圃場排水路の流出水量と塩分量（2012 年）.....	68
Fig. 4-19	B 圃場排水路の流出水量と塩分量（2012 年）.....	68
Fig. 4-20	研究対象 WCA の月別配分水量.....	68

Fig. 4-21	排水路流出水における EC _w と TDS の関係.....	69
Fig. 4-22	地下水上昇期における垂直排水運転時の地下水位の変化	71
Fig. 4-23	垂直排水運転時の地下水位の下降と回復	73
Fig. 4-24	月別深層地下水位の変化と揚水量	75
Fig. 4-25	月別表層地下水位の変化, 推奨地下水位および揚水量	75
Table 4-1	WCA および研究対象圃場の概要.....	50
Table 4-2	垂直排水施設および観測井の概要.....	58
Table 4-3	試験圃場内の土壌塩分.....	66
Table 4-4	水と塩分の年間収支 (2012 年)	69
Table 4-5	垂直排水の運転実績.....	74
Table 4-6	シルダリア州垂直排水の推奨地下水位.....	75

第 5 章

Fig. 5-1	穿孔機とカットドレーンの空洞部	79
Fig. 5-2	カットドレーン空洞部の成形過程	79
Fig. 5-3	カットドレーンの穿孔方法	81
Fig. 5-4	カットドレーンに適する土性	81
Fig. 5-5	アフメドフ WCA 内の調査農場位置図.....	82
Fig. 5-6	A 圃場の土壌断面	83
Fig. 5-7	A 圃場の土壌の粒径加積曲線	83
Fig. 5-8	A 圃場内の試験施工	84
Fig. 5-9	B 圃場内の試験施工	84
Fig. 5-10	シルダリア州内の研究対象 WCA 位置図.....	85
Fig. 5-11	各試験圃場の土壌の乾燥密度	87
Fig. 5-12	各試験圃場の飽和透水係数	88
Fig. 5-13	各試験圃場の塑性限界と液性限界	88
Fig. 5-14	A 圃場の pF 水分特性曲線.....	88
Fig. 5-15	Y 圃場の pF 水分特性曲線.....	89
Fig. 5-16	B 圃場の pF 水分特性曲線	89
Fig. 5-17	カットドレーン施工時の土壌水分	92
Fig. 5-18	切断刃の変形.....	93

第 6 章

Fig. 6-1	カットドレーンからの流出と排水口付近の崩落	96
Fig. 6-2	A 圃場のカットドレーンの断面	97
Fig. 6-3	Y 圃場のカットドレーンの断面	97
Fig. 6-4	B 圃場のカットドレーンの断面	97
Fig. 6-5	含水比分布の変化 (2015 年 3 月~7 月)	98
Fig. 6-6	空洞部崩落の概要図	98

Fig. 6-7	シリンダーインテークレート試験状況	100
Fig. 6-8	シリンダーインテークレート試験結果	100
Fig. 6-9	浸透試験計画図	102
Fig. 6-10	各灌水条件下のカットドレーンの施工状況	103
Fig. 6-11	各灌水深の土壌水分	104
Fig. 6-12	各試験区の選択流発生開始までの時間	105
Fig. 6-13	浸透時間 (t) と積算浸透量 (D)	106
Fig. 6-14	湛水維持区の浸透能	107

第7章

Fig. 7-1	アフメドフ WCA 内の試験圃場位置図	110
Fig. 7-2	試験圃場の計画概要	111
Fig. 7-3	地下水位の変化と降水量 (2016年12月～2017年4月)	116
Fig. 7-4	暗渠区の流出・流入量 (2016年12月～2017年4月)	116
Fig. 7-5	リーチング前後の土壌水分の変化	118
Fig. 7-6	排水・灌漑水の EC _w と TDS の相関	120
Fig. 7-7	土壌 EC _e と TDS _{soil} の相関	120
Fig. 7-8	リーチング前後の土壌塩分濃度の変化	121
Fig. 7-9	綿花収量調査結果 (2017年)	122
Table 7-1	リーチング前後の水収支	119
Table 7-2	リーチング前後の塩分収支	121

第8章

Table 8-1	カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の施工費	131
-----------	------------------------------	-----

略語標

略称	正式名称	日本語名
ADB	Asian Development Bank	アジア開発銀行
BISM	Basin Irrigation System Management	流域灌漑システム管理局
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	国連食糧農業機関
HGME	Hydro-geology Melioration Expedition	水文・地質土地改良事務所
ISD	Irrigation System Department	灌漑システム部
IWMI	International Water Management Institute	国際水管理研究所
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
MAWR	Ministry of Agriculture and Water Resources	農業・水資源省
RIIWP	Research Institute of Irrigation and Water Problems	灌漑・水問題研究所
SDC	Swiss Agency for Development and Cooperation	スイス開発協力局
TIIM	Tashkent Institute of Irrigation and Melioration	タシケント土地改良大学
UNES	ロシア語 : <u>U</u> prvaleniye <u>N</u> asosnyh stantsiy, <u>E</u> nergetiki i <u>S</u> vyazi (Управление насосных станций, энергетики и связи) (英語名 Department of Pump Stations, Energy and Communications)	ポンプ・エネルギー・通信局
USAID	United States Agency for International Development	米国国際開発庁
WB	World Bank	世界銀行
WCA	Water Consumers' Association	水消費者組合
WUA	Water Users' Association	水利組合

第1章 緒言

中央アジアの乾燥地^{1*)}において、20世紀半ばから大規模な灌漑開発が進み、土壌への二次的塩類集積が生じ、農地に塩害をもたらしてきた。塩類集積とは可溶性塩類が土壌の表層に集積することであり、自然的要因と人為的要因に分けることができる³⁾。土の生成過程、構成する鉱物、降水、地下水の流れ、海水の飛散浸入、津波や地盤沈下による海水浸入などが自然的要因になる。過剰な灌漑や森林伐採などに起因する地下水位の上昇、塩分濃度の高い灌漑水の供給、農地の排水不良などが人為的要因になる⁴⁾。ここでは後者を二次的塩類集積と定義する。本研究では、中央アジアのウズベキスタンで得られた土壌・水文データに基づき、同地域の塩類集積（以下、特に断わりのない限り「二次的塩類集積」のこととする。）の現状とその対策に係る課題を明らかにする。その後、課題解決に向けた新たな塩類集積対策として「カットドレーン^{2*)}」を活用した浅層暗渠排水を提案し、その適用上の課題、対策、効果を明らかにする。

カットドレーンは、近年、日本で開発された穿孔暗渠機により形成される無資材型暗渠であり、乾燥地での使用は初めての試みである。

本章では、研究の背景として、乾燥地において灌漑農業がもたらしてきた塩類集積の実態を概観し、食料の持続的・安定的供給における農地の現状、農業生産を確保するための塩類集積対策の必要性を述べる。次いで、研究対象地域における関連機関の塩類集積対策に関する研究状況を整理し、最後に本論文の目的および構成を述べる。

1.1 研究の背景

1.1.1 灌漑農業における塩類集積

「塩」は地球上の生物にとって不可欠な物質である。人類にとって、塩は「サラリー」の語源とも言われる資源であるが、一方では様々な面で被害をもたらす物質でもある。

古くは、イラク中央および南部に広がるチグリス川とユーフラテス川の沖積平野の灌漑

^{1*)} 本研究論文では、国連環境計画 (UNEP) およびミレニアム生態系評価 (Millennium Ecosystem Assessment : MA) の定義に従い、乾燥度指数 (年間降水量を可能蒸発散量で割った比) が 0.65 以下を乾燥地とする¹⁾。乾燥地は、極乾燥 ($AI < 0.05$)、乾燥 ($0.05 \leq AI < 0.2$)、半乾燥 ($0.2 \leq AI < 0.5$) および乾燥半湿潤 ($0.5 \leq AI < 0.65$) の4つに区分される²⁾。

^{2*)} 当初「カッティングドレーン」と表されていたが、ここでは国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 (農研機構) の成果情報に基づき「カットドレーン」を使用する。

農業において塩による被害と考えられている記録がある。土壌に塩分が含まれたこの地域では、紀元前 3500 年頃の小麦と大麦の栽培比率はほぼ等しかった。紀元前 2100 年頃には耐塩性の強い大麦が多くなり小麦の栽培比率は 2%まで減少し、紀元前 1700 年頃には小麦が完全に栽培されなくなった。収量の減少も含めたこの変化は塩類集積によるものと考えられている⁵⁾。また、同地域では紀元前 3100 年頃にシュメール人による人類最古の都市文明があり、その遺跡で発掘された粘土板に耕作地が白くなるなどの記述がある⁶⁾。紀元前 1800 年頃までに多くの都市が荒廃しており、それが塩害によると断定した証拠は明らかにされていないものの、塩が農業生産環境の悪化をもたらし、都市文明の滅亡の一因となったことは十分に考えられる⁷⁾。

古代の塩類集積のタイムスケールは、数百年から千年という単位で非常に緩やかな変化であり、河川の氾濫を利用しながら土壌の肥沃度を保ち、塩類を洗い流し、バランスを維持した農業が営まれていた。このような農業形態は、近代のエジプトのナイルデルタを中心とした地域にも見る事ができた。ナイル河谷で約 5000 年前に堤防と洪水導入用の水路が建設され、ベイスン灌漑^{3*)}の下、生産性が維持されてきた⁹⁾。その後、1800 年代半ばからナイル川の水利土木工事が進められ、ベイスン灌漑は徐々になくなり周年灌漑に移行し、1964 年にアスワン・ハイ・ダムによりナイル川がせき止められて以来、下流に洪水は発生していない¹⁰⁾。一方、灌漑水量の増大によりナイルデルタの地下水位が上昇し、1900 年代初めには湛水被害と塩害が発生してきた。1970 年代後半に入ると塩害状況はさらに深刻化していった⁷⁾。5000 年続いたベイスン灌漑から周年灌漑に移行したわずか 150 年の間に作物生産の増という大きな便益を得た反面、農地に対する大きなダメージも生み出したのである。

本論文の研究対象地域である中央アジアでは、エジプトの事例よりさらに短い数十年というタイムスケールで大規模な塩類集積が発生している。アラル海流域の塩類集積は人為的な要因による近年の最大の環境変化である¹¹⁾。中央アジアだけでなく、現在も世界中の地域で水文バランスが改変され、塩類集積問題が進行している¹²⁾。塩類集積は、農業生産の持続発展性に対する大きな脅威であり、人類が解決すべき重要な課題である。

^{3*)} エジプトにおけるベイスン灌漑の形態は、洪水期の水を耕地に引き入れ、2~3 カ月貯留させ、その後、河川水位の低下を待って水を河川に戻し、耕作できる程度まで排水した後、作付けを開始するものである⁸⁾。

1.1.2 持続可能な開発のための目標

世界人口は 1970 年から 2010 年までの 40 年間で 32 億人増加したが、近年の伸び率は緩やかになっており、現在、76 億人となっている。国連による世界人口予測（2017 年改訂版）によれば、2030 年には 86 億人、2050 年 98 億人、2100 年 112 億人に達すると予測している¹³⁾。このような人口状況の中、48 億人（2013 年時点）が 1 日 10 ドル以下の収入で暮らし、貧困や飢餓に苦しむ人々の数は今なお多い¹⁴⁾、¹⁵⁾。「2030 年までに飢餓を終わらせる」ことは、持続可能な開発のための目標（SDGs）^{4*)}の一つである。世界は 2016 年から 2030 年までの 15 年間で人間、地球、繁栄、平和そしてパートナーシップの観点の課題を相互に関連させつつ、SDGs の達成を目指している。「一人も取り残していかない」ことが誓われ、世界中が SDGs の達成に取り組んでいる¹⁶⁾。しかし、食料不足や慢性的な栄養不足に苦しむ人々の数は、2016 年 8.04 億人から 2017 年 8.21 億人に増加している。さらに、命にかかわるような飢餓に晒されている人々は 2015 年 8 千万人、2016 年 1.08 億人、2017 年には 51 カ国 1.24 億人と増加しているのが現状である¹⁷⁾。食料・栄養安全保障を今後どのように達成していくかが大きな課題である。

1.1.3 灌漑農業の今後の見通し

世界の土地面積は 130 億 ha あり、そのうち、耕地と永年作物栽培を含む全農地面積は 15.9 億 ha（2015 年）である。今後利用可能な農地面積として「適地は 32 億 ha（森林・保護区除き 14 億 ha）ある」と「もはや開発農地は存在していないか非常に少ない」の 2 つの意見がある。FAO の予測では、耕地面積は、2005 年から 2050 年まで先進国で 0.28 億 ha 減少し、途上国で 1.07 億 ha 拡大すると予測している¹⁴⁾。しかし、この予測には土地の劣化がもたらす農業生産の低下は考慮されていない。土地の劣化と人口増を考慮すると、毎年 15 百万 ha の新たな農地が必要になり、2005 年をベースとすると 2050 年までには少なくとも 3～10 億 ha の農地の拡大が必要になるという報告もある¹⁸⁾、¹⁹⁾。

1961 年から 2016 年までの 55 年間、世界の人口、穀物の収穫面積、生産量は、それぞれ 2.4 倍、1.1 倍、3.2 倍に増加してきた（Fig. 1-1）。収穫面積は微増であり、単収の伸びが生産量を上げ、増加人口の食料需要に対応してきたことがうかがえる。この間、農地面積は

^{4*)} 2015 年、国連サミットにおいて「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が採択され、先のミレニアム開発目標（MDGs）の残された課題をベースに人間、地球および繁栄のための行動計画として、17 の持続可能な開発のための目標（SDGs）と 169 のターゲットが示されている。

2.1 億 ha 増加し、増加分の 80%は灌漑農地である (Fig. 1-2). 灌漑農地の面積は年平均 1.4% 程度の伸び率であったが、最近 10 年間は 1%以下が続き、増加率は減少している。灌漑農地 3.3 億 ha (2015 年) は全農地面積の 21%を占め、作物生産量の 44%、穀物生産量の 42% を担っている。途上国では作物生産量の 49%、穀物生産量の 60%を占め、灌漑農地は農業生産に大きな役割を果たしている¹⁴⁾。

国際機関などによる今後の世界の食料需給見通しでは、緩やかな人口の伸びに対して、耕地面積の増加、単収の増加、耕地利用率の向上により対応できるとしている。地球温暖化の影響は、低緯度地域を除けば、農業生産への悪影響は必ずしも明確ではなく、中長期の分析では、大幅な食料不足は生じないとの予測もある。しかし、それらの予測は、農業

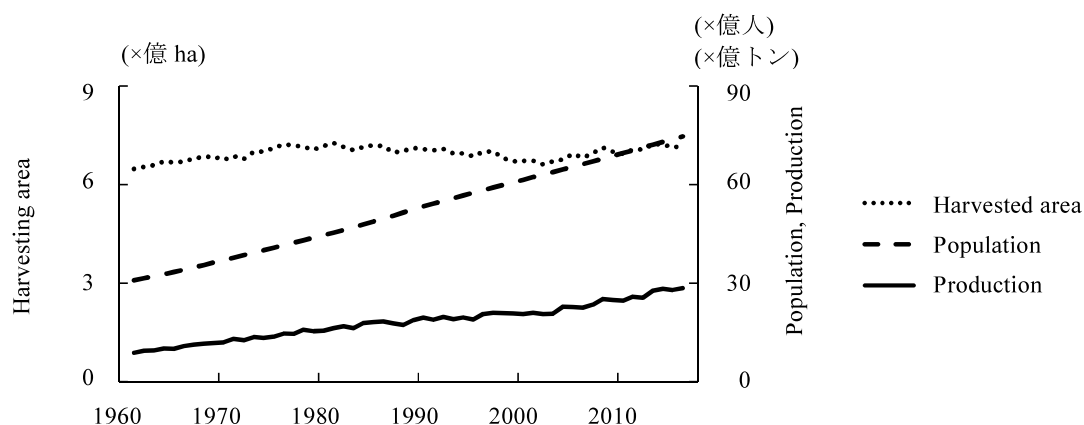
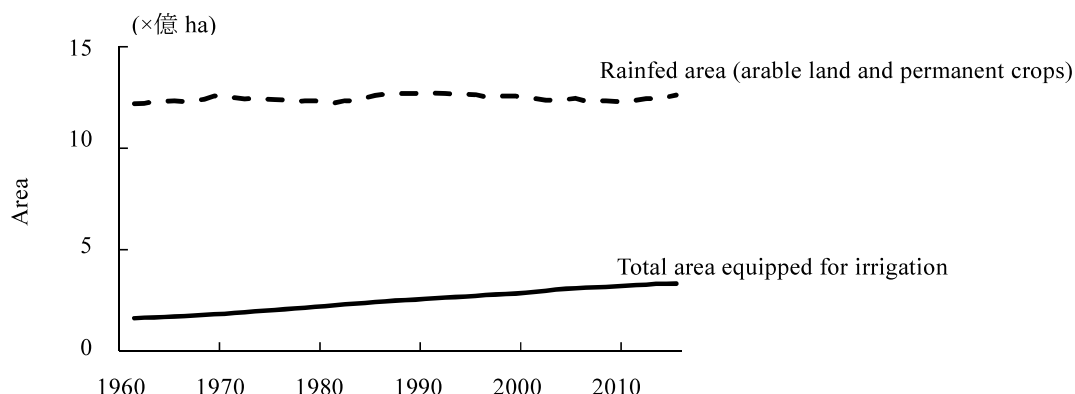


Fig. 1-1 世界の穀物の収穫面積と生産量および人口の推移 (1961 年～2016 年)
Changes in the world's harvested area, production of cereals, and population (1961-2016)

Source: FAOSTAT, Access date: Aug. 25th, 2018



注) 天水農業の面積は耕地面積 (単年作物+永年作物) と灌漑面積の差

Fig. 1-2 世界の農地面積の推移 (1961 年～2015 年)
Changes in the world's arable land area (1961-2015)

Source: FAOSTAT, Access date: Aug. 25th, 2018

投資や技術開発が今後も続くことを前提にしたものである²⁰⁾。後述する土壌の劣化に伴う耕作放棄地の増加だけでなく、近年、過去に例をみない災害や異常気象なども頻発しており、SDGsの達成のため生産機能が低下している農地にも目を向けることが求められる²¹⁾。特に、長年に亘って多大な投資がなされてきた灌漑農地は、既に農業生産基盤として農地・灌漑排水施設が配置されており、新規に灌漑開発をするよりも低コストとなる可能性が高い⁷⁾。

1.1.4 土壌劣化と塩類集積

Oldmanらは、Global Assessment of Soil Degradation Project (GLASOD)の成果に基づき、人為的な要因による土壌劣化面積を約20億haと推定している。その内、水食による劣化10.9億ha、風食による劣化5.5億ha、ウォーターロギングや塩類集積を含む化学的劣化2.4億haが示されている (Fig. 1-3)²²⁾。ウォーターロギングは、過剰な灌漑、浸み出し、不適切な排水によって地表面が湛水状態になることや表層土が水で飽和ないしは飽和に近い状態になることを言い、乾燥地では、土壌の塩類化の前兆で植物の生長を阻害する³⁾。乾燥地の土壌劣化は10億haと推定されている²³⁾。15億人以上がこれら劣化した農地を暮らしの支えとしている²⁴⁾。劣化面積の推定値についてはほかにも異なる数値が報告されている。信頼できる統計データが限られ、土壌劣化の定義や区分にも違いがあるが、土壌の劣化は地球規模の環境課題と言える。

塩類化面積にも幅があり、自然のおよび人為的な要因を合わせて、Harmonized World Soil Database (HWSD)によれば、11.3億ha（うち、塩性土6.8億ha、ソーダ質土2.9億ha、塩性ソーダ質土1.6億ha）^{5*)}と推定されている (Fig. 1-4)²⁶⁾。一方、World Reference Base (WRB) soil classificationは4.0億ha（塩性土2.6億ha、ソーダ質土1.4億ha）と推定している (Fig. 1-5)²⁾。

^{5*)} 塩類土壌は、土壌の飽和溶液電気伝導度 (ECe, mS cm⁻¹), 土壌の交換性ナトリウム率 (ESP, %), 土壌のpHから以下に分類される。

塩性土壌 (saline soil) : ECe >4, ESP <15, pH <8.5

ソーダ質土壌 (sodic soil) : ECe <4, ESP >15, pH >8.5

塩性ソーダ質土壌 (saline-sodic soil) : ECe >4, ESP >15, pH >8.5

旧ソ連などの塩類土壌の分類として、ソロンチャック (solonchak), ソロネッツ (solonets) があり、前者が上記の塩性土壌、後者がソーダ質土壌および塩性ソーダ質土壌に対応している²⁵⁾。

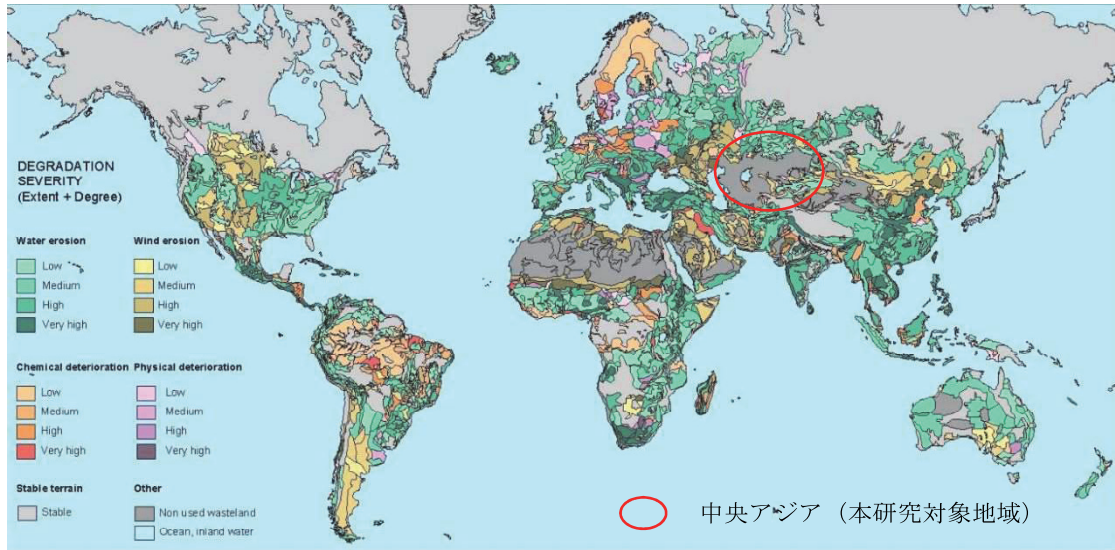


Fig. 1-3 世界の土壌劣化評価図

Map of the global assessment of soil degradation

Source: ISRIC-World soil information

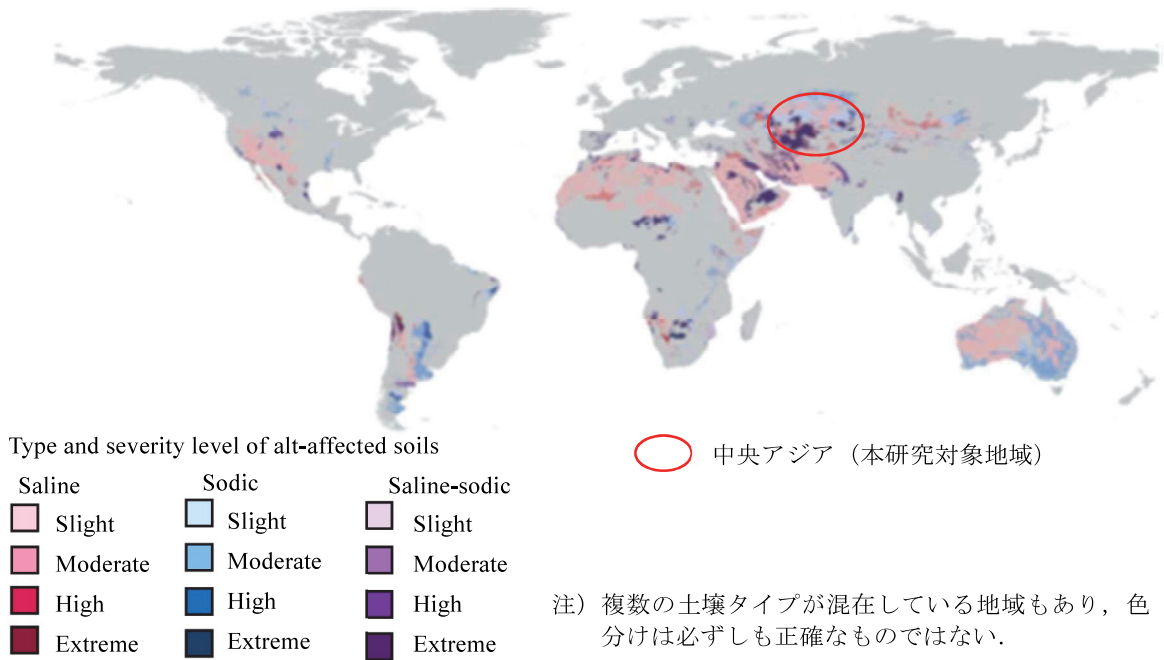
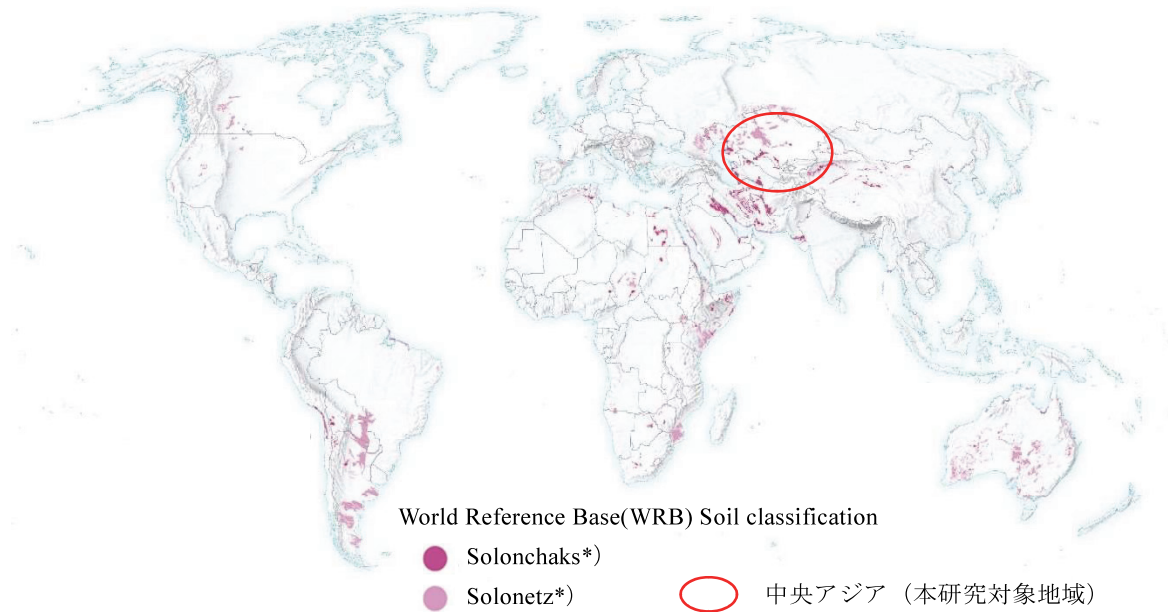


Fig. 1-4 世界の塩性土壌のタイプ・区分別分布

Global salt-affected soils by type and severity

Source: Harmonized World Soil Database (HWSD)²⁶⁾



*) 世界土壌資源照合基準では、強度に塩類の集積した土壌をソロンチャック (Solonchaks)、塩類の影響下でアルカリ化が見られる土壌をソロネッツ (Solonetz) に分類している²⁷⁾。

Fig. 1-5 世界の塩類土壌のタイプ別分布
Global salt-affected soils by type

Source: World Atlas of Desertification

人為的な要因による塩類集積面積は灌漑面積の 20%を超え、GLASOD では 76.3 百万 ha と推定している (Fig. 1-6)^{22), 28)}。周知されている塩類集積地域は、人為的なものとして最大規模の中央アジアのアラル海流域 (アムダリア, シルダリア川^{6*)} 流域), インドのヒンドゥスターン流域, パキスタンのインダス川流域, 中国の黄河流域, シリヤ・イラクのユーフラテス川流域, オーストラリアのマレー・ダーリング川流域, そして, アメリカのサン・ホアキン・バレーなどである。国によっては灌漑農地の半数以上が影響を受けている¹¹⁾。

塩類集積により使われなくなった農地は, 少なく見積もって年間 16 万~30 万 ha, 大きなものでは 150 万 ha という推定もある。また, 塩類の影響で作物生産量が低くなった農地は 2,000 万~4,600 万 ha と言われている²⁹⁾。北村はこれまでの報告や現地調査から, 軽微な塩類化も含んだ塩類化農地は灌漑農地面積の 25%程度に及ぶものと推定している³⁰⁾。Qadir らは灌漑地域の 20%が塩類化していると仮定した場合, 273 億ドルの経済損失が生じ

^{6*)} シルダリア川: 「ダリア」には「川」の意味があり, 「シル川」という名称が使われることがあるが, ここでは固有名詞として用いられている「シルダリア」を用いる。アムダリアについても同じとする。

ていると推定している。しかし、これは収量の損失のみを考慮しているものであり、品種改良、圃場レベルの営農活動の改善、効果的な肥料の利用、効率的な水管理その他の投資も考慮すると、損失額としては過少評価になっているものと考えられる¹¹⁾。

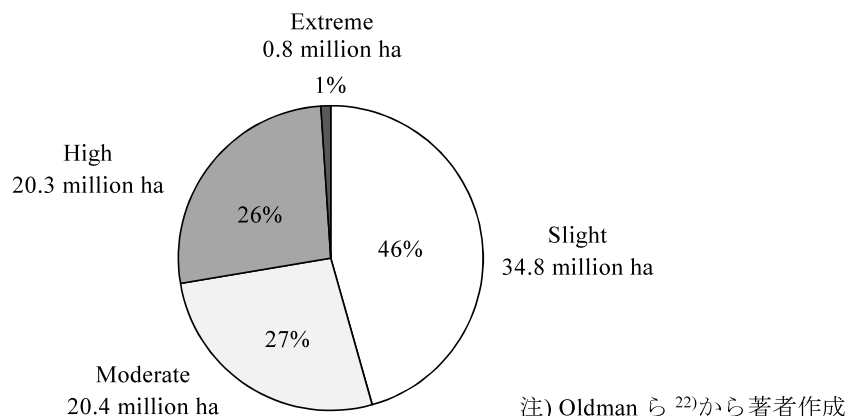


Fig. 1-6 人為的要因による塩類化土壌のレベル別面積
Areas of human-induced salt-affected soils by severity of salt affectedness

1.1.5 中央アジア乾燥地の灌漑開発と塩類集積

(1) 灌漑開発による農地面積の推移

中央アジアとは、広義には中国西域地方からカスピ海東岸の東および西トルキスタンを言い、狭義には西トルキスタンの旧ソビエト連邦のカザフスタン、キルギス、タジキスタン、トルクメニスタン、ウズベキスタンの5共和国からなる地域を指す³¹⁾。ここでは後者の5カ国を中央アジアと定義する。

中央アジアでも紀元前から灌漑が行われていたが、その範囲は限定的であった³²⁾。中世になると取水施設や灌漑水路が河川・オアシス周辺で建設された。ロシア帝国に植民地として統治されていた頃は、既に綿花の主要生産地域として位置付けられ、灌漑開発も進められていた³³⁾。ソ連時代になると南部乾燥地域—森林ステップ・ステップ・砂漠・半砂漠地域で灌漑水利施設が建設されていった³⁴⁾。中央アジアでは、その後も水稻作と綿花作をベースとした大規模な灌漑開発プロジェクトが進められた³⁵⁾。1960年代から約30年をかけて、灌漑面積はウズベキスタンとタジキスタンで1.5倍、カザフスタンで1.7倍に増加し、1987年時点で灌漑農地面積は約760万haに達した³¹⁾。この過剰開発の状況の下、土地や水の効率的使用が大きな課題となっていた³⁶⁾。

研究対象地域の Golodnaya ステップ地域^{7*)}では、1940 年代の終わりに総合的な自然改造計画が着手された³⁴⁾。これによりシルダリア川を水源とする大規模な灌漑開発が 1950 年～1960 年に実施された。1917 年当時、Golodnaya ステップ地域の灌漑面積は 3.4 万 ha であったが、1960 年には 7 倍を超える 25 万 ha に達している。

(2) 塩類集積

現地研究者からの聞き取りによれば、大規模灌漑開発の初期段階で塩類集積リスクは指摘されていた。この段階で福田らも、ウズベキスタンの乾燥地の灌漑開発に対して、塩類集積の問題、水路からの漏水防止の必要性、塩類の毛管上昇を抑制するための排水が軽視できないことを指摘している³⁷⁾。しかし、研究者らの指摘は功を奏さず、灌漑開発の代償として灌漑農地の半数に塩類集積が生じた。中央アジア全体では約 100 万 ha の農地が塩類化により失われていると言われている³¹⁾。また、過剰な取水はアラル海およびその周辺にも深刻な環境問題を引き起こしている。内陸閉鎖湖のアラル海は、自然現象によるもの以外には 300～400 年間大きな変化もなく、1960 年には世界第 4 位の面積を誇っていた。しかし、1970 年代から縮小し、現在、その面積は十分の一にまで減少しており、20 世紀における人類の起こした最大の環境破壊の一つであると認識されている^{7), 38), 39)}。

中央アジアに塩類集積をもたらしている土壌・地下水に含まれる塩類は、テチス海（古地中海）由来と考えられる。テチス海は古生代後半から新生代第三紀中頃（2 千万年前）まで存在したとされている。この海成の岩石が風化土壌として堆積し、現在の陸地ができ上っていった^{7), 40)}。乾燥地では、風化土壌に含まれる水溶性の各種塩類は雨水による洗脱を受ける機会が少なく、多量の塩類が残されている⁴¹⁾。松本が中央アジア・西アジア地域で実施した土壌断面形態の発達過程に関する調査によれば、地下水の影響をまったく受けていない土壌断面でも土層内に塩類を多量に含む集積層が見られた。ただし、表層土に塩が集積している場合は少なく、表層土に関して言えば、塩類土壌の範疇には入らないと考えてよいと指摘している。また、暗渠や多量の灌漑により塩が根圏外に移動集積することで、土壌に塩が持ち込まれても根圏域の塩類濃度が高まらなければ差し支えないとも指摘している⁴²⁾。確かに、ウズベキスタンやカザフスタンの灌漑農地でも多量の灌漑と良好な排水

^{7*)} Golodnaya は「飢餓」（ロシア語）を意味し、同地域は Hungry steppe, または Hunger steppe と英訳されている。

により表層に塩類集積が生じていない圃場もある³⁵⁾。しかしながら、塩類集積は乾燥地の灌漑農業に付きまとう問題と言われるように、現実問題として、多量の灌漑水が供給され、地下水が上昇し、毛管上昇により地表付近の塩分濃度が上昇し、蒸発の過程で地表面に塩分が集積するメカニズムが着実に作用している⁴³⁾。現在、中央アジア地域の灌漑面積は約1,000万haであり、その中で塩類集積面積は約400万ha程度(40%)に及ぶと報告されている(Table 1-1)。先述した世界の塩類化農地の推定値(灌漑農地面積の25%)より中央アジア地域は1.6倍大きい。そして、中央アジアの中でもウズベキスタンはもっとも塩類集積面積が多い。

Table 1-1 中央アジア地域の灌漑排水整備面積と塩類集積面積
Areas of equipped irrigation, drainage, and salinization in Central Asia

単位：ha

国名	灌漑施設	排水施設	塩類集積	比率
キルギス	1,021,400	144,910	49,503	5%
タジキスタン	742,051	345,200	23,235	3%
カザフスタン	2,065,900	343,000	404,300	20%
トルクメニスタン	1,990,800	1,011,897	1,353,744	68%
ウズベキスタン	4,198,000	2,840,000	2,141,000	51%
合計	10,018,151	4,685,007	3,971,782	40%

注) 数値は項目別、国別で統計年に違いがある。

Source: Irrigation in Central Asia in figures, AQUASTAT survey 2012, FAO

1.2 中央アジア乾燥地における塩類集積対策の研究

1.2.1 研究開発に携わる関係機関

中央アジア乾燥地における塩類集積の研究には、圃場の均平や節水技術などの圃場・水管理技術、流域管理などの広域的な水管理手法、農地のモニタリング技術、耐塩性作物などの栽培技術、不耕起・最小耕起法などの保全農業や土壌改善に関する技術、農家・農家組織を対象とした制度開発などのソフト技術がある。様々な研究機関が、食料安全保障、貧困対策、気候変動対応を上位目標に掲げ、塩類集積による農業生産への被害軽減を目指している。

これらの研究に携わる代表的な組織として国際農業研究協議グループ(CGIAR)がある。CGIAR 中央アジア・コーカサス地域プログラム事務所がウズベキスタンの首都タシケント

にあり、国際乾燥地農業研究センター（ICARDA）、国際水管理研究所（IWMI）、国際塩水農業センター（International Center for Biosaline Agriculture: ICBA）、世界野菜センター（The World Vegetable Center, AVRDC）などが現地研究機関とともに活動している。これらの組織と共同・連携し、世界銀行（WB）、アジア開発銀行（ADB）、国連食糧農業機関（FAO）、米国国際開発庁（USAID）、ドイツ国際協力公社（GIZ）、スイス開発協力局（SDC）、国際協力機構（JICA）などが灌漑排水施設の整備更新、圃場管理・水管理・地下水管理への資金・技術協力を行ってきている。また、中央アジア各国家間の調整を行う中央アジア国家間水利調整委員会科学情報センター（Scientific Information Centre of the Interstate Coordination Water Commission of Central Asia : SIC-ICWC）や国外の大学・研究機関も多くの学術的な研究成果を公表している⁴⁴⁾。

ウズベキスタン国内の研究機関では、タシケント土地改良大学（Tashkent Institute of Irrigation Melioration : TIIM）、灌漑・水問題研究所（Research Institute of Irrigation and Water Problems : RIWP^{8*)}）、土地資源・測地・地図・地籍国家委員会（Committee of Land Resources, Geodesy, Cartography and State Cadastre）、科学アカデミー・地質・鉱物資源委員会傘下の水文・地質工学研究所（Institute of Hydrogeology and Engineering Geology）、その他、土壌・栽培に関する研究所や各種委員会などの政府系機関、大学がある。行政組織としては、農業・水資源省（Ministry of Agriculture and Water Resources : MAWR）^{9*)}が開発された技術の展開やフィードバックをしている。MAWR 傘下の地方組織である水文地質・土地改良事務所（Hydro-geology Melioration Expedition : HGME）は、各州の塩類集積対策の計画・実施機関であり、地下水や土壌のモニタリング、排水施設の建設・維持管理、農地管理指導などの対策事業を展開している。モニタリング成果や事業実績は研究・援助機関の基礎データとしても活用されている。

1.2.2 塩類集積対策に関する研究内容

本研究のテーマである塩類集積対策として、塩類集積の予防策、塩類を除去する対応策、塩類土壌への適応策があり、世界各地で研究が進められてきている。予防策としては、地下水位を低下させる排水技術、地下水位の上昇を抑制する技術があり、前者には、排水路・

^{8*)} 中央アジア灌漑科学研究所（ロシア語略称 SANIIRI）と水問題研究所が統合された組織

^{9*)} 2018年2月に組織改編され農業省と水資源省に分かれている。

暗渠排水の土木的排水, 管井による機械的排水, 植物の根の吸水による生物的排水がある。後者には, 蒸発を軽減するマルチング, 毛管上昇を遮断する深耕・キャピラリーバリア, 水路の漏水を抑制するライニング・節水技術などがある。節水技術は塩類の供給を軽減する面もある。対応策としては, リーチング・表面流出除去 (フラッシング)・表面溶出排水・などの水理的除塩, 表面剥離 (スクレーピング)・塩吸着捕獲除去 (デハイドレーション)・表層吸引溶脱などの土木・工学的除塩, ソーダ質土の改良などの化学的除塩, 植物による生物的除塩 (ファイトレメデーション) などがある。適応策では, 耐塩性・好塩性作物などの研究がある⁴⁾。これら主要な対策を体系的に示した報告書が FAO により公表されている^{45), 46)}。

ウズベキスタンにおける塩類集積対策技術に関する研究成果としては, 予防策である排水路, 暗渠排水, 垂直排水に関する研究成果がある。Dukhovny らによれば, 排水施設は 1990 年代までは多額の投資がなされてきたが, ソ連崩壊以降, 投資は減少に転じた。排水システムを良好に保つための組織構造も弱体化し, 十分な管理体制が維持されず, 排水設備の状況の悪化とともに, ウォーターロギングや塩類集積が増加したことを指摘している。近年は, 排水施設の維持管理・運用は組織構造の構築が重要であるとして, IWMI や SDC の協力の下, 統合水資源管理 (Integrated Water Resource Management: IWRM) プロジェクトが進められている⁴⁷⁾。

また, TIIM や RIIWP の研究者らも長年にわたり農地保全, 節水, 塩類集積, 地下水制御に関する研究を行っている。特に, 本研究で論じる暗渠排水の試験研究は, RIIWP の前身である SANIIRI により 20 世紀前半から実施されている。現地研究者からの聞き取りによれば, 1910 年代から 1930 年代まで, Golodnaya ステップ地域を対象に深さ 1.0~1.5 m 程度の比較的浅い暗渠排水と浅い排水路の導入試験が行われた。根群域の集積塩類を溶脱するためのリーチング用水 1,000~2,400 mm が圃場に供給され, 収量に効果が見られたが, 再び塩類集積が見られた。その他の試験結果も含め, 収量が良好であったという観点から深さ 1.0 m, 施工間隔 60 m, リーチング用水量 600 mm が提案された。しかし, 1930 年から 1940 年にかけて, 灌漑水の供給が少ないという理由から排水施設が軽視され, 暗渠排水と収量に関する試験は行われなくなった。その後, 1950 年後半から 1960 年初めに排水軽視の考え方が改まり, 暗渠排水の調査研究が再開された。塩類集積対策には, 地下水位をコントロールし, リーチング効果を確保する技術が必要とされ, 研究テーマとして地下水制御効果を期待する深い暗渠排水が採用された。暗渠管の埋設深さ 2.5 ~3.0 m の設計で良

好な収量が見られたことから、これが広く採用されていった。これ以降、ウズベキスタンでは浅い暗渠排水の研究事例は見られない。

垂直排水について、現地研究者からの聞き取りによれば、暗渠排水と同じく Golodnaya ステップ地域で、20 世紀初頭に導入試験が行われている。当初、地下水の揚水は灌漑目的であった。20 世紀半ばには、灌漑開発地域の地下水位が上昇し、土壌に塩類化が見られたことから、地下水制御のための排水施設として研究が進められ、地下水位の低減効果が確認されている。また、揚水量や周辺農地の塩類集積状況も分析され、RIIWP により垂直排水運用に係る推奨地下水位などが示されている。垂直排水の導入時は、高い稼働率で運用されていたが、現状の稼働率が低下した条件下において、地下水の制御効果を確認した事例はほとんど見られない。

乾燥地の塩類集積については、日本の研究者による成果も数多い。特に、中央アジアでは、北村らがシルダリア川下流域のカザフスタンにおいて、灌漑農地の水収支をテーマにした一連の研究を行っている⁴⁸⁾。その結果、現地の塩類集積の要因として、水路の浸透ロスなどによる灌漑効率の低下、排水システムの機能低下、水と塩分収支の不均衡、比較的高い塩分濃度の灌漑水の利用などを指摘している。塩類集積対策として、水稻作と畑作が混在する栽培ブロック体系を避けること、用水の搬送ロス・適用ロスを減らすこと、下流域への影響を考慮しつつ排水機能を維持改善すること、塩湖などの排水の処理や排水の再利用に関する技術開発、節水の徹底と河川への還元水の水質の確保、取水・排水に関する流域単位での国際合意が重要であることなどが挙げられ、塩類集積軽減のための課題を広範囲な角度から論じている⁴⁹⁾。また、舟川らはカザフスタン・ウズベキスタンを対象に灌漑農業に伴う塩類集積の潜在的リスクを広域的に解析している⁵⁰⁾。同地域では塩類集積が少ない土壌もあるものの、排水機能に問題のある圃場では塩類集積もしくはそのリスクが大きく、適切な間隔の排水整備が必要と述べている^{35), 51)}。同様に、久米らによる本研究対象地域と類似した塩類集積が生じている中国内蒙古自治区での研究成果がある。電磁誘導法を用いた塩分観測結果から、除塩灌漑は作土層の除塩には有効であるが、地下水の水平移動が緩慢なため、圃場外への除塩効果が少ないことを指摘している⁵²⁾。

ここ数年の研究成果では、安西らが中央アジア乾燥地の水稻・畑輪作技術に関するシミュレーション評価、効率的水利用の事例研究を行っている。灌漑管理の重要性、地下水位の高い圃場での排水機能の確保の重要性を指摘している^{53), 54)}。また、本論文の研究対象地域であるシルダリア州の塩類集積に関する研究として、JIRCAS が日本の農林水産省の補助

を受け、MAWR・フェルメル評議会（Farmers' Council）^{10*）}と共同し、農地塩害対策を研究してきている^{55) 56)}。本研究はこのJIRCASの研究成果に基づくものである。JIRCASの一連の研究の中で、大森はリーチング期の土壌水分と塩分の動態について研究し、硬盤層破碎の除塩効果を明らかにしている⁵⁷⁾。また、大西らは塩類集積軽減のための節水灌漑手法を研究し、交互畝間灌漑の効果について分析評価している^{58) 59)}。

1.3 研究の目的

中央アジア地域の大規模灌漑開発において、塩類集積要因への対応策である排水対策が実施されてきた。しかしながら、乾燥地における灌漑農業の宿命である高い塩類集積リスクが表面化し、多くの農地で塩害が増大してきた。食料安全保障はSDGsの目標の一つであり、高生産性農地の確保が重要であるが、農地・灌漑排水施設の新たな整備には多大な投資が必要である。今後、劣化した農地においても生産力の回復に目を向ける必要がある。中央アジアにおいては、灌漑農地の劣化のほとんどが塩類集積であり、現在も農地改善のための対策が実施されているが、依然、対策が機能していない農地が見られる。対策が機能していない圃場では、集積した塩類を圃場から除去することが一層求められる。圃場の塩類除去にはリーチング水や降水の浸透水を確実に流出させる浅層暗渠排水が有効な手段であることが示されているが、従来の浅層暗渠排水はコスト面で問題がある。このため本研究では、日本で開発されたカットドレーンを活用した浅層暗渠排水を提案し、その適用性と効果を明らかにすることを目的とする。カットドレーンは掘削作業やパイプなどの資材を必要とせず、穿孔機の牽引により成形される無資材型暗渠である。従来の心土破碎や弾丸暗渠より深く、高い排水性が期待できる。研究対象地域は、中央アジアの乾燥地で塩類集積面積が最大であるウズベキスタンからシルダリア州を選定する。乾燥地の除塩対策にカットドレーンを活用する研究は初めての試みである。

1.4 本論文の構成と概要

第2章では、研究対象地域であるウズベキスタンおよびシルダリア州の灌漑農業の展開、灌漑農地の塩類集積の現状を解説する。

^{10*）} 2012年10月にフェルメル協会（Farmers' Association）からフェルメル評議会（Farmers' Council）に名称変更。フェルメルを会員とする全国組織で農業経営面のアドバイス、農業資材等の斡旋サービス、各種データ収集、研修・セミナーなどを実施している。

第3章では、シルダリア州内でもっとも塩類集積の深刻な行政区において、HGMEなどが収集したモニタリングデータを使い、土壌塩分濃度と水供給、地下水状態との関連性を三次水路レベルの領域を管理する水利用組織を対象に分析する。

第4章では、前章の水利用組織から圃場レベルに分析対象を絞り込み、排水施設、地下水、塩類集積状態を観測データに基づき分析し、排水施設が地下水位、土壌の塩類集積に及ぼす影響を明らかにする。

第5章では、圃場に集積している塩類を迅速、確実に除去する技術として、浅層暗渠排水を提案し、低コスト化を実現するカットドレーンの乾燥地への導入の適否、乾燥した土壌におけるカットドレーンの施工時の問題点とその解決策を論述する。

第6章では、カットドレーンの適用上の課題として、施工後に生じた空洞部の崩落とその対策案について論述する。

第7章では、提案技術を導入した農家圃場において、リーチング試験の結果からその除塩効果を論述する。

第8章では、各章を総合考察として取りまとめ、新たな排水改良技術として提案する上での留意点、経済性の評価、現地農家の意見、普及上の今後の研究課題について論じる。

第2章 研究対象地域の概要

2.1 自然条件

2.1.1 地理的概要

研究対象地域のウズベキスタンは、北部にカザフスタン、東部および南東部にキルギス、タジキスタン、南部にアフガニスタン、南部および西部にトルクメニスタンの5つの内陸国に囲まれている。国土面積は447,000 km²で日本の約1.2倍を有する。西には国土の60%を占める砂漠・ステップ地域、東には天山山脈およびパミール高原に繋がる山間部・山麓平原部が広がっている。ウズベキスタンを南北に挟む形でアムダリア・シルダリア両河川がアラル海に向かって流下している⁶⁰⁾。

研究圃場のあるシルダリア州(面積5,100 km²)はシルダリア川左岸に位置する(Fig. 2-1)。地形は南から北に向かって緩やかな勾配を有している。研究圃場の測量結果によれば、圃場面の勾配は1/500~1/1000程度となっている⁶¹⁾。

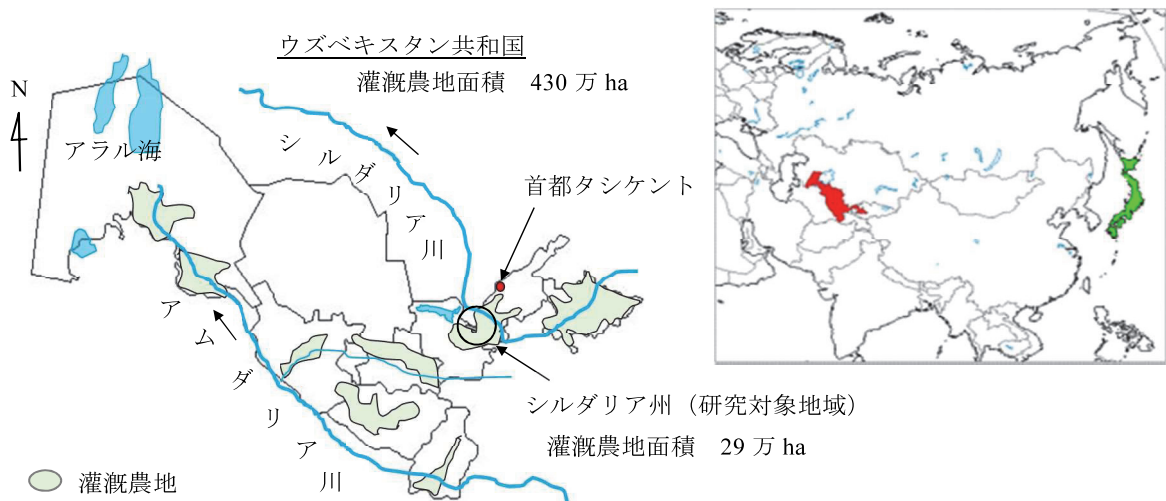
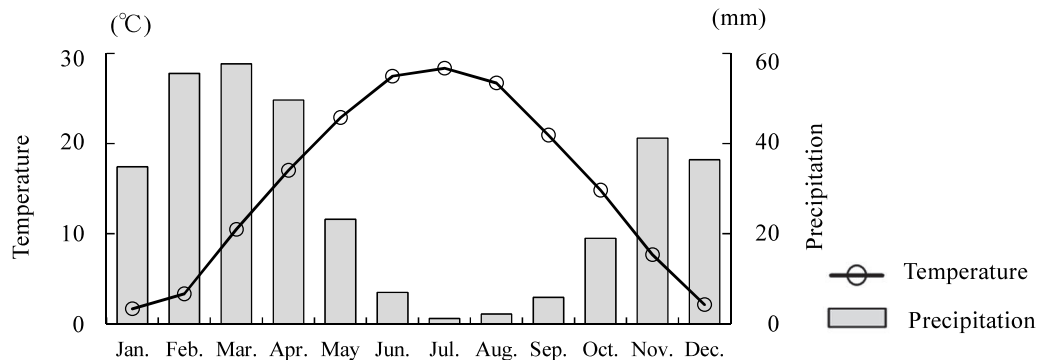


Fig. 2-1 ウズベキスタンの灌漑農地と研究対象地域
Irrigated areas in Uzbekistan and the research site

2.1.2 気候

ウズベキスタンの年間降水量は、砂漠地帯で100~250 mm、山麓平原地帯で200~545 mm、山間部で400 mm以上になる⁶²⁾。シルダリア州は、山麓平原地帯にあり、大陸性気候を示し、寒暖の差が激しく、夏は暑く乾燥し、冬は寒い雨季となる。灌漑開発以前、シルダリア州には隣接するジザフ州とともにGolodnayaステップの草原が広がっていた。乾燥

度指数および降水量がそれぞれ 0.28⁶³⁾, 334 mm (過去 10 年間の平均値) であり, 半乾燥地域に区分される. 夏は 40 °C を超え, 冬は -10 °C を下回ることがある. 降水は 10 月から 4 月にかけての雨季に多く見られ, 降水量の約 9 割がこの時期に集中している (Fig.2-2)⁶⁴⁾.



注) シルダリア州内 2 カ所 (Syrdarya, Yangier) の測候所の 10 年間 (2006 年～2015 年) の平均値

Fig. 2-2 シルダリア州の気温と降水量 (2006 年～2015 年)
Temperature and precipitation in Syrdarya Province (2006-2015)

2.2 社会・行政

ウズベキスタンの国土は, 12 州, 1 自治共和国, 1 特別市 (首都タシケント) に分かれ, 159 の最少行政区 (Rural Districts, 以下, 地区) がある³³⁾. 1991 年 12 月, ソ連解体後に独立し, 以降, ウズベキスタン政府は, 独立国家共同体 (Commonwealth of Independent States: CIS) 諸国で政治・経済両面で安定を保っている. 旧共和国共産党中央委員会第 1 書記のイスラム・カリモフ初代大統領 (1991～2016) が長期に安定した体制を強力な指導力をもって率いていた. 後継者と見なされていたシャヴカト・ミルズィヤエフ現大統領がその基盤を受け継ぎつつも, 行政, 外交, 経済, 農業と多方面で改革を進めている.

シルダリア州は 8 つの地区と州都グリスタンに分かれ, 州中央部を流下する幹線排水路の北東側が古くから灌漑が整備されたオールドゾーン, 南西側は新規に灌漑開発されたニューゾーンと呼ばれている. 研究圃場のあるミルザバット (Mirzaobod)^{1*)} 地区はシルダリア州中央部に位置し, オールドゾーンとニューゾーンを跨いでいる (Fig. 2-3).

^{1*)} ここでは現地での発音に従い「ミルザバット」と表記する. 以下, その他の地名・組織名も同様に発音のとおり表記とする.

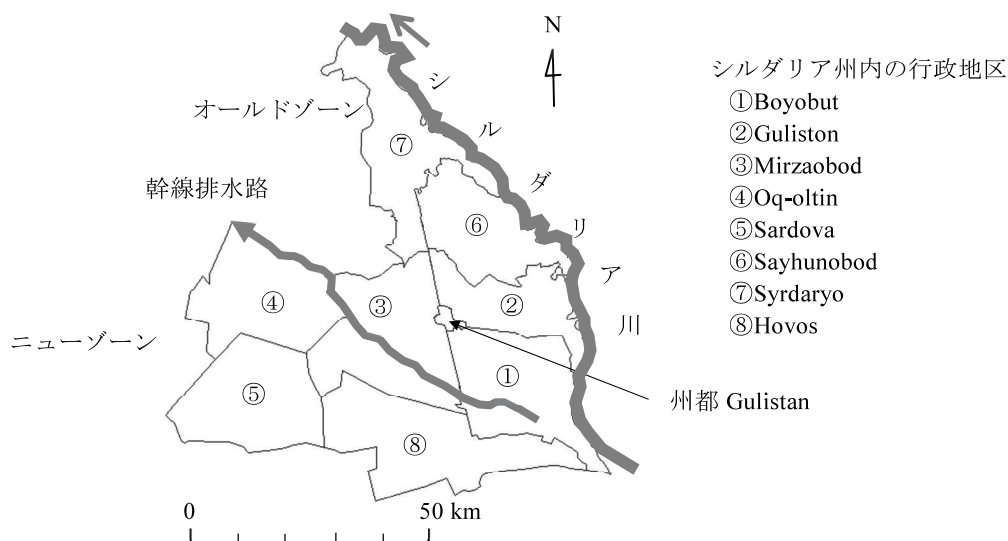


Fig. 2-3 シルダリア州の行政区
Districts of the Syrdarya Province

2.3 農業

2.3.1 農業の位置付け

旧ソ連時代の共和国分業体制の下，土地利用は綿花栽培に特化されてきた経緯があり，綿花生産は世界第6位（2012年）で外貨収入に貢献している．綿花のほかに重要な外貨収入源は鉱工業であり，とりわけ金の採掘生産も世界9位の生産量を誇る．しかし，綿花や金といった第一次産品は国際市場価格の変動の影響を受けやすいという脆弱性がある．

農業はウズベキスタンの重要な経済部門の一つであり，GDPの17.5%，外貨獲得の20%を占めている．労働人口の40%（2010年）が農業に従事し，農業は社会の安定化を担う重要な部分となっている．主要な農産物である綿花は輸出収入の10%を占め，小麦は食糧安全保障の基幹となっている³³⁾．

灌漑面積は国土の10%に過ぎないが，農業生産物の95%以上が灌漑農地に依っている（Fig. 2-4）．灌漑農地に占める綿花の割合は年々減少傾向にあり，1990年には50%を占めていたが，2010年には30%まで減少している⁶⁵⁾．ウズベキスタンの農地の利用率（2008～2011年）は，穀物生産45%（うち小麦40%），次いで綿花36%，飼料作物8.6%，野菜5%となっており，食料保障と換金作物に重点が置かれている⁶⁶⁾．

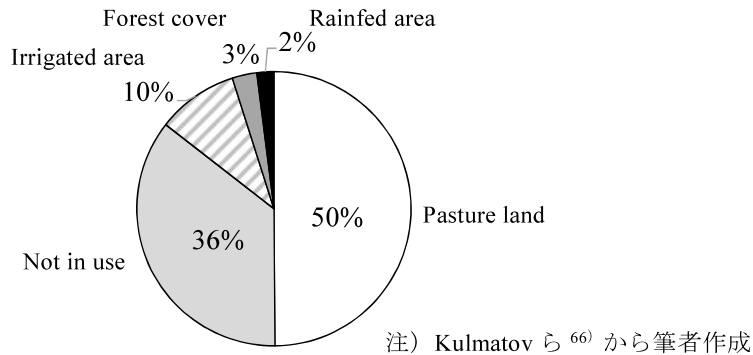


Fig. 2-4 ウズベキスタンの地目別面積割合
Area ratio by land type in Uzbekistan

2.3.2 農業生産構造

ウズベキスタンは、ほかの中央アジアの国々と同様に 19 世紀までは、広大な国土を利用した遊牧とオアシス農業を営んでいた。しかし、1918 年のソビエト政権成立以降、土地・水利改革、集団化が行なわれ、集団農場（コルホーズ）、国営農場（ソフホーズ）の大規模経営を中心とする国家計画に基づく農業生産体制が成立した。ウズベキスタンに対しては、綿花栽培の拡大が最優先課題とされた。1960 年代以降には、「自然改造計画」の流れをくむアムダリア・シルダリア両河川を水源とした大規模灌漑開発事業が着手され、綿花栽培面積は飛躍的に増加した。農場の規模は 2,000～3,000 ha 程度で農業機械、灌漑排水施設を含む農業生産システムが一つの農場組織で管理されていた。しかし、一方では、大量取水によって河川流量が激減し、下流に位置するアラル海の面積が急激に縮小するという深刻な環境問題を引き起こした。

1991 年の独立以降もウズベキスタン政府は、旧ソ連時代からの農業生産への介入を持続しながら、中央集権経済から市場経済へと緩やかに移行する漸進的アプローチを採用し、農業分野の市場経済化は立ち後れていると言われている⁶⁷⁾。しかし、一方では農業政策の基本目標として掲げられた綿花モノカルチャーからの脱却、穀物自給の達成を目指す農業改革も進められ、一部に品質の高い小麦などの輸入も見られるものの、2003 年以降は穀物自給を達成している。また、独立直前から直後にかけて、大規模経営とは異なる経営体である個人副業経営（デフカン）や中規模の農業専門法人（フェルメル^{2*)}）の農業生産が増

^{2*)} ウズベキスタンでは 1998 年以前にはデフカンとも呼ばれていた。現在のフェルメルは、フェルメル法（1998 年）により国有地の長期賃貸に基づいた中規模の農業専門法人を指す⁶⁸⁾。本論文では、特にフ

大した。ソフホーズ、コルホーズは 1998 年に施行されたシルカット（農業生産共同組合法、フェルメル法、デフカン法により、3 つの形態に整理されていった。なお、シルカットは国民への継続的な食料供給を目的にコルホーズの継承法人として設立されたが、運営方法がコルホーズに酷似していたことから、経営の効率化などの期待された効果を得ることができなかった。このため低収益のシルカットは廃止され、フェルメルに分割されていった⁶⁸⁾。

フェルメルに対しては、2003 年から 2009 年にかけて、農業改革、農地の最適化、経営規模の効率化が進められ、フェルメルの廃止、統合が進んだ。その結果、ウズベキスタン全体のフェルメル数（経営登録数）は 2008 年に約 21 万まで増加していたが、2009 年には 11 万に半減している（Fig. 2-5）。

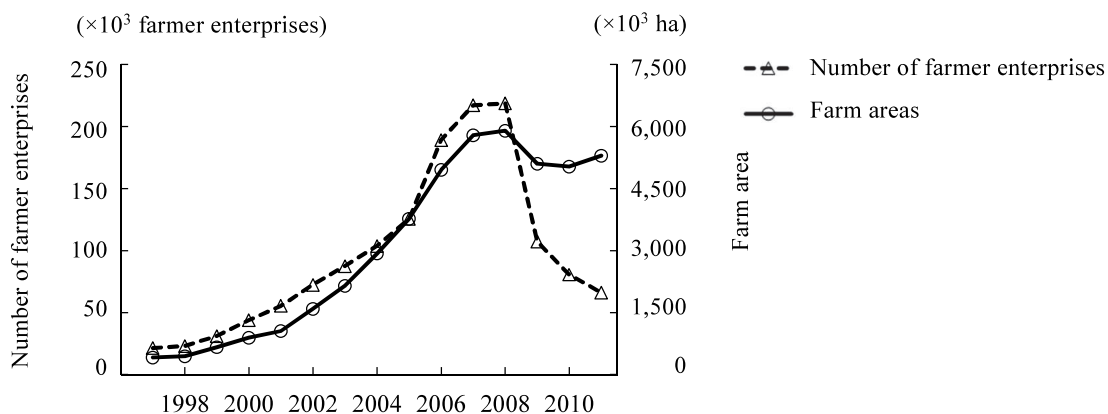


Fig. 2-5 ウズベキスタンのフェルメル数と経営面積の変化（1997 年～2011 年）
Changes in the number of farmer enterprises and farm areas of Uzbekistan (1997-2011)

シルダリア州をみると、フェルメルの統廃合は 1 年遅れ、2009 年から 2010 年にかけてその数は 9,255 から 4,250 に減少した。平均経営面積を見ると、2009 年には 1 フェルメル当たり 30 ha であったが、2011 年には 72 ha まで経営規模の拡大が進んだ。その後、再び経営の見直しなどによる再分割で 2015 年には 42 ha まで縮小している（Fig. 2-6）⁶¹⁾。

このような農業生産形態の変化の中でも、依然として、フェルメルには国家注文^{3*)}として綿花、小麦の割り当て政策が継続している。フェルメルは独立した経営体であるが、登

エルメルに言及する場合を除き、デフカン、フェルメルを含む一般的な農業従事者を「農家」と表現する。

3*) デフカンを除く農業生産者に対して、政府の計画生産量の一定割合の売却を義務づけるもの。1993 年までは主要農産物、現在は綿花および穀物がその対象となっている。農業生産者には、播種面積および計画生産量が通達される⁶⁸⁾。

録された経営内容から栽培品目の自由な選択は難しい。さらに、国家注文契約では栽培面積および生産量が決められ、綿花の農場引き渡し価格も世界価格と比較して低い⁶⁸⁾。政府からフェルメルへの支援政策もあるが、このような不利な経営条件はフェルメルの水管理や農地改善に対するモチベーションにも影響を及ぼしているものと考えられる。ここ数年は、この綿花栽培を主とした営農から作物多様化政策が進められ、より収益性のある作物栽培が広がってきている。しかし、フェルメルの登録内容や契約義務が達成されない場合、賃貸された農地の利用が制限され、フェルメルを継続できなくなる者もいる。

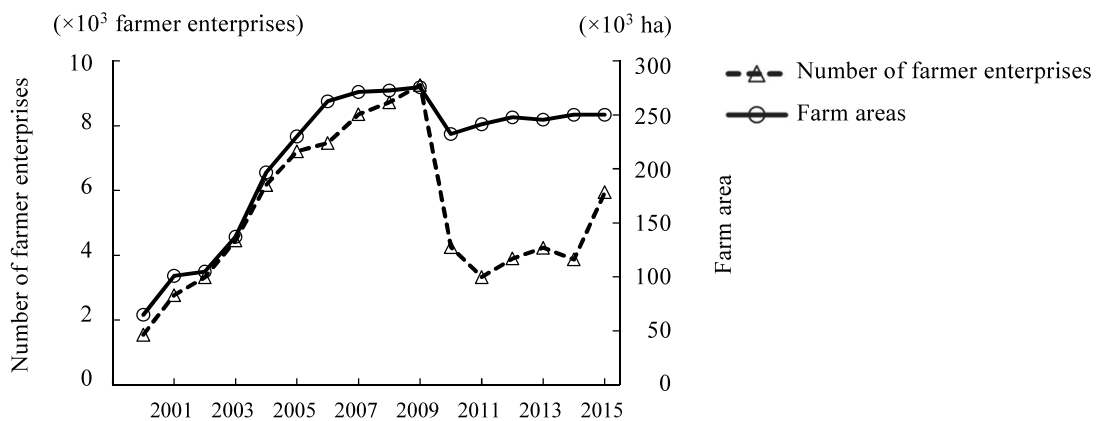


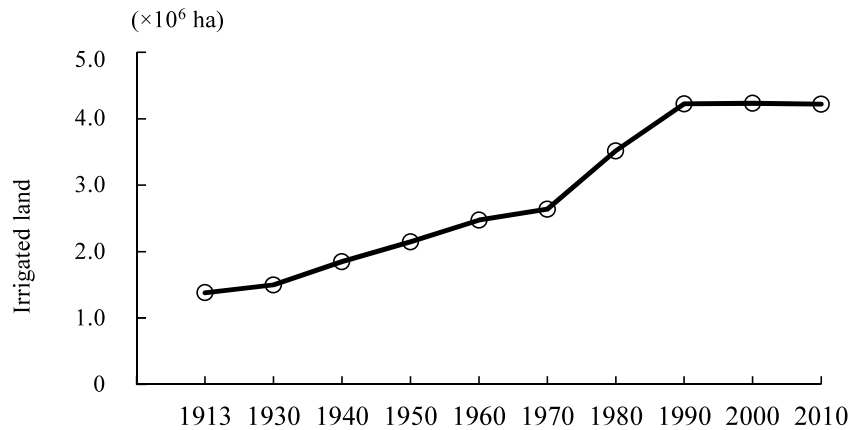
Fig. 2-6 シルダリア州のフェルメル数と経営面積の変化（2000年～2015年）

Changes in the number of farmer enterprises and farm areas in Syrdarya Province (2000-2015)

2.3.3 灌漑排水の整備

ウズベキスタンの総農用地面積は、2016年時点で2,677万haあり、国土の約60%を占める。その中で灌漑農地は421万ha（FAOデータ）となっている。灌漑農地は大規模灌漑開発により急激に伸びてきた。1913年に138万ha（うち、綿花栽培面積は43万ha）であったが、1950年代に未開発地、砂漠・半砂漠地の開発に着手し、215万haとなった。さらに、1990年代には420万haに達し、排水施設も284万haが整備された。その後は、横ばいのまま現在に至っている（Fig. 2-7）³³⁾。

灌漑排水施設は、シルカット規模の面積を結ぶ主要な灌漑用水路2.7万km（うち、62%が土水路）、排水路2.9万km、農場間以下の用水路網16.7万km（うち、79.5%が土水路）、排水路網10.8万km（うち、3.9万kmが暗渠排水）が整備されている。また、灌漑排水を目的とした管井（垂直排水、Vertical drainage）7,447カ所が建設されている。その内訳は、地下水位の制御目的が3,344カ所、灌漑目的が4,103カ所である³³⁾。



注) Khamraev ら³³⁾ から著者作成

Fig. 2-7 ウズベキスタンの灌漑農地面積の変化 (1913 年～2010 年)
Changes in the irrigated land area of Uzbekistan (1913-2010)

2.3.4 水利組織

大規模な農場経営からフェルメル経営へと農業生産構造が変化したことにより、これまで一元的に管理されていた灌漑施設の管理責任が曖昧になった。このためフェルメルによる自主的な水利組織として水利組合 (Water Users' Associations, 以下, WUA) が形成されていった。2001 年 1 月の大臣会議令「フェルメルの圃場における水利組合の役割について」により WUA の法的な位置付けが明確になると、末端の灌漑排水施設の管理責任が WUA に移管され、設立された WUA 数は徐々に増えていった⁴⁴⁾。WUA の設立、活動に対して、ADB, WB, USAID などの海外援助機関が支援している。

2003 年の水資源管理の制度が改善され、MAWR 内に 10 の流域灌漑システム局 (Basin Irrigation System Management, 以下, BISM) が設立された。主要な用水路の管理と灌漑・リーチング用水の水配分はこの BISM および下部組織 (Irrigation System Department, 以下, ISD) が担っている。WUA は水配分スケジュールの調整や支線用水路以下の管理を担っているが、民主的な組織というよりも ISD の末端組織として組み込まれているのが実態である⁶⁹⁾。2009 年に水利用に関する法が改正され、WUA は水消費者組合 (Water Consumers' Associations, 以下, WCA) に名称を変更したが、役割に違いはない。2009 年時点でウズベキスタンの WCA 数は約 1,700 に上っている⁷⁰⁾。WCA の活動予算は、フェルメルが支払う組合員費に依っている。

シルダリア州では、2010 年時点で 105 の WCA、ミルザバット地区では 2012 年時点で 16 の WCA が設立されている (行政区管理による WCA を除く)。2008 年、シルダリア州 8

地区から各 2WUA（合計 16WUA）を選定し、聞き取り調査を行った結果、組合員費の徴収率は平均 29%と低く、財政的な問題を抱えていた。BISM 管理の灌漑施設は比較的機能しているが、WCA は財政面のほか、技術的な部分でも問題を抱えている。水配分計画が徹底されず、用水路やゲートの老朽化・破損・漏水への十分な対応もできていない状態にあり、灌漑用水の損失、上流側圃場で過剰取水、下流側圃場での水不足が発生している (Fig. 2-8)。WCA の水管理能力の向上のため、2009 年から 2013 年にかけて、MAWR は JICA の支援を受けて WCA を対象とした水管理改善プロジェクトを実施した。シルダリア州はこのプロジェクト対象地区の一つとなっている⁷⁰⁾。



接続部からの漏水

フリュームに開けられた取水口からの落水

Fig. 2-8 用水路の管理状態の例

Cases of management states for irrigation canals

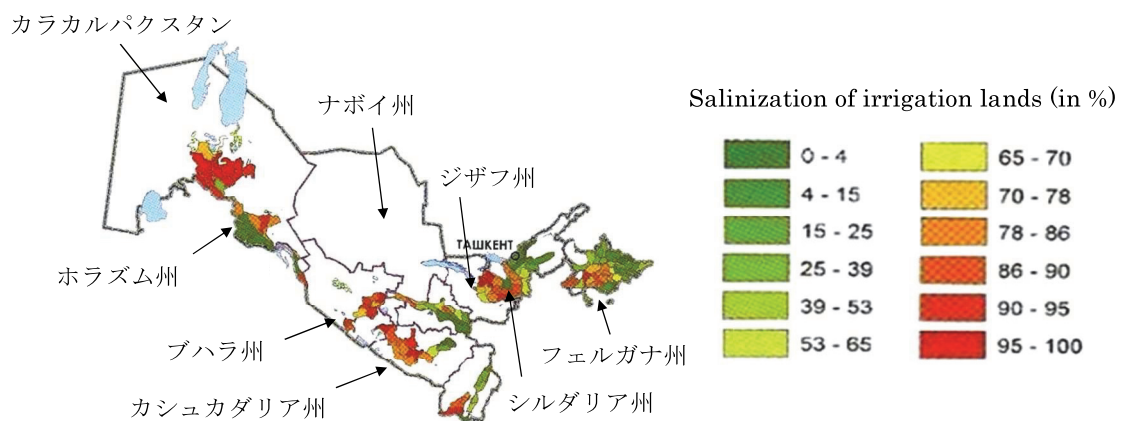
2.4 塩類集積の現状と対策

2.4.1 現地政府の対策事業

土壌の塩類集積の評価は、土壌飽和溶液の電気伝導度 (EC_e : $dS m^{-1}$) が用いられることが多い⁷¹⁾。FAO の基準では、 EC_e の程度により、塩類集積なし ($EC_e < 2 dS m^{-1}$)、軽度 ($2 \sim 4 dS m^{-1}$)、中度 ($4 \sim 8 dS m^{-1}$)、重度 ($8 \sim 16 dS m^{-1}$)、極めて重度 ($> 16 dS m^{-1}$) の 5 段階に区分されている⁴⁶⁾。ウズベキスタンでは、重度と極めて重度を合わせて 4 段階に区分されている。2007 年時点において、ウズベキスタンの灌漑農地の約半数が軽度以上となっている³³⁾。この塩類集積による農業生産への損害は年間 10 億ドル以上に及ぶと言われている⁶⁰⁾。

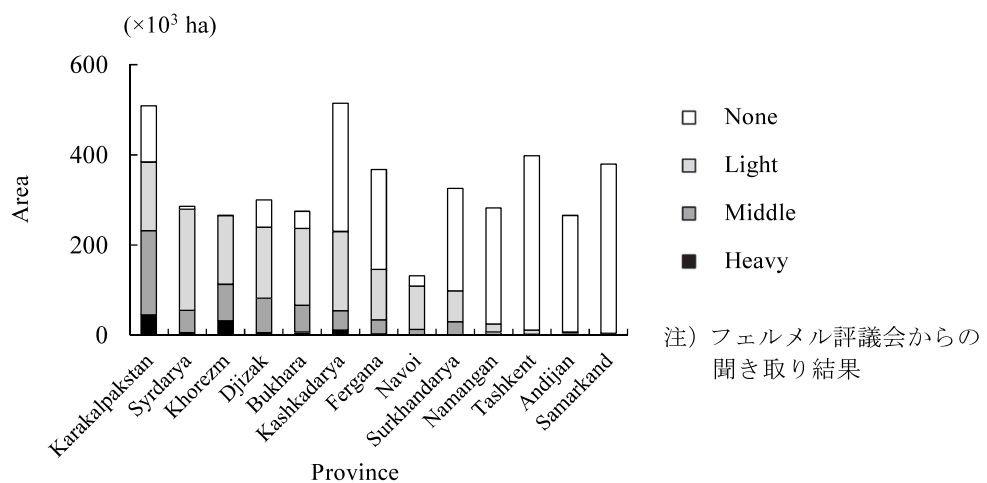
塩類集積を州別に見ると、シルダリア州、ホレズム州ではほぼ全域に見られ、ブハラ州、ナボイ州、ジザフ州、カラカルパクスタン自治共和国でも灌漑農地の 3/4 以上に広がっている (Fig. 2-9, 2-10)。シルダリア州では灌漑農地の 98% (28 万 ha) に塩類集積が見られ

る。中でもミルザバット地区は他地区と比較して塩分濃度が高くもっとも深刻な状況にある (Fig. 2-11, 2-12)。このような状況下、ウズベキスタン政府は 2007 年に農地改善・塩類集積対策を促進するため財務省内に「土地改良基金 (National Irrigated Land Reclamation Fund)」を設けた。この事業予算は MAWR に配分され、地方の対策事業は主に HGME が担っている。ウズベキスタン全土で年間約 1.1 億ドルの予算が配分され、土壌や地下水の調査・モニタリング、排水施設の維持改修・更新・新規建設、農地改善のための建設機械・機材調達などに充てられている³³⁾。この事業は 2012 年に第 1 フェーズが終えたが、2013 年から 2017 年まで第 2 フェーズが実施され、2018 年からは第 3 フェーズが計画されている⁷²⁾。



注) Environmental Profile of Uzbekistan 2008 に筆者が加筆

Fig. 2-9 ウズベキスタンの塩類集積率による区分図
Salt accumulation ratio map for Uzbekistan



注) フェルメル評議会からの聞き取り結果

Fig. 2-10 ウズベキスタン各州の土壌塩類集積区分別面積 (2014 年)
Areas of salinity levels by province in Uzbekistan (2014)

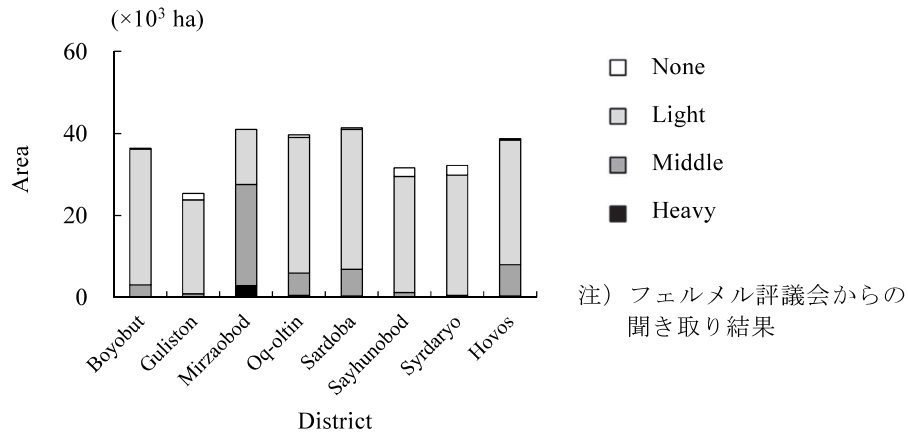


Fig. 2-11 シルダリア州各行政区の土壌塩類集積区分別面積 (2014 年)
Areas of salinity levels by district in Syrdarya Province (2014)



オコルティン地区ボブル WCA 内の
冬小麦栽培圃場 (2010/12/13)



ミルザバット地区ヤンガバット WCA 内の
綿花収穫後の圃場 (2010/12/2)

Fig. 2-12 シルダリア州内の圃場に析出した塩類
Educed salt on fields in Syrdarya Province

2.4.2 塩害対策技術の構成

塩類集積がもたらす農業被害と前章で述べた塩類集積対策（予防策，対応策，適応策）の関わりを Fig. 2-13 に示す⁵⁵⁾。

ウズベキスタンの対策の実施主体は，その規模・内容に応じて，政府レベル，WCA レベル，農家個人レベルとなる。第 1 の予防策には，地下水位の上昇を抑制する排水路（明渠排水），暗渠排水，垂直排水がある。ウズベキスタンでは，これまでこの 3 つの排水技術が主に展開されてきている⁷³⁾。近年，節水・均平化などの水・圃場管理技術も進められている。第 2 の塩類を除去する主な対応策は，綿花栽培前の冬季に圃場を湛水させ，集積した塩類を洗い流すリーチングが実施されている。第 3 の適応策では主に耐塩性作物の導入が行われている。

ここでは、シルダリア州で主に取り組まれている第1の排水対策技術、第2のリーチング技術の現状を述べる。

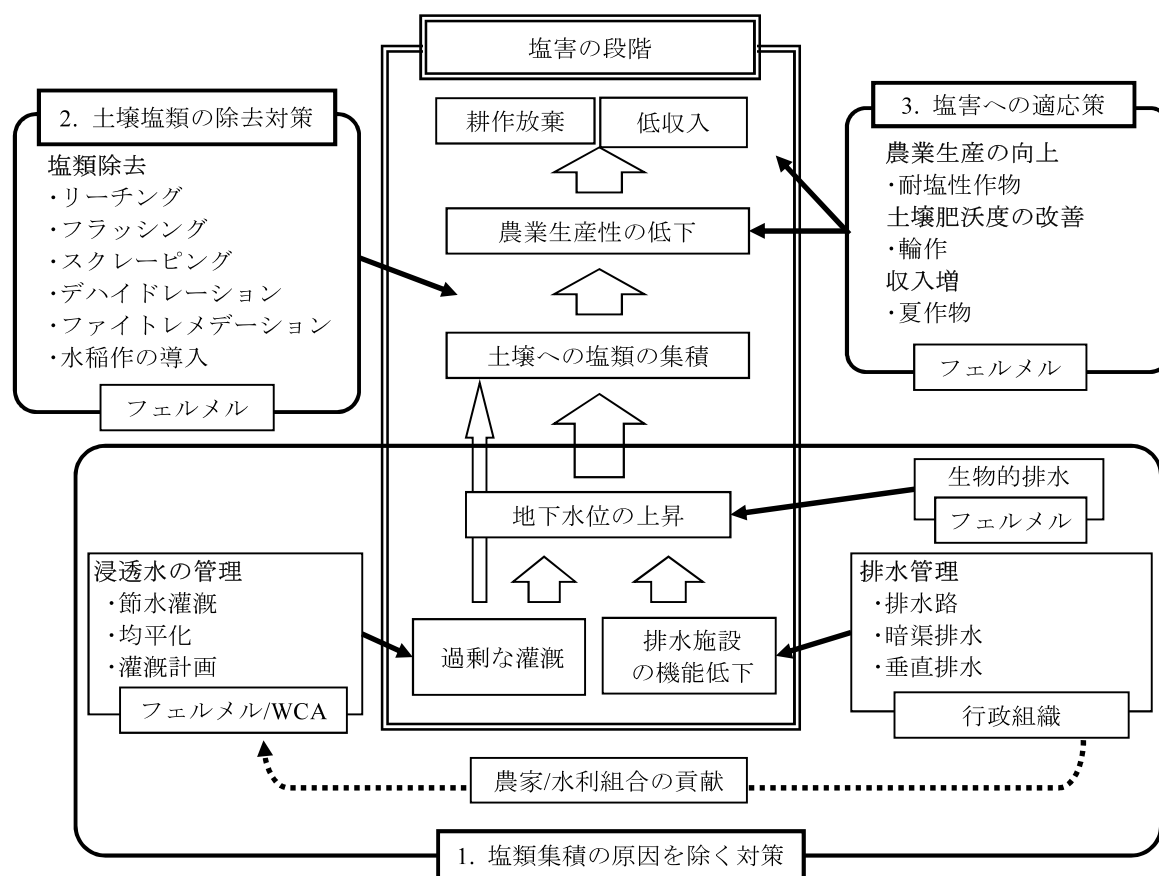


Fig. 2-13 塩害と対策の構成

Components of salinization and its countermeasures

(1) 地下水の制御のための排水対策

1990年までは灌漑農地の拡大に従い、排水路および暗渠排水の延長、垂直排水の受益面積が拡大していった。独立以降、灌漑農地面積は横ばいとなり、それに合わせて排水路・暗渠排水の延長に増減は見られない。一方、垂直排水の受益面積は1995年以降、ピーク時の30%まで減少している (Fig. 2-14)。以下に各排水施設の概要を示す。

排水路の設計深さは3.0~4.5 m程度とされている。また、これより小規模な排水路が圃場の分割や境界、養魚場など水利用形態の違いが見られる圃場との間に建設されている。規模の大きな排水路の維持管理はHGMEが担当し、水路内の堆積土砂の浚渫作業を実施している。ウズベキスタン研究者からの聞き取りによれば、シルダリア州で浚渫が必要とされる箇所への作業実施率は、1990年までは76%であったが、2000年には45%に低下し、独立以降、浚渫作業の実施を待つ圃場が多くなっている。

暗渠排水は、圃場面から深さ 2.5～3.0 m、敷設間隔は 100～250 m で設計されている。シルダリア州内 7WCA からの聞き取りによれば、WCA によりバラツキもあるが、施設の半数近くが機能低下を引き起こしている。暗渠排水の清掃・更新は、HGME が担っており、暗渠管内の高圧洗浄、新規建設を行っている (Fig. 2-15)。

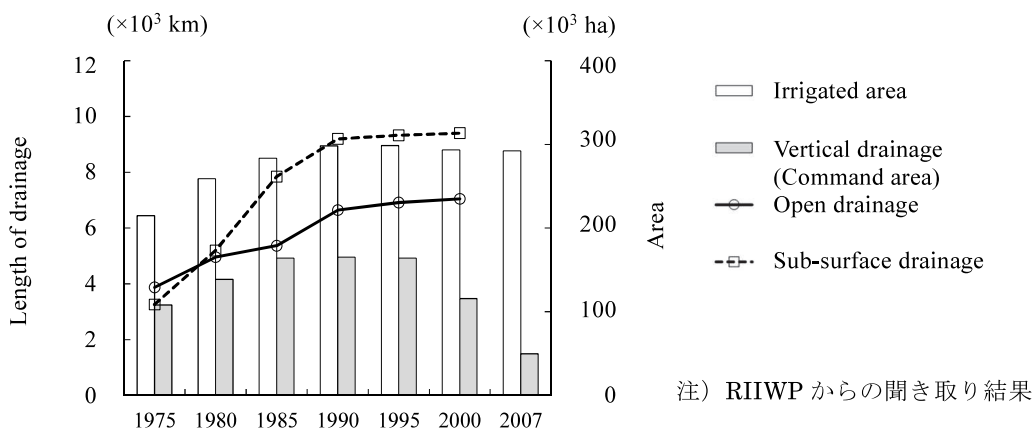


Fig. 2-14 シルダリア州の灌漑排水整備の変化 (1975 年～2007 年)
Changes in irrigation and drainage development in Syrdarya Province (1975-2007)



シルダリア州ミルザバット地区バルニーWCA 内でクェートファンドによる支援で建設中の暗渠排水 (2014/6/18)



シルダリア州 HGME が所有する暗渠排水用高圧洗浄機 (2014/6/18)

Fig. 2-15 暗渠排水の建設と維持管理用機材

Construction work and maintenance equipment for subsurface drainage

シルダリア州の垂直排水は、1965 年まで調査・試験・システム構築が行われ、1965 年から 1990 年代初めまでに集中的に建設されている (Fig. 2-16)。井戸深さは、ボーリング調査に基づき、砂質分の多い透水性の高い帯水層まで掘削され、深さは 30 m 程度から深いもので 120 m にまで及ぶ。現地の事例では、掘削径 1.0～1.3 m、ケーシング径 380～430 mm、ポンプ口径 235 mm、揚水量 160 m³ h⁻¹ 程度のものが建設されていた。現地技術者からの聞

き取りによれば、垂直排水は 100～150 ha 程度（半径 560～690 m）が受益範囲とされ、新たに建設する際には、近くの垂直排水から原則 1 km 以上離すこととされている。垂直排水施設の運用・維持管理は、MAWR 傘下のポンプ管理部局（Department of Pump Station, Energy and Communications，以下、UNES（ロシア語略称））が担っている。垂直排水には、揚水後、再利用されずに排水される施設、主に灌漑用水として利用される施設、灌漑排水両方の役割を有する兼用施設がある。垂直排水施設の建設箇所は、シルダリア川と中央幹線排水路に挟まれた区域や州南側に多く見られ、受益面積は約 5 万 ha と見込まれている⁷⁴⁾。

垂直排水の施設数については、ウズベキスタン全体で 1990 年代にピークとなり、2000 年代初めにはその 79%に減少している。年間の稼働率（総運転時間/年時間）もピーク時の 67%から 24%に減少している。シルダリア州の施設数の減少傾向はさらに激しく、1995 年のピーク時には 988 カ所あったが、2007 年には 373 カ所（38%）と大きく減少している。年間の稼働率は 1970 年代の 88%から 2007 年に 23%になり約 1/4 に減少しており、電力消費量も 1980 年代のピーク時の 16%まで落ちている（Fig. 2-17）。

UNES では、垂直排水に多額の更新コストや管理運用コストを投入してきたが、予算上の制約によりポンプや付帯設備の更新の遅れ、配電施設などの盗難などに対応できていない。このため機能していない施設、放棄された施設も多く、これが施設数の急激な減少に繋がっているものと考えられる。また、高額な電力料金により運転時間そのものも少なくなっている。運転する施設箇所やその時期は、原則、HGME のモニタリングデータに基づき決定されるが、WCA、農家の要請なども考慮されている。



揚水中の垂直排水（配電盤は建屋内）
ミルザバット地区アフメドフ WCA 内
(2015/8/4)



メンテナンス中の垂直排水（写真右は水中ポンプ）
ミルザバット地区オコルティン WCA 内
(2016/6/7)



Fig. 2-16 シルダリア州の垂直排水施設
Vertical drainage in Syrdarya Province

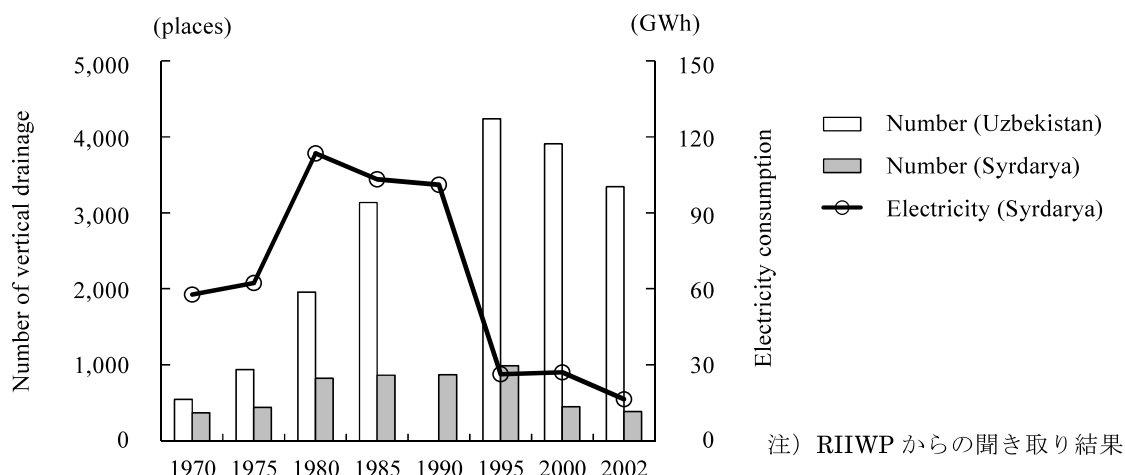


Fig. 2-17 垂直排水の施設数と電力消費量の変化 (1970年～2002年)
Changes in the number and electricity consumption of vertical drainage (1970-2002)

(2) 農家レベルの除塩対策

ウズベキスタンの農家を実施する主な除塩対策はリーチングである。リーチングにより、塩類を含む浸透水を表層下に下方浸透させ、排水路に流出させる。このため排水路は十分な深さが必要である。流出機能が低下した排水路に接した圃場においても、リーチングにより塩分を表層から下方に一時的に移動させているが、そのまま圃場内の地下水として留まり、乾期に再び塩類を集積させるリスクがある。

リーチング作業については、HGMEがWCA・農家向けにガイドラインを作成しており、塩類集積レベルや圃場の勾配に合わせたリーチング水量（250～400 mm）と区画の大きさ（0.08～0.25 ha）を指導している（Table 2-1, Table 2-2）。リーチングの準備作業として、農家は事前に40 cm程度の深さで耕起し、その後、砕土を行い、圃場を小区画（畦畔築立）に分け、圃場内仮水路を建設する。リーチングの開始適期は11月、12月が望ましいが、気象条件により1月末になることもある。ただし、雨季になり圃場表面がぬかるんだ状態になればトラクタによる準備作業ができず、リーチング時期を逸するため、圃場の準備作業は遅くならないようにしなければならない。

リーチングの実施状況を観察すると、HGMEが示すガイドラインが遵守されず、過剰なリーチング用水を供給している圃場が多く見られる（Fig. 2-18）。このような過剰な水供給と排水機能の低下により地下水位が高い状態の圃場では、周辺圃場を含めて塩類が再集積するリスクがさらに高くなるものと考えられる。

Table 2-1 シルダリア州のリーチング用水量

Volume of leaching water in Syrdarya Province		
塩類集積区分	ECe (dS m ⁻¹)	水量 (mm)
軽度	2~4	250
中度	4~8	300
重度	>8	300 (1回目)
		100 (2回目)

Source : Instruction of leaching salt, BISM & HGME, Syrdarya Province

Table 2-2 シルダリア州の圃場勾配別リーチング区画規模

Leaching plot size in relation to land slope in Syrdarya Province	
勾配 (%)	区画規模
<0.2	0.25 ha (50 m×50 m)
0.2~0.4	0.16 ha (50 m×33 m)
0.4~0.6	0.12 ha (50 m×25 m)
0.6~1.0	0.08 ha (50 m×17 m)

Source : Instruction of leaching salt, BISM & HGME, Syrdarya Province



小区画でのリーチング
ミルザバット地区アフメドフ WCA 内
(2017/1/4)



小区画分けを実施していないリーチング
ミルザバット地区アフメドフ WCA 内
(2016/12/20)

Fig. 2-18 シルダリア州内のリーチングの実施状況

Leaching operations in Syrdarya Province

2.5 まとめ

旧ソ連時代、ウズベキスタンでは大規模な灌漑開発事業が進められ、綿花栽培が優先事項とされていた。灌漑農地は大規模な農業経営体制の下、一元的な水管理や施設の維持更新が行なわれていた。しかし、コルホーズ・ソフホーズの解体という農業生産の構造形態の変化により維持管理体制が曖昧となった。さらには、旧ソ連からの独立以降の予算不足も加わり、灌漑排水施設が維持管理されなくなっていた。国際協力機関の支援の下、末

端灌漑排水施設の維持管理を担う WUA（現 WCA）が設立されたが、財政・技術面での問題点も多い。ウズベキスタンの灌漑農地の約半数に塩類集積が見られ、年間 10 億ドルの損害がもたらされているとも言われている。研究対象地域であるシルダリア州においても、ほぼ全域に塩類集積が見られ、農業生産が脅かされている。

このような状況を解決するためにウズベキスタン政府は MAWR 傘下の HGME が中心となり、地下水位の制御を目的とした排水路・暗渠排水・垂直排水の維持管理・更新などの農地改善事業を進めてきた。また、HGME は、WCA や農家に対してリーチングなどの塩類集積対策を指導してきている。さらに、近年では、ウズベキスタン政府により「土地改良基金」予算が配分され、農地改善事業が一層積極的に推進されている。しかし、現在も不適切な水管理が行われ、排水施設の維持管理状態も低下している。依然として、塩類集積対策の効果が十分得られていない圃場や塩類集積リスクが高い圃場が多いと考えられる。

第3章 三次水路レベルの水と塩分の観測

3.1 目的

ウズベキスタンでは、灌漑農地に生じた塩類集積に対して現地政府や農家がそれぞれ対策を実施してきている。しかし、依然として塩類が集積している農地は多い。その要因は、過剰な灌漑、排水施設の機能低下による地下水位の上昇とされている。本章では、これらの要因に関する水文・土壌モニタリングデータなどを現地機関より入手し、それら要因間の関連性を明らかにする。分析はシルダリア州ミルザバット地区内の三次水路レベルの領域を管理する WCA を対象とする。

3.2 ミルザバット地区 WCA の概要

シルダリア州の灌漑用水は州南東部のタジキスタンとの国境付近のシルダリア川から取水される。取水後、用水路はカザフスタンに至るドストリック幹線用水路と州南部を走り隣接のジザフ州に至る幹線用水路（South Golodnostep Canal）に分かれ、二次・三次水路の分水施設で各WCAの圃場群の末端用水路網に配水される。また、州内中央部に幹線排水路（Central Golodnostep Main Collector : CGC）が建設されており、南東から北西に向かって流下している。CGCは末端でカザフスタンとの国境沿いをジザフ州まで流下し、最終的にはアルナサイ低地・アイダール湖に流れ込む。ミルザバット地区はCGCで二分され、北東側のオールドゾーンには11のWCA、南西側ニューゾーンには6つのWCAがある⁷⁵⁾。排水路は両ゾーンにあり各圃場に接するように配置され、暗渠排水は主にニューゾーン、垂直排水はオールドゾーンに建設されている。シルダリア州の灌漑排水網、ミルザバット地区のWCAの位置、各WCAの概要をそれぞれFig. 3-1, Fig. 3-2, Table 3-1に示す。

3.3 分析方法

3.3.1 観測値の入手

入手した観測値は、各 WCA の月別水配分実績、綿花・小麦栽培実績、土壌塩分濃度、地下水位、地下水塩分濃度、垂直排水の月別電力消費量の 6 項目である。各データは関係機関（BISM, 地区政府, HGME, UNES）が 2012 年（垂直排水は 2011 年）から 2014 年にかけて記録したものである。データはフェルメル評議会を通じて入手した。

3.3.2 分析方法

観測値を WCA 毎に数値化し、WCA 間の傾向を比較した。また、水配分実績に対する収量、地下水、土壌塩分濃度との関連性を分析した。垂直排水データについては、地下水位との関連性を比較した。

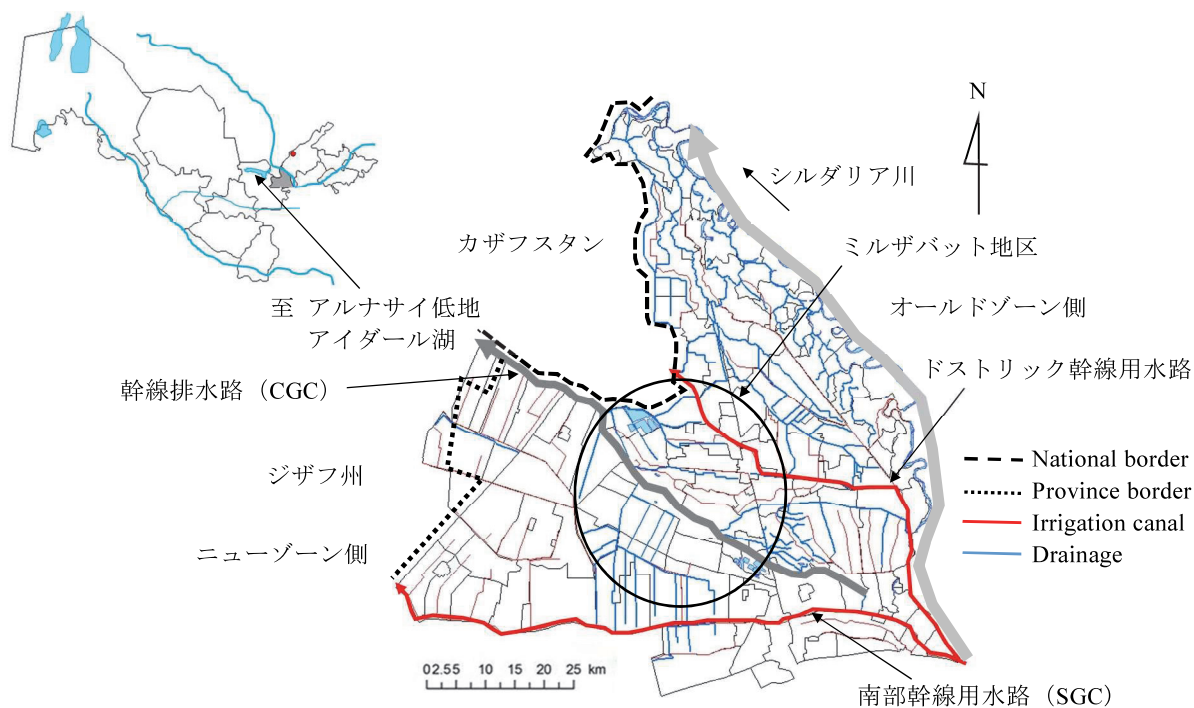


Fig. 3-1 シルダリア州の灌漑排水網

Irrigation and drainage systems in Syrdarya Province

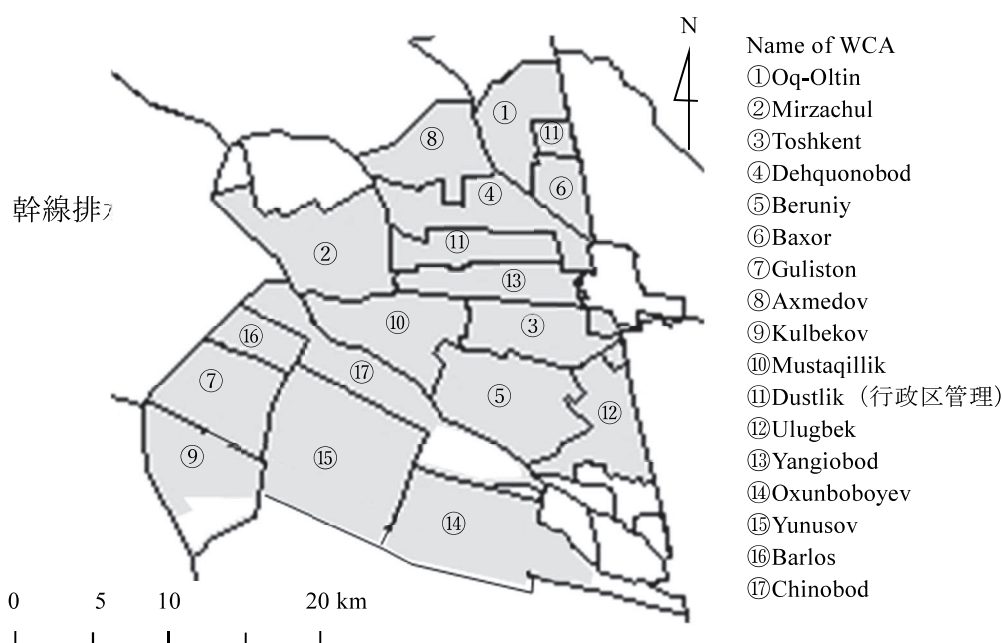


Fig. 3-2 ミルザバット地区の WCA 区域

WCA area in Mirzaobod District

Table 3-1 ミルザバット地区WCAの概要 (2013年)

Outline of WCA in Mirzaobod District (2013)

WCA名称	設立年	灌漑サービス		灌漑排水施設				
		面積* ¹⁾ (ha)	フェル メル数	灌漑水路* ²⁾ (km)	排水路 (km)	暗渠 排水 (km)	垂直 排水* ³⁾	排水路の 浚渫
① Oq-Oltin	2003	2,470	53	74.5(17.7)	63.0	3.4	8	一部
② Mirzachel	2002	2,312	44	76.0(29.0)	120.8		3	なし
③ Toshkent	2002	1,645	66	83.2(13.2)	84.5		5	一部
④ Dehquonobod	2002	2,627	53	94.0(27.3)	135.1	2.0	12	なし
⑤ Beruniy	2002	1,770	54	49.6(4.6)	87.5	28.0	4	一部
⑥ Baxor	2003	827	36	35.8(5.8)	19.1		4	一部
⑦ Guliston	2002	2,142	48	63.7(59.7)	53.1	250.1		なし
⑧ Axmedov	2002	1,739	45	80.0(11.0)	71.1		13	一部
⑨ Kulbekov	2002	1,912	36	48.2(43.2)	39.1	271.6		一部
⑩ Mustaqillik	2002	1,802	28	45.3(3.3)	100.8		8	なし
⑪ Dustlik* ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	8	-
⑫ Ulugbek	2002	1,501	27	42.6(6.3)	108.9	18.6	4	なし
⑬ Yangiobod	2002	1,973	33	49.6(15.6)	84.2	3.4	11	一部
⑭ Oxunboboyev	2002	3,785	62	97.4(92.4)	113.7	357.4		なし
⑮ Yunusov	2002	5,411	44	72.1(66.6)	106.4	532.8		なし
⑯ Barlos	2003	761	27	27.9(24.9)	11.6			なし
⑰ Chinobod	2003	1,326	24	33.6(30.6)	29.6	105.5		なし
Total		34,003	680	973.5(451.2)	1,227.2	1,572.8	80	

*¹⁾ WCAデータ, *²⁾ 灌漑水路括弧内はフリュームタイプまたはコンクリートの延長

*³⁾ 垂直排水の施設数は2014年の調査結果, *⁴⁾ 行政区管理によるWCA, データ未収集

3.4 分析結果

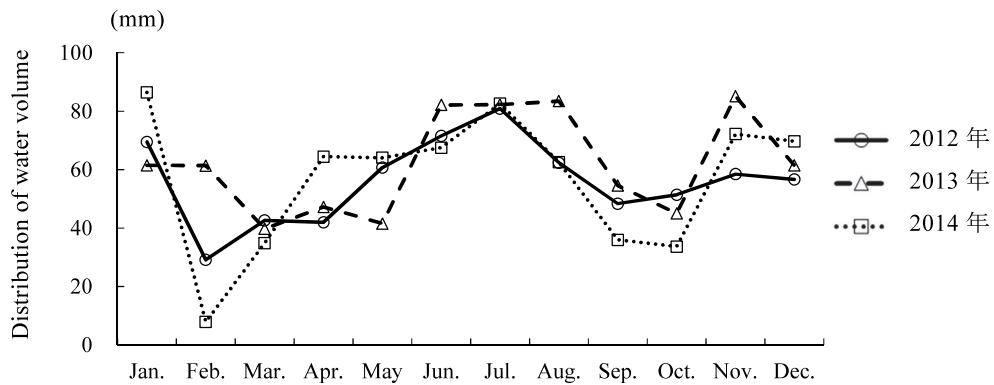
3.4.1 WCA への水配分実績

水配分実績 (m³) は, BISM, ISD から各 WCA への配分水量である. ISD または WCA の技術職員が灌漑用水路の水量を観測し, 月別に取りまとめている (付属資料 Table A1).

ミルザバット地区 17WCA のうち, 15WCA の 3 カ年の月別実績を Fig.3-3 に示す. 除かれた 2WCA は, データが入手できなかった行政区管理のドストリック (Dustlik) WCA, 水配分区域が他地区と跨っているバホール (Baxor) WCA である. 水量は, 11 月~1 月, 6 月~9 月が多くなっていた. 前者は綿花へのリーチングと小麦への灌漑時期, 後者は乾季の灌漑時期である.

各 WCA の水配分実績の数値化は, 水配分実績を WCA 面積で除した水量 (mm) とした. WCA 面積は, HGME のモニタリングデータの図化面積を採用した. 地区全体の配分水量は年平均約 710 mm であった. 3 年間, 各 WCA には大きな変化はなかった. 最大の配分水量はヤングバット (Yangiobod) WCA の 1,620 mm (2012), 最少はチノボット (Chinobod) WCA の 160 mm (2012) であり, 10 倍の差が見られた (Fig. 3-4).

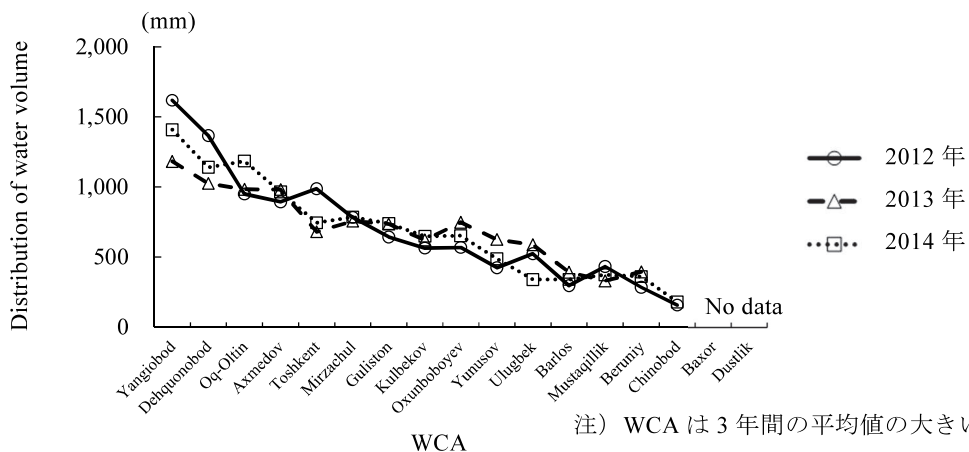
HGMEによれば、綿花圃場のリーチング水量は約 250~400 mm とされている。灌漑は、通常、夏季7月~8月に約 400 mm（約 200 mm を2回程度実施、農家からの聞き取り結果による）が供給されている。よって、合計 650~800 mm 程度が綿花圃場に必要となる。WCA への配分水量はこれに用水の搬送ロスを考慮したものである。搬送ロスを 30%程度と想定すると、綿花圃場への配分水量は 930~1,110 mm 程度となる。綿花は WCA の一部で栽培されているため、配分水量はこれより少ない値となるものと想定されるが、ヤングバット WCA は 1.5 倍程度になっており、明らかに過剰な水配分を受けていることが分かる。ヤングバット WCA では、2010年、2011年においても水配分計画より実績がそれぞれ 1.5 倍、2.4 倍に達していたと報告されており、水管理意識の低さがうかがわれる⁷⁶⁾。



注) 15WCA (Dustlik, Boxor を除く)

Fig. 3-3 ミルザバット地区の月別配分水量

Monthly distribution of water volume in Mirzaobod District



注) WCA は3年間の平均値の大きい順

Fig. 3-4 WCA 別年配分水量

Distribution of annual water volume by WCA

3.4.2 綿花および小麦の栽培実績

(1) 栽培面積と水配分

入手データは、州農業部局により WCA 別に集計された綿花および小麦の栽培面積とその生産量である（付属資料 Table A2）。

WCA 毎に栽培面積率（%），単収（ t ha^{-1} ）を計算した。前者は、綿花および小麦の栽培面積を HGME 図化面積で除した値，後者は綿花および小麦の生産量をそれぞれの栽培面積で除した値である。

データが得られた 16 WCA（ドストリック WCA を除く）の栽培面積率および単収を前述の配分量の多い WCA 順に Fig. 3-5 に示す。栽培面積率（Fig. 3-5 の折れ線グラフ）は右肩下がりの傾向が見られ，栽培面積率が多い WCA では配分量も多くなっている傾向が見られた。全 WCA の 3 年間の平均栽培面積率は，綿花 23%，小麦 25%であるが，2008 年時点のシルダリア州内 8 地区各 2WUA（合計 16WUA）から聞き取り調査結果によれば，栽培面積率は綿花 55%，小麦 39%程度であった。綿花，小麦ともに面積率は減少していた。特に，綿花は 2008 年の半分以下に減少しており，作物多様化政策が進展しているものと考えられる。

綿花栽培面積は，平均すると WCA 面積の 1/4 程度であり，全農地で何らかの作物が作付けされたとしても，必要水量は 650～920 mm（綿花と同様の灌漑水量を仮定）である。ヤンガバット，デフカナバット，オコルティン，アフメドフの 4WCA は過剰な配分量になっていることが推定される。

国家注文である綿花は，栽培面積と生産量が契約事項であり，これらを確保できない場合，農地貸与にも影響する。このためフェルメルは安全側という意識から多量に灌漑水を供給する傾向がある。さらに，綿花の販売価格の低迷からフェルメルはリーチングや灌漑に費用や労力をかけない粗放的な水管理を行う場合が多い⁵⁸⁾。このような傾向も過剰な水配分実績に拍車をかけているものと考えられる。

(2) WCA 別の収量

綿花および小麦の 3 年間の平均単収は，それぞれ $1.7 \pm 0.2 \text{ t ha}^{-1}$ ($n=48$)， $2.1 \pm 0.4 \text{ t ha}^{-1}$ ($n=46$) であった。ウズベキスタンおよびシルダリア州の平均単収（推定値）は，それぞれ 2.0 t ha^{-1} ， 2.2 t ha^{-1} であり，綿花は州平均より 15%程度，小麦は 5%程度低くなっていた⁷⁷⁾。

WCA 別に見ると、アフメドフ WCA（綿花 2.1 t ha⁻¹、小麦 2.9 t ha⁻¹）が高く、収量が比較的小さい WCA（綿花 1.5 t ha⁻¹ 以下の 4WCA、小麦 1.9 t ha⁻¹ 以下の 3WCA）と有意差(p<0.01)が見られた、ほかの WCA 間の収量には有意な差は見られなかった (Fig. 3-5)。

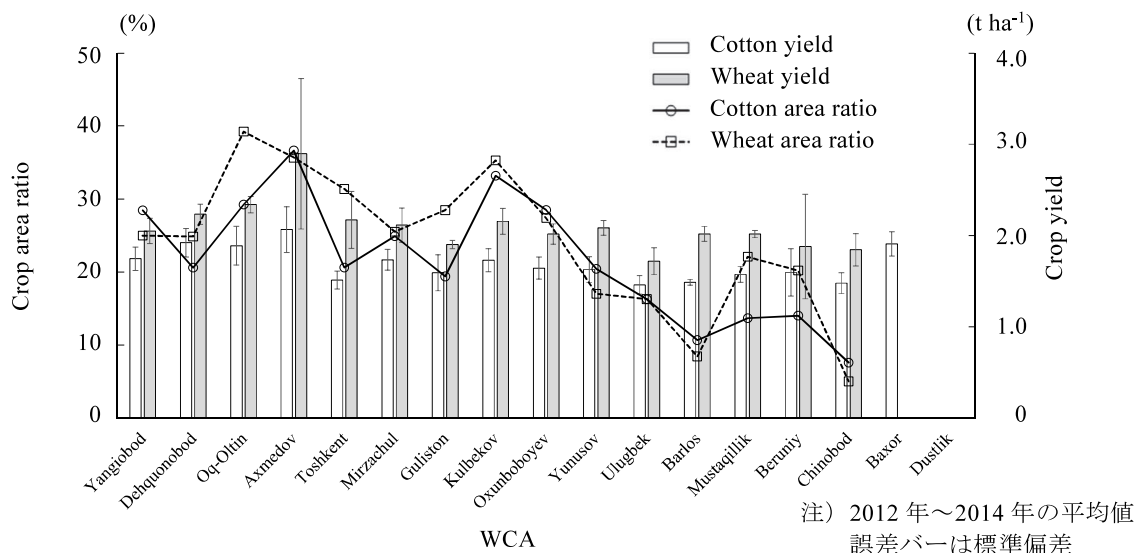


Fig. 3-5 WCA 別平均作物栽培面積率と収量
Average crop area ratio and yield by WCA

3.4.3 土壌塩分濃度

(1) 土壌塩分濃度の測定

HGME は、4月、10月に土壌塩分濃度を測定し、区分別に面積を算定している。ミルザバット地区ではモニタリング先進技術のモデル地区として、これまで手書きであった区分図を GIS 化している。今回、入手したのはこの GIS 化に基づき算出された面積データである (Fig. 3-6, 付属資料 Table A3)。濃度の区分は「塩害なし、軽度、中度、重度」である。

HGME によれば、測定は約 50 ha に 1カ所程度とされているが、2012年は 40,000 ha に対して約 1,800カ所 (約 22ha に 1カ所) であり、計画よりも密に測定されていた。測定は RIIWP (旧 SANIIRI) が開発した土壌挿入式の EC メーター (Progress 1T) で行われる。HGME 技術職員が各圃場を回り、3層の深度 (0~30 cm, 30~70 cm, 70~100 cm) を計測する。この EC メーターでは土壌の間隙水の塩分濃度および地温を計測し、そのデータから変換式を用いて ECe 値に換算される。

(2) 土壌 ECe の変化

各 WCA の土壌 ECe の比較として、4段階の区分の代表値とそれぞれの面積から加重平

均値を求めた。各区分の代表値は「1 dS m⁻¹, 3 dS m⁻¹, 6 dS m⁻¹, 12 dS m⁻¹」とした。3年間の17WCAの平均値, 最大WCA, 最小WCAをFig. 3-7に示す。平均値は4月4.6±1.1 dS m⁻¹, 10月5.3±1.2 dS m⁻¹であり, 乾季を経て14%増加していた。土壌ECe変化傾向は, 最大WCAと平均値が同じであるが, 最小WCAにはほとんど変化がなく, WCAにより違いがあることがうかがえる。

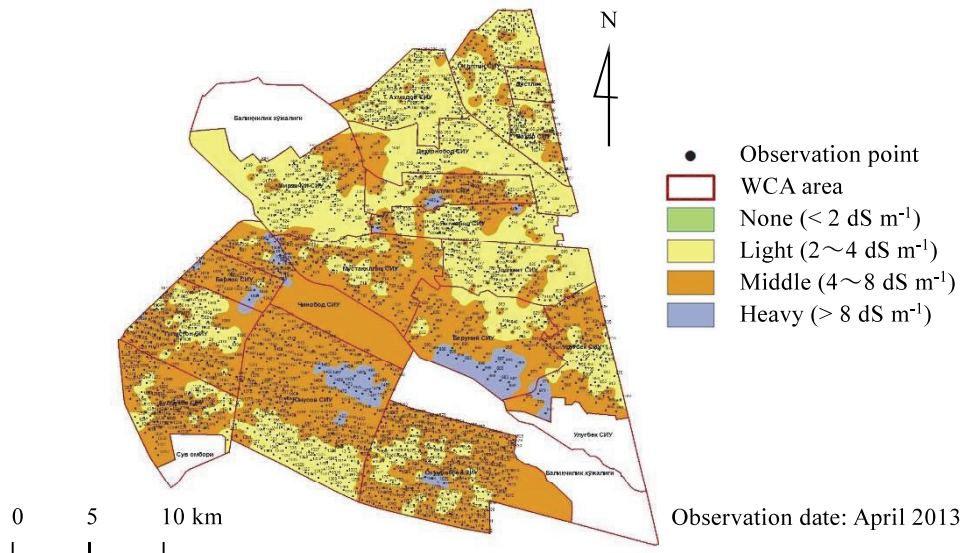


Fig. 3-6 HGMEによる土壌塩分濃度区分図

Area map showing soil salinity levels in HGME preparation

Source: HGME in Syrdarya Province

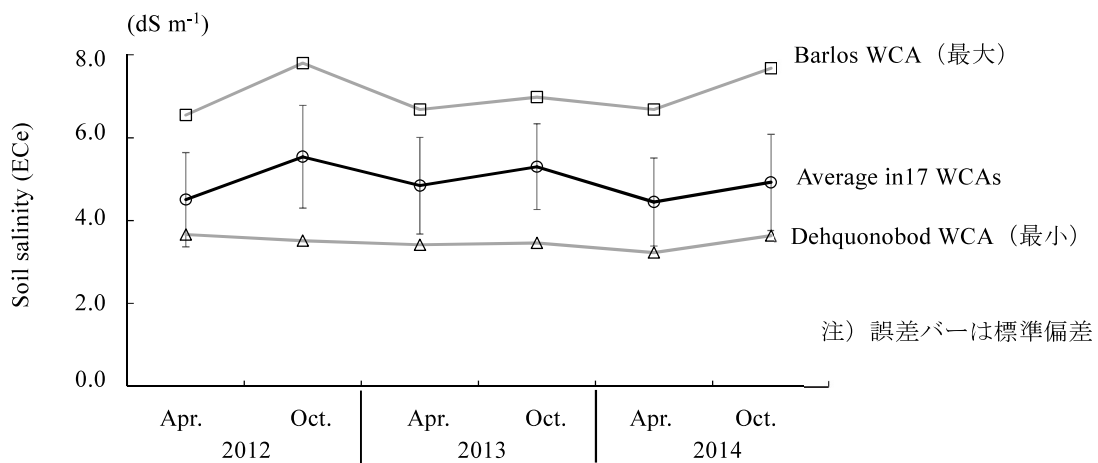


Fig. 3-7 土壌塩分濃度の変化 (2012年~2014年)

Changes in soil salinity (2012-2014)

(3) リーチング時の配分水量と土壌ECeの関係

10月と翌年4月の間には雨季があり, 綿花圃場ではリーチングが行われる。HGMEのガ

イドラインによれば、塩分濃度が高い圃場ではリーチング水量を多くすることが指導されている。このリーチング水量が多ければ、塩分濃度の低下量が大きくなることが予想される。すなわち、10月のECe値が高いWCAでは、その冬の配分水量が多く、翌年4月のECe値との差も大きくなるものと考えられる。Fig. 3-8にリーチング時期12月および1月の合計配分水量とECe値の関係性を示す。その結果、配分水量の多いWCAにおいて、10月、4月ともにECe値が低くなっている傾向が見られた。10月ECeが高いWCAの配分水量が多いと想定したが、異なる結果となった。リーチング水量は土壤のモニタリング結果が反映されていないことが示唆される。また、配分水量に対する10月から4月にかけてのECeの減少量の分布には、リーチングの効果がほとんど見られなかった。

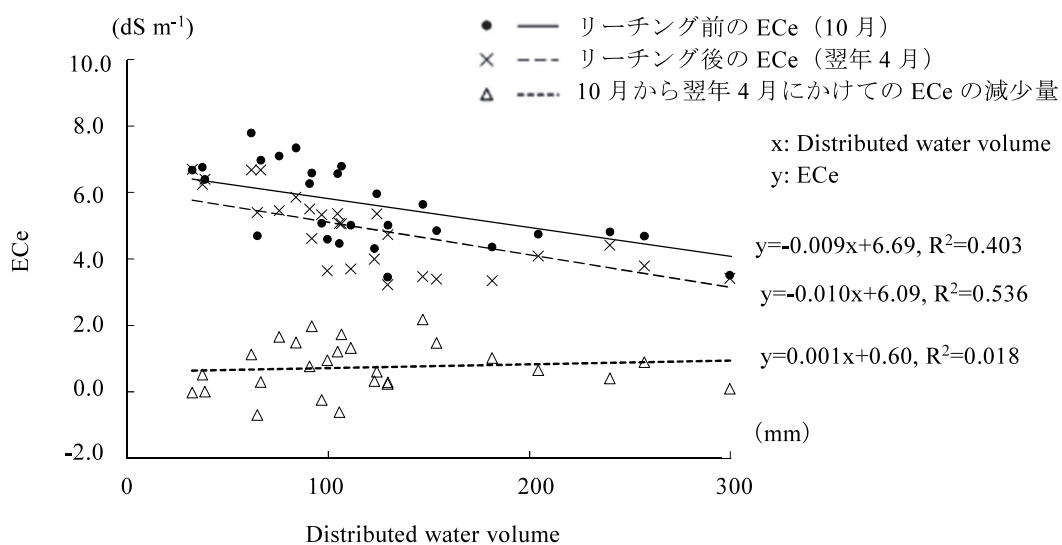


Fig. 3-8 リーチング時の水配分と土壤 ECe の関係

Relationship between distributed water volume and soil ECe during leaching period

3.4.4 地下水の水位および塩分濃度

(1) 地下水の観測

HGME は地下水位と地下水の塩分濃度を定期的に測定し、区分別に面積を算定している。今回、2012年の地下水位データ（HGMEの観測井による計測結果）、2012年から2014年の各WCAの水位と塩分濃度の区分別面積データ（土壤と同様のGIS面積データ）を入手した（Fig. 3-9, 附属資料 Table A4, Table A5）。

地下水位と地下水塩分濃度の測定値はともに5段階に区分される。地下水の測定は、圃場周辺に設置された観測井の定点観測で行われている。HGMEによれば、測定は約150ha

に 1 点とされている。シルダリア州内には観測井が 2,030 カ所、ミルザバット地区内には 294 カ所（約 140 ha に 1 カ所）設置されていた。水位の観測は月 3 回（10 日毎）に行われる⁷⁴⁾。塩分濃度の測定は、4 月、7 月、10 月に採水し、総溶解固形分（TDS, g L^{-1} ）が分析される。区分別面積は 4 月、7 月、10 月の測定結果に基づき算出される。

各区分の範囲は、地下水位「0~-1.0 m, -1.0~-1.5 m, -1.5~-2.0 m, -2.0~-3.0 m, -3.0 m 以深」（地表面から距離，上向きをプラスとする），塩分濃度（TDS）「0~1.0 g L^{-1} , 1.0~3.0 g L^{-1} , 3.0~5.0 g L^{-1} , 5.0~10.0 g L^{-1} , 10.0 g L^{-1} 以上」である。

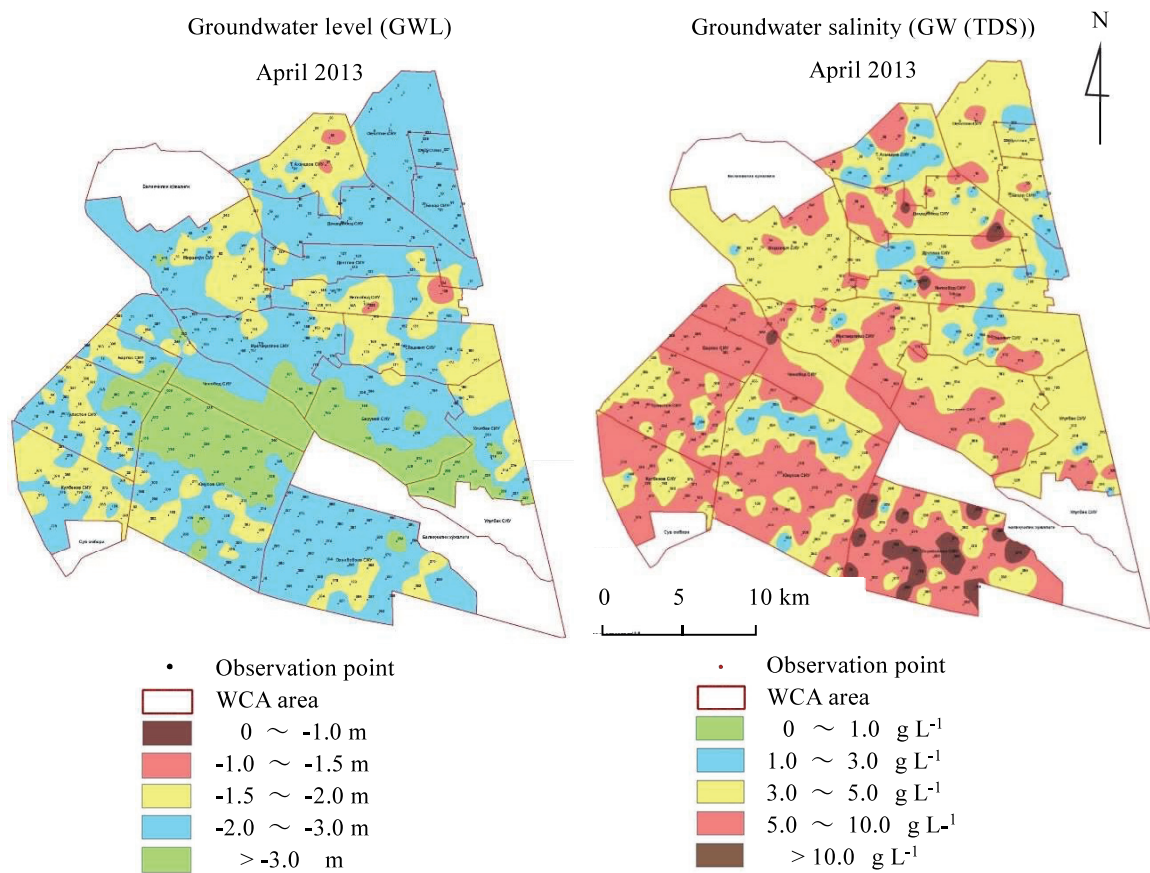


Fig. 3-9 HGME による地下水位および地下水 TDS 区分図

Area map showing groundwater level and groundwater TDS in HGME preparation

Source: HGME in Syrdarya Province

(2) 地下水位の変化

地下水位の比較においては、土壌 E_{Ce} と同様に 5 段階区分の代表値とそれぞれの面積から加重平均値を求めた。代表値は「-0.5 m, -1.25 m, -1.75 m, -2.5 m, -3.5 m」とした。3 年間の値について、17WCA の平均値，最大 WCA，最小 WCA を Fig. 3-10 に示す。2012 年と 2014 年は雨季の終わりに地下水位が上昇し，夏季に下降する季節変動が明確であるが，2013

年は変化が見られなかった。地下水位の変化は、WCA 間で高低差はあるものの同様な傾向を示していた。配分水量以外に河川水位などのミルザバット地区全体の地下水位を変動させる外部要因が影響しているものと考えられる。

(3) 地下水の塩分濃度 (TDS)

地下水 TDS は、地下水位と同様に 5 段階区分の代表値とそれぞれの面積から加重平均値を求めた。代表値は「0.5 g L⁻¹, 2.0 g L⁻¹, 4.0 g L⁻¹, 7.5 g L⁻¹, 15.0 g L⁻¹」とした。3 年間の値について、17WCA の平均値、最大 WCA、最小 WCA を Fig. 3-11 に示す。WCA 間にはバラツキがあり、変動傾向は一致していないが、平均値ではほぼ変化が見られず、3 年間の変化に有意差 (p<0.05) は見られなかった。

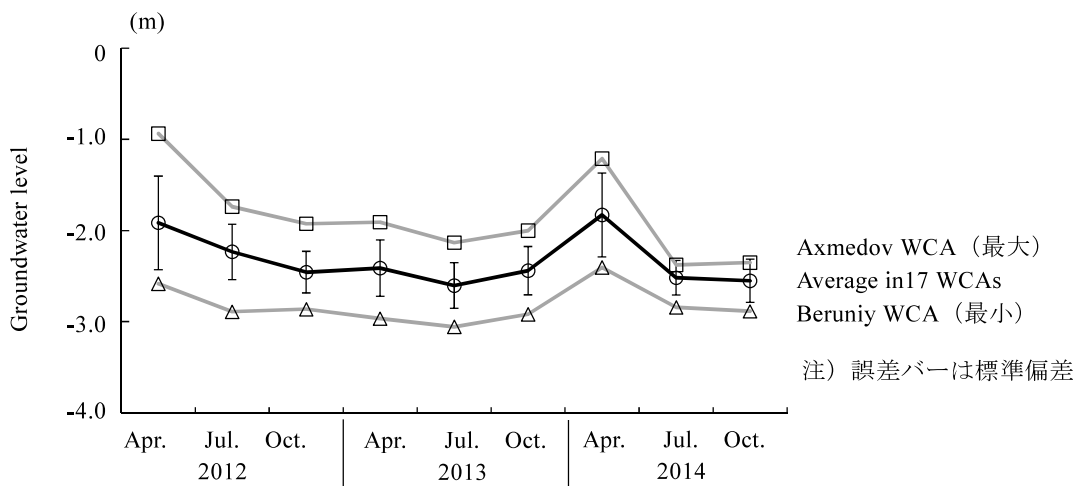


Fig. 3-10 地下水位の変動 (2012 年～2014 年)
Fluctuations in groundwater level (2012-2014)

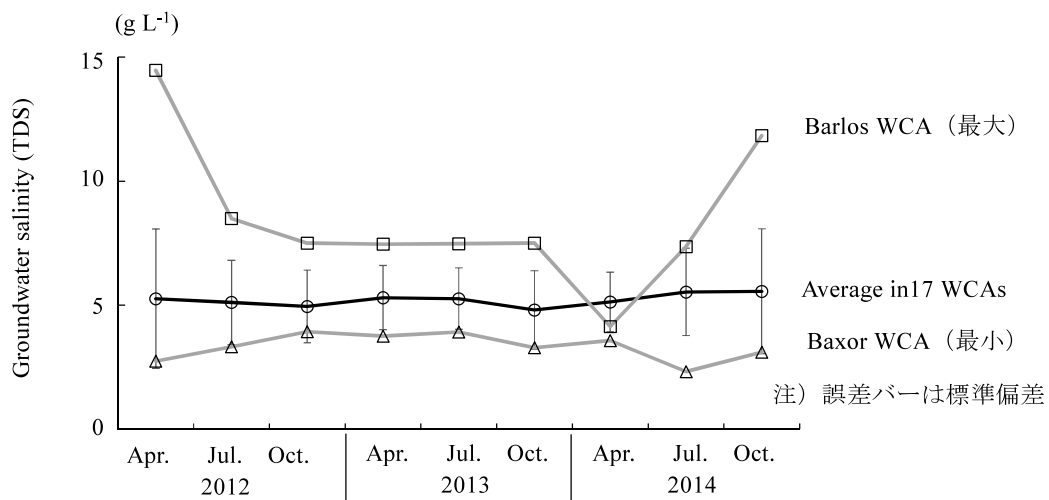


Fig. 3-11 地下水塩分濃度の変動 (2012 年～2014 年)
Fluctuations in groundwater salinity (2012-2014)

3.4.5 土壌塩分濃度の影響因子の評価

土壌塩分濃度に影響すると考えられる配分水量，地下水位，地下水塩分濃度のデータ間の関連性を重回帰分析により検討した。

重回帰分析では，乾季を終えた 10 月時点の土壌 ECe を目的変数とし，説明変数を配分水量，地下水位および地下水 TDS の 3 項目とした。回帰式は以下で示される。

$$\hat{E}_i = aA_i + bB_i + cC_i + k \quad (i = \text{各 WCA のデータ})$$

ここで， E_i ：目的変数（実測値），土壌 ECe (dS m^{-1})

A_i, B_i, C_i ：説明変数

A_i ：配分水量（単位：1,000 mm，直前の半年間 4 月から 9 月までの合計値）

B_i ：地下水位（単位：m，上向きプラス，4 月，7 月，10 月の平均値）

C_i ：地下水 TDS（単位： g L^{-1} ，4 月，7 月，10 月の平均値）

a, b, c ：配分水量，地下水位，地下水 TDS の偏回帰係数， k ：定数項

分析は減少法とし，説明変数の除去条件は $p > 0.05$ とした。その結果， $a = -2.01$ ， b は除去， $c = 0.42$ ， $k = 3.81$ ，が得られた（Table 3-2）。

配分水量 (a) の偏回帰係数はマイナスを示している。配分水量が 1,000 mm 多い WCA では土壌 ECe が約 2.0 dS m^{-1} 減少している結果となった。冬季のリーチング時期ではないが，配分水量にはリーチング用水も含まれ，除塩に繋がっていることが想定される。

地下水位 (b) の偏回帰係数は，最終的に説明変数から除去されており，地下水位の高低と土壌 ECe の関連性は少ない結果となった。

地下水 TDS (c) の偏回帰係数はプラスを示している。塩分量が 1 g L^{-1} 多い WCA では土壌 ECe が 0.4 dS m^{-1} 増加している結果となった。標準偏回帰係数によれば，配分水量よりも影響が強く現れている。

上記の目的変数，説明変数の関係を Fig. 3-12 に示す。配分水量が多い順の WCA において，配分水量が少なくなるに従い，土壌 ECe と地下水 TDS が増加傾向を示していた。一方，地下水位の変動には明らかな関連性が見られなかった。

以上，現地機関観測データを三次水路レベルの領域を管理する WCA から見た。地下水 TDS が塩類集積の増加リスクを高め，配分水量がリーチング効果として現れていることが示唆された。一方，地下水位の影響については明確に示すことができなかった。地下水位

が塩類集積に影響を及ぼすことは明らかな点であり、この点については、圃場レベルで詳細な検証を行う必要がある。

Table 3-2 10月時点の土壌塩分濃度に関する重回帰分析 (2012年~2014年)

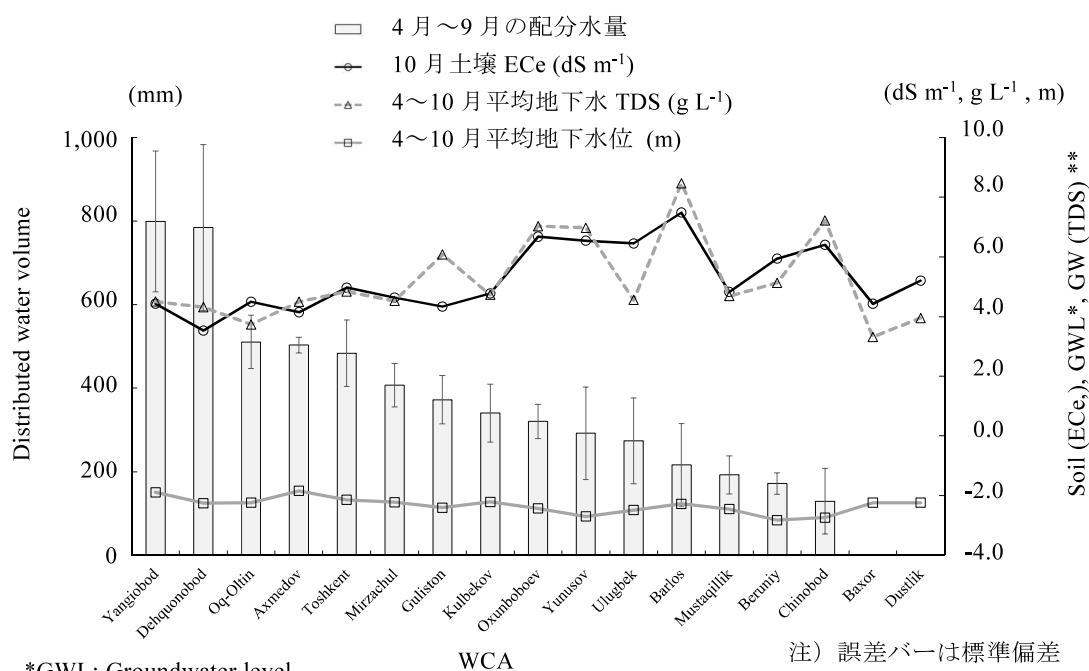
説明変数	3変数の場合			変数選択後 (減少法)		
	偏回帰係数	標準偏回帰係数	p値	偏回帰係数	標準偏回帰係数	p値
a. 配分水量 (1,000 mm)	-1.58	-0.28	0.048	-2.01	-0.36	0.0035
b. 地下水位 (m)	-0.48	-0.13	0.32	-	-	-
c. 地下水 TDS (g L ⁻¹)	0.42	0.52	<0.001	0.42	0.52	<0.001
k. 定数項	2.52	-	0.087	3.81	-	<0.001
重相関係数・決定係数	R	R ²	修正 R ²	R	R ²	修正 R ²
	0.77	0.59	0.56	0.76	0.58	0.56

注) データ数 n=45 (2012年~2014年)

配分水量は単位面積当たりの水量で4月から9月までの合計値

地下水位, 地下水 TDS は4月, 7月, 10月の平均値

説明変数の除去条件は p 値 > 0.05



*GWL: Groundwater level

**GW (TDS): Groundwater (TDS)

Fig. 3-12 リーチング時の水配分と土壌 ECe, 地下水位および地下水 TDS
Distributed water volume and soil ECe, GWL, and GW (TDS) during leaching period

3.4.6 垂直排水

(1) 施設の運用管理状況

UNES は、垂直排水施設毎の月別電力消費量を記録している。今回、2011 年から 2014 年までのミルザバット地区の記録データを手に入れ、施設の位置および管理状況を確認した (Fig. 3-13)。

垂直排水は 80 カ所 (灌漑専用を除く) が運用されている。施設はオールドゾーンの 11WCA にあり、その数は 1,000 ha 当たり平均 4 カ所であるが、WCA 間でバラツキがある。1972 年から 2005 年の間に建設され、その 90%以上が 1970 年代のものである。現在でも垂直排水に対するニーズは高く、シルダリア州全域およびミルザバット地区において、2013 年時点で新規建設がそれぞれ 55 カ所、25 カ所、補修工事が 148 カ所、18 カ所計画されている。ミルザバット地区では既に 3 つの WCA (ムスタキリック、ベルニーおよびウルグベック) で新たに 7 カ所が建設中であった。

2011 年から 2014 年のミルザバット地区の電力消費量は年間約 1.0~1.5 GWh であった。各施設の電力消費量から、試運転程度のものや 1 年以上使用されていないものなどが見られ、運転実績にはバラツキが見られた。UNES からの聞き取りによれば、運転実績の少ない施設は、①点検整備中、②配電盤などの盗難、③耕作放棄地周辺の施設、などであった。

月別の電力消費量を見ると、地下水位が高くなる冬季 (11 月~2 月) の運転は少なく、蒸発量が多く塩類集積が激しくなる夏季 (6 月~7 月) に多くなり、その差は 3~4 倍になっていた (Fig. 3-14)。現地技術者からの聞き取りによれば、地下水の塩分濃度が低い場合は、河川の灌漑水と混合して利用することが認められており、夏季には灌漑用補給水として運転要請が多くなるとのことであった⁷⁸⁾。

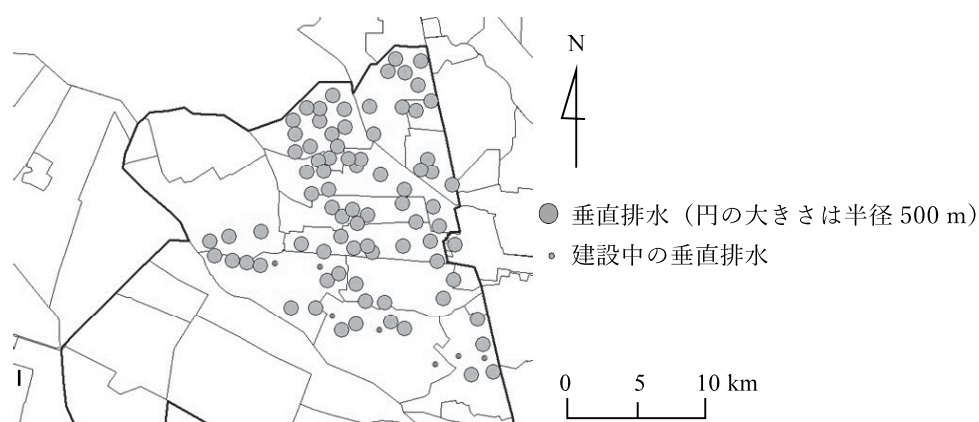


Fig. 3-13 ミルザバット地区の垂直排水位置図

Map showing locations of vertical drainage in Mirzaobod District

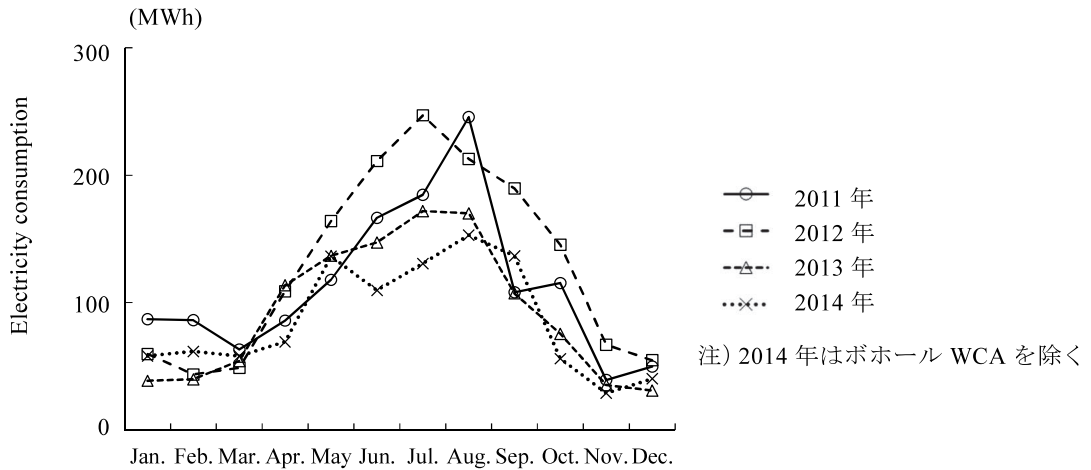


Fig. 3-14 垂直排水の月別電力消費量 (2011年～2014年)
 Monthly electricity consumption of vertical drainage (2011-2014)

(2) 垂直排水が地下水位，土壤に及ぼす影響

垂直排水を有する 11WCA の電力消費量 (1～12 月) と地下水位 (4 月, 7 月, 10 月の平均値) の関係を見ると, 地下水位が高い WCA において電力消費量が多くなる正の相関が見られた (Fig. 3-15). 一方, 地下水位を下降期 (4 月～10 月) と上昇期 (10 月～翌年 4 月) に分け, 電力消費量に対して, 運転の効果と想定される地下水位の変化量 (各期間の水位差, マイナスが下降状態) の関係を見ると, バラツキが大きくなり, 下降期は弱い逆相関, 上昇期はほとんど相関がなかった (Fig. 3-16, 3-17). 高い地下水位を示す WCA において, 電力消費量が多いことは, 垂直排水の運用目的に合致するが, 運用実績では地下水位の制御効果は現われていない可能性がある⁷⁵⁾.

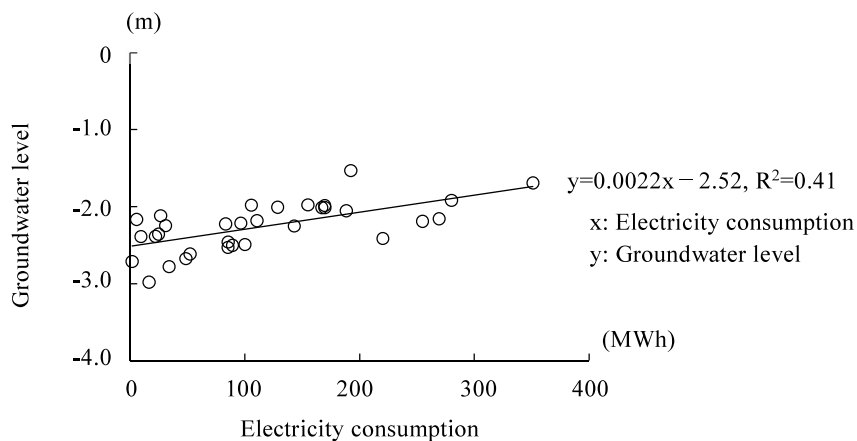
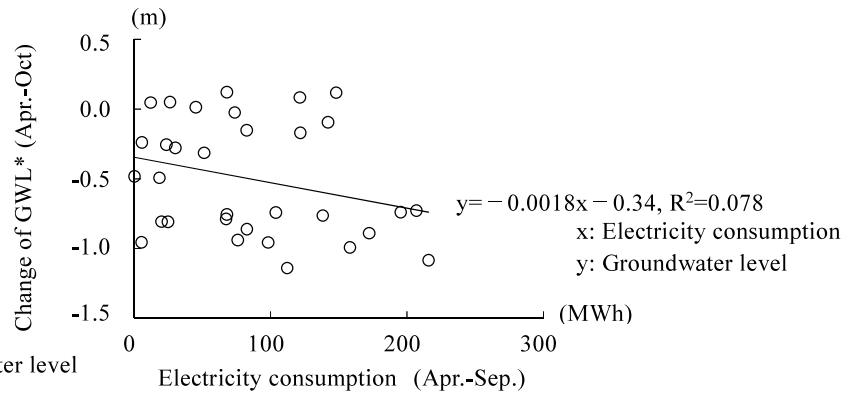


Fig. 3-15 電力消費量と地下水位 (2012年～2014年)
 Relationship between electricity consumption and groundwater level (2012-2014)

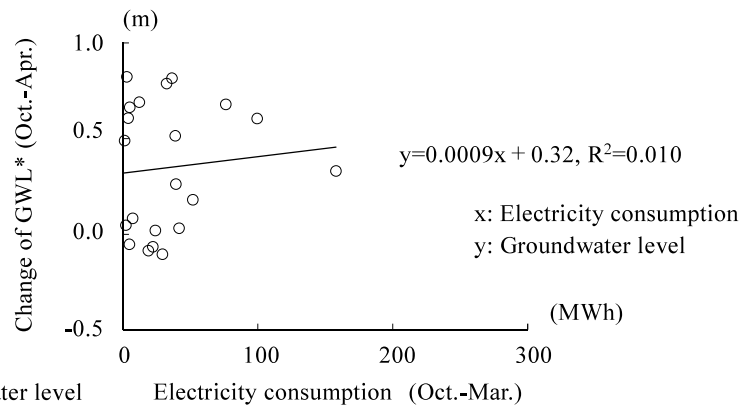


*GWL: Groundwater level

注) 縦軸は10月 GWL から同年4月 GWL を引いた値 (マイナス方向が水位の下降を示す)
横軸は4月～9月までの電力消費量の合計値 (2012年～2014年)

Fig. 3-16 地下水下降期の電力消費量と水位変化の関係

Relationship between electricity consumption and GWL change during the lowering period



*GWL: Groundwater level

注) 縦軸は4月 GWL から前年10月 GWL を引いた値 (マイナス方向が水位の下降を示す)
横軸は10月から翌年3月までの電力消費量の合計値 (2011.10-2012.3, 2012.10-2013.3, 2013.10-2014.3)

Fig. 3-17 地下水上昇期の電力消費量と水位変化の関係

Relationship between electricity consumption and GWL change during the rising period

(3) 垂直排水の有無と地下水位の変動

ミルザバット地区には垂直排水のない WCA もあり, これらの地下水位の変動と垂直排水を有する 11WCA の変動を比較した. HGME より入手した 2012 年の 17WCA の地下水位 (10 日毎の観測データ) を「①垂直排水が建設されている区域 (11WCA)」, 「②垂直排水なし+暗渠排水ありの区域 (4WCA)」および「③垂直排水なし, 暗渠排水なしの区域 (2WCA)」の 3 つに分け, 変化を比較した.

②は①と③よりも常に地下水位が低く推移していた. これは暗渠排水の効果が現れているものと考えられる. 電力消費量が多い 6 月から 9 月の地下水位の下降期に着目すると, ①の下降速度は②および③のそれとほとんど違いが見られなかった (Fig. 3-18)⁷⁴⁾. また,

4月の土壌 ECe に対する 10月の増減比を見ても、①、②、③の間に有意差 ($p < 0.05$) は見られなかった (Fig. 3-19).

以上の点から、ミルザバット地区の垂直排水において、現状の運転状況では地下水制御効果が現れていないことが示唆される。現地関係者からの聞き取りによれば、垂直排水は地下水制御効果が高いと評価されている。高額な電気料金に加え、盗難・故障への対応の遅れ、耕作放棄地などの受益区域の変化、灌漑補給水としての揚水要請など当初の運用計画時とは状況が変化してきている。これらの変化に効率的に対応するため、垂直排水の地下水制御効果を明確にする必要がある。

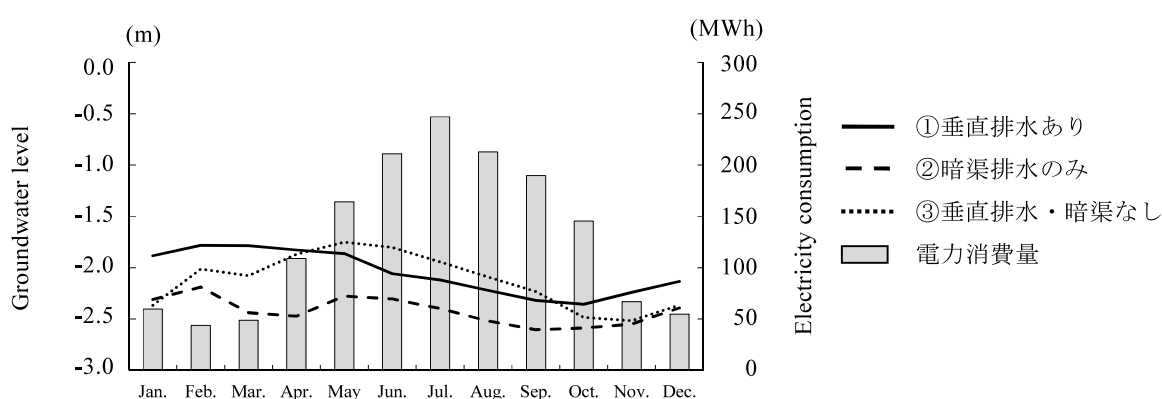


Fig. 3-18 垂直排水の電力消費量と地下水位の変化 (2012年)
Changes in electricity consumption and groundwater level (2012)

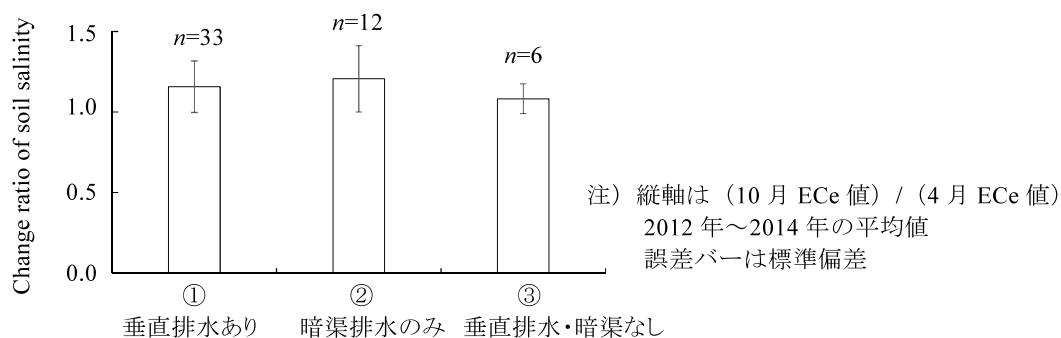


Fig. 3-19 排水条件別の土壌 ECe 増減比 (2012年~2014年)
Changes in the ratio of soil ECe with respect to drainage condition (2012-2014)

3.5 まとめ

乾燥地の灌漑農業には、灌漑水の過剰な供給により地下水位が上昇し、毛管作用で塩分が表層に移動し、その結果、作物に被害をもたらす塩害が付きまとう。シルダリア州 HGME は、土壌や地下水のモニタリングや農地改善事業だけでなく、BISM, UNES, 州農業部局,

WCA, 農家と連携して塩害対策に当たっている. 限られた資源や予算の中で効率的に塩類集積対策を実施していくためには, 観測結果が適切に反映されなければならない.

本章では, シルダリア州の中でもっとも塩類集積の深刻なミルザバット地区において, HGME ほかの現地機関が収集した塩害に関連する観測・分析データを用いて, データ間相互の関連性を三次水路レベルの領域を管理する WCA を対象に論じた. データは, 各 WCA の水配分実績, 綿花・小麦の栽培面積と生産量, 土壌の塩分濃度区分別面積, 地下水位の深さ区分別面積, 地下水塩分濃度の区分別面積, 垂直排水の電力消費量を用いた.

比較分析の結果, 観測結果が塩類集積対策の計画や実施効果とリンクしていないことがうかがわれた. リーチング時の配分量は, リーチング前の土壌の観測結果が反映されておらず, かつ, 配分量と土壌 E_{Ce} の減少量にも明確な関連性が見られなかった. 土壌 E_{Ce} を目的変数, 配分量, 地下水位, 地下水 TDS の 3 項目を説明変数として重回帰分析を行った結果, 地下水 TDS に正の重相関, 次いで配分量に負の重相関が見られ, 地下水位は説明変数から除外された. 偏回帰係数から, 地下水 TDS が 1.0 g L⁻¹ 増加すると, 土壌 E_{Ce} が 0.4 dS m⁻¹ 上昇, 配分量 1,000 mm の増加で 2.0 dS m⁻¹ 減少することが示された. 栽培期間中の配分量においてもリーチング効果が生じているものと考えられる. 一方, 土壌塩分濃度と地下水位については相関が見られなかった. 乾燥地において高い地下水位が塩類集積に影響することは既往の研究から明らかであり, 灌漑水の EC の影響を考慮していないことや WCA 内の平均化が影響を消してしまった可能性がある. その他, データの精度 (測定, 分析ミスなど), 区分別面積の精度 (GIS 分析面積と実灌漑農地面積の差など), WCA の施設条件, 地形などの条件の違いも分析結果に影響を与えている可能性も否定できない. 詳細な検証が求められる. このため次章において, 圃場レベルの観測データを用いて, 地下水と土壌塩分濃度の関連性を明らかにする.

垂直排水については, 地下水位の高い WCA で電力消費量が多くなっていた. しかし, 垂直排水の有無で WCA を見た場合, 運転時間の多い時期であっても地下水位の変動傾向に大きな違いが見られず, 垂直排水の効果が現れていないものと考えられた. 次章において, 垂直排水近傍の地下水位データを用いて, ポンプ運転が地下水位へ及ぼす影響を明らかにする.

第4章 圃場レベルの水と塩分の観測

4.1 目的

前章において、現地行政機関から入手した水文・土壌の観測結果を三次水路レベルの領域を管理するWCAを対象として分析した。その結果、地下水位と土壌塩分濃度との関係、垂直排水の運転と地下水位の関係が明らかにされなかった。本章では、農家圃場周辺域を研究対象とし、測定密度を上げたデータを用いて、地下水、土壌、排水施設との関連性を明らかにする。

4.2 研究対象圃場

研究対象圃場のあるWCAは、ミルザバット地区のヤングバットWCA、オコルティン地区ボブールWCAである。両WCAの用水系統は、ヤングバットWCAがドストリック幹線用水路から分水されたK3用水路掛かり、ボブールWCAが州南部の幹線用水路（South Golodnostep Canal）から分水された中央用水路末端の左岸用水路掛かりである。灌漑用水は用水路から分水後、U字型コンクリート水路などで圃場まで運ばれ、各圃場で取水される。灌漑方法は畝間灌漑で圃場内に仮水路が築造され各畝間に通水される。排水系統は、ヤングバットWCAでは北側にある排水路（Sardoba Main Collector）を経て中央幹線排水路（Central Golodnostep Main Collector : CGC）へ排水される。ボブールWCAでは西側末端で接続している排水路（17-K-7）を経て同じくCGCへ排水される。CGCはジザフ州に入り、アルナサイ低地・アイダール湖に至る。

研究対象圃場は、ヤングバットWCAがNurafshon Qulb Sehri農場（以下、Y圃場）、ボブールWCAがPaxtakor農場（以下、B圃場）である。

両WCAおよび試験圃場の概要、WCAの位置、WCA内の用排水系統をそれぞれTable 4-1, Fig. 4-1, Fig. 4-2に示す。

Table 4-1 WCAおよび研究対象圃場の概要

Outline of WCAs and research fields

	ヤンガバットWCA* ¹⁾	ボブールWCA* ¹⁾
設立年	2002年	2003年
組合員数 (フェルメル)	33	54
地区面積 (宅地, 導水路を含む)	2,290 ha	5,890 ha
灌漑排水施設		
灌漑農地	1,973 ha	4,820 ha
幹線水路からの分土工	12カ所	10カ所
用水路 (うち, ライニング)	49.6 (15.6) km	103.2 (88.2) km
排水路	84.2 km	74 km
暗渠排水	3.4 km (一部のみ)	350 km (WCA全域)
垂直排水	9	—
研究対象圃場の農場名	Nurafshon Qulb Sehri (Y圃場)	Paxtakor (B圃場)
面積	13 ha	29 ha (全体46 ha)
大きさ (幅×長さ)	450 m×290 m	450 m×650 m
土性区分* ²⁾	SL, L, CL	CL
垂直排水	南側450 m地点に1基	—

*¹⁾ ヤンガバットWCAは2012年データ, ボブールWCAは2009年データ

*²⁾ 土性は国際土壌学会の分類による

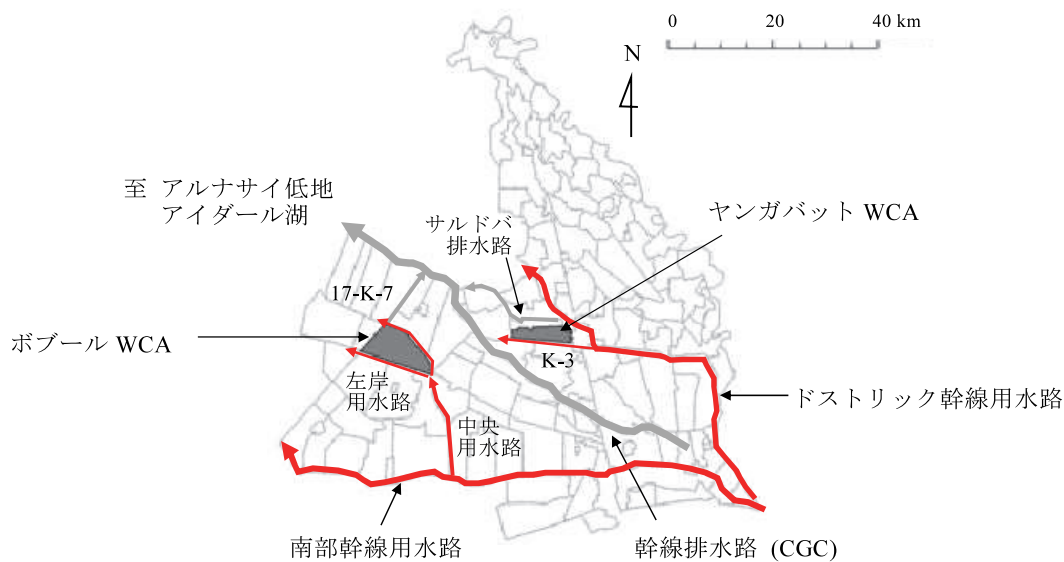


Fig. 4-1 研究対象 WCA の位置図
Map showing locations of research WCAs

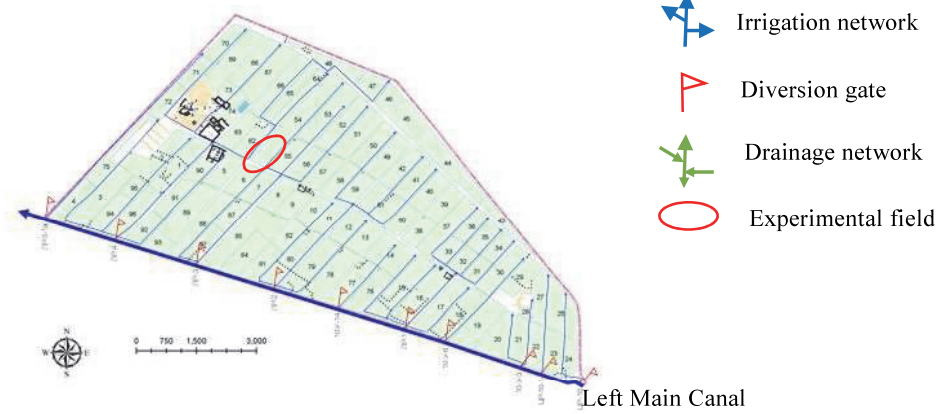
ヤングバット WCA 用水系統図



ヤングバット WCA 排水系統図



ボブル WCA 用水系統図



ボブル WCA 排水系統図

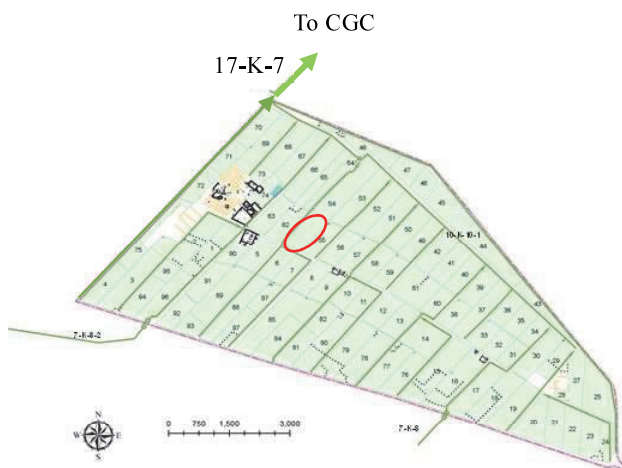


Fig. 4-2 研究対象 WCA の用排水系統図
Irrigation and drainage systems in research WCAs

Source: The Committee of the Republic of Uzbekistan for Land Resources, Geodesy, Cartography and State Cadastre

4.3 調査・分析方法

4.3.1 調査・分析の内容

研究対象圃場周辺の排水施設の踏査・測量および土壌・水文データの観測により、排水施設が地下水位に及ぼす影響、地下水位と土壌の関係性を分析した。

調査・分析の項目は、以下のとおり。

- (1) 排水施設の現状把握
- (2) 排水路・暗渠排水，地下水位，土壌塩分濃度の関係
- (3) 水・塩分収支の算定
- (4) 垂直排水の運転時の深層地下水位，表層地下水位への影響分析

4.3.2 排水施設の調査方法

(1) 排水路

Y圃場およびB圃場に接する排水路を踏査・測量し、現状を把握した。水・塩分収支算定のため、排水路の流量および塩分濃度を測定した。流量の測定位置は圃場直下流、測定回数は原則月1回、塩分濃度の測定は月3回とした。流量の測定は、流下断面および流速（電磁流速計ケネック社LP30）を計測した。塩分濃度は現場で電気伝導度計（HORIBA社コンパクトECメータB-173）を用いて測定した。また、流出水を数回採水し、総溶解固形分TDSを分析した。TDSの分析はRIIWPに依頼した。

(2) 暗渠排水

B圃場には暗渠排水が建設されており、このB圃場内の吸水渠の現状を把握した。排水路内の暗渠排水口、圃場内の暗渠管理孔から吸水渠の位置、標高を確認した。排水口については流出状況を確認した。

(3) 垂直排水

ミルザバット地区内で稼働可能な垂直排水を3カ所選定し、施設設置からの距離50 m、100 m、500 mにおける地下水位を測定した。水位の測定は、揚水される深層部透水層の地下水ポテンシャル（以下、深層地下水位）および表層の地下水面（以下、表層地下水位）とした。観測井には塩化ビニール管（径50 mm）を用い、深層部観測井は深さ30 m程度、表層部観測井は深さ5 m程度まで挿入した。観測井の構造は、底部から土砂が浸入するの

を防ぐため管底を栓で閉塞した。深層部観測井は底部から 30 cm 部分のみ側面を穿孔したピエゾメータ型とし、表層部観測井は底部から地表面付近まで側面穿孔した。水位の記録は自記水位計（Onset 社 HOB0-U20-001-04-TI）を孔内に設置し、測定間隔 10 分で計測した。また、3 カ所のポンプ吐出管に量水計を設置し、揚水量を測定した。

4.3.3 地下水・土壌の観測方法

(1) 地下水

地下水の水位（Groundwater level : GWL）および塩分濃度（EC_w）を測定した。観測井を Y 圃場，B 圃場にそれぞれ 20 カ所，38 カ所設置し，2010 年から 2012 年まで原則 10 日に 1 回計測した。観測井の構造は，オーガーで深さ 3～4 m まで掘削し，塩化ビニール管（径 50 mm，管底から 2 m 程度まで穿孔）を挿入した。計測は HGME 技術者に依頼し，テープ式水位計，コンパクト導電率計（HORIBA 社，B-173）を用いて測定した。

(2) 土壌

土壌の塩分量 TDS_{soil} (%) ^{1*)} を測定した。測定箇所は，Y 圃場 52 点，B 圃場 80 点の定点とし，地表面から 4 層（0～30 cm，30～50 cm，50～70 cm，70～100 cm）をオーガーで採取した。採取位置は定点（誤差：数 m～10 m 程度）とした。測定時期は，リーチング前（2009 年 12 月），リーチング後の綿花播種前（2010 年 3～4 月），綿花生育期（同年 7 月），綿花収穫後（同年 10 月），小麦播種前（2011 年 3 月）とした。分析はシルダリア州グリスタン大学に依頼した。

^{1*)} TDS_{soil} は，100 g 乾土当たりの塩分量（g）の割合を%表示したもの。土壌懸濁液による EC1:5 法と同様に，乾土 1 に対して 5 倍の水分量を加え，攪拌後，ろ過した水の総溶解固形分を測定する。

4.4 調査・分析結果

4.4.1 排水施設の現状と問題点

(1) 排水路

Y 圃場の灌漑排水施設の概要を Fig. 4-3 に示す。圃場の東側に排水路（土水路、深さ 2.0～3.0 m、幅 25～30 m 程度）、西側に用水路（コンクリート水路）が接している。また、圃場の南側と北側にも小規模な排水路（土水路、深さ 1.5～2.0 m、幅 6～10 m 程度）が建設されている。排水路は堆砂・雑草が多く、測量結果によれば逆勾配となっている区間も見られた。

B 圃場の灌漑排水施設の概要を Fig. 4-4 に示す。圃場の西側に排水路（土水路、深さ 3.0～4.0 m、幅 25～30 m 程度）、東側に用水路（コンクリート水路）が接している。排水路内には、堆砂・雑草が多く、一部には法面の崩落箇所も見られた。水路勾配から堆砂は少なくとも厚さ 0.7～0.8 m と見込まれた⁷⁸⁾。

WCA 技術者からの聞き取りによれば、排水路の機能を維持するには少なくとも 3～4 年に 1 回程度浚渫が必要である。シルダリア州においても、土地改良基金の予算を受け、HGME が WCA などの要請を考慮しつつ、浚渫路線を決定後、測量設計を行い、浚渫作業を順次行っているが、全ての要請には応えられていない。Y 圃場、B 圃場脇の排水路については本研究に係る観測時点で 10 年近く浚渫実績はない (Fig. 4-5)。

(2) 暗渠排水

ボブール WCA の技術者によれば、同 WCA 内の暗渠排水は、長年、吸水管の掃除も行われておらず、機能していないものも多くあるとのことであった。

B 圃場（研究対象区域 29 ha）には 3 本の吸水渠（径 150 mm）が 1960 年代に建設されている。吸水渠は、埋設深さ 2.5～3.0 m、勾配 1/700 程度で排水路（Fig. 4-4 の a 地点、写真中段）に接続されている。1 本の吸水渠の長さは約 400 m、埋設間隔は約 210～250 m である。同地域の暗渠排水では、圃場中央部および用水路側（吸水渠上流端）に管理孔（Fig. 4-4 の b, c 地点、写真右下は b 地点）が建設され、それぞれ管径 1.0 m、0.5 m のコンクリート管が使われている。

排水路内の排水口（a 地点）については、①および②は堆積した土砂に埋没していた。①の周辺には地下水が流出している形跡が見られず、排水口も発見できなかった。②の周辺では堆積した土砂表面に滲出箇所があり、1 m 程度掘削したところ、排水口が確認できた。

管内には土砂が堆積していた (Fig. 4-4 の写真下の左側および中央)。掘削状態であれば 6 月～7 月には $0.02\sim 0.05\text{ L s}^{-1}$ 程度の流出量が観測された。③の排水口は排水路の水面下に管および湧水状の流出が確認でき、流出量は $0.1\sim 0.2\text{ L s}^{-1}$ 程度であった。なお、③から 1 km 下流側 (試験圃場外) にも暗渠排水④が建設されている。④の排水口は法面に露出しており、流出量は 0.6 L s^{-1} 程度であった⁷⁸⁾。

圃場内中央部の管理孔 (b 地点) については、2 月時点①、②ともに吸水渠が孔内の水面下 2 m にあり、地下水が高いままの状態であった。一方、③は水面下 0.2 m に吸水渠があり、地下水位が低くなっていた。

用水路側の管理孔 (c 地点) については、①は破壊されてなくなっており、コンクリートの一部が残されている程度であった。②および③は内部に土砂が堆積し、吸水渠管を確認することはできなかった。

以上のように B 圃場および周辺の暗渠排水は、排水口が閉塞し流出機能が大きく損なわれているもの (①、②)、機能がやや低下しているもの (③)、排水路法面内にあり良好な状態にあるもの (④) が混在していた。流出機能を確保のためには排水路を浚渫し、④と同様に排水口を露出させ、管内に堆積した土砂を洗浄するなどの維持管理の徹底が必要である。

(3) 垂直排水および観測井

選定した 3 カ所 (VD23, VD1, VD51) の垂直排水施設と観測井の概要および施設の位置をそれぞれ Table 4-2, Fig. 4-6 に示す。UNES の地質調査によれば、3 カ所ともに地表面下 25 m 程度までシルト質の多い層であり、それ以深は主に透水性の高い砂層である。集水するストレーナー管はこの砂層に配置されている。VD23, VD1, VD51 の単位時間当たりの揚水量は、設置当初 $30\sim 40\text{ L s}^{-1}$ であったが、揚水量を測定した結果、それぞれ 16 L s^{-1} , 25 L s^{-1} , 2 L s^{-1} まで減少しており、揚水能力の低下が見られた。

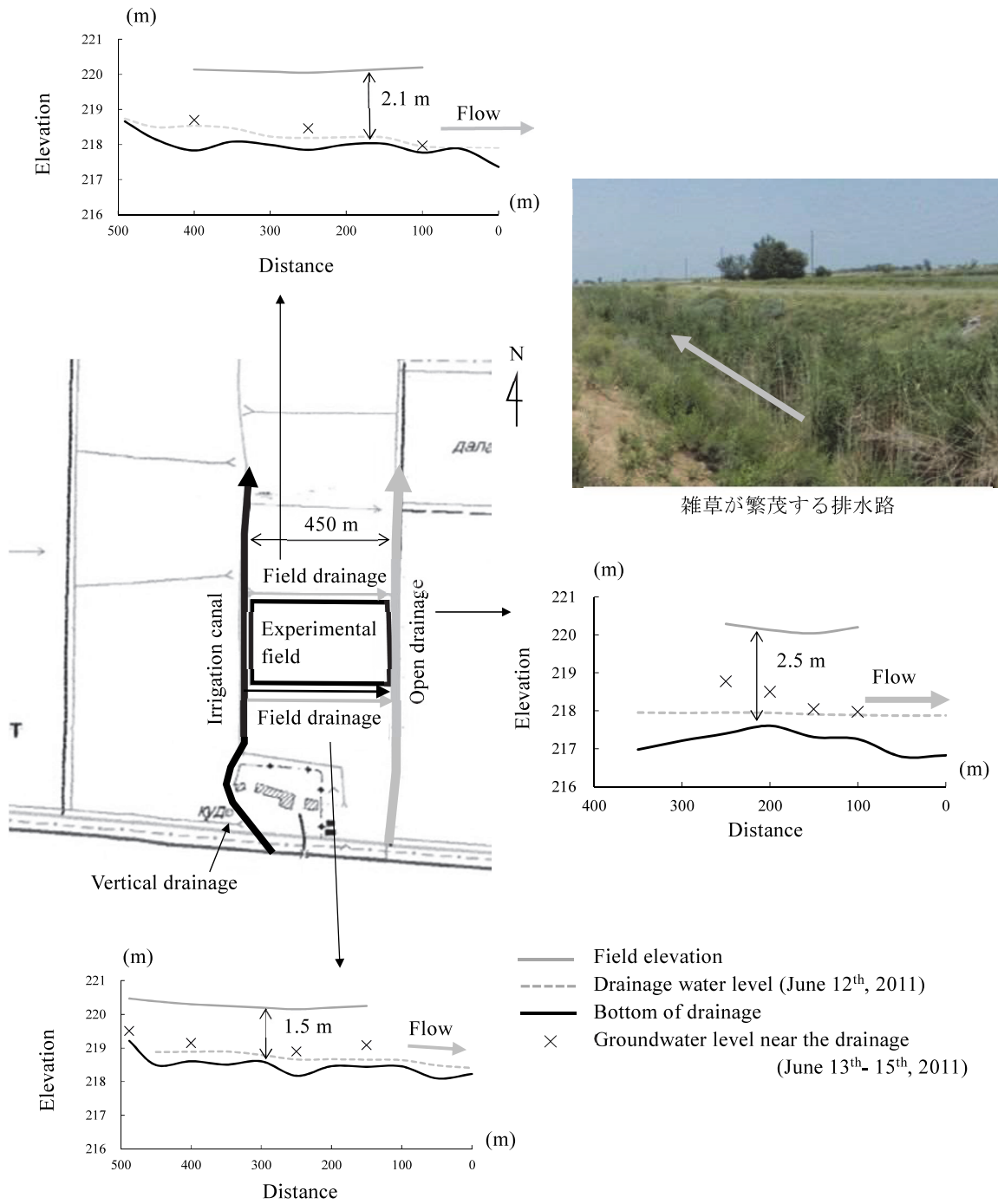
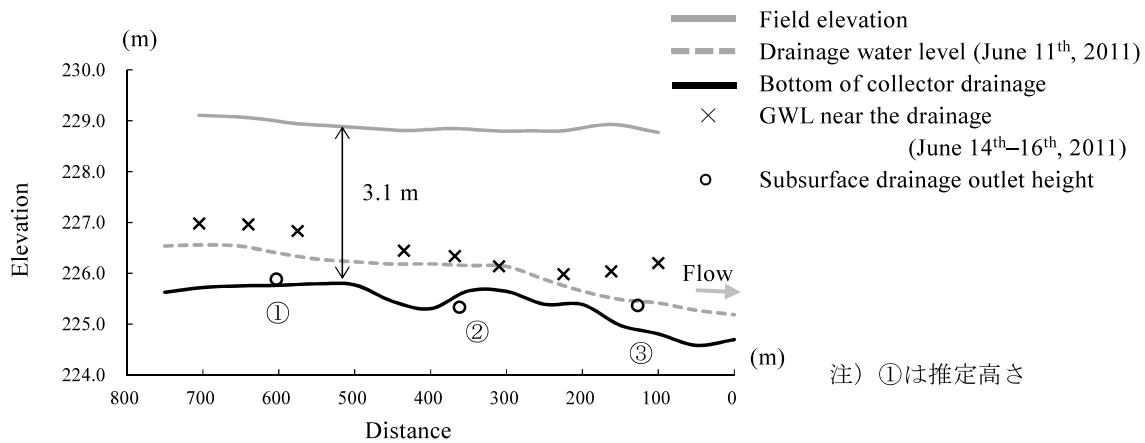
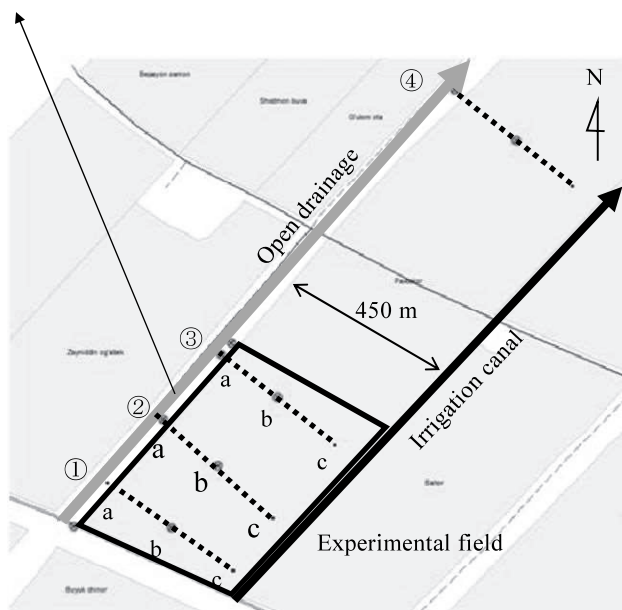


Fig. 4-3 Y 圃場周辺図と排水路縦断図
Map showing Y-field and open drainage profiles



法面が崩落した排水路



..... Sub-surface drainage



排水口 (②-a) の確認作業。
排水口の上部に 60 cm 以上の土砂が堆積



排水口 (②-a) の管内部にも土砂が堆積



圃場中央付近 (b) に設置された暗渠排水の管理孔 (管径 1.0 m)

Fig. 4-4 B 圃場周辺図と排水路縦断面図
Map showing B-field and open drainage profile

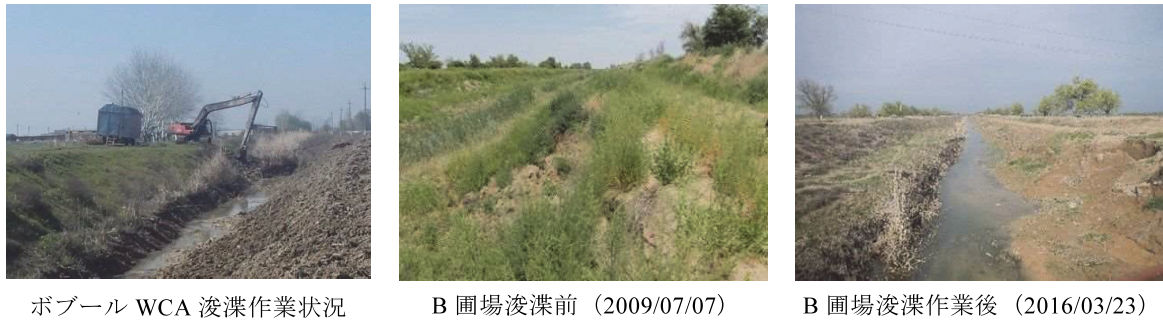


Fig. 4-5 排水路の浚渫事業の様子

Dredging work situations for open drainage

Table 4-2 垂直排水施設および観測井の概要

Outline of vertical drainages and observation wells

項目	VD23	VD1	VD51
WCA	アフメドフ	オコルティン	ヤンガバット
施設番号	23	1	51
位置 緯度	北緯 40°34'20"	北緯 40°36'48"	北緯 40°29'56"
経度	東経 68°39'40"	東経 68°43'21"	東経 68°42'32"
建設年	1978	1978	1974
深さ (ストレーナー位置) : m	52.0 (28.0~47.0)	53.0 (23.4~44.6)	53.0 (31.5~48.9)
地質 上層部 (ローム層) : m	0~26	0~24	0~23
下層部 (砂層) : m	>26	>24	>23
年間使用電力量*1) : MWh	45.5	74.5	31.1
現ポンプ揚水量 (当初揚水量) : L s ⁻¹	16.1 (30)	25.4 (40)	1.7 (35)
灌漑利用	あり (宅地脇菜園)	あり	なし
観測井の位置・深さ : m			
表層 (-0.5~-5.0 m 穿孔)	5	5	5
深層 (底部穿孔)	35	30	30
観測井までの距離	60*3)	100 500	50 100 500
表層観測井地盤高*2)	0 -0.01 -0.55	-0.28 -0.33 -0.98	-0.17 -0.32 -1.24
深層観測井地盤高*2)	-0.02 -0.02 -0.57	-28 -0.35 -1.00	-0.09 -0.34 -1.24

*1) 年間使用電力量は 2012~2013 年の平均値

*2) ポンプ設置個所の地盤標高を 0 m と仮定

*3) 50 m 地点に立木があり, 60 m 地点とした.

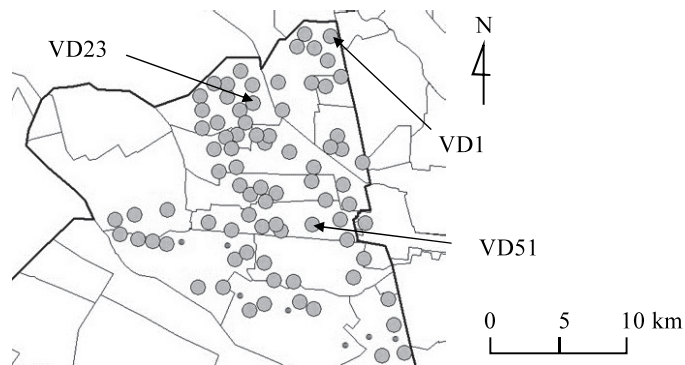


Fig. 4-6 選定した垂直排水位置図

Map showing locations of selected vertical drainages

4.4.2 排水路・暗渠排水と地下水の関係

(1) 地下水と流出水の塩分濃度の変化

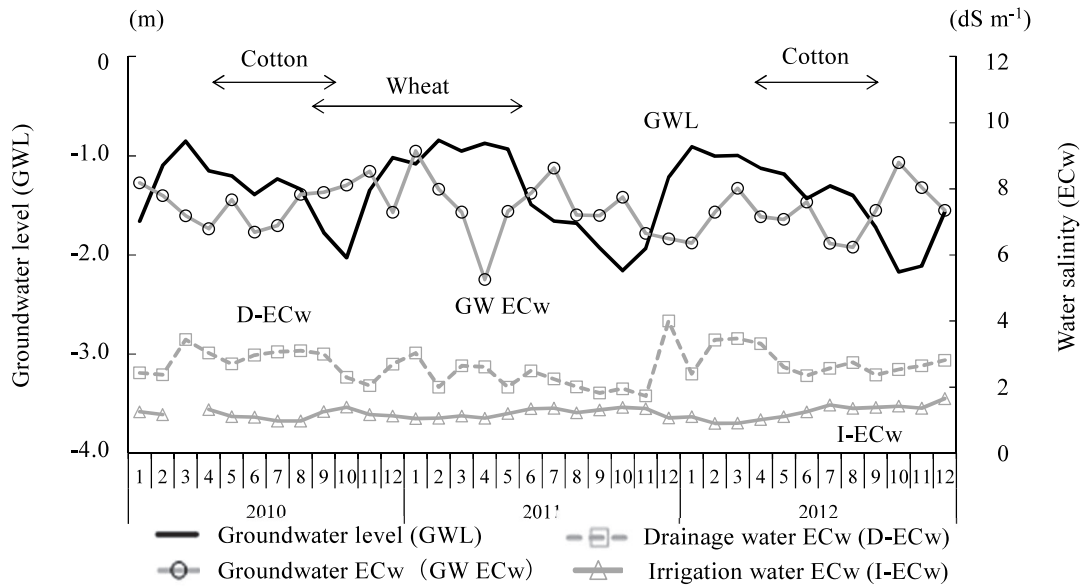
Y 圃場, B 圃場の地下水位, 地下水 ECw, 排水路 ECw, 用水 ECw の変化 (2010 年~2012 年) をそれぞれ Fig. 4-7, Fig. 4-8 に示す.

3 年間の平均地下水位は, Y 圃場-1.38±0.42 m, B 圃場-1.60±0.69 m であった. Y 圃場では地下水位が浅く, その変動幅も小さかった. Y 圃場はシルダリア州の中でも低位部 (B 圃場との標高差は 9 m) にあることに加え, B 圃場は暗渠排水が地下水位を低下させていると考えられる.

地下水 ECw および排水路 ECw の平均値は, それぞれ Y 圃場で $7.4 \pm 1.0 \text{ dS m}^{-1}$, $2.6 \pm 0.7 \text{ dS m}^{-1}$, B 圃場で $6.1 \pm 1.0 \text{ dS m}^{-1}$, $4.0 \pm 1.6 \text{ dS m}^{-1}$ であった. 地下水 ECw は Y 圃場が高く, 排水路 ECw は B 圃場が高かった. 用水 ECw は Y 圃場 $1.2 \pm 0.2 \text{ dS m}^{-1}$, B 圃場 $1.3 \pm 0.2 \text{ dS m}^{-1}$ であり, ほとんど差はなかった. Y 圃場では高い地下水位が長く続いていることにより下層の塩分も上方に拡散移動し, 塩分濃度を上昇させていることがうかがわれる⁷⁹⁾.

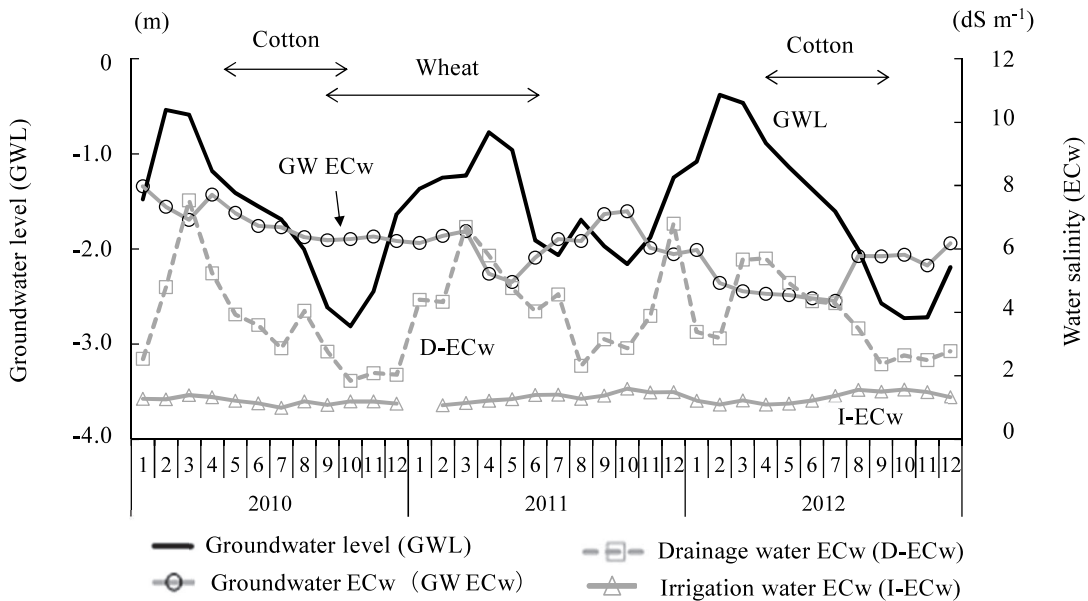
Y 圃場では, 地下水位 (Fig.4-7 の黒実線) の高い時期に排水路 ECw (Fig. 4-7 の□印の灰色破線) の小さな上昇が見られた. 両者の間には中程度の相関 ($r=0.41$, $p<0.05$) があった. 排水路の流量の一部として地下水が浸透流出していることが示唆される. 地下水位の低い時期には, 排水路 ECw は用水 ECw に近づいており, 用水の排水路への流入も示唆される. シルダリア川下流のカザフスタンの水稻作圃場では, 大量の灌漑水が給水され, 大部分が地表排水として排水路へ流出している事例が報告されている⁸⁰⁾. 本研究圃場では地表排水はないが, ヤンガバット WCA の配分水量は過剰傾向であり, 用排水路の交差部または分水工付近での漏水や溢水などにより用水が無効に排水路に流れ込んでいる可能性がある.

B 圃場では, 地下水位 (Fig. 4-8 の黒実線) の高い時期と排水路 ECw (Fig. 4-8 の□印の灰色破線) の上昇時期が一致し, 強い相関 ($r=0.69$, $p<0.01$) が見られた. また, この時期, 排水路 ECw は地下水 ECw (Fig. 4-8 の○印灰色実線) まで上昇していた. これらの関係から, B 圃場では, 地下水が浸透または暗渠排水により排水路に流出し, 排水路の流量のほとんどがこの圃場からの流出水で占められていることが示唆される. 一方, 地下水位が低い時期には, 排水路 ECw は用水 ECw に近づいており, B 圃場においても, Y 圃場と同様に用水の排水路への流入が想定される.



注) GWLとGW ECwの測定箇所数 $n=20$, 各月の値は3回の平均値

Fig. 4-7 地下水位とY圃場周辺の塩分濃度の変化(2010年~2012年)
Changes in groundwater level and salinity around Y-field (2010-2012)



注) GWLとGW ECwの測定箇所数 $n=38$, 各月の値は3回の平均値

Fig. 4-8 地下水位とB圃場周辺の塩分濃度の変化(2010年~2012年)
Changes in groundwater level and salinity around B-field (2010-2012)

(2) Y圃場の排水路と地下水位の関係

上述の(1)において、Y圃場では、地下水位の高い時期、量的には少ないが圃場からの流出が示唆された。排水路に向かう地下水の流れは、地下水面の勾配、すなわち排水路側に向かい地下水位に高低差が生じていると想定される。このため地下水位を排水路からの

距離別に比較した。

観測井を「用水路付近（排水路から遠い地点）」、「圃場中央」、「排水路側」の3カ所（観測井は各箇所3点）に分けた（Fig. 4-9）。1年間（2010年3月～2011年2月）の観測結果を Fig. 4-10 に示す。一時期、用水路側が高くなる時期も見られたが、1年間の平均値は、用水路側、圃場中央部、排水路側でそれぞれ、-1.1 m、-1.2 m、-1.2 m であり、排水路側の低下は 0.1 m に過ぎなかった。排水路に向かい地下水面に勾配がほとんど見られないことから、圃場から排水路へ向かう地下水の流出は少ないと考えられる。

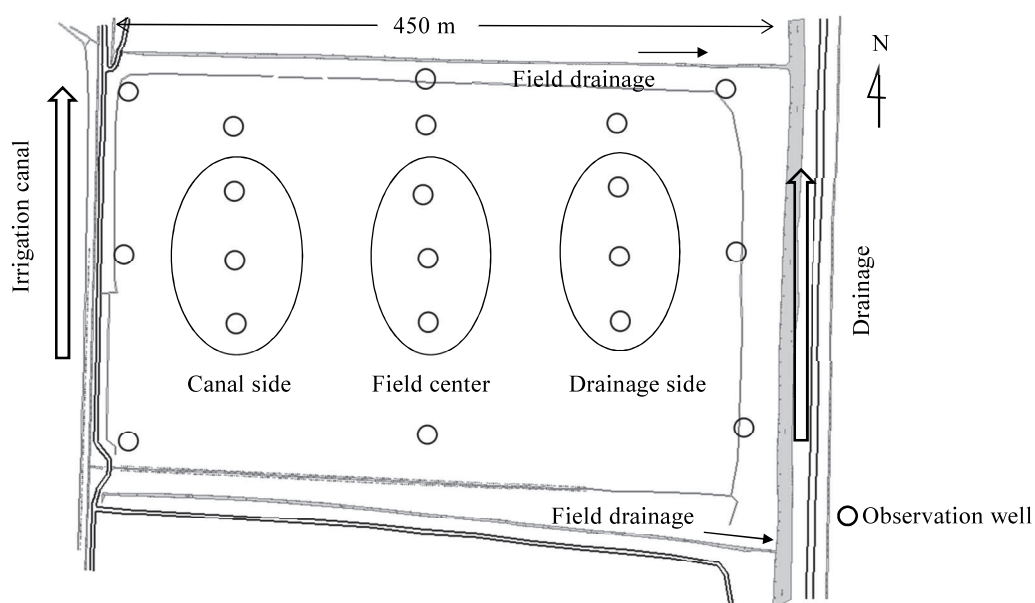


Fig. 4-9 Y 圃場の観測井位置図

Map showing locations of observation wells in Y-field



注) 各観測井の地盤高を 0 m と仮定
 地下水位は観測井 3 カ所の平均値、空白箇所は欠測

Fig. 4-10 Y 圃場各地点の地下水位の年変化（2010年3月～2011年2月）
 Changes in annual groundwater level at each location in Y-field (Mar. 2010 – Feb. 2011)

(3) B 圃場の排水路および暗渠排水と地下水位の関係

B 圃場においても排水路に向かう地下水の流れを想定し、地下水位の高低差を比較した。

B 圃場では暗渠排水があるため、排水路からの距離別「用水路側」、「圃場中央」、「排水路側」に、「吸水渠①（暗渠機能なし）」、「吸水渠③（暗渠機能あり）」の2条件を加え、合計6カ所（観測井は各箇所3点）に分けた（Fig. 4-11）。1年間（2010年3月～2011年2月）の観測結果を Fig. 4-12 に示す。地下水位は、両条件ともに用水路側より排水路側が低く推移していた。また、リーチング後の2010年3月以降、地下水位の下降速度は、灌漑時期を除き、①よりも③が速くなっていた⁸⁾。1年間の平均値は、①の用水路側、③排水路側でそれぞれ、-1.1 m、-2.3 m であり、-1.2 m の差が生じていた。

2011年2月時点の吸水渠に対する横断面および縦断面をそれぞれ Fig. 4-13、Fig. 4-14 に示す。観測井の設置位置が渠線上ではないため厳密には吸水渠上の水位ではないものの、①と③の水位差が明確に現れている。③の排水路側と①の用水路側の地下水位の差は2.0～2.5 m に達していた。①の地下水面は、排水路から用水路側へ向かい100 m 程度までは勾配1.5%程度、その後は0.4%程度で上昇していた。地下水位は、排水路側（40 m 地点）で-2.0 m、圃場中央部（230 m 地点）で-0.5 m、用水路側（380 m 地点）で-0.3 m であり、地下水位制御効果の範囲は排水路に近い部分と限定的であった。一方、③については、圃場中央部まで地下水位が-2.0 m 以深であり、その後、勾配0.7%程度で上昇し、用水路側（380 m 地点）で-1.2 m 程度になった。排水口が法面に完全露出していないものの、地下水位が低く抑えられていることが分かる。ただし、用水路側の地下水位が高くなっていることから、吸水渠上流部の機能は低下していると考えられる。

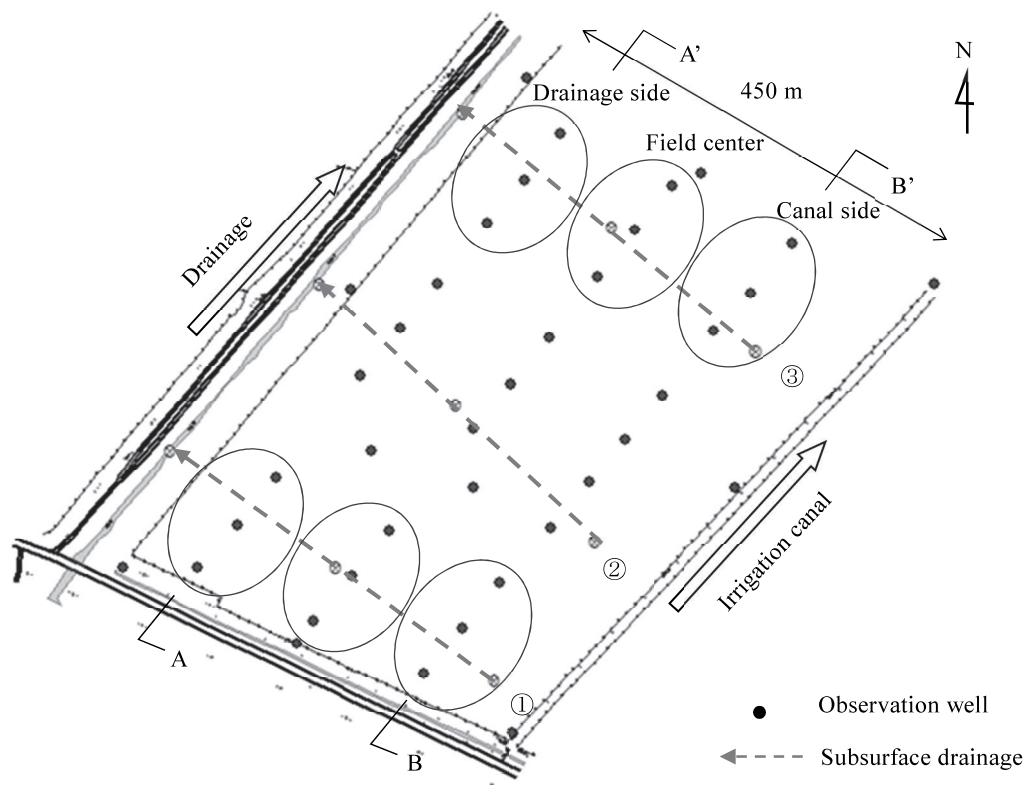
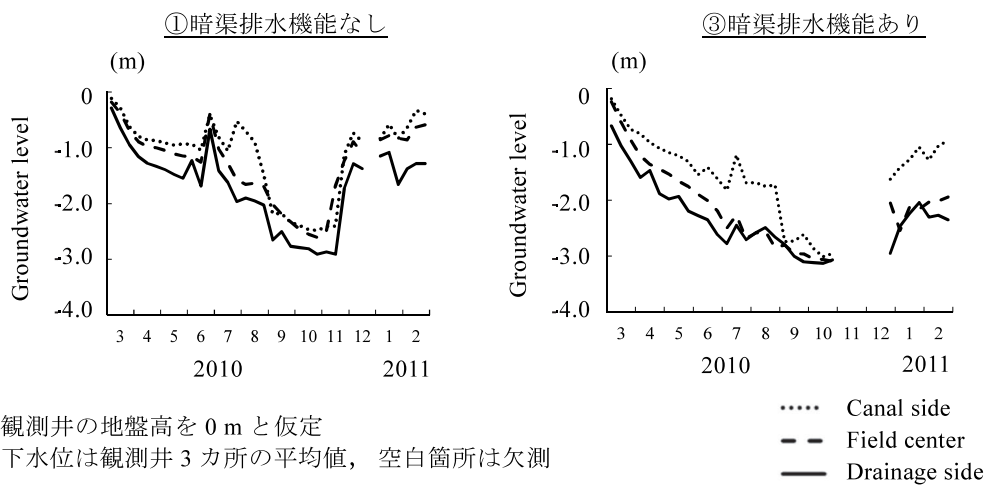


Fig. 4-11 B 圃場の観測井位置図

Map showing locations of observation wells in B-field



注) 各観測井の地盤高を 0 m と仮定
 地下水位は観測井 3 カ所の平均値, 空白箇所は欠測

..... Canal side
 - - - Field center
 ——— Drainage side

Fig. 4-12 B 圃場各地点の地下水位の年変化 (2010 年 3 月～2011 年 2 月)
 Changes in annual groundwater level at each location in B-field (Mar. 2010 – Feb. 2011)

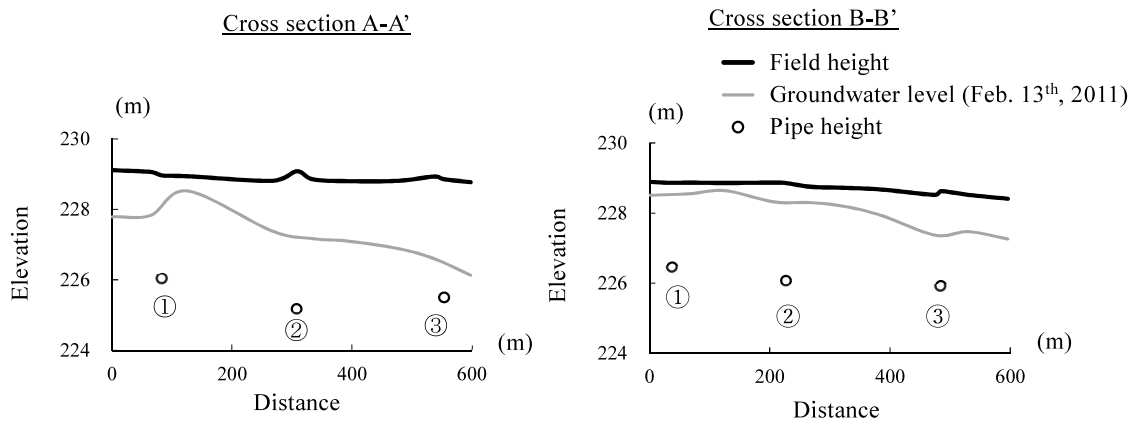
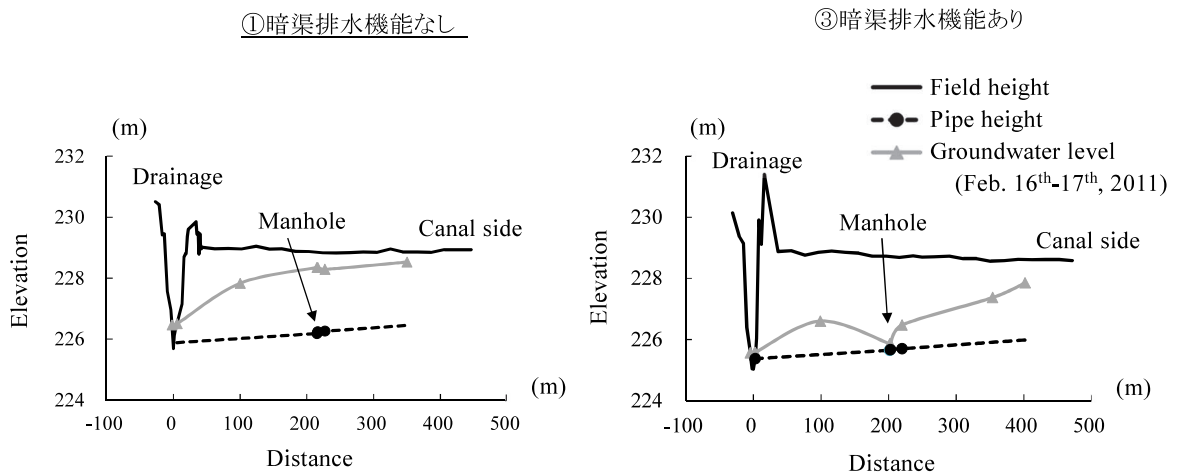


Fig. 4-13 吸水渠近傍の地下水位の横断面図
Cross section of groundwater levels around the tile drain



注) 距離 0 地点は排水路中央
地下水位は観測井が渠線上にないため吸水渠上のものではない。
暗渠管①の縦断標高は③の実測勾配による推定

Fig. 4-14 用排水路間の地下水位の縦断面図
Profile of groundwater levels between the drainage and irrigation canals

4.4.3 排水路・暗渠排水と土壌塩分濃度の関係

Y 圃場, B 圃場の 1 年間の平均土壌塩分量 (土層 0~1 m) は, それぞれ $158 \pm 43 \text{ t ha}^{-1}$, $84 \pm 34 \text{ t ha}^{-1}$ であった. Y 圃場は B 圃場の 1.9 倍の塩分量があり, 塩類集積状況には大きな差がある.

Y 圃場の「用水路側, 圃場中央部, 排水路側」の塩分濃度の分析結果を Fig. 4-15 に示す. 1カ所 (3観測井) 当たりの土壌採取地点は観測井周辺の6点とした. 用水路側の塩分濃度が小さく, 2010年3月を除き有意差が見られた (2009年12月, 2010年7月, 2010年10月: $p < 0.05$, 2011年3月: $p < 0.01$). Y 圃場は圃場中央付近が低く, 排水路側まで灌漑するためには, 用水

路側の水供給を過剰にする必要がある。このため用水路側ではリーチング効果が大きく現れている可能性が高い。地下水位が高い状態で水位差に大きな違いがなかったことから、用水路側で供給された灌漑・リーチング水は、地表面および下降浸透水として、圃場全体に広がり、流出しないまま残留していることが想定される。

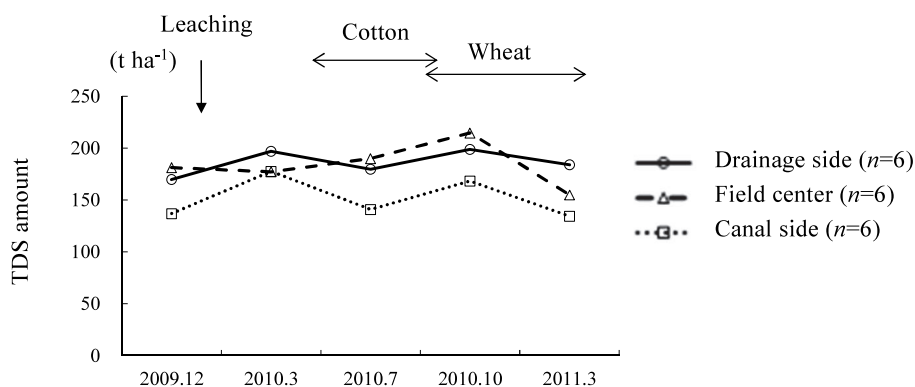


Fig. 4-15 Y 圃場各地点の土壌 TDS の変化 (2009 年 12 月～2011 年 3 月)
Changes in TDS at each location in Y-field (Dec. 2009 - Mar. 2011)

次に、B 圃場の「用水路側，圃場中央部，排水路側」および「暗渠機能なし①，機能有り③」で分けた 6 カ所の土壌塩分濃度の分析結果を Fig. 4-16 に示す。1 カ所当たりの土壌採取点は 6～8 点とした。①では、2010 年 7 月に有意差 ($p<0.01$) が見られたが、その他の時期では用水路側と排水路側に有意差は見られなかった。一方、③では、全時期を通して、排水路側が低く、有意差が見られた (2009 年 12 月: $p<0.05$, 2010 年 7 月, 2010 年 10 月, 2011 年 3 月: $p<0.01$)。また、排水路の効果が少ない用水路側において、①と③を比較すると、2010 年 7 月に有意差 ($p<0.01$) があり、ほかは有意差が見られなかった。以上から、B 圃場の「暗渠排水が機能している排水路付近」では塩類集積軽減効果が 1 年を通じて顕著に現れ、「排水路付近」または「暗渠排水の機能が低下している箇所」では、夏の一時期を除き、塩類集積軽減効果に差が見られないことが分かった。

Y 圃場, B 圃場の土層 0～1 m の土壌塩分量の平均値を Table 4-3 に示す。Y 圃場では、用水路側が排水路側より 35 t ha^{-1} 少ないが、塩分量から換算した ECe 値では、圃場全体が塩類集積区分「重度」に区分され、塩分除去対策が機能していない状態になっていた。B 圃場では、①の用水路側が「重度」であるのに対して、③の排水路側は「中度」となっており、排水路・暗渠排水の両効果が現れていた。その塩分量の差は 58 t ha^{-1} (53%減) に達していた。

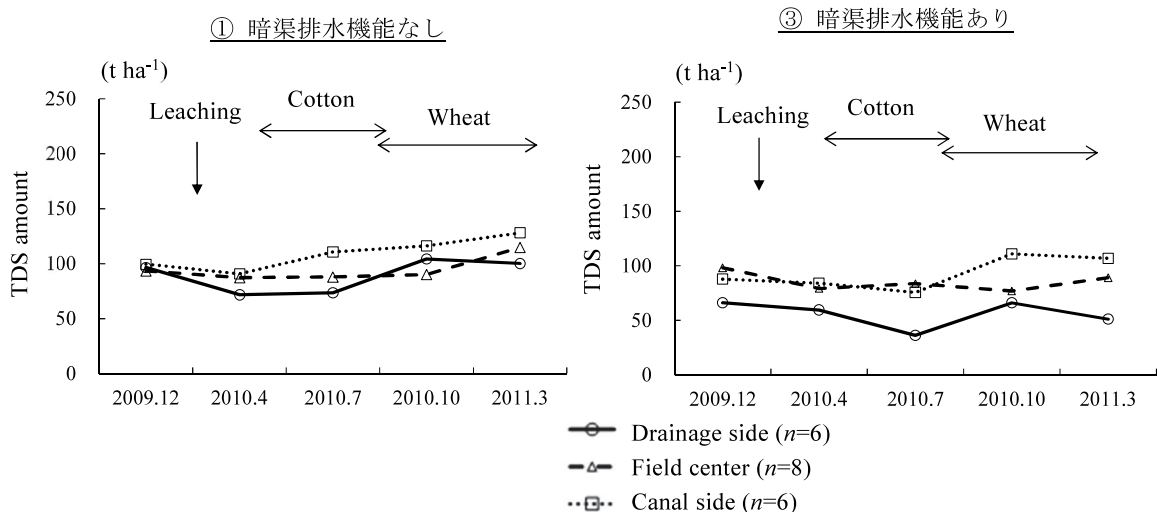


Fig. 4-16 B 圃場各地点の土壤 TDS の変化 (2009 年 12 月～2011 年 3 月)
Changes in TDS at each location in B-field (Dec. 2009 - Mar. 2011)

Table 4-3 試験圃場内の土壤塩分
Soil salinity in experimental fields

単位 : t ha⁻¹ (dS m⁻¹)*¹⁾

	Y 圃場* ²⁾	B 圃場* ³⁾		
		暗渠排水機能		差
		なし (①)	あり (③)	
用水路側	155 (12.2)	111 (9.9)	94 (8.4)	17 (1.5)
中央部	184 (14.4)	95 (8.4)	82 (7.3)	13 (1.1)
排水路側	190 (14.9)	87 (7.7)	53 (4.7)	34 (3.0)
用水路側と排水路側の差	-35 (-2.7)	24 (2.2)	41 (3.7)	58 (6.2)

*¹⁾ () は換算 ECe 値, 土壤分析結果より以下の関係式を用いて推定

Y 圃場 : TDS_{soil} = 0.0836ECe, B 圃場 : TDS_{soil} = 0.0755ECe

*²⁾ Y 圃場 (0~100 cm) : 2010 年 3 月, 7 月, 10 月, 2011 年 3 月の平均値

*³⁾ B 圃場 (0~100 cm) : 2010 年 4 月, 7 月, 10 月, 2011 年 3 月の平均値

4.4.4 地下水位と土壤塩分濃度のまとめ

上述してきた地下水位 (2010 年 3 月～2011 年 2 月) と土壤塩分濃度 (Table 4-3 の ECe 換算値) の関係を Fig. 4-17 に示す.

回帰直線の傾きは, 両圃場ともに地下水位の上昇により土壤 ECe が増加することを示しているが, Y 圃場ではほとんど相関が見られなかった. 前章の WCA を対象とした分析と同じ傾向であるが, 平均地下水位 (9 点) は -1.2 m 程度と高く, その水位差が小さいにも関わらず土壤 ECe には幅があることが分かった. この土壤 ECe の幅は, 圃場の微地形など地下水位以外の要因による影響が示唆される. また, 前章で活用した HGME の土壤塩類集積レベルの区分図 (2013) では, Y 圃場付近は中度 (4~8 dS m⁻¹) に区分されていた. しか

し、観測結果から平均土壌 ECe は 12 dS m^{-1} 以上であり、重度に区分された。観測時期は異なっているものの、HGME のモニタリング結果による評価では Y 圃場のような深刻な塩類集積状況が十分な精度で示されていないと考えられる。

一方、B 圃場では、土壌塩分濃度と地下水位との間にかなり強い相関が見られた。得られた回帰直線式から、年間を通じて軽度以下の塩類集積状態とするには平均地下水位を -2.8 m 以深に維持することが求められる。しかし、③の排水路側ですら平均地下水位は -2.3 m であったことから、地下水制御対策としての排水機能の回復に加え、塩類除去に繋がる圃場の排水性改良も必要と思われる。

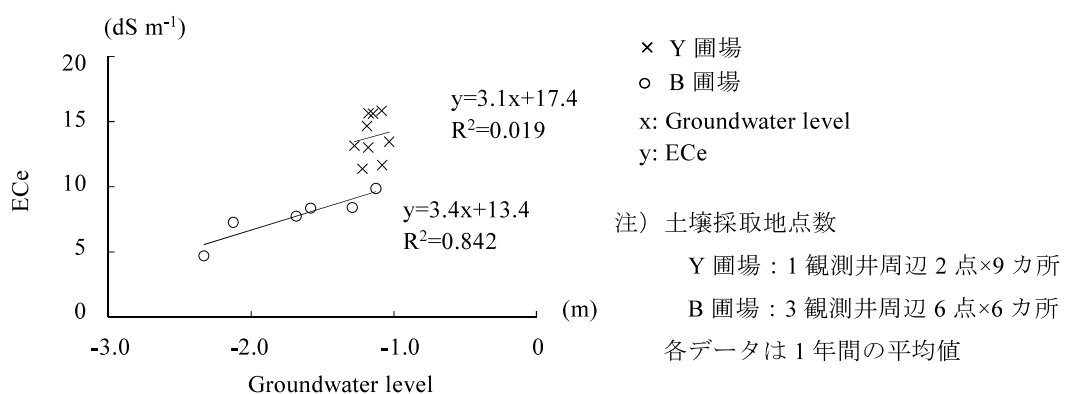


Fig. 4-17 地下水位と土壌 ECe の関係
Relationship between groundwater level and soil ECe

4.4.5 水・塩分収支

排水路における月別の流出水量 (mm), 流出水の塩分量 (TDS, t ha^{-1}) および塩分濃度 (ECw, dS m^{-1}) を Y 圃場, B 圃場それぞれ Fig. 4-18, Fig. 4-19, 両圃場の月別配分水量 (mm) を Fig. 4-20, 水収支計算結果を Table 4-4 に示す。

1 月, 10 月, 12 月は排水路流量を測定できなかったため、推定値として前後の月の中間値とした。配分水量は、Y 圃場では 2012 年のデータ (第 3 章のヤングバット WCA 分) を使い、B 圃場では 2010 年の聞き取りデータを代用した⁷⁶⁾。塩分量は ECw と TDS の関係式から算定した (Fig. 4-21)。

Y 圃場の排水路では、塩分濃度 (ECw) 上昇しても、流出水量・塩分量 (TDS) とともに増加していなかった。一方、B 圃場の排水路では、塩分濃度 (ECw) と流出水量が同調している月が多かった。この観測データからも、4.4.2 と同様に Y 圃場では年間を通じて排水路への地下水浸透流出が少ないこと、B 圃場では地下水浸透流出が多くなる時期があることが示唆される。

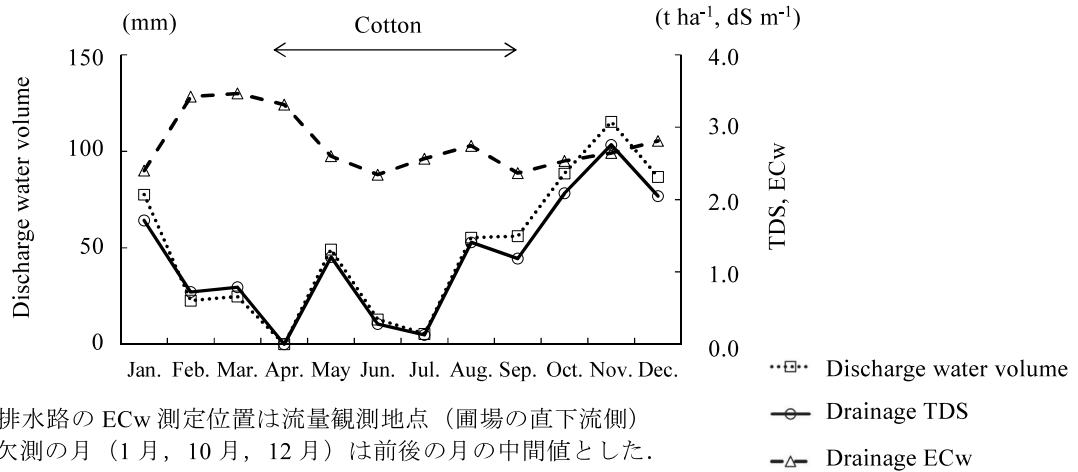


Fig. 4-18 Y 圃場排水路の流出水量と塩分量 (2012 年)
 Discharge water volume and salt mass in Y-field drainage (2012)

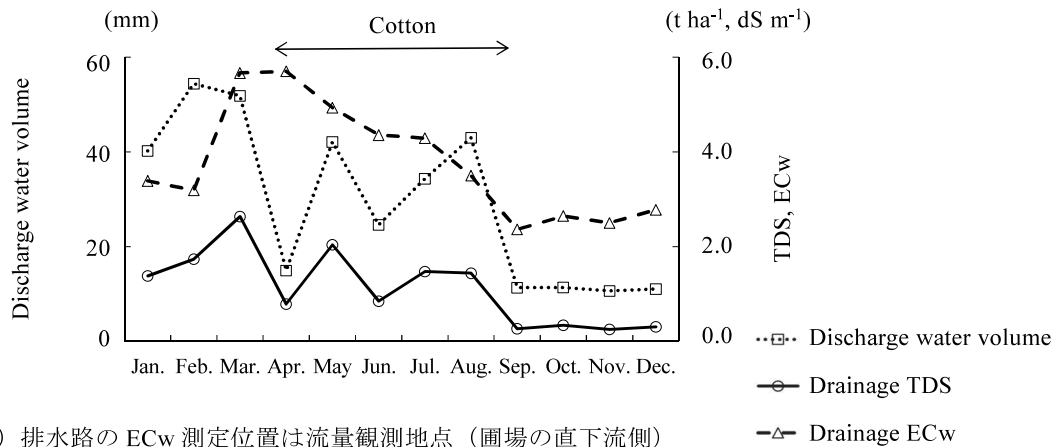


Fig. 4-19 B 圃場排水路の流出水量と塩分量 (2012 年)
 Discharge water volume and salt mass in B-field drainage (2012)

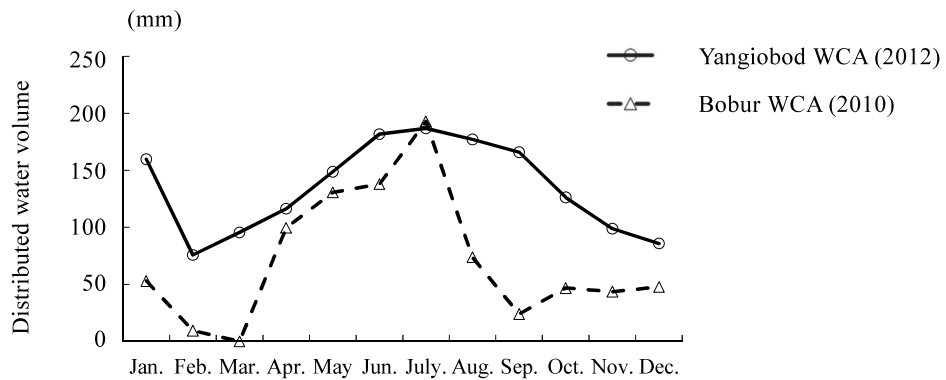


Fig. 4-20 研究対象 WCA の月別配分水量
 Monthly distribution of water volume in the research WCAs

Table 4-4 水と塩分の年間収支（2012年）

	Annual water and salt balances (2012)						
	配分 水量* ¹⁾ , * ²⁾	搬送 ロス* ³⁾	圃場流入量 (含む, 降水)	流出量* ⁴⁾		流出率	
	a		b	c	d	c/a	d/b
水量	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
Y 圃場	1,618	448	1,429	594	116	37	8
B 圃場	859	238	880	350	212	41	24
塩分量	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(%)	(%)
Y 圃場	17.1	4.7	13.1	14.5	9.7	82	74
B 圃場	10.1	2.6	7.5	13.0	11.6	129	155

*¹⁾ 排水路観測地点における流域面積は、Y 圃場 250 ha, B 圃場 630 ha

*²⁾ Y 圃場の配分水量は 2012 年のデータ, B 圃場は 2010 年のデータを代用

*³⁾ 搬送ロスは 27.7%を想定⁴⁹⁾

*⁴⁾ 浸透水は圃場地下水の排水路への浸透量で流出量（排水路）の内数

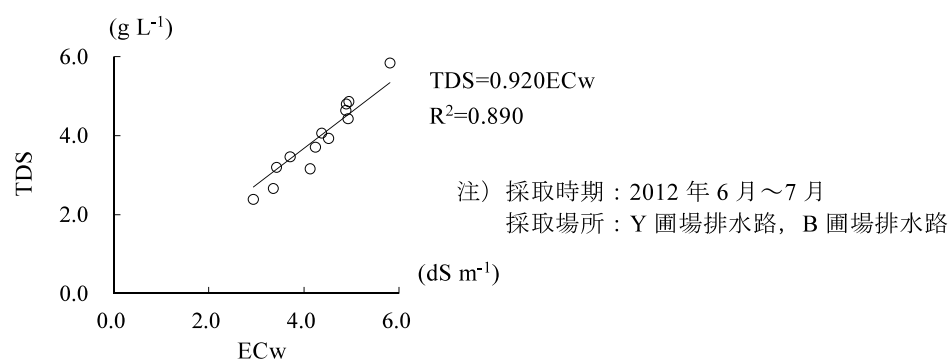


Fig. 4-21 排水路流出水における ECw と TDS の関係
Relationship between ECw and TDS in drainage runoff

排水路の流出量は、Y 圃場の排水路では 1 月（全流出量の 13%）と 10 月～12 月（49%）が多くなっていた。B 圃場の排水路では 1 月～3 月（42%）が多くなっていた。年間の流出量は、前者が 594 mm（平均単位流出量 1.62 mm d⁻¹, 最大値 3.84 mm d⁻¹）、後者が 350 mm（同 1.0 mm d⁻¹, 1.9 mm d⁻¹）であった。前者の流出量は後者より 1.7 倍多くなっていた。Dukhovny らは、排水路設計に用いる単位流出量 1.3～2.2 mm d⁻¹（筆者による換算値）を示している。また、単位流出量は、実際には 0.6 mm d⁻¹ を超えることは珍しく、最大でも 1.3 mm d⁻¹ 程度、ただし、地下水または灌漑施設の漏水などが影響し、3.0 mm d⁻¹ 程度にまでなることもあると指摘している⁴⁷⁾。本研究で得られた両排水路の年間の単位流出量は、ともに Dukhovny らの設計値の範囲に入っているが、実際に見られるという流出量（0.6 mm d⁻¹）を大きく上回っている。Y 圃場の排水路ではその傾向がさらに強く、最大値も漏水などが影響するという値を上回っている。

また、シルダリア川下流域の排水路への流出について、北村らは水稻作圃場において栽

培期間中の取水量と排水量を観測している⁴⁹⁾。その観測結果によれば、水路ロスを含む取水量は4カ月で約4,000~6,100 mmであり、流出率は40~50%程度と見込まれる(筆者による計算値)。本研究圃場の両排水路の年間流出率は、配分水量に対してそれぞれ37%、41%である。この流出率は北村らのそれと同程度であるが、水稻栽培期間中の多量な水供給による流出率であることを考慮すれば、Y圃場・B圃場で得られた年間流出率は過大な値と考えられる。4.4.2で示唆されたように用水が直接的に排水路へ流入していることが想定される。この直接流入水および浸透水の塩分濃度をそれぞれ用水、地下水のそれと同じと仮定すると、排水路への直接流入水と浸透水の割合は、次式で推定することができる。

$$a \times Si + b \times Sg = Sd, \quad a + b = 1$$

ここで、Si：用水の塩分濃度，Sg：地下水の塩分濃度，Sd：排水路の塩分濃度

a：排水路流出量に占める直接用水流入量の割合

b：排水路流出量に占める地下水浸透量の割合(浸透流出率)

Si, Sg, Sdは既知である。観測結果を上式に代入し、水収支を推定した結果、Y圃場およびB圃場から排水路への浸透水の流出率(浸透流出率)は、圃場流入量(搬送ロスを除き、降水量を含む)に対して、それぞれ8%、24%程度、単位浸透流出量は、それぞれ0.4 mm d⁻¹(最大0.7 mm d⁻¹)、0.6 mm d⁻¹(最大1.6 mm d⁻¹)が得られた。塩分収支については、WCAへの配分水量に含まれる塩分量はそれぞれ17.1 t ha⁻¹、10.1 t ha⁻¹、排水路への流出は14.5 t ha⁻¹、13.2 t ha⁻¹と推定された。また、圃場への流入塩分量は13.1 t ha⁻¹、7.5 t ha⁻¹、圃場から排水路への浸透流出塩分量は9.7 t ha⁻¹、11.6 t ha⁻¹と推定された。

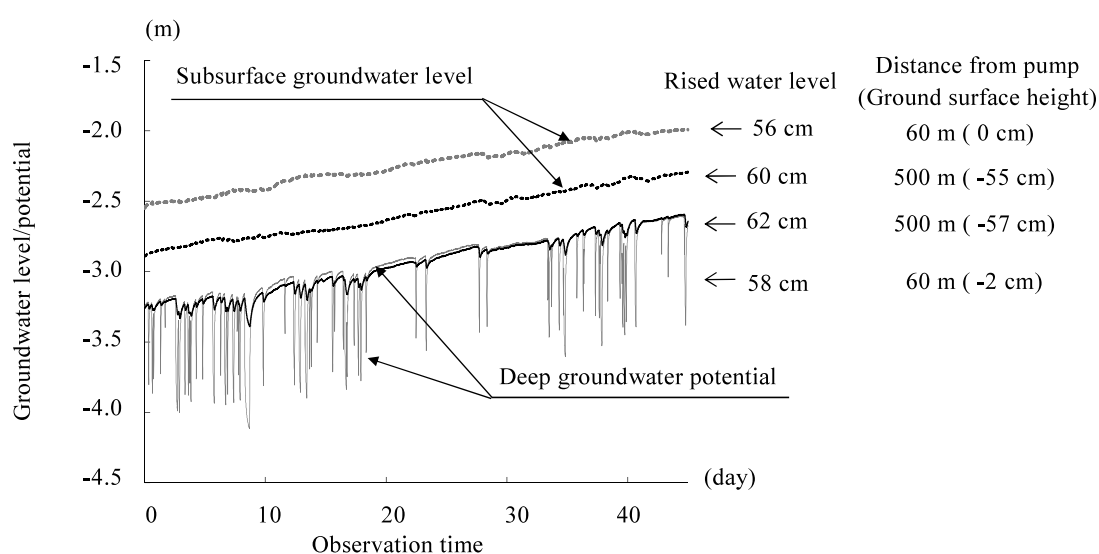
以上の分析結果から、Y圃場では流入塩分量より流出塩分量が少なく、塩分が圃場周辺部に留まっている可能性が示唆された。一方、B圃場は、流出塩分量が比較的多く、排水路・暗渠排水が機能しているものと考えられる。

ただし、上記の水・塩分収支算定については、配分水量の推定値が粗い点に留意しなければならない。配分水量はWCAを対象とした値であり、ヤングバットWCAではHGMEのモニタリング圃化面積、ボブールWCAでは灌漑農地面積をベースに算定している。水配分されている実圃場面積は、算定に使用した面積より小さく、その分、実配分水量は大きくなる。これに伴い流入水量・塩分量は増加する。この点から言えば、今回の算定結果はリスクを楽観視した推定値となっている。推定値の精度を高めるためには、観測に基づいた供給水量を用いた分析が必要である。

4.4.6 垂直排水が地下水位に及ぼす影響

(1) 運転時の地下水位の変化

垂直排水施設 VD23 の運転時の地下水位変化を Fig. 4-22 に示す。観測期間は 2014 年 10 月 27 日から 12 月 10 日（45 日間）である。運転時の揚水量は 16 L s^{-1} であった。運転開始後 10 分以内に 60 m 地点の深層地下水位に下降が観測された。観測期間中、ポンプの運転・停止に合わせて、地下水位は大きく下降と上昇を繰り返し、その回数は短時間のものも含めて 66 回、合計の運転時間は 108 時間（稼働率 10%）であった。1 回当たり平均 1.6 時間、1 日当たり平均 2.4 時間の運転になる。500 m 地点においても、運転開始後 30 分前後で振幅の小さい下降が現れた。観測期間中は全体的に水位が上昇していた。上昇量は、深層部・表層部ともに 60 m 地点が少ないが、500 m 地点との違いは、深層部、表層部ともに 4 cm 程度であり、地下水位の上昇抑制効果は小さかった⁷⁴⁾。また、観測期間内のポンプ地盤高を基準（0 m）として平均水位を見ると、深層部では 60 m 地点が 5 cm 低い。一方、表層部では 500 m 地点が 35 cm 低く、ポンプに向かう水面勾配は見られなかった。表層部においては垂直排水の遠近による違いが見られなかった。



注) 観測期間：2014 年 10 月 27 日 (0:00) ～12 月 10 日 (23:50)
垂直排水ポンプの地盤高を 0 m と仮定

Fig. 4-22 地下水上昇期における垂直排水運転時の地下水位の変化
Changes in groundwater level during vertical drainage operations in the rising period

次に、VD23 について、詳細な水位の下降と回復状況を Fig. 4-23 に示す。観測期間は 2016 年 4 月 20 日から 5 月 2 日（13 日間）である。2016 年 4 月から 5 月は地区全体の水位が上昇から下

降に転じる時期であり、全体的な水位変動が小さい。表層地下水位は水供給・降水により変動するが、深層地下水位の変動は主に垂直排水の影響として捉えることができる。

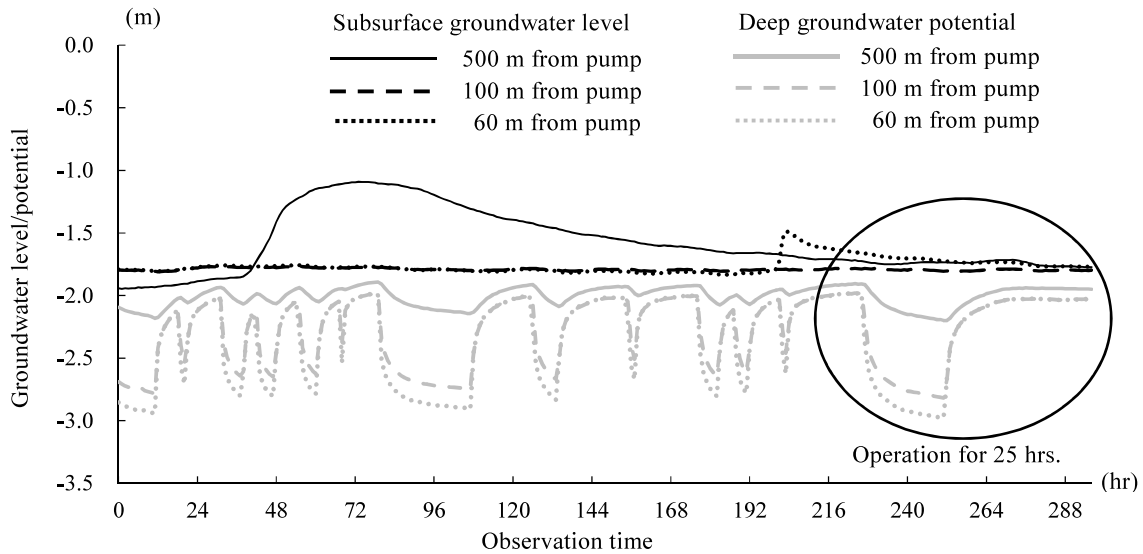
観測期間中の運転時間は108時間（稼働率36%）であった。深層地下水位の平均値は、60 m、100 m、500 m地点でそれぞれ、-2.34 m、-2.29 m、-2.01 mであり、運転によりポンプに近い地点の水位が深くなっていた。

運転時間とポンプからの距離による水位の詳細な変化を把握するため、運転開始前のポンプ停止時間が長く、かつ長時間運転に着目した。4月29日10時30分に運転を開始した25時間連続運転を見ると、運転開始前の20時間は運転が停止の状態であり、運転開始前の深層地下水位は自然状態に近いと考えられる。分析の結果、深層地下水位は、運転開始から24時間後には60 m、100 m、500 m地点でそれぞれ0.99 m、0.83 m、0.29 m下降していた。60 m地点に着目すると、運転開始から1時間後に0.52 m、5時間後に0.81 m、10時間後に0.91 m（24時間下降量の91%）に達していた。同様に、100 m地点では10時間後に0.74 m（同89%）、500 m地点では10時間後に0.21 m（同73%）となっていた。10～20時間後は3点ともに下降速度は0.7 cm h⁻¹前後となり、その後さらに下降速度は低下した。

運転停止後の回復量は、60 m地点で1時間後に0.51 m、5時間後に0.77 m、10時間後に0.87 mになり、この時点で実運転25時間の全下降量に対する回復率は87%となった。同様に100 m地点では10時間後に0.71 m（回復率85%）、500 m地点では10時間後に0.19 m（同65%）となっていた。10時間後から20時間まで3点ともに0.7 cm h⁻¹前後の上昇速度になり、20時間後以降ほとんど変化は見られなかった。

一方、表層地下水位について観測期間全体を見ると、60 m地点では、200時間まで深層地下水位の変動の影響も見られず、一定の水位を維持していた。その後、灌漑によるものと思われる上昇0.24 mがあるが、その後は上昇前の水位に近づいていた。100 m地点もほとんど変化が見られなかった。500 m地点では前半に灌漑によると思われる上昇0.75 mがあり、後半は100 m地点とほぼ同じ水位に近づいていた。表層地下水位には、全期間を通じて、垂直排水の運転に関連していると思われる下降現象が見られなかった。

以上の結果から、垂直排水の影響は、深層地下水位ではポンプに近いほど下降量は大きく、24時間連続運転でポンプから500 m地点の水位下降量は0.30 m程度になること、10時間運転でも24時間下降量の70～90%に達すること、運転停止後、運転時のほぼ逆の過程で水位が回復すること、現状の稼働率の下では表層地下水位の低下効果が見られないことが分かった。



注) 観測期間：2015年4月20日0時～5月2日8時
 垂直排水ポンプの地盤高を0mと仮定

Fig. 4-23 垂直排水運転時の地下水位の下降と回復
 Decrease and recovery of groundwater level during vertical drainage operations

(2) 地下水位の長期的変動

VD23, VD1, VD51 の3カ所の運転データを Table 4-5, 月毎の深層地下水位および揚水量を Fig. 4-24 に示す。深層地下水位の大きな周期的変化は、3カ所ともに一致しており、11月から2月までが上昇期、4月から9月までが下降期を示していた。上昇期・下降期はシルダリア川の流量の増減時期と一致しており、これが広域的に地下水位を変化させている要因と考えられる。垂直排水の稼働率はVD23とVD1が40%程度、VD51が11%である。VD23, VD1は、上昇期・下降期ともに揚水されているが、特に蒸発量の多い夏季に多く揚水されていた。この時期、VD23は付近の小面積の菜園用灌漑にも使われることがあるが、ほとんどはそのまま排水されており、地下水制御を意図した運転と思われる。VD1は灌漑のための揚水も含まれており、VD23より多く揚水されていた。VD51は運転時間も揚水能力も少なく、ほかの2カ所と比較して揚水量はほとんどないことから、VD51の地下水位の変化はポンプ運転以外の要因によるものと考えられる。

深層地下水位の波形を見ると、VD51の変動がもっとも緩やかであった。3カ所の地下水位の変動条件が同一の場合、ポンプ運転により下降期にはその勾配がVD51より急になり、上昇期には勾配が緩やかになることが想定される。しかし、VD23およびVD1では、上昇期もVD51より急勾配となっており、3カ所の地下水の変動条件に違いがあることがうかがわれる。変動条件には、河川・用水路からの距離、周辺部の地形、帯水層の構造などが

考えられる。いずれにしても、少なくとも上昇期において、VD23 および VD1 の深層地下水位は、垂直排水による地下水位の上昇抑制効果が現れていないことが分かる。

次に、表層地下水位と揚水量、RIIWP による塩類集積軽減のための推奨地下水位を Fig. 4-25 に示す。表層地下水位も深層地下水位と同様に大きな周期的変化を示し、しばしば、リーチングや灌漑の影響と考えられる変化も見られた。推奨地下水位は、垂直排水の運転のために RIIWP により作成され、塩類集積レベルの面積率、地下水の塩類濃度 (TDS) により 4 段階に分けられる (Table 4-6)。ミルザバット地区は中度から重度の面積率が 36～69% (2012 年～2014 年) となっていた。地下水 TDS は 3～5 g L⁻¹ が半数程度を占め、Y 圃場の観測結果では約 7 g L⁻¹ になっていた。この状況から、地下水推奨地下水位はレベル 3～4 になるものと想定される。仮に、レベル 3 の場合、推奨地下水位を満たしていない期間 (Fig. 4-25 の灰色太線の上側) は、VD23, VD1, VD51 でそれぞれ 94%, 83%, 17% になり、VD23, VD1 では塩類集積リスクの高い状態が続いているものと考えられる。月別に水位と揚水量を見ると、推奨地下水位より浅くても運転が少ない月、深くても多く運転している月が見られた。

また、VD23 および VD1 のポンプの地盤高を基準 (0 m) として見ると、500 m 地点の平均表層地下水位はポンプ近傍よりそれぞれ数 cm、VD1 が 0.3 m 低く、ポンプに向かう地下水水面勾配は見られなかった。現状の稼働率では、長期間においても表層地下水位に影響が現れていないことが分かった⁸²⁾。

以上、現状の垂直排水の稼働率 (40%程度、日当たり 10 時間) において、深層地下水位は 500 m 地点で 0.3 m 程度低下するが運転停止後すぐに回復すること、表層地下水位には垂直排水の影響が現れていないことが明らかになった。また、推奨地下水より浅い時期の運転停止、深い時期の運転などが見られ、ポンプ稼働が地下水位状態に対応していない場合があることが分かった。

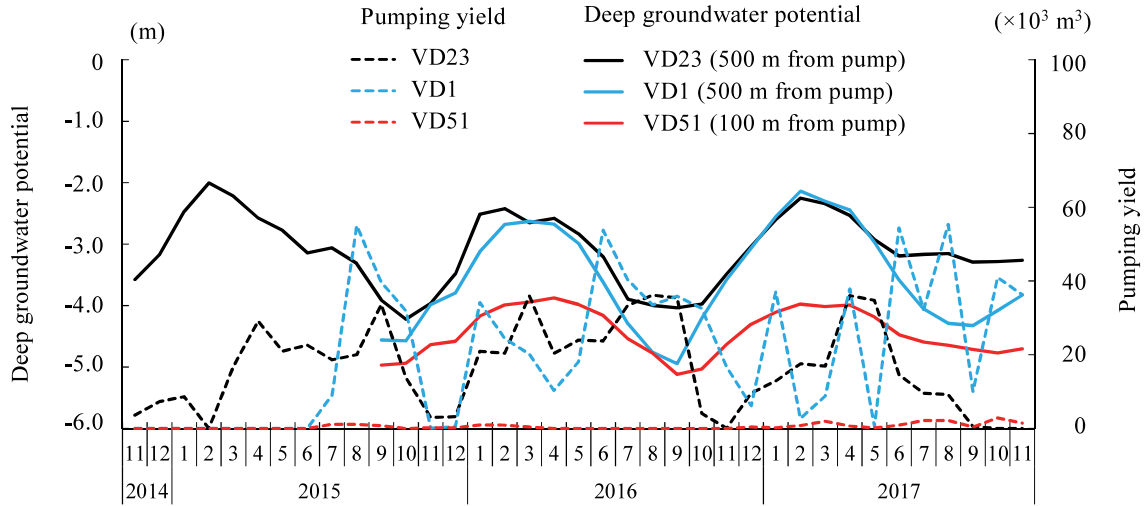
Table 4-5 垂直排水の運転実績

Operation data for observed vertical drainages				
	平均運転時間 (hr/日)	稼働率 ^{*3)} (%)	ポンプ能力 (L s ⁻¹)	揚水量 (m ³ d ⁻¹)
VD23 ^{*1)}	9.7	41	16.1	564
VD1 ^{*2)}	9.1	38	25.4	830
VD51 ^{*2)}	2.6	11	1.7	16

*1) 2014 年 11 月～2017 年 10 月 (3 年間)

*2) 2015 年 11 月から 2017 年 10 月 (2 年間)

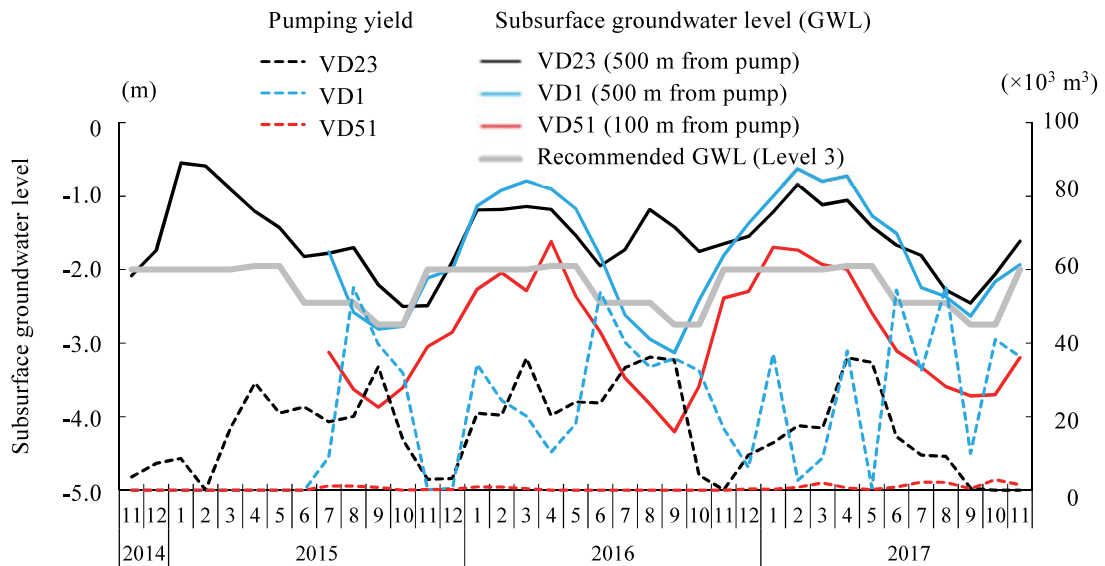
*3) 期間全体に占める運転時間の割合



注) 各観測井の地盤高を 0 m と仮定

Fig. 4-24 月別深層地下水位の変化と揚水量

Changes in monthly deep groundwater potential and pumping yields



注) 各観測井の地盤高を 0 m と仮定 (VD51 の 500 m 地点は欠測のため 100 m 地点)
推奨地下水位は期別の範囲の中間値とした。

Fig. 4-25 月別表層地下水位の変化, 推奨地下水位および揚水量

Changes in monthly subsurface GWL, recommended GWL, and pumping yields

Table 4-6 シルダリア州垂直排水の推奨地下水位

Recommended groundwater levels for vertical drainage in Syrdarya Province						
レベル	中度・重度 の面積率	地下水 TDS (g L ⁻¹)	地下水位 (m)			
			9~10月	11~3月	4~5月	6~8月
1	50%以上	>10	-3.5~-4.5	-4.5~-1.5	-1.9~-2.7	-2.7~-3.5
2	30~50%	>10	-3.0~-4.0	-4.0~-1.5	-1.5~-2.5	-2.5~-3.0
3	20~30%以上	<10	-2.5~-3.0	-2.5~-1.5	-1.5~-2.4	-2.4~-2.5
4	20%以上	3~5	-2.0~-2.3	-2.3~-1.5	-1.5~-1.7	-1.7~-2.0

注) RIIWP の聞き取り結果

4.5 まとめ

本章では、農家圃場（Y 圃場，B 圃場）を研究対象として、地下水位と土壌，地下水制御のための排水施設を観測し，排水施設が地下水位や塩類集積に及ぼす影響を検証した。

排水施設の現状調査の結果，圃場に隣接する排水路は，堆砂や雑草が多く，設計深さを満足していない箇所があること，暗渠排水も排水口が埋没し，流出していない箇所が見られた。また，垂直排水は，揚水能力が低下していることが分かった。

観測データの分析から，Y 圃場では，地下水位が高く，水位の変動幅も小さく，土壌塩分濃度は重度レベルであった。隣接排水路の塩分濃度は低く推移しており，圃場からの浸透水よりも塩分を含まない用水が多く流入している可能性が示唆された。B 圃場では，地下水位が比較的深く，暗渠排水により圃場内から地下水が流出していることが示唆された。B 圃場内の排水施設の機能には差が見られ，機能が現れている箇所では機能が低下している箇所より地下水位が約 1.2 m 低く抑えられ，表層 1 m の塩分量も半分以下に減少していた。ただし，塩分濃度は中度～重度レベルの範囲にあった。

水収支の算定結果において，WCA への配分水量に対して，排水路に 40%程度が流出し，Y 圃場，B 圃場への流入量に対して，それぞれ 8%，24%が排水路に浸透流出しているものと推定された。塩分収支の算定結果から，Y 圃場では流入した塩分量より浸透流出する塩分量が少ないと推定され，塩類集積リスクを高めていることが示唆された。排水路への浸透流出が少ない状況下において，リーチングの除塩効果を高めることが課題となる。

地下水位と土壌 E_{Ce} の関係について，Y 圃場では WCA を対象領域とした分析結果と同様に明らかな相関が見られなかった。土壌 E_{Ce} 値に変動幅があることから，地下水位が高い状態の中で，圃場の微地形など別の要因が土壌 E_{Ce} に影響しているものと考えられた。一方，B 圃場では，地下水位と土壌塩分濃度の間に強い相関が見られ，塩分濃度レベルを軽度抑えるための平均地下水位は -2.8 m と見込まれた。排水路の効果の範囲は限定的であり，暗渠排水の深さも 2.5～3.0 m であることから，圃場全体でこの地下水位を満足するのは難しい。地下水制御のための排水施設の維持管理・機能回復に加え，塩類の除去効率を高める圃場の排水改良も必要な対策であると考えられる。

地下水制御のための垂直排水は，現地関係者らにより地下水位を制御する技術として従来から評価されてきている。しかし，現在の稼働率が低下した状況下において，地下水位の制御効果を研究した事例はほとんどない。観測井を設置し，揚水している透水層の深層地下水位および表層地下水位の変化を観測した結果，地下水位は周期的な変動パターンを

示し、河川水位などの別の要因と考えられる影響が強く現れていた。深層地下水位はポンプ運転開始後 24 時間で 60 m 地点で 1 m 程度低下し、500 m 地点では 0.3 m 程度の低下が見られた。運転停止後、水位の回復は速く、数時間で地表面下 0.2 m 程度まで回復した。一方、表層地下水位は深層地下水位と同様に周期的に変化する中で、灌漑などの影響による一時的な上昇もあるが、ポンプの運転、深層地下水位の変化と明らかな関連性が見られなかった。また、地下水位が高い時期の停止、低い時期の運転も見られ、必ずしも地下水位に応じた運用にはなっていなかった。今回の研究では、長期に亘る運転時間が地下水位に及ぼす影響を明らかにできなかったが、予算制約がある中、垂直排水の効果を引き出すには、必要な稼働率を明確にし、塩類集積リスクの高い時期と場所を絞り込み、集中的・効率的に運用することが求められる。

以上、研究対象地域において、圃場レベルの観測結果などにに基づき、排水施設の地下水位制御技術の効果を論じてきた。圃場レベルでは排水機能が低下している箇所が見られ、塩類集積リスクが高められていることが明らかになった。排水施設の維持管理・更新は全てが一度に解決できない。また、排水施設が機能しても、地下水制御だけでは塩類集積の軽減は難しい。塩類の除去効率を高める排水改良技術が求められる。次章以下、排水改良技術の一つとして低コストの浅層暗渠排水技術を取り上げ、その適用上の課題と導入の効果を論じる。

第5章 カットドレーンを活用した浅層暗渠排水

5.1 カットドレーンの活用の背景

第4章において、シルダリア州内の圃場周辺の排水施設を観測した結果、排水機能が低下している圃場や排水路から離れた圃場中央部や用水路周辺部において、過剰な灌漑水やリーチング水の浸透水が圃場外に十分に流出せず、地下水位と土壤塩分濃度が高い状態であることが明らかになった。このような圃場では、地表面付近まで達することがある地下水位を低下させ、塩類を含む浸透水を確実に排除する浅層暗渠排水が有効な対策の一つと考えられる^{83), 84), 85)}。日本で一般的な浅層暗渠排水は、深さ1.5 m程度の排水路であっても排水することができる。浅層暗渠排水は、深層暗渠排水と比較して、単位長さ当たりの土工量は少ないが、単位面積当たりの管延長が長くなり、施工コストは必ずしも安価なものとはならない⁸⁶⁾。中央アジアにおいても、北村らがシルダリア川下流域の二次的塩類集積の解明と対策について検討を行っており、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、コスト的に問題があると指摘している⁸⁷⁾。

浅層暗渠排水の低コスト化を図るための技術としては、近年、北川らにより穿孔暗渠機（以下、穿孔機、施工された暗渠をカットドレーンという。）が日本で開発されている⁸⁸⁾。穿孔機は、トラクタの牽引力だけで土中60~90 cmの任意の深さに空洞を成形する作業機である。土壤を切断する二枚の刃（前刃および後刃、以下、切断刃）と下部にある押し上げ刃で土塊を縦長に切断して持ち上げ、サイドカッターで土塊直下の空洞の真横に空洞を成形する構造であり、比較的堅密な土壤にも適応できる（Fig. 5-1, 5-2）。従来の弾丸暗渠のような施工ラインの直下に成形する空洞より断面の安定性が期待できる。カットドレーンは、1) 明渠排水路に空洞部を接続する直接排水方式暗渠、2) 本暗渠（有孔管+モミガラなどの疎水材）に空洞部を接続する補助暗渠、3) 排水管を敷設する穿孔引き込み暗渠などに適用できる⁶⁴⁾。

本研究では、排水機能が低下し、塩類集積リスクが高い圃場において、リーチング時に迅速で確実な塩類除去を図る排水改良技術として、このカットドレーンを活用した浅層暗渠排水技術を提案し、その適用性を明らかにする。乾燥地でのカットドレーンの施工は初めての試みである。本章ではカットドレーン施工時に生じた課題および解決策を示す。



穿孔機

施工後の土壌断面

Fig. 5-1 穿孔機とカットドレーンの空洞部

Drain drilling machine and cavity of a cut-drain

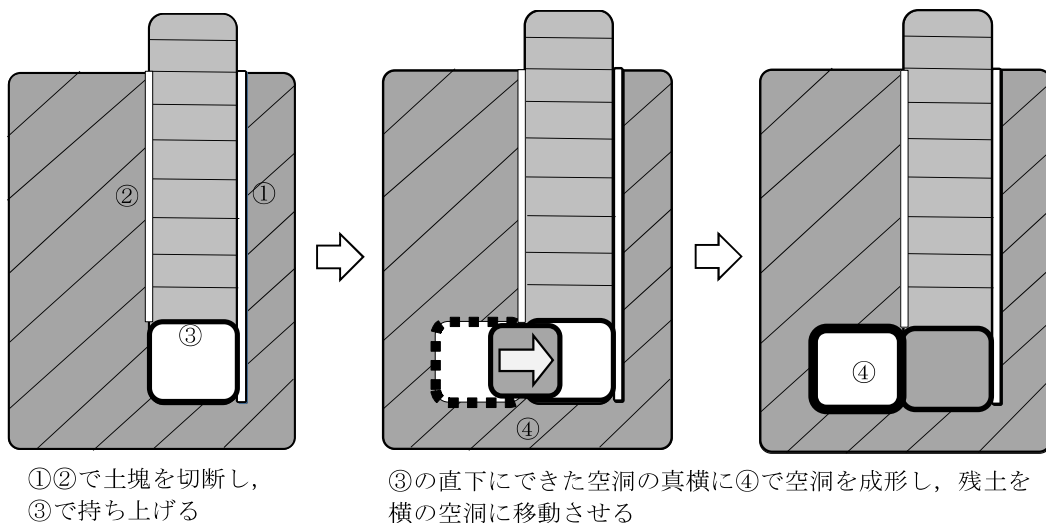


Fig. 5-2 カットドレーン空洞部の成形過程

Process of making the cavity of a cut-drain

5.2 カットドレーンの概要

5.2.1 カットドレーンの開発経緯

日本では、大豆や小麦、野菜の生産強化が求められる一方、豪雨が増加傾向にあり、農地の排水性を良好に保つ必要がある。農地の排水性を良好にするには、吸水渠として、地下1 m程度に有孔管を埋設した本暗渠の整備が有効で公共事業により進められている。また、本暗渠の排水機能を維持・向上させるため、本暗渠に交差させた弾丸暗渠や心土破碎などの補助暗渠を施工している。しかし、抜本的な農地の排水改良となる本暗渠の整備は農業土木工事用のトレンチャなどで施工され、多額の費用がかかり、短期間では広域の農

地を整備することができない⁸⁹⁾。近年では、農家自らで対応できる施工機械も開発されているものの、有効管や疎水材などの材料費が必要である⁹⁰⁾。

弾丸暗渠や心土破碎は圃場の排水性を改善するが、無資材で成形された空洞や亀裂を通して排水するため耐久性に劣る点と施工深さが浅く、本暗渠より通水性に劣る⁹¹⁾。さらに、暗渠のように圃場外へ排水を排除することができない点が課題であった。弾丸暗渠の経年劣化を防ぐ簡易暗渠資材も開発されているが、単独で施工することはない⁹²⁾。生産現場からは、簡単かつ安価で、有孔管を使用した本暗渠と同様の効果のある技術が求められていた。そこで、農家自身が、無資材で迅速・簡単に施工でき、本暗渠と同じ通水性を有する通水空洞を深さ 60~70 cm 程度に施工できる穿孔暗渠機「カットドレーン」が農研機構農村工学研究部門と（株）北海コーキにより実用化された⁸⁹⁾。現在、市販普及が進められている^{1*)}。

5.2.2 湿潤な圃場における施工の効果

日本国内のカットドレーンの施工圃場では、穿孔した通水空洞から排水されるピークの単位時間当たりの排水量が 5 mm h^{-1} を確保できる場合もあり、暗渠排水としての機能を十分に有している。通水空洞が維持されている間は、排水性の向上により表面滞水がなくなることで、生育初期の麦の出芽・分けつ・春の起生を良好な状態に保つことができる。また、湿害に弱い大豆の苗立ちと生育を確保するなど、畑作物の生育を良好に保つことができる。カットドレーンの施工に適した土壌においては、畑作物に対して 5~40% の範囲で収量の向上・維持の効果を見込むことができると報告されている⁹³⁾。

5.2.3 施工方法の特徴

カットドレーンは、機械ユニットをトラクタ (70~120 PS) に装着し、走行 ($2\sim 4 \text{ km h}^{-1}$) させることで土の深い位置に通水空洞を成形するものである。農家にとっては、営農技術として対応できる簡単な技術である。既設の本暗渠に交差して接続する補助暗渠として使用する場合や、畦を超えて機械ユニットを排水路内に下ろし、排水路の法面に通水空洞を開けて浸透水の過剰分を排除する暗渠として使用する場合がある (Fig. 5-3)⁶⁴⁾。

^{1*)} 日本市販品は施工深 70 cm である。本研究では、ウズベキスタン側研究者との協議上、通常販売しているものより深く施工できる仕様 (施工深 120 cm) に改良したものを用了。

カットドレーンは、管を用いないことから、施工時の空洞の成形性や空洞内の流水による土壌の崩落などを考慮しなければならない。日本におけるカットドレーンの適用性は、粘土や泥炭土などの土壌で高い。一方、砂やシルト分の多い S, LS, SC, SCL, SL, SiC, SiCL, SiL (国際法による土性区分) の土壌では使用できず, L (同区分) では耐用期間が短く数年ごとの再施工が必要である (Fig. 5-4)⁸⁹⁾。また, カットドレーンを利用する主な地目は, 転換畑, 畑, 草地である。湛水が必要となる水田では, 排水を調節する水閘が設置された本暗渠と組み合わせた補助暗渠として利用する⁶⁴⁾。



Fig. 5-3 カットドレーンの穿孔方法
Drilling methods for a cut-drain

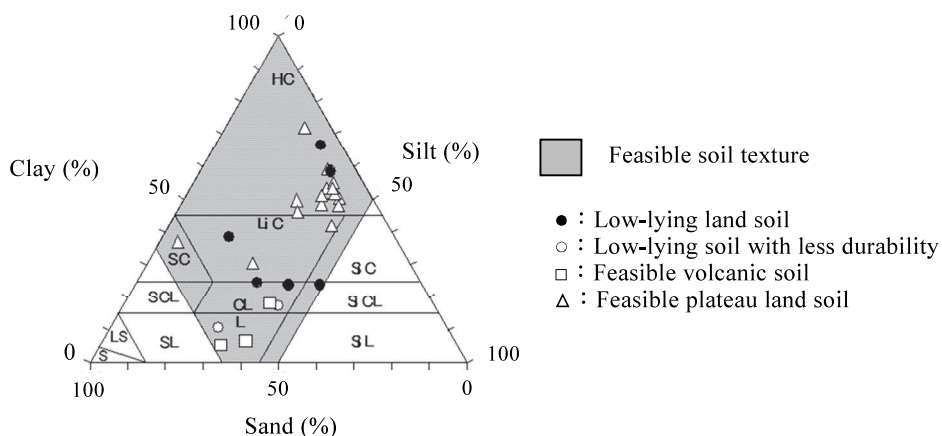


Fig. 5-4 カットドレーンに適する土性
Feasible soil texture for a cut-drain

Source: Institute for Rural Engineering, National Agricultural and Food Research Organization

5.3 乾燥地におけるカットドレーンの試行

5.3.1 導入事前評価

(1) 穿孔機の導入事例

穿孔機のように土層内に機械を挿入牽引する既存の土層改良技術には心土破碎ならびに弾丸暗渠などがある。前者は硬い土層の破碎による硬度の減少と透水性の増加を目的とし、乾燥地では主に根群域の拡大などの役割を担っている。後者は通水空洞の成形を目的とし、ヨーロッパやモンスーンアジアでの排水対策として適用されており、乾燥地での空洞成形の知見はきわめて乏しい⁶⁴⁾。

(2) 土壌評価

2014年6月、穿孔機開発者とともにカットドレーンの導入可能性調査を行った。ミルザバット地区オールド・ゾーンのアフメドフ WCA 内の Nozima Durдона Fayz 農場（以下、A 圃場、Fig. 5-5）において、土壌断面調査を実施し、導入可能と判断した（Fig. 5-6）。土性・土色がやや異なる4層（0~13 cm, 13~50 cm, 50~90 cm, 90 cm 以下）から土壌を採取し、RIIWP に粒度分布の分析を依頼した。分析結果を Fig. 5-7 に示す。土性区分はカットドレーン工法の適用範囲内であった。

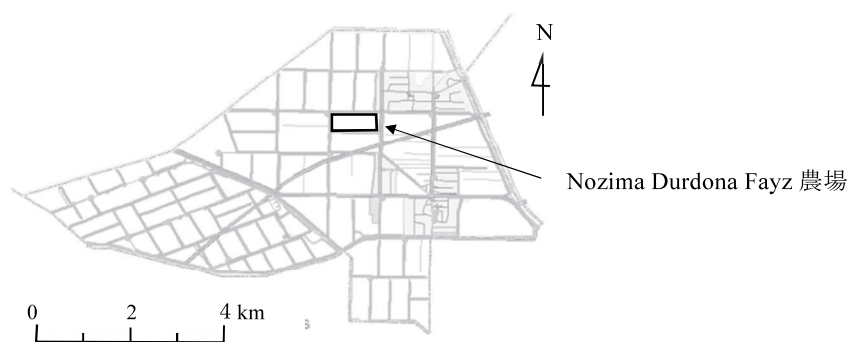


Fig. 5-5 アフメドフ WCA 内の調査農場位置図

Map showing location of survey farm in Axmedov WCA

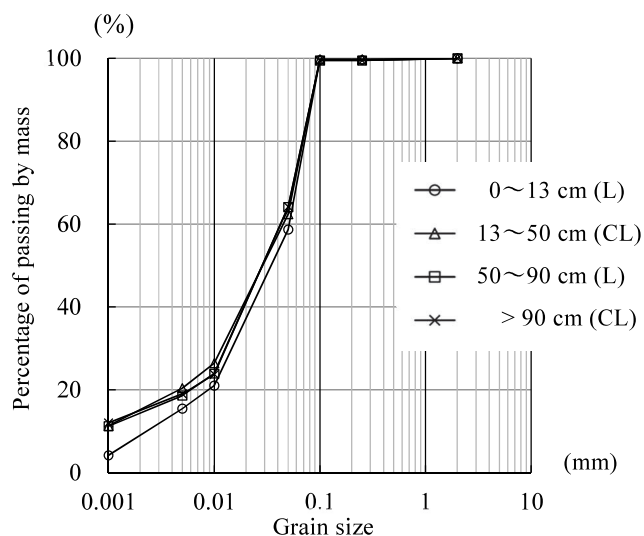
(3) トラクタの性能

ウズベキスタンではヨーロッパからトラクタなどの農機具が輸入されており、トラクタの油圧やPTO（回転パワーテイクオフ）などの基本機能が活用できる。ただし、頻繁に使用する機能は故障している場合が多く、部品を交換せず溶接などの応急処置で使用している。また、シルダリア州で見られたトラクタは、機械の水平や設置高などの微調整ができないものが使用されていた⁸⁹⁾。



土壌断面調査 (2014年6月17日)

Fig. 5-6 A 圃場の土壌断面
Soil profile in A-field



注) 粒度分析はRIIWPに依頼

Fig. 5-7 A 圃場の土壌の粒径加積曲線
Grain size accumulation curve of soil in A-field

5.3.2 施工試験の結果

2014年10月、穿孔機をA圃場に搬入し、カットドレーンの試験施工を行った。A圃場内に仮排水路を掘削し、トラクタ(130PS)により施工深度90cmで穿孔機を牽引したところ、土層内に入れた切断刃の浮き上がりが生じた(Fig. 5-8)。この浮き上がりを抑えるため上部フレームに過重した状態で試行したが、再度、浮き上がりが生じるか、またはトラクタ車輪が空転した。A圃場に見られる褐色低地土(土性L)は、乾季に下層まで土壌水分が極めて少なく、塑性を有していない。乾季が終わった時点で、土壌の乾燥が強く、土壌が切断刃により変形せず、粉砕された状態になり、切断刃が土壌中に挿入できないことが原因として考えられた。そこで、A圃場よりもやや土壌水分が保持されているB圃場(位置については第4章参照)でカットドレーンの試験施工を行った(Fig. 5-9)。その結果、切断刃の浮き上がりは生じず、一定深度で穿孔機を牽引できた。牽引後、土壌断面調査を行った結果、空洞も確認できた。

以上の点から土壌の乾燥状態がカットドレーンの施工に影響を及ぼすものとして、施工に適した土壌水分状態を探ることが、乾燥地でのカットドレーンの施工上の課題と考えられた。次節において、カットドレーンの施工に適した土壌水分状態を明らかにする。



仮排水路に穿孔機をセット

牽引開始直後

牽引途中（施工不可）

施工日：2014年10月22日

Fig. 5-8 A 圃場内の試験施工
Trial construction in A-field



穿孔機のセット

牽引開始直後

牽引途中（一定深度を維持）

施工日：2014年10月23日

Fig. 5-9 B 圃場内の試験施工
Trial construction in B-field

5.4 ウズベキスタンにおけるカットドレーンの施工性

5.4.1 研究の目的

乾燥地の土壤水分が少なく塑性限界以下の成形性のない領域では、挿入牽引型機械の施工には大きな牽引抵抗がかかり、土壤の破砕は可能であるものの一定の空洞を成形することはきわめて困難である。そのため空洞を成形するには一定の水分を保持させなければならない。しかし、穿孔機の施工について、土壤水分の面から考察した先行研究はほとんどない。日本では下層土の乾燥によって土壤の塑性が低下することはあまりなく、穿孔機の挿入牽引ができなくなるといった問題はほとんど生じない。このため本研究では、乾燥地において穿孔機が浮き上がらず、一定の深さで牽引・空洞成形が可能となる土壤水分状態を明らかにすることを目的とする⁶⁴⁾。また、得られた土壤水分状態を他地域においても活用可能とするため試験圃場の土壤の物理性を分析する。

5.4.2 研究対象圃場

本研究の対象地は、シルダリア州ミルザバット地区アフメドフ WCA、ヤンガバット WCA、オコルティン地区ボブール WCA 内の農家が耕作する圃場（それぞれ A 圃場、Y 圃場、B 圃場およびその周辺圃場）^{2*)}である（Fig. 5-10）。試験圃場は透水性が低い沖積土で RIIWP の分析結果によれば、表層下 1 m までの土性として、主に壤土 (L)、砂質壤土 (SL)、殖壤土 (CL)（国際法による土性区分）が見られ、カットドレーンが使用できる土壌 (L, CL)、使用できない土壌 (SL) が混在している。圃場別の土性はやや異なり、A 圃場には L および SL、Y 圃場には L, SL, CL、B 圃場には CL, L が多く見られる⁶⁴⁾。

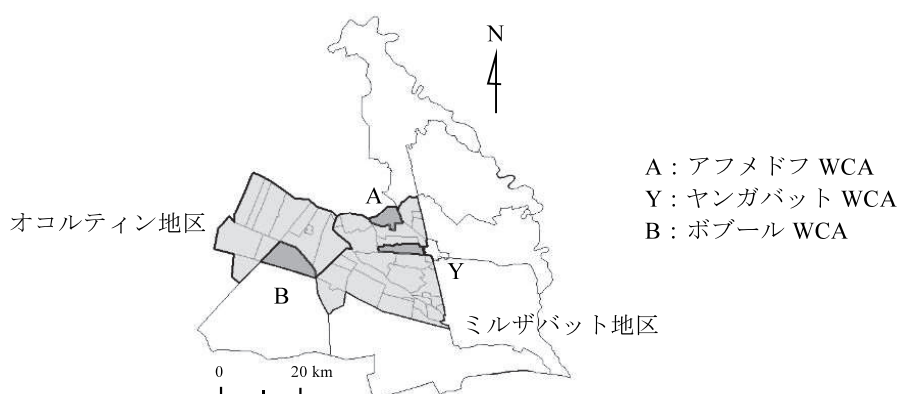


Fig. 5-10 シルダリア州内の研究対象 WCA 位置図

Map showing location of research WCAs in Syrdarya Province

5.5 試験方法

5.5.1 試験圃場の土壌の物理性試験

試験圃場の土壌の物理性を把握するため、3 つの WCA 内の試験圃場から不攪乱土壌を採取し、乾燥密度、透水係数、液性・塑性限界、pF 水分特性曲線を求めた。

土壌は作土層 (0~20 cm)、30 cm 付近にある硬盤を含む層 (20~40 cm)、カットドレーン空洞上部の層 (40~60 cm)、カットドレーンの層 (60~80 cm)、計 4 層から各 3 サンプルの不攪乱土壌を採取し、3 つの WCA 合計で 36 サンプルを日本国内に持ち込み分析した。土壌採取は A 圃場：2017 年 2 月 28 日、Y 圃場：3 月 6 日、B 圃場：3 月 7 日に行った。

透水係数は試料の入った採土管を蒸留水に 24 時間浸水させた後、変水位透水試験法により測定した。

^{2*)} 第 4 章で示した Y 圃場、B 圃場とは位置が異なるが、同じ農家が耕作している周辺圃場である。本章でも Y 圃場、B 圃場と表記する。

塑性限界 (W_p)・液性限界 (W_L) 試験は JIS1205「土の液性限界・塑性限界試験法」により測定した。塑性限界試験はバラツキが大きくなることがあるため、各サンプル 3 反復とした⁹⁴⁾。

pF 水分特性曲線は、飽和状態から pF3.2 までを加圧版法、pF3.2 以上をサイクロメータ法 (Decagon 社 WP4C) により測定した。なお、サイクロメータ法は土壤溶液の塩分による浸透ポテンシャルが測定値に含まれる。採取土壤は塩分濃度が高いため、本試験では浸透ポテンシャルを推定し、それを差し引いた値から pF 値を求めた⁹⁵⁾。浸透ポテンシャルについては、基準となる浸透ポテンシャルを次の方法で求めた。乾土 40~60g を遠沈管に入れ、同重量の水を加える (1:1 法と同じ)。遠沈管を振とう機により 1 時間攪拌し、遠心分離機 (毎分 3000 回転, 10 分) にかけて、上澄み液をろ過した。ろ過水は 15~30 cc 程度が得られ、それを 3~4 cc (サイクロメータカップ内の計量最小量) になるまで蒸発濃縮した。濃縮後、サイクロメータにより計測し、基準浸透ポテンシャルとした。浸透ポテンシャルは水分量 (正確には水体積) に反比例しており、乾燥過程の各土壤水分状態の浸透ポテンシャルは、基準浸透ポテンシャルに蒸発濃縮後の水分量を乗じ、各土壤水分量で除した値を求めた。

5.5.2 空洞成形に適した土壤水分状態の把握

3 つの WCA 内の圃場において、異なる土壤水分状態を有する時期にカットドレーンを施工し、空洞成形の出来栄を比較することによりカットドレーン施工に適した土壤水分状態を明らかにした。

土壤水分の把握は、測定が比較的容易であり、ウズベキスタンの現地技術者でも容易に分析が可能である含水比を用いた。カットドレーン施工付近において土壤を採取し、105°C・24 時間乾燥法で含水比を測定した。土層の区分は 0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm の計 5 層とした。異なる土壤水分を有する時期として、リーチング後の 3~4 月、乾季の 6~8 月を選定した。前者は綿花栽培圃場の播種前であり、トラクタが走行できる程度まで表層が乾燥しているが、下層部は水分が残っている状態である。後者は表層・下層ともに土壤が乾燥している時期であるが、灌漑の実施や地下水位が高い圃場などでは土壤水分が比較的保持されている。

カットドレーンの施工は、フェルメルが所有するトラクタ (Case IH MXM140Pro または New Holland TS130) に穿孔機を装着し牽引して行った。

5.6 試験結果

5.6.1 試験圃場の土壌の物理性

乾燥密度の試験結果を Fig. 5-11 に示す。3 圃場の乾燥密度（平均値）は、 $1.56\sim 1.58\text{ g cm}^{-3}$ であった。3 圃場ともに 2 層目（20~40 cm）に硬盤層が形成され、密度が高かった。

透水係数の試験結果を Fig. 5-12 に示す。3 圃場の透水係数はオーダーが $10^{-4}\sim 10^{-6}\text{ cm s}^{-1}$ であり、圃場の透水性は比較的小さかった。A 圃場および Y 圃場では硬盤層が最も小さかった。B 圃場では 3~4 層目が 10^{-6} cm s^{-1} と低いオーダーを示し、下層の透水性も小さかった。B 圃場に比較的多く見られる粘土分の影響と考えられる。

塑性限界・液性限界の試験結果を Fig. 5-13 に示す。3 圃場の塑性限界は 17~18%（各圃場 4 層平均値）、液性限界は 25~28%（同 4 層平均値）であった。A 圃場と Y 圃場の塑性指数（ $I_p=W_L-W_P$ ）は、それぞれ 7~8%、8~9% とほぼ等しかった。B 圃場は下層の液性限界が大きな値を示し、 I_p 値が 9~15% とほかの 2 圃場より大きかった。

pF 水分特性曲線の試験結果を Fig. 5-14~5-16 に示す。塑性・液性限界（含水比）を体積含水率に換算し、重ねて記載している。3 圃場の飽和土壌水分状態（pF 0）の体積含水率は、0~60 cm が約 0.35~0.40、60~80 cm が 0.42~0.46 であった。いずれも 4 層目が大きかった。塑性限界の pF 値は A 圃場が pF 2.8~3.1、Y 圃場 pF 2.6~2.9、B 圃場 pF 3.0~3.4 の範囲であった。B 圃場は粘土分が多く、ほかの 2 圃場より粘着性が高いと考えられる。A 圃場および Y 圃場の 4 層目の液性限界はそれぞれ pF 2.0、pF 1.6 であったが、その他の pF 0 は液性限界以下であった。

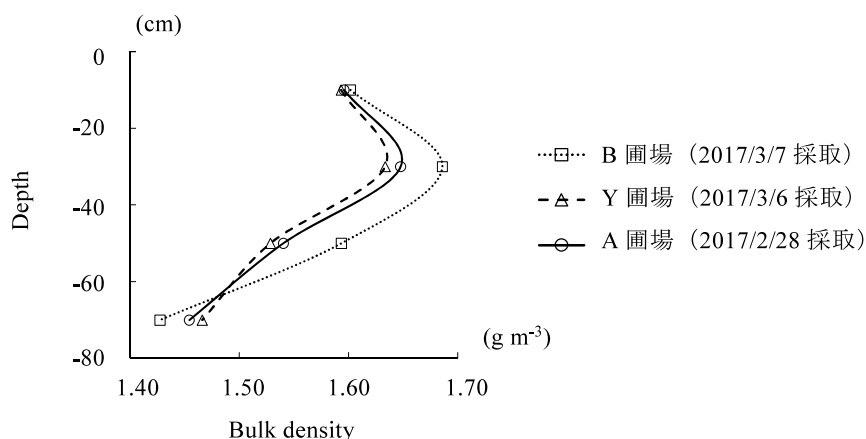


Fig. 5-11 各試験圃場の土壌の乾燥密度
Bulk density of soil in each experimental field

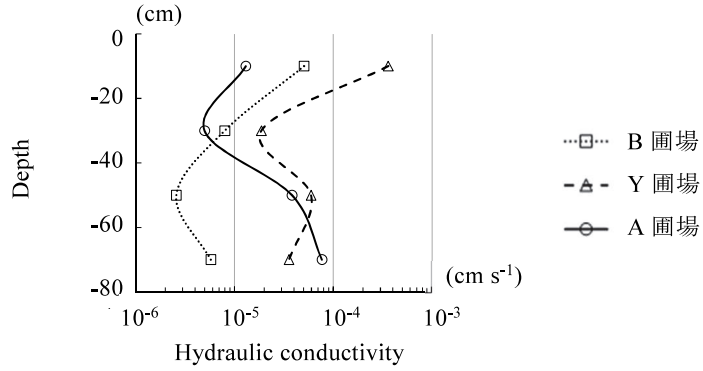


Fig. 5-12 各試験圃場の飽和透水係数

Saturated hydraulic conductivity in each experimental field

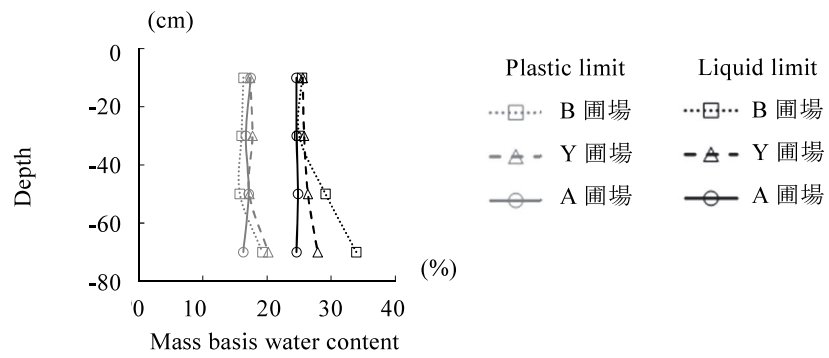


Fig. 5-13 各試験圃場の塑性限界と液性限界

Plastic and liquid limits in each experimental field

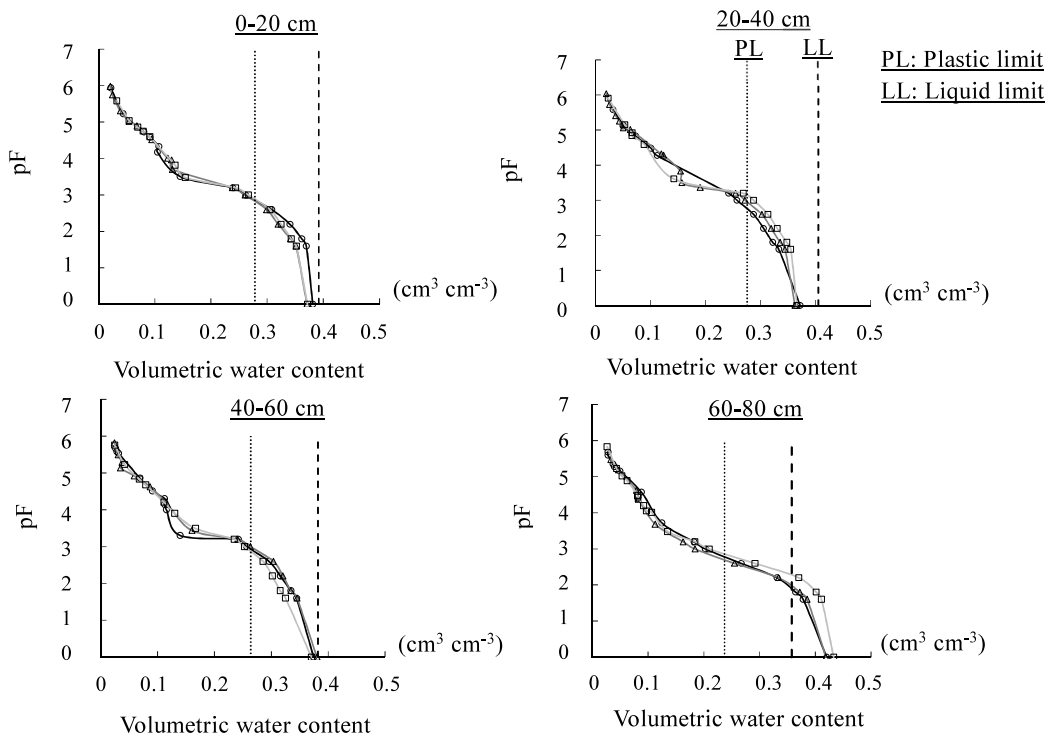


Fig. 5-14 A 圃場の pF 水分特性曲線

pF water moisture characteristic curve in A-field

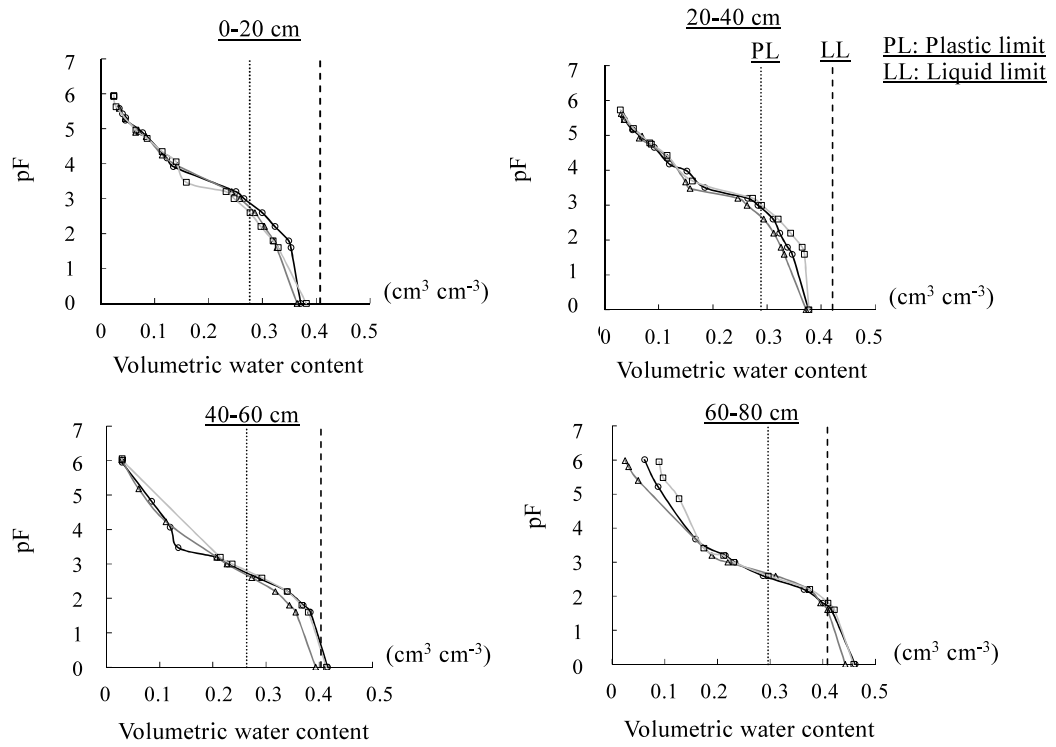


Fig. 5-15 Y 圃場の pF 水分特性曲線
pF water moisture characteristic curve in Y-field

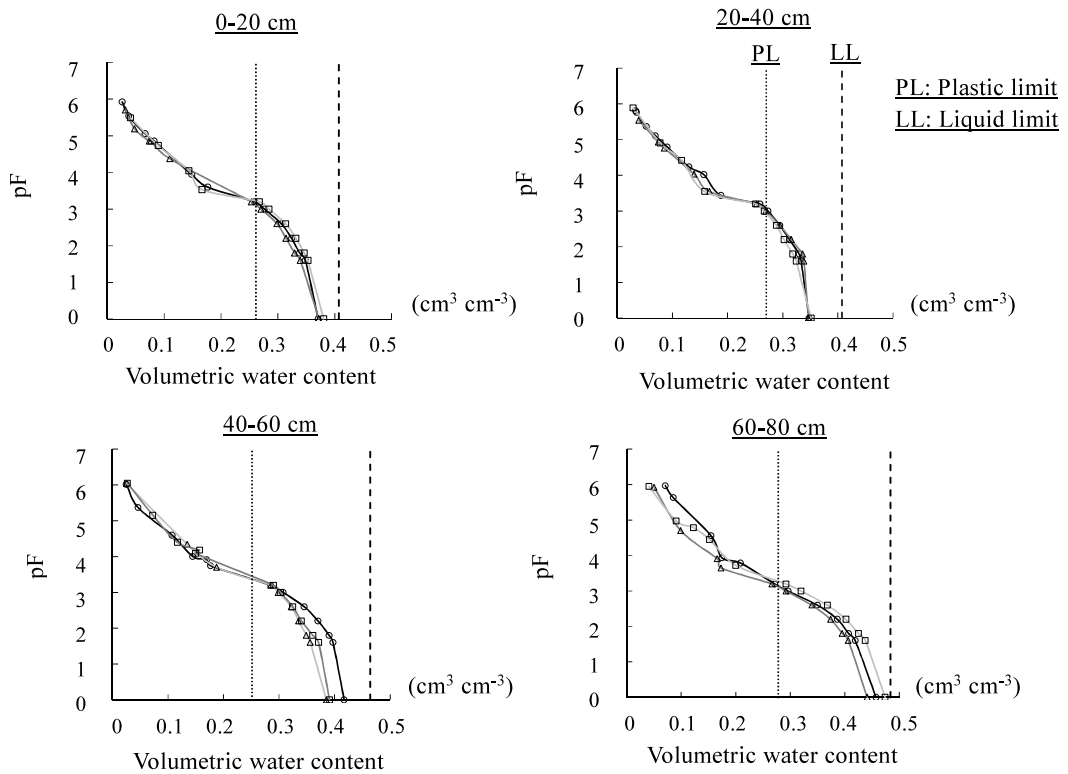


Fig. 5-16 B 圃場の pF 水分特性曲線
pF water moisture characteristic curve in B-field

5.6.2 空洞成形に適した土壌水分状態

試験圃場におけるカットドレーンの施工結果と深さ別土壌水分（含水比）および塑性限界，液性限界を Fig. 5-17 に示す。

リーチング後の綿花播種前の3月から4月にかけて施工した結果，穿孔機の挿入時に抵抗が見られたが，ベースフレームに荷重（100～120 kg）を加えることで，一定の深さ（60～90 cm）で施工できた。施工後の土壌断面調査では，全ての調査地点において，空洞が成形されていた。この時の3試験圃場の含水比（各圃場の平均値）は，1層目0～20 cmが16～18%の範囲にあり，2層目20～40 cmが18～19%，3層目40～60 cmが18～23%，4層目60～80 cmが25～29%，5層目80～100 cmが29～31%であった（Fig. 5-17の○印実線部）。

次に，やや土壌水分が保持されていた圃場で施工した結果，綿花播種前と同様に荷重を加えることで施工できた。土壌水分の保持要因は，A圃場がリーチング水の残り，Y圃場が灌漑，B圃場では高地下水位状態であった。牽引中，土壌が固くなっている地点で一時的にトラクタの車輪が空転し牽引に時間を要したが，牽引できなくなる事態には至らなかった。土壌断面調査では，全ての調査地点で空洞が成形されていた。含水比は，1層目から5層目までそれぞれ11～13%，15～16%，19～21%，23～28%，25～36%となっていた（Fig. 5-17の△印破線部）。

一方，乾季の小麦収穫後圃場（灌漑が実施されていない）で施工した結果では，穿孔機が浮き上がり，ベースフレームに荷重を加えても施工できなかった。含水比は，1層目から5層目までそれぞれ7～9%，9～14%，13～17%，17～22%，20～24%であり，綿花播種前の含水比と比較して全体で平均8%減少していた（Fig. 5-17の×印点線部）。

これら乾季の施工不可の圃場では施工可の圃場よりも含水比が低くなっていた。両者の間にカットドレーンの施工の可否が生じる土壌水分状態の下限值があるものと考えられた。3試験圃場における両者の含水比の中間値は，1層目から5層目までそれぞれ9～11%，12～15%，15～19%，21～23%，24～25%（B圃場は3層目以下，施工不可と綿花播種前圃場の施工可との中間値）であり，この土壌水分状態が本研究地域のカットドレーンの施工における下限値と推定した。

塑性限界は，A圃場，Y圃場，B圃場でそれぞれ16～17%（pF 2.9～3.1に相当），17～20%（pF 2.6～2.9），16～19%（pF 3.0～3.4）であった。この塑性限界に対して，施工下限値の含水比を比較すると，1層目から2層目で塑性限界をそれぞれ6～8%，2～5%程度下回った状態，3層目で塑性付近となっていた。このことからカットドレーンの施工では，表層

土壌（0～40 cm）が塑性限界を数%下回っても、40～60 cm 付近で塑性限界付近の含水比を保持していれば施工が可能となるものと考えられる。

一方、土壌水分状態の多い時期において、空洞成形付近の4層目の含水比は、A圃場 27%、Y圃場 29%、B圃場 28%であった。A圃場、Y圃場では、液性限界をそれぞれ 2%、4%超えていた。このことから本研究地域では液性限界を数%程度超えても空洞が成形されると考えられる。

また、トラクタ車輪の空転について見ると、灌漑により表層に土壌水分が残っていた箇所では、穿孔機を牽引しない場合には走行できたが、牽引時には車輪が空転し、施工ができなくなった。この時の含水比は 24%（A圃場の表層、液性限界付近）であった。乾季で表層が強く乾燥している圃場では、場所により土壌が固くなっており、トラクタの牽引抵抗が大きく、車輪が一時的に空転する状況が見られた。このような表層の過湿や強乾燥も施工の適否に関わる点となる。

以上からシルダリア州ではリーチング後の綿花播種前の含水比に近い状態が、施工上、支障の生じない土壌水分状態の一つと考えられるが、乾期において表層 40 cm 程度まで塑性限界を数%程度下回る程度に乾燥しても、その下の層が塑性限界を超えていれば施工可能であると考えられる。ただし、いずれの時期でも、穿孔機の挿入には荷重が不足しており、ベースフレーム部に荷重を加えるなどの改良も必要である⁶⁴⁾。

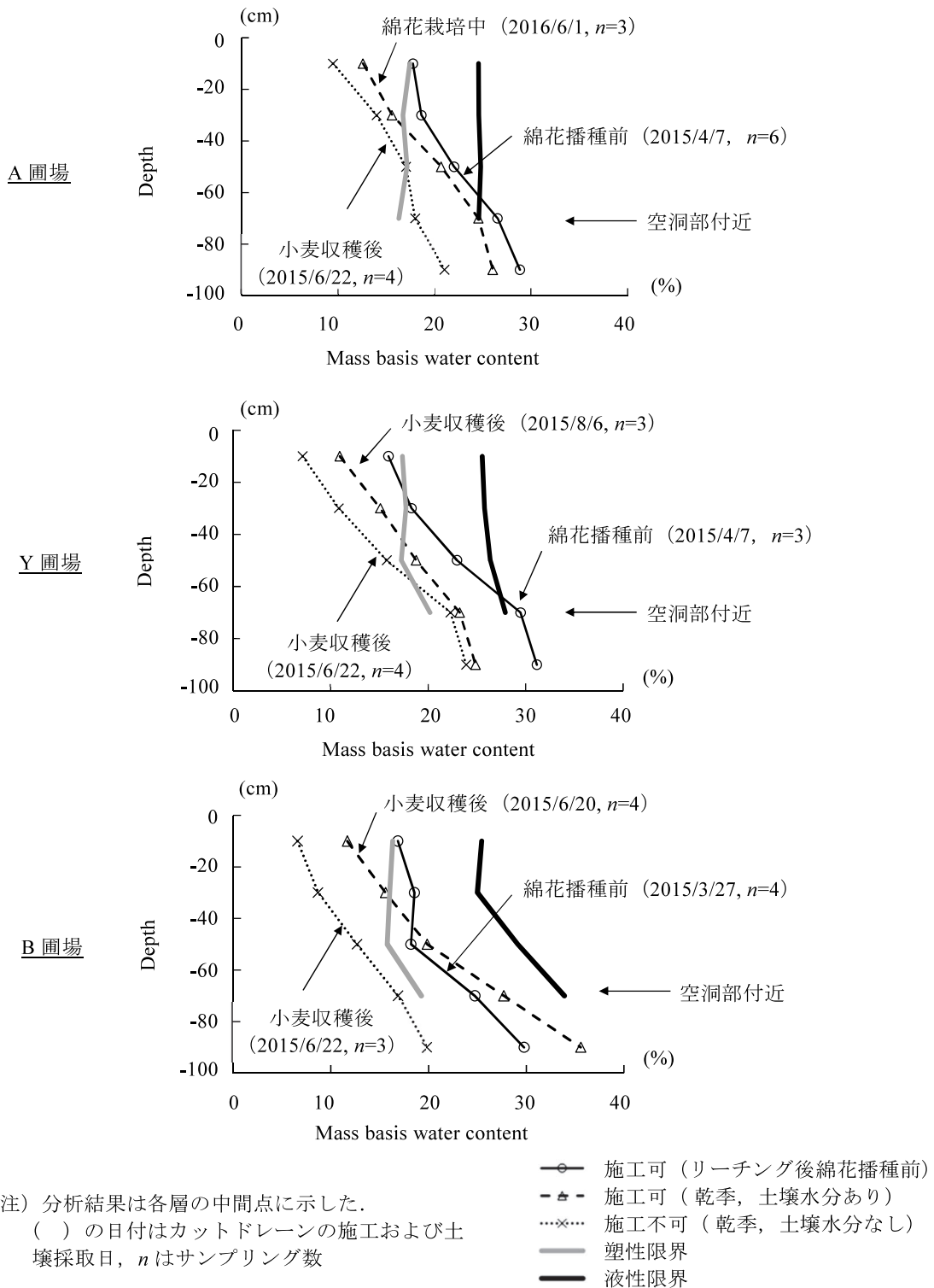


Fig. 5-17 カットドレーン施工時の土壤水分
 Soil moisture under the construction of the cut-drain

5.6.3 カットドレーンの施工深さ

穿孔機をウズベキスタンに導入するに当たり、事前に RIIWP 研究者と協議をした結果、施工深さはできるだけ深いことが望ましいとの提案があった。このため穿孔機の切断刃を改良し、穿孔深さの調節用フック孔を 3 カ所開けた機材を持ち込んだ。施工試験時、最深 1.2 m で施工したところ、牽引中に前刃上部に変形（曲がり）が生じた（Fig. 5-18）。この変形は 3 番目のフック孔（通常は搬送時に切断刃を上部に留めるために使用）周辺で生じており、フック孔が切断刃の強度面の弱点となっているものと考えられた。深さ 0.9 m の施工試験では切断刃の変形が見られなかったことから、構造・強度をそのままとした場合、深さ 0.9 m 程度が本試験地域における施工の限界深さと考えられる。



Fig. 5-18 切断刃の変形
Deformation of the cutting blade

5.7 まとめ

排水施設の機能低下により地下水位が高く、除塩効果が低下している圃場に対して、浅層暗渠排水は有効な対策の一つと考えられる。浅層暗渠排水は、地表面付近の地下水位を低下させ、リーチングなどによる塩類濃度の高い浸透水を確実に排除することができる。また、末端排水口が深さ 1.5~2.0 m 程度の排水路にも設置でき、堆砂により浅くなった排水路にも適用できる。しかし、浅層暗渠排水は、吸水渠の施工延長が長くなり、資材費、工事費を增高させるコスト面での問題がある。そこで本研究では、日本で開発された低コスト暗渠排水工法であるカットドレーンの活用を提案した。乾燥地でカットドレーンを活用するのは初めての試みである。

ウズベキスタンに見られる乾燥地でのカットドレーンの施工は、土壤の乾燥が強い場合、穿孔機が浮き上がるため施工が困難となる。このため、シルダリア州の 3 つの WCA の農家圃場において、施工に適した土壤水分状態を検討した。その結果、カットドレーンの施

工可否の含水比（施工可と不可の中間値）は、地表面下 0～40 cm で 9～15%（塑性限界以下）、同 40～60 cm で 15～19%（塑性限界付近）、空洞が成形されている層（同 60～80 cm 付近）で 21～23%（塑性限界と液性限界の間）であった。この層別の水分状態が研究対象地域における施工可否の下限值と推定された。この推定値は、塑性限界と対比した施工限界の土壤水分状態として、一般的な同種の工法にも共通するものと考えられる。

含水比は現地技術者も容易に測定できる。施工前に含水比を確認することで、カットドレーンの穿孔機が浮かび上がるリスクを避けることができる。穿孔機はトラクタに装着された状態で圃場まで運搬されるため、事前に施工適否を判断できることは、農家にとって時間とコストの浪費をなくすことに繋がる。

なお、表層部の含水比が高い場合、トラクタの車輪の空転が見られたことから、表層においては、トラクタの走行性を確保する土壤水分状態が施工のための必要条件の一つとなる。また、穿孔機の挿入にはしばしば荷重不足が見られることから、ベースフレーム部に荷重を加えるなどの改良が必要である。

以上、本章では、研究対象地域の乾燥土壤条件下において、カットドレーンの施工時に求められる土壤水分状態を明らかにした。次章では、施工したカットドレーンの適用性に関する課題と対策について論じる。

第6章 乾燥地におけるカットドレーン適用上の課題と対策

6.1 目的

乾燥地の灌漑農地で排水機能が低下し、塩類集積リスクが高い圃場に対して、リーチング時に確実な塩類除去を図る排水改良技術として、カットドレーンを活用した浅層暗渠排水を提案した。このカットドレーンを施工した圃場において、灌漑後やリーチング後に空洞部の崩落現象が見られた。本章では、この崩落の要因とその対策について論じる。

6.2 乾燥地におけるカットドレーンの課題

6.2.1 空洞部の崩落

(1) リーチング後におけるカットドレーンからの流出状況

2014年11月から12月にかけて、アフメドフWCA内の農家圃場で直接排水方式のカットドレーンの試験施工を行った。圃場の末端部に仮排水路を造成し、この排水路から穿孔機を牽引した。カットドレーンの排水口には洗堀防止のための塩化ビニール管(2m)を挿入した。2014年12月27日から2015年1月15日にかけて、リーチングが行われ、カットドレーンからの流出状況を観測した。多量の流出(最大 140 L min^{-1})が観測された箇所、流出がほとんど見られない箇所など流出状況には大きな違いがあった。流出水には泥水状のものがあり、排水口付近では洗堀崩落が見られた(Fig. 6-1)。また、施工ライン上では陥没箇所も見られた。カットドレーンに多量の水が流入し、洗堀が生じているものと考えられた。流出は湛水直後に発生しており、リーチング水が直接空洞部に短時間で到達していると考えられた。

(2) 灌漑後における空洞部の崩落

2015年3月から4月にかけてA圃場、Y圃場、B圃場で施工したカットドレーンの空洞状態を同年6月(綿花灌漑前)、7月(綿花灌漑後)に土壌断面調査により確認した。6月は調査した12カ所全てにおいて空洞の形状が維持されていた。一方、7月はA圃場で6カ所調査したうち5カ所、Y圃場で3カ所調査したうち2カ所、B圃場で5カ所の調査箇所全てに崩落が見られた。崩落状態は、隙間なく埋まっているものが多かったが、一部空隙が残されているものも見られた(Fig. 6-2~6.4)。崩落した部分は柔らかく、容易に掘り出せる状態であった。このため水みちとしての機能は残されているものと考えられる。崩落要因としては、自重による落盤、トラクタ走行などの振動による崩壊、灌漑水による空洞

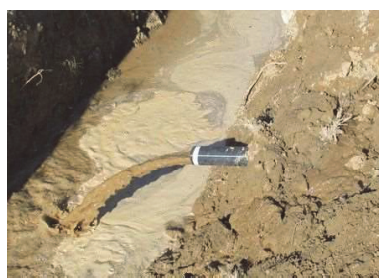
土壁の流動化や過剰な選択流の発生による落盤崩落が想定される。本試験圃場では、カットドレーン施工2カ月後の6月まで圃場全体を数回トラクタが走行していたが、空洞の形状は全て維持されていた。弾丸暗渠の研究事例によれば、施工直後にしばしば崩落が見られる^{96), 97)}。しかし、2カ月間、空洞部が維持されていたことから、崩落の要因は、自重による落盤やトラクタ走行の振動によるものではなく、6月下旬から7月上旬にかけて実施された灌漑によるものと考えられた。

灌漑による水の動きには、徐々に浸潤前線が下層に向かい空洞部に達する場合と灌漑直後に選択流が発生する場合がある。前者の可能性について土壌水分状態の変化から検討するため、カットドレーン施工時(3~4月)、灌漑前(6月)、灌漑後(7月)の含水比を深さ別に計測した結果をFig. 6-5に示す。施工時はリーチング水が土層内に保持され、また、雨季も経ており土壌水分は高かった。その後、2カ月間で約40mmの降水量があったが、乾季であり灌漑前の土壌水分は減少していた。灌漑から1週間程度を経た時点において、表層(深さ0~30cm)の含水比は増加していたが、下層(深さ30~100cm)では表層ほどの増加は見られず、Y圃場ではむしろ乾燥が進んでいた。このことから、本試験圃場の灌漑時の浸透水の動きとして、浸潤前線が全体的に下降する現象が生じたとは考えにくい。

以上から、本試験圃場ではリーチング・灌漑時に過剰な選択流が発生したと考えられる。選択流は、土壌間隙の中でもサイズの大きな植物根、土壌小動物活動、心土にまで達する乾燥亀裂などのマクロポアを優先的に移動する水の流れである⁹⁸⁾。カットドレーン切断刃が鉛直方向の亀裂として新たなマクロポアを形成し、灌漑水・リーチング水を優先的に地表面から空洞部に移動させる選択流となり、崩落が生じたと考えられる(Fig. 6-6)。



カットドレーンの施工(圃場内の仮排水路に直接接続)
(2014年12月21日)



リーチング後排水口(保護パイプ)より流出した泥水
(2014年12月30日)



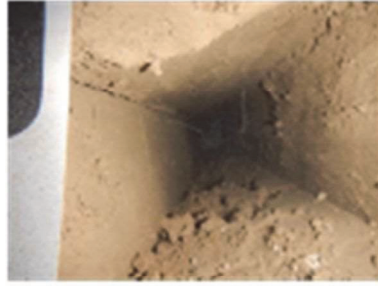
排水口付近に生じた崩落
(2015年2月24日)

Fig. 6-1 カットドレーンからの流出と排水口付近の崩落

Discharge from the cut-drain and collapse near outlet



空洞部付近 (○印) が崩落して
いるが柔らかい状態
(2015年8月3日)



空洞部が維持されている箇所
(2015年7月29日)



一部空隙が見られる箇所
(2015年8月3日)

Fig. 6-2 A 圃場のカットドレーンの断面
Profiles of cut-drain in A-field



空洞部付近 (○印) は崩落して
いるが柔らかい状態
(2015年7月30日)

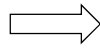


変形が見られるが、空洞部が維持され
ている箇所 (2015年7月30日)

Fig. 6-3 Y 圃場のカットドレーンの断面
Profiles of cut-drain in Y-field



空洞部付近 (○印) は崩落して
いるが柔らかい状態
(2015年7月29日)



写真左の崩落部分を掻き出した状態
(2015年7月29日)

Fig. 6-4 B 圃場のカットドレーンの断面
Profiles of cut-drain in B-field

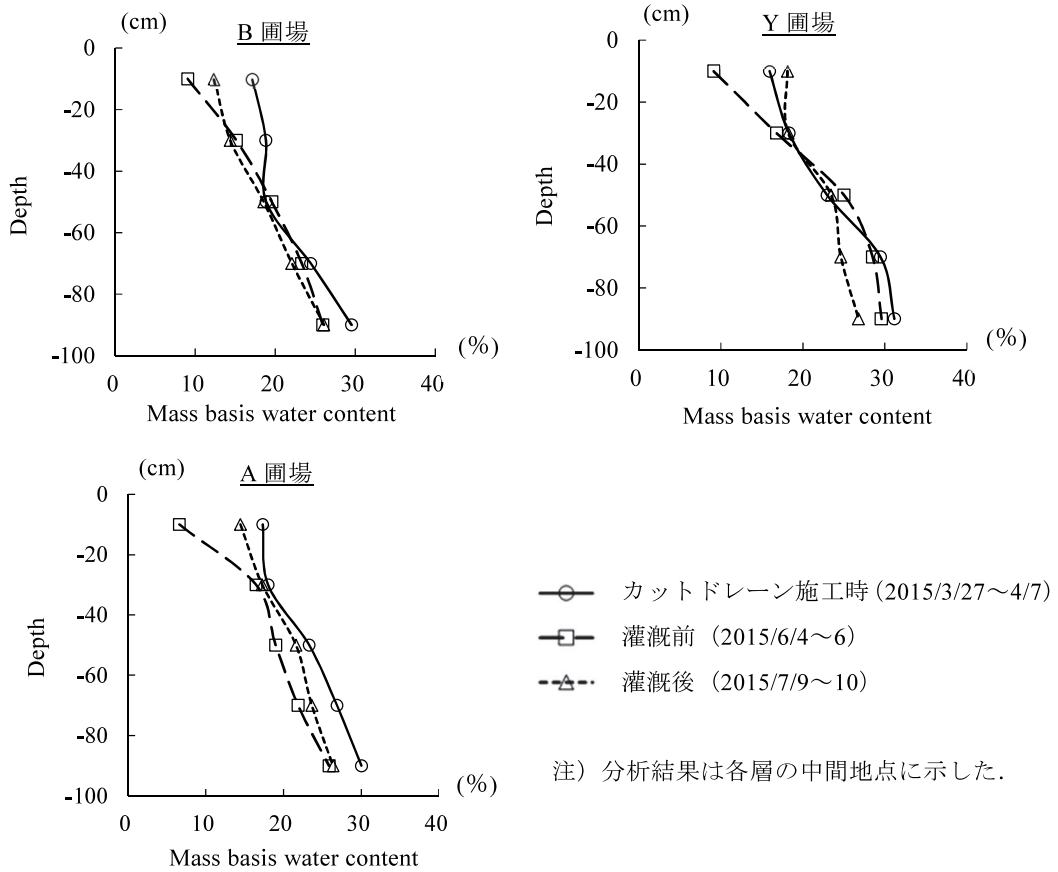


Fig. 6-5 含水比分布の変化 (2015年3月~7月)
Changes in water content profile (Mar. – Jul. 2015)

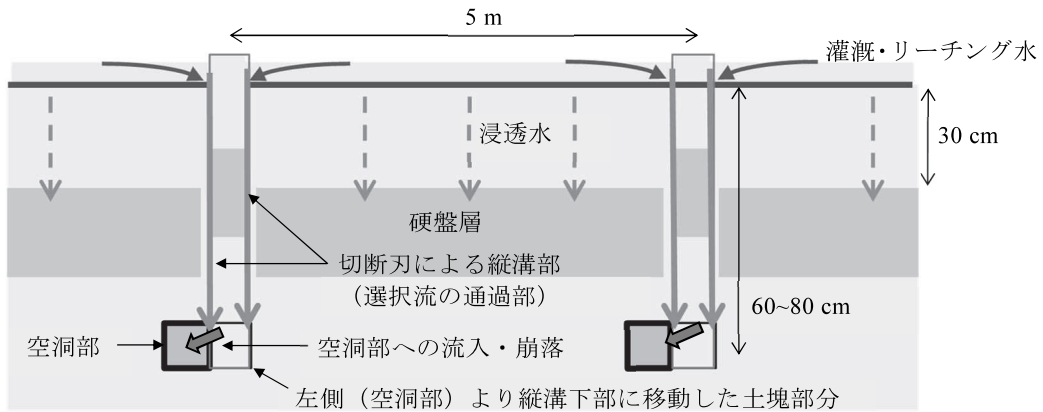


Fig. 6-6 空洞部崩落の概要図
Outline of cavity collapse

6.2.2 選択流抑制対策の必要性

リーチング時に見られたように、カットドレーンを直接排水方式にした場合、排水口付近では流速・流量が増し、洗堀崩落が激しくなる。このような流速・流量を抑制するためには、吸水渠（モミガラなどの疎水材部分）に接続する補助暗渠として活用することが適

当と考えられる。一般的に、補助暗渠には弾丸暗渠などが施工され、吸水渠の設計延長は小さくならないが、カットドレーンは弾丸暗渠より深く、かつ通水断面が大きく、吸水渠に近い排水能力がある。カットドレーンを吸水渠方向に配置し、そこに集めた浸透水を吸水渠で受ける構造とすることにより吸水渠の資材・施工コストを抑えることができる。

本地域の圃場は透水性が低く、選択流は流出率を増加させ、暗渠排水を促す。一方、リーチングの浸透水を排除するための浅層暗渠排水にとって、極度の漏水を引き起こす選択流は、空洞部の崩落による通水断面の縮小だけでなく、リーチング水と土壌の接触機会（時間）を少なくし、塩類の溶脱効果を低下させる⁶⁴⁾。水管理面からも選択流の発生は灌漑効率に悪影響を及ぼす。選択流による崩落後も水みち機能はある程度は残されているが、低コスト浅層暗渠排水としてカットドレーンの排水能力を最大限活用するには、空洞部の崩落の要因となる選択流の発生を軽減することが必要である。

以上の点から次節では、選択流の発生状況を検証し、その発生の軽減対策を論じる。

6.3 選択流の浸透試験

6.3.1 試験目的

本試験では、カットドレーンの施工ライン上でシリンダーによる湛水試験を実施し、選択流の発生の有無、浸透状況を確認した。

6.3.2 試験方法

シリンダーインタープレート試験（円筒直径 30 cm、湛水深 10～15 cm）によりカットドレーン施工ライン上の浸入速度を測定するとともに、空洞部への選択流の到達状況を確認した。試験位置は A 圃場（カットドレーン施工：2015 年 4 月 7 日）である。測定位置は①カットドレーンの施工ライン上（2 枚の切断刃の通過ライン）4 カ所、②浸入速度の比較対照のため施工ライン 2 本の間地点（①から 2.5 m 離れた地点）3 カ所、③対照区（施工ラインから 10 m 離れた地点）3 カ所、合計 10 カ所とした。①については、シリンダーの脇の施工ライン上に深さ 1 m のピットを掘削し、カットドレーン空洞部をピット内に露出させ、選択流の流入を観測した。

6.3.3 試験結果と考察

シリンダーインタープレート試験は、2015 年 9 月 22 日～23 日に実施した。①の施工ラ

イン上の4カ所中3カ所では選択流が発生せず徐々に浸透が進んだが、残る1カ所では湛水開始から1分後に空洞部に水が到達し、土壌断面内に流出があった。シリンダー内の水は完全に落水し、浸入速度は計測できなかった (Fig. 6-7)。②および③では徐々に浸透が進んだ。計測できた全9カ所について、ベーシックインテークレート (Ib: 浸入量の変化率が浸入量の10%になった時の浸入量) を算出した。①, ②, ③の各3カ所のIb (平均値) は、それぞれ 3.3 mm h^{-1} , 4.1 mm h^{-1} , 4.9 mm h^{-1} であり、有意差 ($p < 0.05$) は見られなかった (Fig. 6-8) ⁹⁹⁾。

本試験結果から、カットドレーン施工ライン上、選択流は部分的に発生し、選択流が発生しない施工ライン上の浸透状況はほかと違いがないことが分かった。ただし、今回のシリンダーインテークレート試験の湛水深は、実際のリーチング水深より小さく、マクロポアに移動する水の正圧状態も小さくなっている可能性がある。よって、リーチングと水深を同じくした場合、選択流の発生頻度はさらに高まることが考えられる。



浸入速度が遅い箇所

落水したシリンダーとピット内の流出

実施日: 2015年9月22日~23日

Fig. 6-7 シリンダーインテークレート試験状況

Cylinder intake rate test

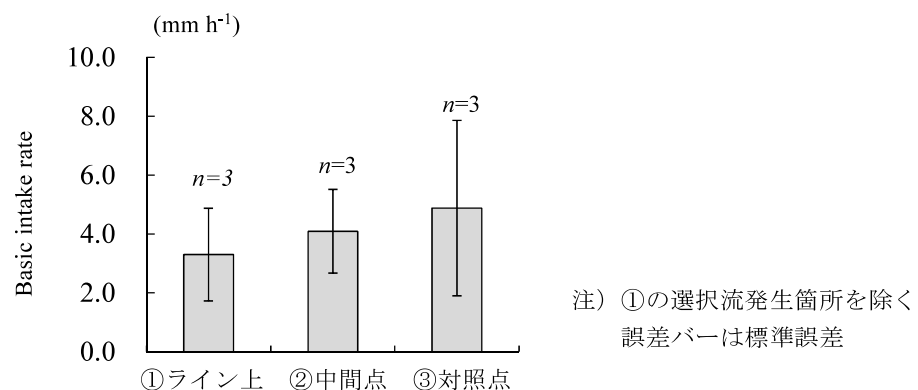


Fig. 6-8 シリンダーインテークレート試験結果

Result of cylinder intake rate test

6.4 選択流の発生抑制手法に関する試験

6.4.1 試験目的

カットドレーンの選択流の発生抑制対策として、穿孔機の切断刃を通過させる畝間にあらかじめ灌水し、高い土壌水分状態の下で施工する手法が考えられる。この手法では土壌内の空隙を土粒子により閉塞させること、土が変形し易くなることで切断刃による大きな亀裂を塞ぐ効果を期待している。本試験は、この手法を試行し、選択流の発生抑制の効果を確認することを目的とした。

6.4.2 試験方法

試験は A 圃場で実施した。試験に供する畝間の延長は 10 m とし、以下の灌水条件によりカットドレーンを施工した。

(a) 水深約 10 cm 相当量の灌水（灌水 10 cm 区）

畝間幅 0.9 m に対して、水深約 10 cm 相当量（ $0.9 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 0.9 \text{ m}^3$ ）を灌水し、2 日後に施工した。

(b) 水深約 3 cm 相当量の灌水（灌水 3 cm 区）

畝間幅 0.9 m に対して、水深約 3 cm 相当量（ $0.9 \text{ m} \times 0.03 \text{ m} \times 10 \text{ m} \doteq 0.3 \text{ m}^3$ ）を灌水し、同日に施工した。

(c) 無灌水（対照区）

畝間に灌水しない状態で施工した。

上記の (a) ～ (c) の処理をそれぞれ 3 本の畝（合計 9 本）で実施し、施工前後において、5 層（0～20 cm, 20～40 cm, 40～60 cm, 60～80 cm, 80～100 cm）から土壌を採取し含水比を測定した。

カットドレーンの施工から約 1 週間経過後、畝間内に浸透試験区（長さ 1.0 m）を設け、浸透状況を観測した。

浸透試験は、(a) ～ (c) の各畝間でそれぞれ 2 カ所ずつ、合計 18 点を観測した。浸透量の変化は、試験区内にゲージ（目盛を付けた木杭）を設置し、約 10 cm の深さに湛水後、水深の変化と時間を測定した。試験区では浸透が進んだ場合、注水して観測を継続した。畝の法面はビニールで覆い、試験開始と同時に試験区の周囲も灌水し、試験区内から横方向への浸透を抑えた。なお、カットドレーン施工区に対して、灌水条件だけを (a) ～ (c) と同じにし、カットドレーンを施工しない浸透試験区（未施工区、9 点）を施工区近傍に設

置し、両者の浸透状況を比較した。浸透状況は、灌水開始から約4時間観測し、時間 (t) を横軸、積算浸透量 (D) を縦軸にとり、両対数グラフにプロットし、近似式を求めた。この近似式から灌水開始30分後および60分後の積算浸透量を算出し、その差を単位時間当たりに換算して浸透能とした¹⁰⁰⁾。

選択流の発生は、空洞部への流出の有無を土壤断面により観測することで評価した。浸透試験区の隣に深さ1.0 m程度の観測用ピットを掘り、ピット内に空洞部を露出させた。観測用ピットと試験区を挟んだ反対側は、浸透水がピット側に対して逆に流れるのを防止するため空洞部まで掘削し、土壌で閉塞した (Fig. 6-9)。

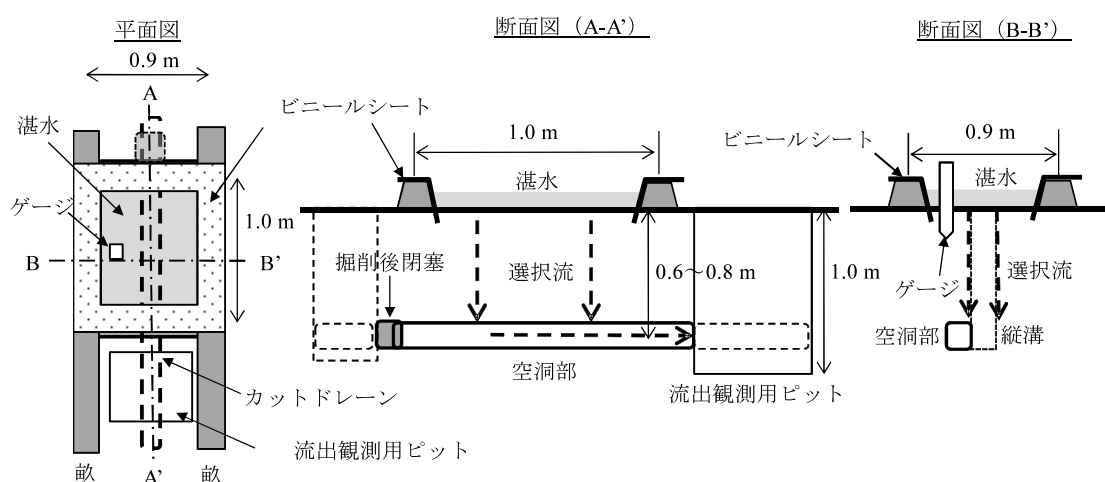


Fig. 6-9 浸透試験計画図
Diagram of the infiltration experiment

6.4.3 試験結果と考察

(1) カットドレーン施工時の含水比

A 圃場において、(a) 灌水 10 cm 区は 2016 年 5 月 30 日に灌水、(b) 灌水 3 cm 区は 6 月 1 日に灌水、カットドレーンの施工は (a)、(b) および (c) 対照区ともに 6 月 1 日に実施した (Fig. 6-10)。カットドレーン施工時の含水比を Fig. 6-11 に示す。(a) および (b) の含水比は、地表面から深さ 0~20 cm が 23~24%、20~40 cm が 20~21%、40~60 cm が 22%、60~80 cm が 25%、80~100 cm が 27%であり、各層に大きな違いはなく、(c) と比較するとそれぞれ 10~11%、6~7%、1%、0%、2%増加していた。40 cm 以下では (a) ~ (c) に大きな違いはなかった。このことから灌水による土壤水分への影響は主に 0~40 cm に生じることが分かった。

(a) 灌水 10 cm 区



0.9 m³ 投入 (5/30)



灌水後 2 日目にカットドレーンを
施工 (6/1)

(b) 灌水 3 cm 区



0.3 m³ 投入 (6/1)



灌水当日にカットドレーンを施工
(6/1)

(c) 対照区



無灌水 (6/1)



乾燥状態でカットドレーンを施工 (6/1)

Fig. 6-10 各灌水条件下のカットドレーンの施工状況
Cut-drain construction under different irrigation conditions

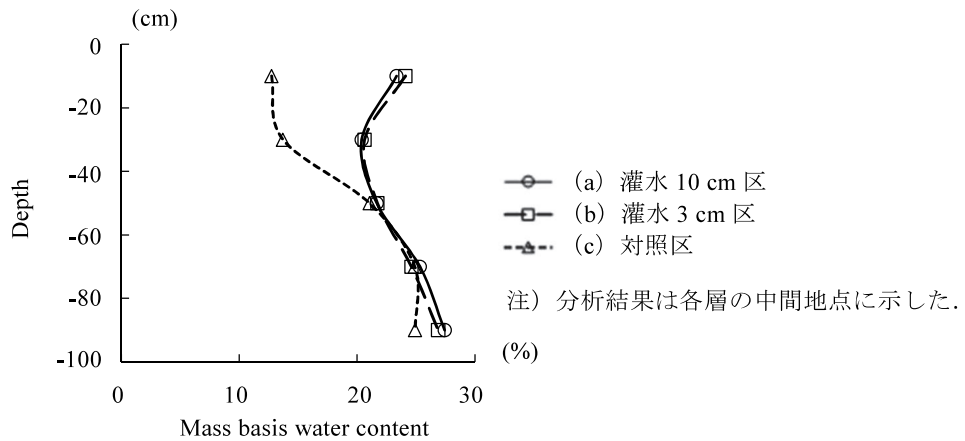


Fig. 6-11 各灌水深の土壤水分
Soil moisture at each irrigation depth

(2) 灌水によるトラクタ走行への影響

カットドレーンの施工時、車輪が走行する畝間の土壤水分量が多くなると、車輪が空転する懸念がある。(a)は、水量が多く、車輪が走行する畝間の土壤水分も増加させることが考えられた。このため(a)において、灌水した畝間の隣の畝間の含水比を測定した。その結果、灌水当日では0~20 cmが12%、20~40 cmが15%であったが、施工時の2日後にはそれぞれ17%、19%と4~5%の増加が見られた。この土壤水分状態は、リーチング後綿花播種前の土壤水分状態に近い。水深10 cm相当量の灌水は、隣接畝間の土壤水分を増加させるものの、施工上、支障は生じないものと考えられる。なお、灌水の管理上の問題として、畝間が狭い箇所や浅い箇所では、隣接の畝間に漏水することが想定される。これにより車輪が走行する畝間の土壤水分量が多くなり過ぎると空転が生じる。(a)の灌水量を投入する場合は、通水断面が確保されていることを確認し、漏水が生じないように水量を管理しつつ施工する必要がある⁶⁴⁾。

(3) 選択流の発生状況

カットドレーンの施工から8~9日後、(a)~(c)(各6点、合計18点)の浸透試験を実施した。その結果、各6点中、(a)では1点、(b)では2点、(c)では5点、計8点において、灌水開始後に選択流が発生し、大きな浸透が観測された。選択流が発生した試験区は、その発生からほとんど時間をおかずに完全に落水した。試験開始から選択流が発生するまでの時間は、30秒から2分12秒の間に分散しており、(c)が早く落水するなどの傾

向も見られなかった (Fig. 6-12). 表層から空洞部まで至る選択流の経路もしくは空隙の状態は一様でないことが示唆される.

ピット内での観測の結果, (a) では初めに空洞部よりも上の断面から浸透水が滲み出したが, その直後, 空洞部から流出した. (b) では空洞部からのみ流出した. (c) では, 4 点が空洞部からのみ流出し, 残りの 1 点がピット内に流出しなかった. この 1 点について試験区周辺を探索した結果, ピットと反対側のカットドレーン施工部に浸透していたのが確認され, これもカットドレーンによる選択流の発生と考えられた. ピット内には流出が見られたものの, ほとんどの空洞が維持されていた. 流入した水量が少なかったためと推察される⁶⁴⁾.

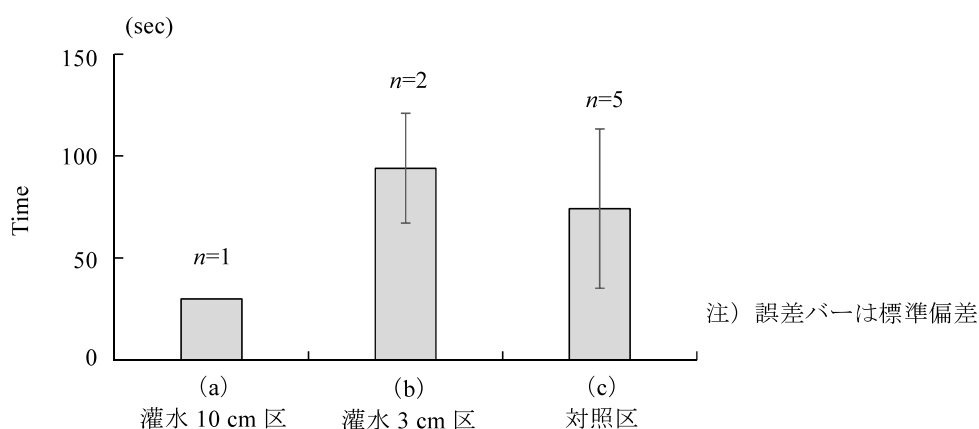


Fig. 6-12 各試験区の選択流発生開始までの時間

Time required for the incidence of preferential flow in each experimental plot

(4) 選択流が抑制された箇所の浸透状況

落水しなかった試験区 10 点 ((a) 5 点, (b) 4 点, (c) 1 点) では, 湛水が 4 時間以上持続し, ピット内には流出が観測されなかった. 時間 (t) と積算浸透量 (D) の関係を Fig. 6-13 に示す. 計算の結果, 浸透能は, (a) では 26 mm h^{-1} (4 点の平均, 1 点は欠測のため除く), (b) では 18 mm h^{-1} (4 点の平均値), (c) では 29 mm h^{-1} (1 点) と算定された. (c) が最も大きく, 次いで (a), (b) の順となっているが, 浸透能としてはオーダーが同じであり, 大きな差はないと言える. (a) ~ (c) のそれぞれのカットドレーン未施工区の浸透能は, (a) に対しては 17 mm h^{-1} , (b) では 19 mm h^{-1} , (c) では 18 mm h^{-1} であった (それぞれ 3 点の平均値). (a) とその未施工区, (b) とその未施工区の間ほとんど差はなかった (Fig. 6-14).

以上から, カットドレーンを施工後, 漏水が見られなかった箇所では浸透能に大きな差

がなく、灌水後の初期 4 時間では未施工の圃場と同様な浸透能であったことが推察される⁶⁴⁾。

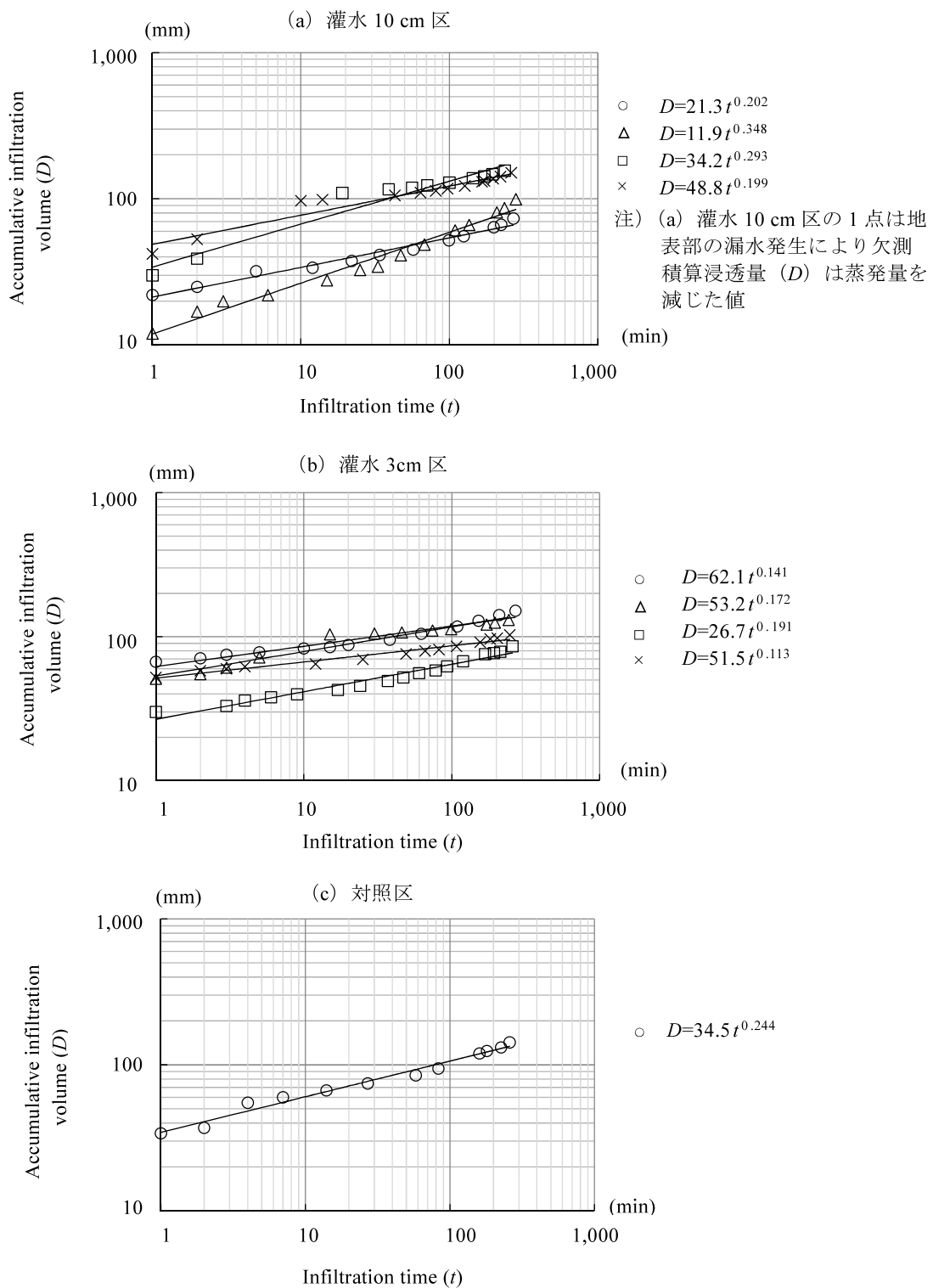
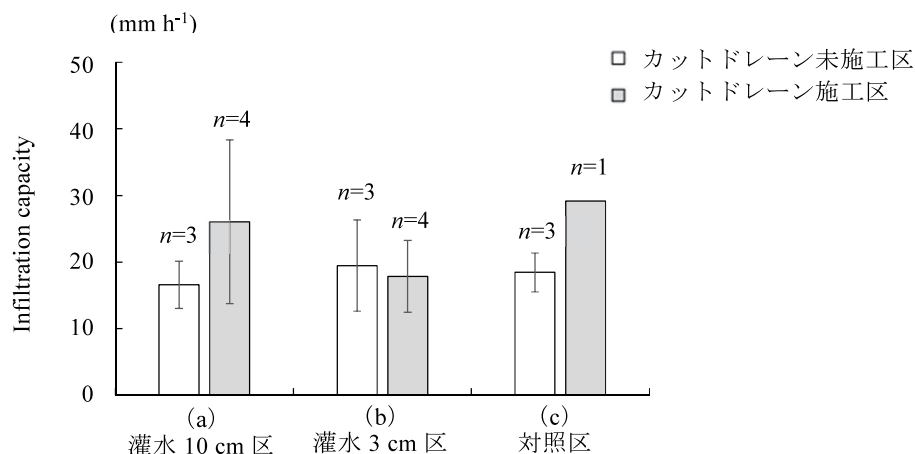


Fig. 6-13 浸透時間 (t) と積算浸透量 (D)

Relationship between infiltration time (t) and accumulative infiltration volume (D)



注) 誤差バーは標準偏差
 カットドレーン施工区 (a) 灌水 10 cm 区の 1 点は欠測

Fig. 6-14 湛水維持区の浸透能

Infiltration capacities of plots maintained under ponded conditions

(5) 選択流の発生抑制手法の評価

カットドレーンの施工前、切断刃が通過する畝間に灌水した場合、無灌水の場合よりも選択流の発生頻度が低下しており、本手法は、リーチング水の急激な落水を抑制し、空洞部の崩落および塩類の溶脱効果の減少を回避する手法として期待できるものと考えられる。また、(a) と (b) ではカットドレーンの施工時の土壤水分に大きな差が見られなかったことから、水に制約がある場合、または通水断面の確保や灌水量の管理を徹底できない場合には、灌水量の少ない (b) を選択しても、同様な効果が得られるものと考えられる⁶⁴⁾。

6.5 まとめ

カットドレーンは、灌漑やリーチングなどにより多量の水が投入された場合、切断刃による亀裂・空隙を通じた選択流が発生することを確認した。この選択流が多量に空洞部に流入すると、土壁が流動化・洗掘されて崩落し、カットドレーンの特徴である高い通水機能が低下する。また、リーチング水と土壤が接触する機会・時間が短くなり、塩類の溶脱効果が減少する。水管理の面においても水分補給に至らない無効な流下は灌漑効率を低下させる。これらのデメリットを回避する選択流の発生抑制対策として、カットドレーンの施工前に切断刃が通過する畝間にあらかじめ灌水する手法を試みた。施工後、浸透試験を実施し、選択流発生の有無を確認したところ、無灌水の場合と比較し、選択流の発生頻度が低下した。同手法には選択流の発生を抑制する効果が期待できる。

今回行った選択流の発生抑制手法試験については、カットドレーンの施工から浸透試験までの期間が1週間程度であった。長い乾燥期間を経た場合、乾燥による亀裂が再び生じて選択流発生頻度の低減効果に影響が出る可能性も残されている。トラクタの走行性に留意が必要であるが、雨季の開始時の施工など、亀裂発生などの影響を抑える効果的な施工時期の検討が求められる。

次章において、この選択流の発生抑制手法を採用したカットドレーンの浅層暗渠排水圃場のリーチング効果を論じる。

第7章 低コスト浅層暗渠排水の除塩効果

7.1 試験目的

本章では、カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の効果を検証する。

Ritzema らは、乾燥地で浅層暗渠排水の塩類集積対策効果と経済効果を検証している¹⁰⁾。それらの暗渠排水システムは有孔管を埋設した吸水渠で構成されている。本研究で提案している浅層暗渠排水は、カットドレーンを有孔管上部の疎水材（モミガラ）に接続し、浸透水をカットドレーンで疎水材まで流下させ、有孔管に集め、排水路へ流出させるものである。カットドレーンは、補助暗渠の役割を果たすと同時に吸水渠レベルの通水機能により吸水渠の低密度・低コスト化を可能にする。通水機能に焦点を当てれば、従来の有孔管と疎水材から構成される吸水渠に代わってカットドレーンを配置する吸水渠代用型暗渠排水とも言える。このようにカットドレーンには従来の補助暗渠と新たな吸水渠の両面役割を有しているが、ここではカットドレーンを吸水渠とは呼ばず、吸水渠はこれまでと同じ有孔管と疎水材部分を示すこととする。

本章では、この低コスト化した浅層暗渠排水を農家圃場に導入し、塩類集積対策試験区として、地下水位、水・塩分収支、作物収量に対する効果を明らかにすることを目的とした。カットドレーンを活用した低コスト浅層暗渠排水を乾燥地の塩類集積対策として研究した事例はない。

7.2 試験方法

7.2.1 試験圃場の概要

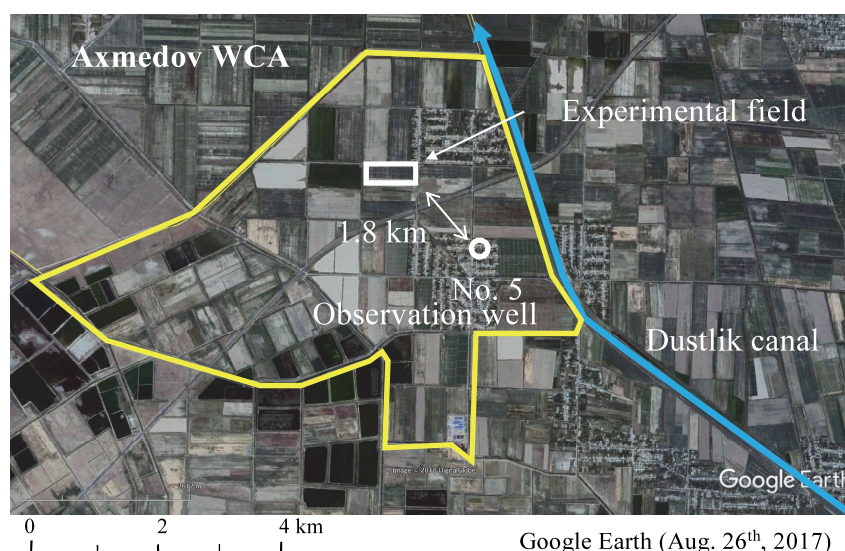
試験区はアフメドフ WCA 内の A 圃場（道路・用排水路で囲まれた 30 ha）内に設置した（Fig. 7-1, Fig. 7-2）。低コスト浅層暗渠排水区（以下、暗渠区）4.0 ha、対照区 3.5 ha、合計 7.5 ha である。A 圃場の周囲には排水路が建設されている。北側と東側の排水路は深さ約 2~3 m 程度であり、A 圃場との間には集落内道路がある。西側の排水路は深さ 1.5~2.0 m であり、A 圃場との間には幅約 12 m の土手を含めた耕作用通路がある。南側は隣接圃場との境界にある深さ 1 m 程度の小排水路である。冬季には排水路水位が上昇し、圃場からの浸透流出は制限された状態となる。

暗渠区は、A 圃場北側の中央付近（200 m×200 m）に設置した。A 圃場は東から西に下る勾配（1/900 程度）がついており、カットドレーンはこれに合わせて東西方向に施工した。

吸水渠は、カットドレーンの下流側、暗渠区中央部にそれぞれ 200 m (計 400 m) を南北方向に配置し、勾配 1/800 程度で埋設した。吸水渠の構成は、有孔管 (径 10 cm, 深さ 80~100 cm 程度) とその上部の疎水材 (モミガラ, 地表面下 30 cm まで投入) とし、モミガラ部にカットドレーンを深さ 60~80 cm で交差させた。吸水渠の下流端は圃場北側に埋設した集水渠に接続し、集水渠は圃場西側の排水路に接続した。カットドレーンの施工は、暗渠区中央部の吸水渠を横断する形で穿孔機を 200 m 牽引した。カットドレーンは、2015 年 12 月に 5 m 間隔で一度試験施工したが、リーチングが実施され、多くは閉塞していると考えられた。このため 2016 年 11 月に選択流の発生抑制対策工法を用いて、再度 5 m 間隔 (施工ラインは前年施工の中間部) で施工した。対策工法では畝間から水が溢れないよう留意したものの、計画施工延長 8 km のうち、約 2 km の区間で畝間から水が漏れ、トラクタ車輪が空転し、施工できなかった。このため対策工法の実施区域は暗渠区の 3/4 程度となった。

対照区は暗渠区の東西に設置した。なお、圃場西側に 2014 年に試行した吸水渠とカットドレーンがあるため、この付近は対照区から除いた。

リーチングは畝で囲まれたプロット毎に行われ、暗渠区内は 20 プロット (うち、選択流対策工法実施区域 14 プロット)、対照区内は 9 プロットとした。地下水位の変動を把握するため観測井を暗渠区、対照区、吸水渠付近、A 圃場内のリーチングを実施しない地点および A 圃場外の 5 カ所に設置した。



注) No.5 は垂直排水の表層地下水位観測井 (垂直排水のポンプから 100 m 地点)

Fig. 7-1 アフメドフ WCA 内の試験圃場位置図
Map showing location of experimental field in Axmedov WCA

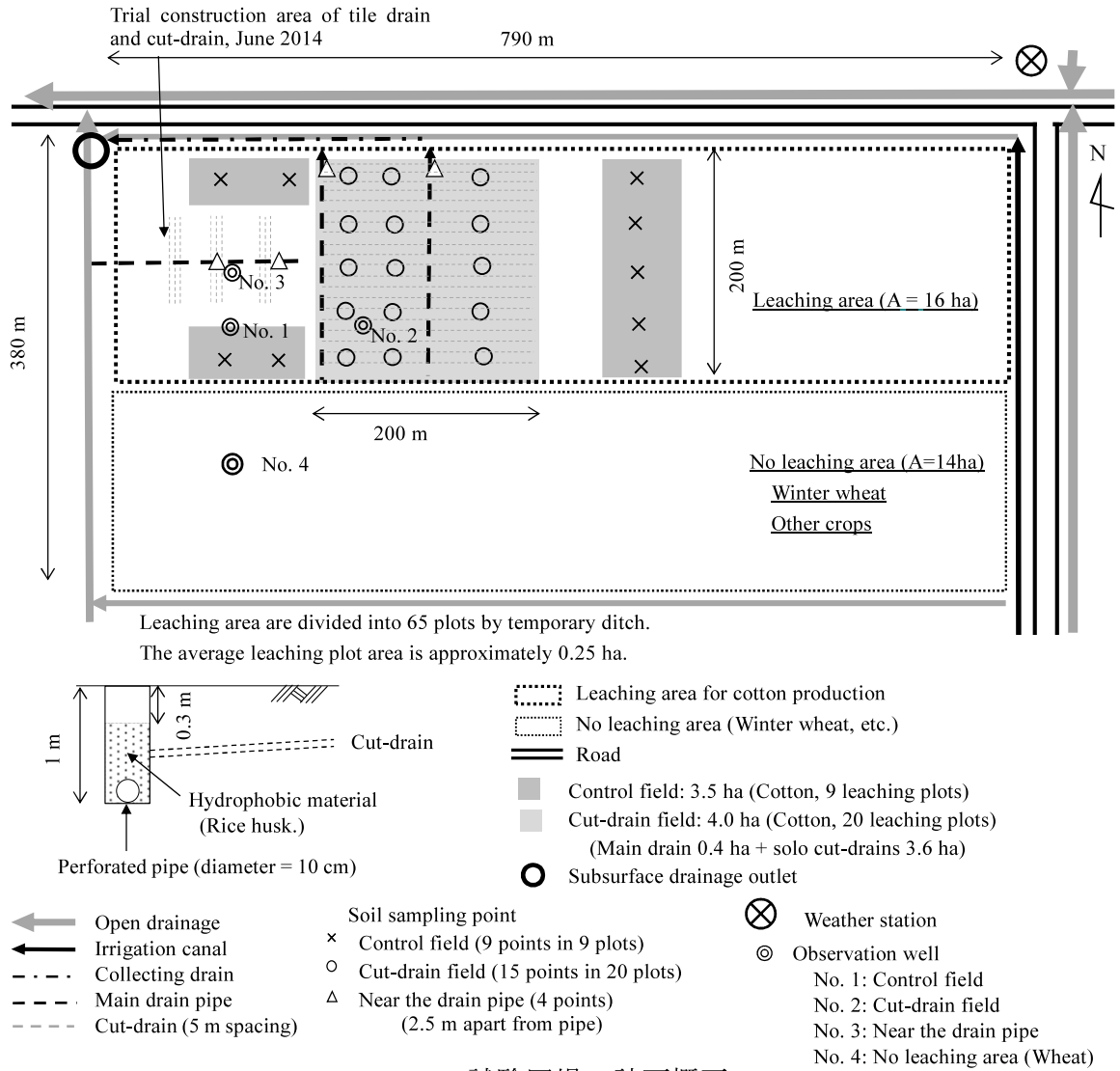


Fig. 7-2 試験圃場の計画概要
Layout of experimental field

7.2.2 測定および評価方法

浅層暗渠排水の効果は、地下水位の変化、リーチング前後の水収支および塩分収支、土壌塩分濃度の変化、綿花収量で評価した。暗渠区の効果は、吸水渠とカットドレーンを組み合わせたものであるが、厳密には吸水渠とカットドレーン部の構造が異なる。このため地下水位、土壌塩分濃度、収量については、カットドレーン区と吸水渠付近に分けて測定した。暗渠区全体の評価には、カットドレーン区 (3.6 ha) と吸水渠付近 (延長 200 m×幅 10 m×2 本=0.4 ha) の加重平均値を用いた。

(1) 地下水位への影響

観測井によりリーチング期間中の地下水位の変化を観測した。A 圃場の観測井は、対照区 (No. 1)、カットドレーン区 (No. 2)、吸水渠付近 (No. 3)、A 圃場内南側のリーチング

圃場から約 70 m 離れた小麦栽培区 (No. 4) に設置した。観測井は、塩化ビニール管 (径 65 mm) の管底を閉塞し、地表面下 0.5 m まで側面を削孔し、深さ 4.5~5.0 m まで埋設した。計測は孔内に自記水位計 (Onset 社 HOB0-U20-001-04-TI) を設置し、測定間隔は 1 時間とした。また、周辺区域を含めてリーチングが行われていない圃場の地下水位 (No. 5) として、A 圃場から約 1.8 km 離れた垂直排水の観測井 (表層地下水位, 100m 地点) のデータを用いて、地下水位の変化を比較した。

(2) リーチング前後の水収支

試験区内の土層 0~1 m の範囲を対象に流入量と流出量を算定した。水収支の式は、以下を用いた¹⁰²⁾。

$$\begin{aligned} \Delta &= Ws2 - Ws1 \\ &= Wi + Wr - Wc + Wg1 - Wg2 - Wg3 - Wg4 - Wd - Wet \end{aligned} \quad \text{①}$$

ここで、 Δ : 試験区の水分量の変化 (対象は土層 0~1 m)、 W : 水量 (単位は深さ : mm)、 W の添え字は、 $s1$: リーチング前の試験区の土層 0~1 m の土壌水、 $s2$: リーチング後の試験区の土層 0~1 m の土壌水、 i : 灌漑・リーチング水、 r : 降水、 c : 水路ロス、 $g1$: 地下水の試験区土層 0~1 m への流入、 $g2$: 地下水の流出 (暗渠排水による排水路への流出分、対照区はゼロ)、 $g3$: 地下水の流出 (試験区地下水の排水路への浸透流出分)、 $g4$: 地下水の流出残量 ($g2$ および $g3$ 以外で排水路に流出せず試験区の土層 1 m 以深または周辺圃場に移動した水分)、 d : 地表面排水、 et : 蒸発散、を示す。水収支の計算期間はリーチングを挟む 70 日間 (リーチング前後に実施した土壌採取日の期間) とした。

本試験では圃場内での水量を対象とするため水路ロスはなく、地表面排水もないことから Wc および Wd を除き、式①は次のようになる。

$$Ws2 - Ws1 = Wi + Wr + Wg1 - Wg2 - Wg3 - Wet \quad \text{②}$$

リーチング後に圃場内に残留した部分を左辺にまとめると、式②は以下となる。

$$Ws2 + Wg4 = Wi + Wr + Wg1 - Wg2 - Wg3 - Wet + Ws1 \quad \text{③}$$

本節ではこの残留水分量を対照区と比較した。

各項目の測定・推定方法は以下のとおり。

- リーチング水量 (Wi) は、試験圃場内のリーチング用仮水路の上流部で流水の断面積、流速、通水時間を測定し、毎秒当たりの水量を算出した。水量を日当たりに換算し、これをリーチング期間で合計し、リーチング面積で除した値を求めた。測定は1日1回とした。流速は電磁流速計 (ケネック社 LP30) により測定した。
- 降水量 (Wr) は、A 圃場から北 60 m の農家菜園内に設置された雨量計 (気象観測装置 Davis 社 Vantage Pro2) の観測値とした。
- 地下水流入量 (Wg1) は、試験区および周辺地下水位の測定結果により流入の有無を検討した。流入がある場合、流入量は地表面下 1 m 付近の土壌水分量と飽和水分量の差を用いて推定することとした。
- 暗渠排水量 (Wg2) は、排水口の流出水量と時間をバケツとストップウォッチにより測定し、毎秒当たりの水量を算出した。得られた水量を日当たり水量に換算し、暗渠区面積 (4 ha) で除した値を求めた。測定は1日1回としたが、測定できない期間は農家に作業を依頼した。なお、暗渠区面積には選択流抑制対策を実施できなかった面積も含めた。
- 試験区地下水の排水路への浸透流出量 (Wg3) は、流入量に浸透流出率を乗じて推定した。浸透流出率は、第4章の算定方法により観測期間のものを推定した。
- 蒸発散量 (Wet) は、シルダリア川流域で観測された既存資料から推定した。
- 試験区の土層 0~1 m の土壌水分量 (Ws1, Ws2) は、リーチング前後の土壌の含水比を測定し、体積含水比に換算し、水深値を求めた。土壌はオーガーにより5層 (0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm) を採取した。採取箇所は、対照区 (リーチングプロットの中央部)、カットドレーン区 (リーチングプロットの中央部、中央付近に吸水渠が埋設された5プロットを除く)、吸水渠付近 (有孔管から 2.5 m の距離) で、それぞれ 9, 15, 4 地点 (45, 75, 20 サンプル) とした。

(3) リーチング前後の塩分収支

上記で求めた水収支に基づき、水に含まれる塩分量から塩分収支を算定した。塩分収支式は、式③から以下のように示すことができる⁷⁹⁾。

$$Ss2 + Sg4 = Si + Sr + Sg1 - Sg2 - Sg3 - Set + Ss1 \quad \text{④}$$

ここで、S は塩分量 (単位は t ha⁻¹)、添え字は上記 (2) と同じである。蒸発散量の塩分量は無視できるため、式④は以下となる。

$$Ss2 + Sg4 = Si + Sr + Sg1 - Sg2 - Sg3 - Sg4 + Ss1 \quad \text{⑤}$$

各項目の測定・推定方法は以下のとおり。

- 流入および流出水の電気伝導度 (ECw) を測定し、同時期に求めた ECw と総溶解固形分 (TDS, g L⁻¹) の関係式から総塩分量を算定した。ECw は電気伝導度計 (HORIBA 社コンパクト EC メータ EC-33B) を用いて測定した。TDS の分析は、RIIWP に依頼した。
- 土層 0~1 m の土壌塩分量 (Ss1, Ss2) は、リーチング前後の土壌 EC_{1:1} を分析後、RIIWP の経験式により ECe 値に換算し、同時期に求めた ECe と TDSsoil との関係式および乾燥密度より求めた¹⁰³⁾土壌は水収支のサンプリング試料を用いた。TDSsoil および土壌 EC_{1:1} の分析は、RIIWP に依頼した。

(4) 土壌塩分濃度への影響

塩分収支で求めた対照区、暗渠区、吸水渠付近の ECe 値を比較した。なお、選択流抑制対策が完全に実施できなかった地点も暗渠区に含めた。

(5) 綿花収量への影響

綿花収穫期に試験区の収量調査を実施し、対照区と暗渠区の収量の違いを明らかにした。収量調査は畝長 1.1 m の範囲の綿花を摘み取り、重量を計測した。畝幅が 0.9 m であり、1.1 m×0.9 m=1.0 m² を 1 カ所当たりの収量調査面積とした。これを ha 当たりの収量に換算した。綿花の摘み取りは土壌採取地点の周囲 4 カ所で行った。なお、選択流抑制対策が完全に実施できなかった地点も暗渠区に含めた。

7.3 試験結果と考察

7.3.1 地下水位への影響

地下水位の変動状況を Fig. 7-3 に示す。本試験圃場では WCA の水配分計画上、リーチングは 2 回に分けて実施された。リーチング開始前 (12 月 24 日) の試験区内の観測井の地下水位 (対照区 No. 1, 暗渠区 No. 2, 吸水渠付近 No. 3) は、深さ-2.7~-3.1 m 付近にあり、10 mm d⁻¹ 程度の速度で上昇していた。観測井を設置しているリーチングプロット、または、その隣接プロットが湛水された日に地下水位の急上昇が見られた。その後、2 回目のリー

チング時に再び上昇していた。土壌採取 2 月 27 日までの間、降水の影響を受け、-1 m 以浅で上昇下降を繰り返していた。

観測井 No. 1~3 の水位を個別に見ると、下降量や下降速度に異なる動きが見られた。暗渠区の地下水位が早く下降していた。1 回目のリーチング後の上昇から 2 月 27 日までの間の平均水位は、それぞれ-0.30 m, -0.44 m, -0.66 m であり、吸水渠付近が最も深く、次いでカットドレーン区となっていた。

一方、A 圃場内でリーチングを実施していない小麦栽培区の観測井 (No. 4) の地下水位は、初めは試験区内と同様に深い位置-2.8 m 付近にあり、試験区と同じ上昇速度を示していたが、やがて 20 mm d^{-1} に上昇速度を上げ、1 月 15 日時点で-2.1 m まで達した。翌日 16 日にさらに上昇速度を上げ、2 月上旬にはリーチング圃場内の地下水位と同調していた。15 日まではリーチング圃場や隣接圃場の高い地下水ポテンシャルの影響を受けた上昇、次の上昇速度の変化はリーチング浸透水が No. 4 地点に到達したことが想定された。北村らは、シルダリア川下流域のカザフスタンの水稲作を中心とする輪作圃場において、水稲作圃場と畑作圃場の間に排水路があっても水稲作圃場の高い地下水位は畑作圃場の地下水位を上昇させ、塩類集積リスクを高めていると指摘している⁷⁹⁾。No. 4 とリーチングプロットは約 70 m の距離があるが、同一圃場内であり地下水位はより影響を受け易い。リーチング開始後から 40 日程度で、リーチングの有無に関わらず、圃場内の地下水位が同じ状態になることが分かった。

上記の地下水位の変動に対して、周辺区域にリーチングが行われていない地点の観測井 (No. 5) の地下水位は、1 月 28 日まで約 10 mm d^{-1} の上昇速度であった。1 月下旬から降雨によると思われる水位の上昇があるが、その後、前の上昇速度から想定される水位までに戻っていた。3 月に入ると、No. 1~No. 4 と同様な下降を示した。この下降はアフメドフ WCA 全体の広域的な地下水位の変動と考えられる。

7.3.2 リーチング前後の水収支

(1) リーチング水量 (W_i)

リーチング水量を Fig. 7-4 (上横軸の灰色棒グラフ) に示す。A 圃場のリーチング 1 回目は 2016 年 12 月 21 日~29 日、2 回目は 2017 年 1 月 3 日~12 日に行われ、このうち暗渠区は、1 回目 12 月 25 日~27 日の 3 日間、2 回目 1 月 6 日~11 日の 5 日間に実施された。リ

ーチングは、圃場東側（上流側）から西側（下流側）に向かって行われた。試験区の平均水量は、1回目 192mm, 2回目 118 mm, 合計 310 mm であった。

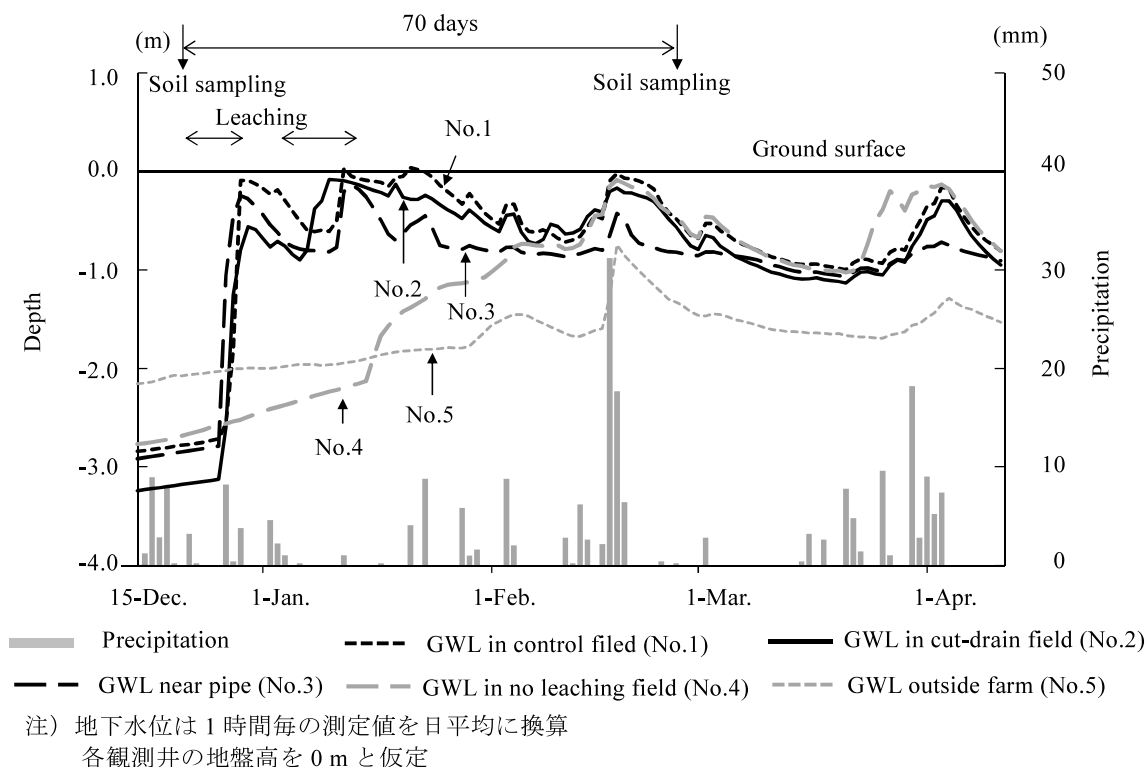


Fig. 7-3 地下水位の変化と降水量（2016年12月～2017年4月）

Changes in groundwater level and precipitation (Dec. 2016 – Apr. 2017)

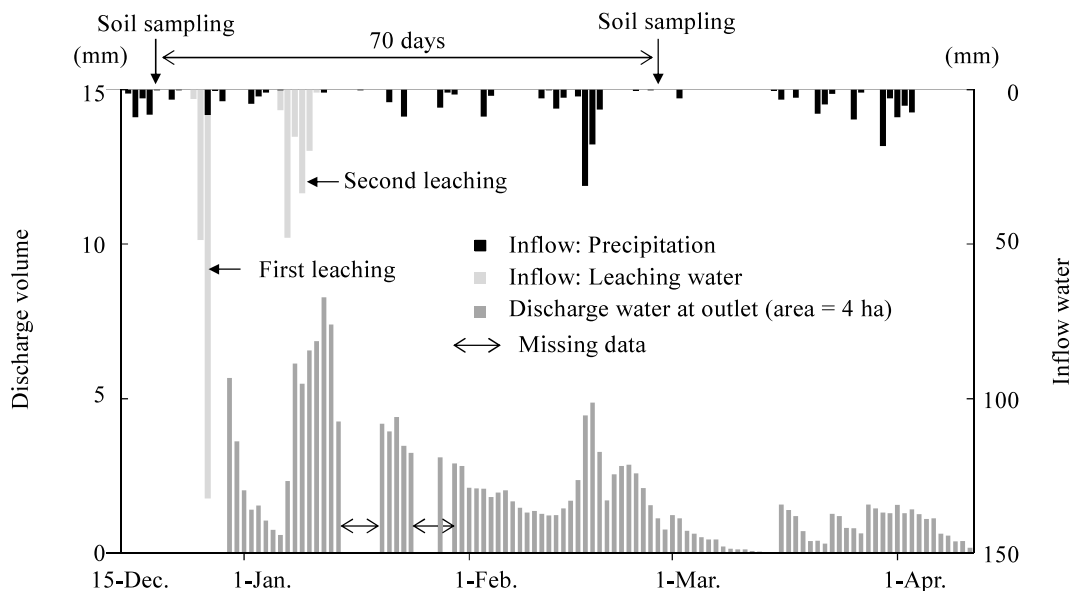


Fig. 7-4 暗渠区の流出・流入量（2016年12月～2017年4月）

Volumes of discharge water and inflow water in subsurface drainage field (Dec. 2016 – Apr. 2017)

(2) 降水量 (Wr)

降水量を Fig. 7-4 (上横軸の黒色棒グラフ) に示す。水収支計算期間 (リーチング前後の土壌採取日の 70 日間) の降水量は 127 mm であった。

(3) 地下水の流入量 (Wg1)

観測初期の地下水位は深さ -2.7~-3.1 m 付近にあった。その後、仮にリーチングが実施されず、上昇速度が No. 4 と同様に 20 mm d^{-1} になったとしても、観測期間の終わりの水位は -1.4~-1.8 m 程度である。このため土層 0~1 m の範囲に流入する地下水はない ($Wg1=0$) と考えられた。

(4) 暗渠排水量 (Wg2)

排水口の流出量を Fig. 7-4 (下横軸の灰色棒グラフ) に示す。1 回目のリーチング開始前、選択流発生リスクを考慮し、選択流の流出予防策として排水口をビニールで覆った。排水口閉塞中に流出の有無を点検したところ、1 回目のリーチング中は流出が見られず、1 回目が完了した 6 時間後、12 月 28 日に流出水が排水口に到達した。1 回目のリーチング中に流出水が観測されなかったことから、リーチング直後には過剰な選択流の発生が抑えられていたものと考えられる。流出確認後、1 日おいて、12 月 30 日に排水口を解放し、流出量の測定を開始した。このため測定初日は、解放時に暗渠管内に貯留されていた水の流出を含んでいる。観測開始から土壌採取日の 2 月 27 日まで地下水位はカットドレーンの施工深さ (60~80 cm) よりも高い状態が多く、流出が継続して見られた。観測期間の流出量は 149 mm であり、リーチング水量と降水量の合計流入量 437 mm の 34% に相当した。

なお、農家に観測作業を依頼していた期間中において、測定データに不十分な点があったため一部を欠測とした。この間も流出はあったものの、流出量算定には含めなかった。

(5) 試験区地下水の排水路への浸透流出量 (Wg3)

第 4 章の浸透流出率と同様な算定手法により 12 月~2 月における圃場からの流出率を 12% と算定した。これを用いて試験区のリーチング時の浸透流出量を 52 mm と推定した。

(6) 蒸発散量 (Wet)

ウズベキスタンの既往研究 (2005 年～2007 年) において, シルダリア川流域の試験圃場の 10 日毎の基準蒸発散量 (ET_0) が示されている. ET_0 は 12 月および 1 月に $0.4\sim 0.8\text{ mm d}^{-1}$, 2 月に $1.0\sim 1.5\text{ mm d}^{-1}$ が見込まれる¹⁰⁴⁾. 雨季におけるリーチング期間であることから作物係数 $Kc=1.0$ と仮定し, ET_0 に Kc を乗じて水収支 70 日間の蒸発散量を 56 mm と推定した¹⁰⁵⁾.

(7) 試験区の土層 0～1 m の土壌水分 (Ws_1 , Ws_2)

土壌採取は, リーチング前 2016 年 12 月 19 日～20 日, リーチング後 2017 年 2 月 27 日～28 日に行った. 対照区, カットドレイン区, 吸水渠付近におけるリーチング前後の含水比と乾燥密度から算定した平均体積含水率を Fig. 7-5 に示す. リーチング前, 3 カ所の 0～100 cm の平均値はそれぞれ 0.261, 0.258, 0.273 であり, 有意差 ($p<0.05$) はなかった. リーチング最終日から 47 日後, 体積含水率はそれぞれ 0.384, 0.381, 0.360 に増加した. よって, 増加した水分量はそれぞれ 123 mm, 123 mm, 87 mm (暗渠区の加重平均値は 120 mm) であり, 対照区, 暗渠区ともに流入量の約 1/3～1/4 が土層 0～1 m に保持されていた. 吸水渠付近の表層 (0～20 cm) がほかより乾燥しており, 有意差 ($p<0.01$) が見られた. 吸水渠付近では平均地下水位も低く, 表層が乾燥しやすくなっていると考えられる. また, 3 カ所ともに下層は飽和近くまで増加しており, リーチングおよび降水により土層全体に浸透水が浸潤していることが示唆された.

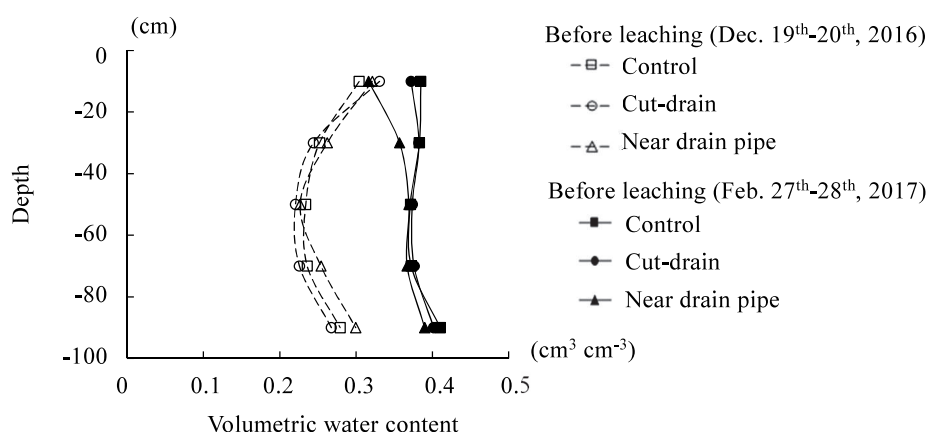


Fig. 7-5 リーチング前後の土壌水分の変化
Changes in soil moisture before and after leaching

(8) 残留水分量 (Ws2+Wg4)

上記で求めた各項目の値を式③に代入した結果を Table 7-1 に示す。土層 0~1 m の水分量 (Ws2) および圃場内の流出残量 (土層 1 m 以深または周辺圃場へ移動した水分: Wg4) の暗渠区の合計値は対照区の 74%に減少していた。この減少量はほとんどが暗渠排水口からの流出分 (暗渠排水量) である。暗渠排水量の内訳は、リーチング前後の差 (Δ) の減少分 3 mm, および Wg4 の減少分 146 mm であり, Wg4 が多くを占めていた。暗渠区の Wg4 は、対照区の約 1/3~1/4 まで減少しており, 1 m 以深および周辺圃場の地下水に涵養される水分量を大幅に減少させていることが示された。

Table 7-1 リーチング前後の水収支
Water balance before and after leaching

試験区	面積	流入量 Wi+Wr	暗渠 排水量 Wg2	圃場浸透 流出量 Wg3	蒸発量 Wet	土壌水分量			流出 残量 Wg4	圃場内 残留分 Ws2+Wg4
						前 Ws1	後 Ws2	差 Δ		
対照区	4.0 ha	437	0	52	56	261	384	123	206	590
暗渠区	3.5 ha	437	149	52	56	259	379	120	60	439

注) 観測期間: 2016年12月20日~2017年2月27日 (70日間)

7.3.3 リーチング前後の塩分収支

(1) 流入・流出の塩分量 (Si, Sr, Sg2, Sg3)

リーチング水 (i), 降水 (r), 暗渠排水 (g2) の塩分濃度 ECw の観測結果は、それぞれ平均値 1.2 dS m⁻¹, 0.3 dS m⁻¹, 10.2 dS m⁻¹であった。暗渠排水の塩分濃度が高く、リーチングの浸透水が土壌中の塩分を溶脱していることが分かる。ECw (dS m⁻¹) と TDS (g L⁻¹) の分析結果から、次の関係式を得た (Fig. 7-6)。

$$\text{暗渠排水: TDS} = 1.13 \text{ ECw}$$

$$\text{リーチング水: TDS} = 0.84 \text{ ECw}$$

上式を用いて、観測期間 70 日間のリーチング水, 降水, 暗渠排水に含まれる塩分量 (Si, Sr, Sg2) は、それぞれ約 3.0 t ha⁻¹, 0.3 t ha⁻¹ (リーチング水の関係式を採用), 17.2 t ha⁻¹ と算定された。地下水の流入塩分量 (Sg1) は地下水の流入量 (Wg1) からゼロとした。試験区地下水の排水路への浸出水の塩分量 (Sg3) については、暗渠排水と同等の塩分濃度が流出するもの仮定し、6.2 t ha⁻¹ と推定した。

(2) 試験区の土層 0~1 m の土壌の塩分量 (Ss1, Ss2)

採取した土壌の EC_e ($dS\ m^{-1}$) と TDS_{soil} (%) の分析結果から、得られた関係式 (Fig. 7-7) を用いて、土層 0~1 m の塩分量を算出すると、対照区はリーチング前 $93.4\ t\ ha^{-1}$ から $69.7\ t\ ha^{-1}$ に、カットドレーン区は $86.3\ t\ ha^{-1}$ から $62.4\ t\ ha^{-1}$ 、吸水渠付近は $77.4\ t\ ha^{-1}$ から $42.8\ t\ ha^{-1}$ に減少した。よって、塩分の減少量は、それぞれ $23.7\ t\ ha^{-1}$ 、 $23.9\ t\ ha^{-1}$ 、 $34.6\ t\ ha^{-1}$ (暗渠区の加重平均値では $25.0\ t\ ha^{-1}$) と算定された。リーチング前後の減少量は、暗渠区が対照区より $1.3\ t\ ha^{-1}$ 多くなっていると見込まれた。

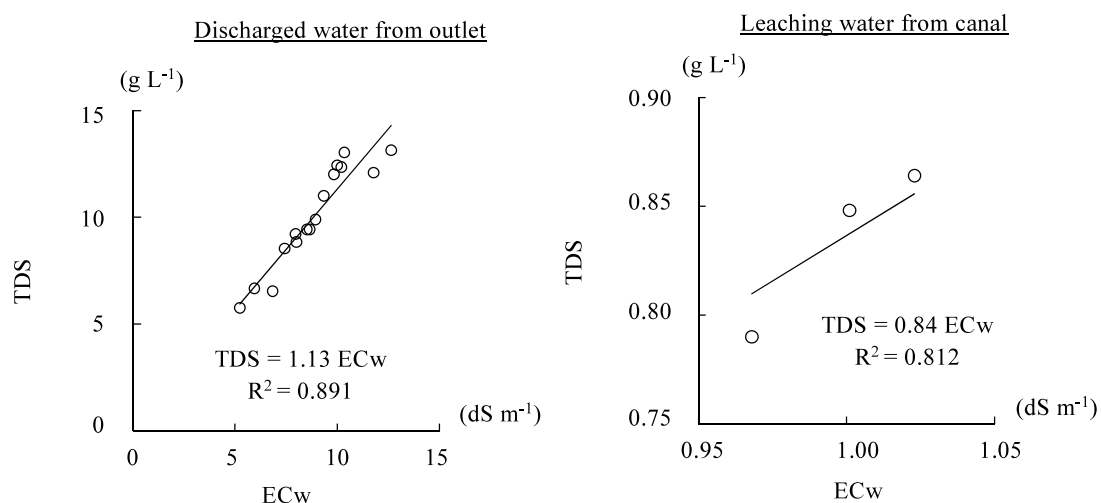


Fig. 7-6 排水・灌漑水の EC_w と TDS の相関

Correlation between EC_w and TDS in drainage and irrigation water

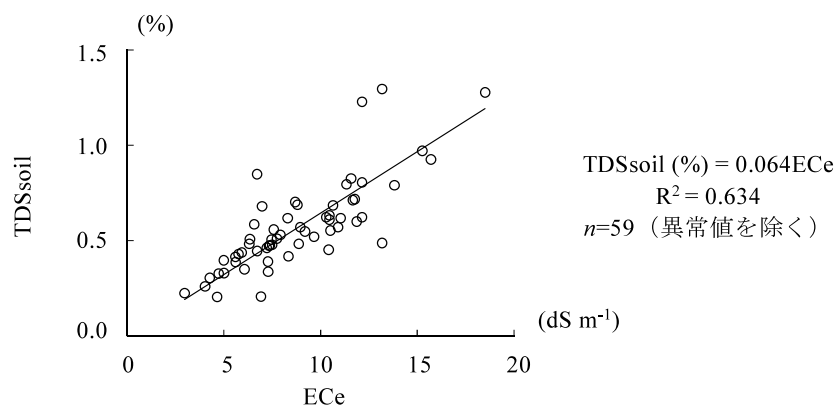


Fig. 7-7 土壌 EC_e と TDS_{soil} の相関

Correlation between soil EC_e and TDS_{soil}

(3) 残留塩分量 ($Ss_2 + Sg_4$)

上記で求めた各項目の値を式⑤に代入した結果を Table 7-2 に示す。溶脱された後の土層 0~1 m の塩分量 (Ss_2) と圃場内の流出残塩分量 (Sg_4) の暗渠区の合計値は、対照区の 72%

となった。リーチング前の土壌塩分量の差を除けば、この減少量は暗渠排水口からの流出分である。その内訳はリーチング前後の差 (S△) の減少分 1.3 t ha⁻¹、および Sg4 の減少分 15.9 t ha⁻¹ であり、Sg4 が多くを占めていた。暗渠区の Sg4 は、対照区の約 1/4 まで減少しており、1 m 以深および周辺圃場に残留する塩分量を大幅に減少させていることが示された。

Table 7-2 リーチング前後の塩分収支
Salt balance before and after leaching

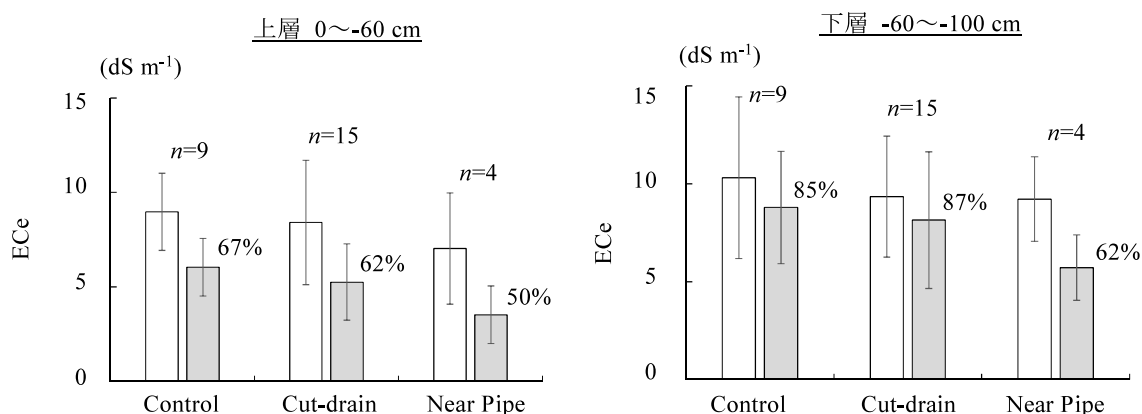
試験区	面積	流入量	暗渠排水 塩分量	圃場浸透 塩分量	土壌塩分量			流出 残量	圃場内 残留分
					前	後	差		
		Si+Sr	Sg2	Sg3	Ss1	Ss2	S△	Sg4	Ss2+Sg4
対照区	3.5 ha	3.3	0	6.2	93.4	69.7	-23.7	20.8	90.5
暗渠区	4.0 ha	3.3	17.2	6.2	85.4	60.4	-25.0	4.9	65.3

単位：t ha⁻¹

注) 観測期間：2016年12月20日～2017年2月27日(70日間)

7.3.4 土壌塩分濃度への影響

リーチング前後の土壌の平均 ECe 値について、カットドレーンの施工深さ 60～80 cm 付近の上下で分けた結果を Fig. 7-8 に示す。棒グラフ上の数字 (%) は、リーチング前に対するリーチング後の相対比率である。相対比率は、上層ではカットドレーン区、吸水渠付近が対照区よりも減少し、下層では対照区がカットドレーン区より減少する傾向が見られた。全層 (0～100 cm) では、対照区、カットドレーン区、吸水渠付近でそれぞれ 75%、73%、56%となるが、3者のデータにバラツキが大きく、有意差 (p<0.05) は見られなかった。



注) 誤差バーは標準偏差
グラフ上の数字は相対比率

□ Before leaching Dec. 19th-20th, 2016
■ After leaching Feb. 27th-28th, 2017

Fig. 7-8 リーチング前後の土壌塩分濃度の変化
Change in soil salinity before and after leaching

7.3.5 綿花収量

2017年9月13日に試験区で実施した綿花の収量調査結果を Fig. 7-9 に示す。対照区、カットドレーン区、吸水渠付近でそれぞれ 3.3 t ha^{-1} 、 3.9 t ha^{-1} 、 4.0 t ha^{-1} であり、対照区よりカットドレーン区 18%、吸水渠付近 21%の収量増加が見られた。収量増には有意差 ($p < 0.01$) があり、カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の塩害改善効果が示された¹⁰⁶⁾。

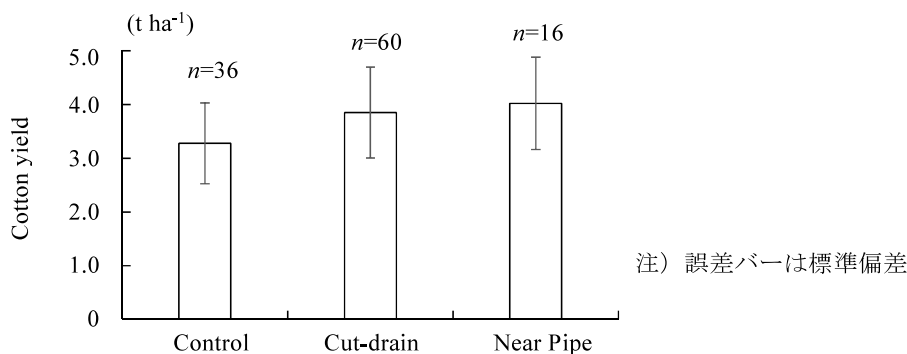


Fig. 7-9 綿花収量調査結果 (2017年)
Result of cotton yield survey (2017)

7.4 まとめ

乾燥地の塩類集積が見られる灌漑農地において、カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の効果を農家圃場で検証した。カットドレーンはリーチングや過剰な灌漑により選択流が発生し、多量の水が流入することで空洞部を崩落させる。このため本研究では試験圃場のカットドレーンに選択流の発生抑制対策を施した。リーチング時期を挟んだ70日間の水・塩分収支計算の結果、リーチング水および降水による圃場への流入量の約1/3~1/4が土壌水分の増加量として保持され、さらに暗渠排水口から約1/3が排水路へ流出していた。流出水は塩分濃度が高く、土壌内に集積した塩分を溶脱していた。圃場への流入塩分量 3 t ha^{-1} に対し、流出塩分量 17 t ha^{-1} となり、除去された塩分量は 14 t ha^{-1} に達した。圃場内の残留している水・塩分量は、対照区と比較して70%程度減少するものと見込まれた。暗渠排水口からの流出により、土層1 m以深または周辺圃場に移動する暗渠区の水・塩分量は対照区の約1/3~1/4になるものと推定され、地下水の涵養量、塩分量を大幅に減少させていることが示された。カットドレーンを活用した浅層暗渠排水は、除塩効果の改善技術として、排水機能が低下している圃場においても、塩分を含んだリーチング浸透水を確実に排水できることが明らかになった。また、綿花収量は対照区より約20%増加しており、農業生産性の面でも効果が見られた。

カットドレーンは、本研究の試験導入を通じてウズベキスタンの研究者、農家、技術者、農業指導者、農業機械メーカー・販売業者などから大きな期待が寄せられている⁹⁹⁾。低コスト浅層暗渠排水技術は、圃場地下水の排水機能が低下している灌漑農地において、塩害に苦しむ地域・農家の生産性改善対策の一つとして提案できるものとする。

第 8 章 総合考察

本論文では、乾燥地の灌漑農地における塩類集積対策の現状と課題を論じ、新たな除塩対策の一つとして、日本で開発されたカットドレーンを活用した低コスト浅層暗渠排水技術の可能性を論じた。乾燥地でカットドレーンを試行するのは初めての試みである。研究対象地域は、塩類集積が深刻な中央アジアのウズベキスタン国シルダリア州である。農家圃場のカットドレーンを導入し、施工上・適用上の課題を明らかにし、その対策と除塩の効果を検証した。低コスト浅層暗渠排水は、除塩効果を改善する新たな排水改良技術として提案できるものと考えられる。

本章では、前章までの内容を総括するとともに、提案技術の普及に向けた留意点、費用対効果、今後の研究課題を論述する。各節の内容は以下のとおり。

8.1 節「ウズベキスタンにおける塩類集積リスク管理」では、第 2 章、第 3 章の内容を踏まえ、ウズベキスタンの大規模灌漑開発に伴い発生してきた農地の塩類集積について、シルダリア州内の現状を概説する。また、現地行政機関が記録している水・土壌・作物データの関連性について、三次水路レベルの領域を管理する WCA を対象に論述する。

8.2 節「圃場レベルから見た排水対策の現状とその効果」では、第 4 章の内容を踏まえ、圃場レベルにおいて排水施設、水・土壌の関連性を示し、現状の排水施設の効果論述する。

8.3 節「乾燥地におけるカットドレーンの適用性」では、第 5 章、第 6 章の内容を踏まえ、塩類集積に対する新たな排水改良技術としてカットドレーンを活用した低コスト浅層暗渠排水技術を提案し、カットドレーンの施工時および施工後に発生する問題点とその対策について論述する。

8.4 節「カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の効果」では、第 7 章の内容を踏まえ、提案技術を導入した試験圃場における、地下水位の変化、リーチング時の水・塩分収支、収量への影響について論述する。

8.5 節「浅層暗渠排水の導入上の留意点」では、提案技術の導入に当たり留意すべき事項、費用および経済効果について論述する。

8.6 節「技術マニュアルと排水対策に関する農家の認識」では、作成した浅層暗渠排水の技術マニュアル内容を概説し、マニュアル普及セミナー時のアンケート結果に基づき、排水対策に関する現地農家の意見を示す。

8.7 節「浅層暗渠技術の今後の研究課題」では、提案技術の効果および評価精度を向上させるための今後の課題について論述する。

8.1 ウズベキスタンにおける塩類集積リスク管理

中央アジアの乾燥地にあるウズベキスタンでは、厳しい気候条件の下、農業生産には灌漑が不可欠である。そのためアムダリア・シルダリア両河川を主な水源として大規模な灌漑開発が行われ、旧ソ連時代には綿花の生産拠点となった。乾燥地の灌漑農業において、塩類集積リスクは一つの宿命である。本地域でも灌漑開発当初から塩類集積対策が取り組まれ、水管理体制・排水施設の整備、リーチングなどの対策が行われていた。しかし、対策は徹底されず、過剰な水が供給され、排水施設の不備と相まって、地下水位が上昇し、土壌表層に塩類集積が生じ、農業生産に被害をもたらす塩害が生じてきた。さらに、農業生産の構造形態の変化とソ連からの独立以降の予算不足も加わり、灌漑排水施設の維持管理体制が悪化し、塩類集積が拡大、深刻化してきた。現在、ウズベキスタンでは塩類土壌が灌漑農地の約半数に上り、年間 10 億ドルの損害をもたらされているとも言われている。研究対象地域であるシルダリア州においても、ほぼ全域に塩類集積が見られ、農業生産を脅かしている。

この状況を解決するために農地改善を担当する HGME などの現地行政機関は、塩類集積リスク管理として、地下水や土壌を定期的に観測し、地下水の制御を目的とした排水路、深層暗渠排水、垂直排水などを整備してきている。また、WCA、農家に対しても農地管理指導を行ってきている。しかし、不適切な水管理や機能が低下した排水施設により、塩類集積対策の効果が得られていない圃場も依然として多く見られる。

本研究では、シルダリア州ミルザバット地区において、HGME などが記録集計した三次水路レベルの WCA を対象とした観測値を入手し、データ相互間の関連性を分析した。入手データは、水配分実績、綿花・小麦の栽培面積と生産量、土壌塩分濃度・地下水位・地下水塩分濃度、垂直排水の電力消費量である。

分析の結果、観測結果が塩類集積対策の計画に反映されず、対策の効果が現れていないことがうかがわれた。リーチング時期において、土壌塩分濃度が高いにも関わらず配分量が少ない WCA、配分量が多くても塩分濃度が低下していない WCA が見られた。土壌塩分濃度に関する重回帰分析の結果、水配分実績とは負の重相関、地下水の塩分濃度とは正の重相関が見られた。すなわち、水配分の多い WCA や地下水の塩分濃度が低い WCA で

は土壌塩分濃度が小さくなる傾向であった。一方、土壌塩分濃度と地下水位の関連性は明確に現れなかった。

垂直排水施設は、地下水位の高い WCA で多く運転されており、観測結果が施設運用に反映されていることがうかがわれたが、垂直排水のない WCA と比較しても、地下水位の下降速度に差が見られず、垂直排水の運転による地下水制御効果が明確に現れていなかった。効果が得られないにも関わらず、慣行的に運用されている可能性もうかがわれる。

HGME の毎年の観測結果とその解釈は、農地改善事業計画の立案、他機関の活動計画や農家指導のベースになるものであり、塩類集積リスクを管理する上で重要な役割を担っている。また、綿花栽培中心から作物の多様化へと政策転換が進みつつある中、観測結果に基づき、HGME、BISM、UNES、WCA、農家が緊密に連携し、塩害対策を効率的に実施していくことが不可欠である。明確な関連性、効果が現れなかった分析結果については、圃場レベルに精度を上げた検証が必要である。

8.2 圃場レベルから見た排水対策の現状とその効果

本研究では、シルダリア州ミルザバット地区ヤングバット WCA 内の Y 圃場およびオコルティン地区ボブール WCA 内の B 圃場の 2 圃場において、地下水、土壌、流出量を詳細に調査・観測し、圃場レベルで排水対策の影響を検証した。

Y 圃場は地下水位が高く、その変動幅も小さい。地下水は高い塩分濃度を示していた。ヤングバット WCA は州内の低位部に位置し、地下水が上層に滞留し、下層からの塩分が上方に拡散移動している可能性が考えられる。また、リーチング時期に地下水位が高くなるにも関わらず、排水路内の塩分濃度の上昇は少なかった。圃場内の地下水の浸透流出が少なく、低塩分濃度の水が排水路に流入していることが示唆された。さらに、地下水位が低い時期であっても排水路の流量は多く、年間を通じて、配分された水が直接排水路に流入している可能性が高いと考えられた。

一方、B 圃場は Y 圃場と比較して深い排水路に接し、暗渠排水も建設されている。排水路の塩分濃度の変動には幅があり、リーチング時期の塩分濃度は圃場内の地下水と同程度になるまで上昇していた。圃場内の地下水が浸透水または暗渠排水による流出水として排水路に流出していること、直接排水路へ流れ込む低塩分濃度の水量が少ないことが示唆された。

WCA への水配分実績（聞き取りデータ）を参考に水と塩分収支を分析した結果、Y 圃場

の流入塩分量は流出塩分量より多かった。圃場周辺に塩分が留まり、塩類集積リスクが高まっていることが懸念された。Y 圃場では節水と除塩対策の効果改善が課題と言える。一方、B 圃場では流出塩分量が多く、排水路と暗渠排水により除塩効果が現れていることがうかがわれた。

両圃場の地下水位と土壌 E_{Ce} の関係を見ると、Y 圃場では相関が見られなかった。地下水位の変動幅は小さいが、土壌 E_{Ce} には変動幅が見られた。塩類集積レベルは「重度」に区分された。土壌 E_{Ce} の変動要因は、高い地下水位状態により塩類が集積し、さらにほかの要因（圃場の微地形など）が重なっているものと考えられた。また、HGME の土壌観測結果によれば、Y 圃場付近は「中度」の区分を示していた。広範囲を精度よく把握することは難しいが、少なくとも HGME では、Y 圃場のような深刻な塩類集積レベルを十分な精度で示していないことが分かった。

B 圃場では暗渠排水の機能が低下していたものの、排水路と暗渠排水による効果が発現した箇所では、効果が発現していない箇所より地下水位が 1.2 m 低く抑えられ、表層から 1 m までの土壌塩分量も半分以下に減少していた。WCA を対象とした分析結果とは異なり、地下水位と土壌 E_{Ce} の間には強い正の相関が見られた。ただし、B 圃場でも塩類集積レベルは「中度」であり、排水路の浚渫や暗渠排水の機能回復、除塩効果の改善が求められる。

垂直排水については、地下水位を制御する技術として現地関係者らにより従来から評価されており、現在もその期待は大きい。しかし、稼働率が大きく減少してきている中、地下水位の制御効果として、深層部の地下水ポテンシャルと表層地下水面の変化の実態を研究した事例はほとんど見られない。観測の結果、年間を通じてみると、垂直排水は、運転時に深層地下水位を低下させているものの、下降量は少なく、むしろ季節的な水位変動が大きく影響していることが示唆された。表層地下水位は、周期的な上昇下降と灌漑などの影響による一時的な上昇が見られるが、ポンプ運転がもたらす深層地下水位の低下との関連性は見られなかった。運用面では、地下水位が高い時期の運転停止状態、地下水位が低い時期の運転状態が見られ、必ずしも地下水位に応じた運用になっていないことがうかがわれた。運転・維持管理経費は高額であり、予算的な制約からポンプの稼働率は減少している。垂直排水の効果を発現するには、表層地下水位の制御効果が得られる稼働率を明確にし、地下水位の観測結果から塩類集積リスクの高い時期と場所を絞り込み、集中的・効率的に運用していくことが求められる。

以上、圃場レベルの測定結果から、研究対象地域の排水施設の機能と塩類集積の関係を

明らかにすることができた。

8.3 乾燥地におけるカットドレーンの適用性

排水施設が十分に機能せず、除塩効果が少なくなった圃場では、浅層暗渠排水が有効な対策の一つと考えられる。浅層暗渠排水は、地表面付近の地下水位を低下させ、リーチングなどによる塩類濃度の高い浸透水を確実に排除することができる。また、圃場内の埋設深が浅いため、末端排水口が深さ 1.5~2.0 m 程度の排水路にも設置でき、比較的浅くなった排水路でも導入できる。

浅層暗渠排水のデメリットは、吸水渠 1 本当りりの排水面積が狭く、広い農地では吸水渠の全体延長が長くなり、資材費、工事費を增高させることが挙げられる。そこで本研究では、日本で開発された穿孔暗渠機によるカットドレーンを活用し、吸水渠の施工延長を短くする低コスト浅層暗渠排水技術を提案した。これまで乾燥地の浅層暗渠排水にカットドレーンを活用した事例はない。

ウズベキスタンのシルダリア州において、カットドレーンを農家圃場で試行した結果、乾燥状態が強い圃場では、土壌表面に穿孔機が浮き上がり、空洞が成形できなかった。空洞を成形するには一定の水分を保持させなければならないと考えられた。しかし、穿孔機の施工について、土壌水分の面から考察した先行研究はほとんどない。日本では下層土の乾燥によって土壌の塑性が低下することはあまりなく、穿孔機が挿入できなくなるといった問題はほとんど生じない。このため乾燥地において穿孔機が浮き上がらず、一定の深さで牽引・空洞成形が可能となる土壌水分状態を明らかにすることを本研究の目的の一つとした。

研究対象地域として、シルダリア州の 3 つの WCA 内の圃場を選定し、圃場表面が乾燥している時期における施工可能な土壌水分状態を検討した。その結果、カットドレーンの施工可否の境界の含水比（施工可と不可の中間値）は、地表面下 0~40 cm で 9~15%（塑性限界以下数%）、同 40~60 cm で 15~19%（塑性限界付近）、空洞が成形されている層（同 60~80 cm 付近）で 21~23%（塑性限界と液性限界の間）であった。この層別の水分状態が研究対象地域の施工の可否の下限値と推定された。塑性限界と対比した施工限界の土壌水分状態として、一般的な同種の工法にも共通するものと考えられる。

一方、施工可否の上限値は明らかにできなかったが、空洞部の層では液性限界を数%超えていても、空洞が維持されていた。地下水位が高く空洞部の層が液性限界付近であって

も施工可能であることが分かった。特に、粘土分の多い圃場では飽和付近であっても、空洞が成形できるものと考えられた。また、表層部が湿潤時（含水比 24%、液性限界付近）にトラクタの車輪の空転が見られたことから、トラクタの走行性を確保できる土壌水分状態が表層の上限値と言える。

含水比は現地技術者も容易に測定でき、施工前に含水比を確認することで穿孔機を挿入牽引できない圃場状態を判断することができる。施工不可な圃場に穿孔機を搬入してしまうなどの無駄な支出を避けることができる。

次に、カットドレーンの適用上の課題として、リーチング水や灌漑水による空洞部の崩落への対応がある。崩落の要因は、穿孔機の 2 枚の切断刃による亀裂・空隙を通過する過剰な選択流であることが分かった。崩落によりカットドレーンの特徴である高い通水機能が低下する。また、選択流発生によりリーチング水と土壌が接触する機会・時間が短くなり、塩類の溶脱効果が減少する。崩落閉塞部は膨軟な状態であり、みず道にはなりうるが、通水機能を維持するためには選択流の発生を抑制することが求められる。その対策として、カットドレーンの施工前に切断刃が通過するライン上にあらかじめ灌水する手法を試みた。この手法は、施工時に土壌水分状態を増加させ、土粒子で空隙を閉塞させること、変形しやすくなった土壌により亀裂を復元させることを期待するものである。この手法の浸透試験を実施し、選択流発生の有無を確認した結果、無灌水の場合と比較し、選択流の発生頻度が低下した。同手法は選択流の発生を抑制する効果が期待できることが明らかとなった。

8.4 カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の効果

シルダリア州内の農家圃場において、カットドレーンを施工した浅層暗渠排水のリーチング試験を実施した。カットドレーンは選択流の発生抑制対策を施した。試験の結果、観測期間中（70 日間）、暗渠排水口からの流出量は圃場への流入量の 1/3 程度に達していた。この流出水には高い塩分濃度が観測されており、リーチング浸透水が土壌塩分を溶脱していることが示された。流入塩分量は 3 t ha^{-1} 、流出塩分量は 17 t ha^{-1} であり、除去された塩分量は 14 t ha^{-1} になった。観測期間における水・塩分収支計算の結果、排水路に流出せず、土層 1 m 以深または周辺圃場に移動する暗渠区の水量・塩分量は、対照区の 1/3～1/4 程度に減少するものと考えられた。また、綿花生産に対する効果として約 20%の収量増が確認できた。

以上の点から、提案した技術は、排水施設の機能が低下した圃場に対して、塩分を溶脱したリーチング浸透水を確実に排水し、塩類集積リスクの軽減と農業生産の向上を期待できる新たな排水改良技術になるものと考えられる。

8.5 浅層暗渠排水の導入上の留意点

排水整備が困難な圃場では、抜本的な塩類集積の改良は難しい¹⁰⁷⁾。本研究の中で、カットドレーンを活用した浅層暗渠排水は、排水路の深さが1.5~2.0 m程度と比較的浅くても導入でき、塩類を除去できる技術であることが示された。技術導入に当たっては、この排水路が整備され、投資効果が得られる農地であることが前提条件となる。また、新たな塩類集積対策の導入に当たっては、長期的な視野に立ち、塩分コントロール機能がもたらす広域的な環境への影響と農業生産性のバランスを見極め、多様な選択肢の中で経済的に決定していくことが求められる³⁰⁾。浅層暗渠排水では高塩分濃度の浸透水が流出し、下流域の水質を悪化させることになる。試験圃場地域の排水はアルナサイ低地に流れ込むためシルダリア川には還元しないが、高塩分濃度の排水には塩湖などの末端排水処理が必要である。大規模な面積を対象に浅層暗渠排水が導入される場合、計画段階で下流域を含めた塩分収支を分析し、排出口の管理、排水管理池の整備、河川に還元する際の水質基準などについて流域全体で検討していく必要がある^{49), 87)}。

浅層暗渠排水が導入可能であっても、農家にとって投資判断の最優先となるのは施工コストである。試験圃場の施工事例に基づき算出した単位面積当たりの施工経費をTable 8-1に示す。施工経費は、圃場の形状、均平状態、排水路との接続条件などにより増減するが、2015年12月時点、ヘクタール当たり約3百万ウズベクスム(UZS)であった。当時の為替レートは2,825 UZS/ドルであり、約1,100 USDに相当する。その後、物価上昇、為替レート的大幅な変動(2018年12月末8,300 UZS/ドル)が生じており、施工経費は見直す必要がある。参考として、2017年までの物価上昇から推定すると、施工単価は約3.6百万UZS/ha、カットドレーンだけの施工費(5 m間隔)は約60万UZS/haになる。

上記の施工費から内部収益率(IRR)を算定すると12%が見込まれた。算定条件は、次のように仮定した。綿花収量増 0.6 t ha^{-1} 、綿花販売単価3百万UZS/トン、穿孔機の耐用年数7年、この間4回の綿花栽培、カットドレーンは営農作業の一環として栽培毎の施工とした。農地への初期投資、穿孔機への投資額が大きく、資金不足に苦しむ農家には政府の支援や穿孔機の共同利用などを検討する必要があるが、塩害農地の改善事業として経済効果

があると考えられる。シルダリア州では、カットドレーンの耐用年数は2年程度と見込まれるが、選択流の発生抑制対策を実施済みでも、リーチング後には機能の低下が想定される。このため効果を確実にするために次のリーチング時には、圃場準備作業の一環として再施工するのが望ましい。また、再施工では、前回の施工ラインの間に施工するのが良い。前回の残されたカットドレーン機能と合わせて面的な排水性を高めることが期待できる。

Table 8-1 カットドレーンを活用した浅層暗渠排水の施工費

Construction costs of shallow subsurface drainage in combination with cut-drain	
項目	単位：1,000 UZS/ha
土工費（掘削・埋め戻し）	390
材料費 吸水渠（有孔管：径 100 mm, 運搬費を含む）	1,250
集水渠（無孔管：径 100～150 mm, 運搬費を含む）	630
疎水材（モミガラ, 運搬配置を含む）	250
カットドレーン施工費（トラクタ運転経費, 燃料など）* ¹⁾	200
カットドレーン穿孔機損料* ²⁾	80
その他（人力施工, 作業補助員）	170
合計	2,970 * ³⁾

*¹⁾ 現場実績をベースに算出（2015年11月～12月施工）

*²⁾ 耐用年数7年, 年間利用面積50haと仮定した減価償却費

*³⁾ 2015年12月18日時点の換金レート2,825UZS/USD（現地銀行調べ）

8.6 排水対策に関する農家の認識

本研究で提案した技術については、JIRCASにより浅層暗渠技術マニュアルとして取りまとめられている⁵⁶⁾。このマニュアルは、A4版72ページで「塩類集積の要因と主な対策」、「実証試験地域の塩類化の要因」および「浅層暗渠排水技術」で構成され、農家を含むユーザーが理解しやすい写真やイラストが多く用いられている。マニュアルは普及版としてA5版10ページにも要約され、フェルメル評議会に手交され、ウズベキスタン国内の農家に配布されている。

2017年11月、シルダリア州内の農家を対象にマニュアル普及セミナーを開催した。セミナー後、現状の排水対策と浅層暗渠排水技術に関する聞き取り調査（対象28名）を行った。調査結果は以下のとおり。

農家が認識している塩類集積レベルは「中度」が多く、農家の37%を占めていた。綿花の生産計画量を達成した農家は29%、未達成となった大きな理由には塩類集積が挙げられた。必要と考える農地の改善対策として、暗渠排水(26%)、垂直排水(26%)、排水路(22%)、リーチング(16%)が上げられ、暗渠排水と垂直排水への期待が高い。

排水施設に対する認識を個別に見ると、39%の農家が排水路の機能低下を問題としていた。具体的な問題点として、「堆砂、流下能力不足、単位面積当たりの延長不足」が挙げられた。

暗渠排水については、36%の農家が機能していると回答した。暗渠排水に対する具体的な問題点として、受益面積が小さいこと、流出が見られないこと、排水口の埋没などが挙げられた。

垂直排水については、効果あり（32%）、効果なし（36%）と評価が分かれた。運転の目的は、地下水位の低下（46%）、地下水位の低下と灌漑（18%）であった。垂直排水による地下水位の低下効果の認識は、50 cm 未満（11%）、50～100 cm（18%）、100～150 cm（14%）、150 cm 以深（11%）が示され、本研究で明らかとなった効果の実態との乖離が見られた。また、61%の農家が新規建設を必要と考え、垂直排水にも期待の高さがうかがえた。

以上のアンケート結果から、排水路と暗渠排水については、本研究の中で示してきた現状と同様な地区が多いことがうかがわれる。垂直排水は運転の効果が不明である点を周知する必要があると思われる。

カットドレーンを活用した浅層暗渠排水に対しては、半数の農家が導入すべきと考えていた。一方、導入しない理由には資金不足が多く、次いで、技術に対する理解度・信頼度不足が挙げられた。施工費および経済性については、前説で述べたとおりであるが、農家の資金不足に対して国や関係機関による支援が必要である。開発された新たな技術は、利用者への速やかな情報提供や現場での実演などにより社会実装が促進される¹⁰⁸⁾。本研究で提案した技術についても、HGME やフェルメル評議会、専門家機関が農家と連携し、研修、技術展示圃場などの展開により、技術の理解度・信頼度を高めていくことが求められる。

8.7 浅層暗渠排水の今後の研究課題

今後の浅層暗渠排水技術については、以下の課題が考えられる。

第1に、塩類の再集積状況の把握が挙げられる。深層暗渠排水と比較した場合、浅層暗渠排水は、地下水位の制御範囲が表層に限られる。カットドレーンの施工深さは、地表面下0.6～0.8 mと浅く、吸水渠でも1.0 m程度である。RIIWPによれば、地表面下2 m程度が推奨地下水位とされている。浅層暗渠排水の導入圃場における塩類の除去と再集積について、経年変化を把握しておくことが求められる。

第2に、精度を高めた浸透流出量の検証が挙げられる。本研究では圃場内地下水の排水

路への浸透流出量を推定により求めている。この増減によって残留する水量・塩分量が変動する。現場の浸透流出量の把握は難しいが、流出・流入条件を制御できる条件下での検証が求められる。

第3に、暗渠排水流出量の最大化の手法確立が挙げられる。本研究の圃場試験では、リーチングを2回に分けて実施し、2回目のリーチング時に流出が多く見られた。既往研究のケーススタディでは、断続したリーチングは連続したものより効果があるとされている¹⁰⁹⁾。このような除塩効果を高めるリーチング手法として、回数だけでなくリーチングプロットの湛水順序なども検討する必要がある。また、本研究では、観測期間中、高地下水状態が長く維持され、排水口からの流出期間も長く、3月の降水時も流出が観測された。地下水位が下がれば、湛水による浸潤が過ぎ、正圧がなくなった段階で浅層暗渠排水への流出はなくなる。暗渠排水量の最大化に繋げるための栽培ブロック単位でのリーチング手法などの検討も課題と考えられる。

第4に、選択流の発生抑制手法の改良が挙げられる。本研究では、カットドレーンの施工から浸透試験までの期間が1週間程度であった。選択流発生抑制手法の施工後、長い乾燥期間を経た場合、乾燥による亀裂などにより選択流発生頻度の低減効果に影響が出る可能性がある。トラクタの走行性に留意が必要であるが、雨季の開始時の施工など効果的な施工時期の検討が求められる⁶⁴⁾。

以上、本研究では、乾燥地の灌漑農業における排水対策の課題とカットドレーンを活用した低コスト浅層暗渠排水による除塩対策の可能性を明らかにした。本研究で提案した技術が普及するには環境への影響を把握しつつ、農家への支援の展開が不可欠である。提案技術には残された課題もあるが、排水機能が低下した圃場において、確実に除塩効果が期待できる技術である。カットドレーンは農家自身で施工可能な技術であり、本技術が塩害に苦しむ地域・農家に活用されていくことを期待する。

第9章 摘要

9.1 日本語摘要

本研究は、乾燥地の灌漑農地の塩類集積対策として、日本で開発された「カットドレーン」を活用した浅層暗渠排水技術の適用性と効果を明らかにしたものである。カットドレーンは、トラクタで牽引する穿孔暗渠機を用いて、地表面下に迅速に連続した空洞を無資材で成形するものである。カットドレーンの乾燥地での使用は初めてであり、塩類集積対策としての研究事例はない。

中央アジアの乾燥地では灌漑開発に伴い農業の生産性が増加してきた。しかし、不適切な水管理が続けられた農地では、地下水位が上昇し、二次的塩類集積が生じている。本研究では、中央アジアのウズベキスタンにおいて、排水施設と塩類集積の現状を明らかにし、地下水流出が制限された圃場におけるリーチングの除塩効果改善対策として、カットドレーンを活用した低コスト浅層暗渠排水技術を提案した。カットドレーンについては乾燥土壌条件下における適用上の技術的課題と対策を示し、試験圃場において水・塩分収支分析、綿花収量調査により提案技術の効果を明らかにした。以下に本研究の概要を示す。

● ウズベキスタンの排水施設および塩類集積の現状

ウズベキスタンでは、塩類集積対策として、地下水位の上昇抑制を図ることを目的とした深い排水路、暗渠排水、垂直排水が整備され、塩類を除去するため圃場ではリーチングが実施されているが、灌漑農地の半数程度に塩類集積が見られる。同国シルダリア州の現地踏査および地下水・土壌データから、排水路には土砂の堆積が見られること、暗渠排水の排水口は水面下もしくは土砂に埋没した状態が見られること、垂直排水の稼働率が低いこと、地下水が十分制御されていないこと、土壌塩分濃度が高いままの圃場があることが確認された。排水施設やリーチングの効果が十分に得られていない可能性が示唆された。

地下水制御のためウズベキスタン政府は灌漑農地の改善事業を進めているが、十分な対応には至らず、対策事業を待つ圃場は依然として多く見られる。ウズベキスタンが安定した農業生産と作物多様化を推進していくには、これまでの事業に加え、事業実施が遅れた圃場や地下水流出が困難な圃場においても迅速・確実に除塩できる排水改良技術が必要と考えられた。

● 低コスト浅層暗渠排水の課題と対策

除塩に有効な排水改良技術の一つとして、浅層暗渠排水があるが、一般的には吸水渠の

敷設密度が高く、途上国ではコスト面や資材供給面で制約がある。このため筆者は、吸水渠に近い機能を有するカットドレーンに着目し、これを暗渠網に組み入れることにより吸水渠の敷設密度を大幅に減らした低コスト浅層暗渠排水を提案した。

シルダリア州内の農家圃場において、カットドレーンを試行した結果、二つの問題点が明らかになった。一つは強い乾燥状態の土壌条件下において運転中に穿孔機が土壌表面に浮き上がることで、もう一つは施工後の灌漑・リーチングにより過剰な選択流が発生することである。このためカットドレーンの施工に適した土壌水分状態、過剰な選択流の発生抑制手法に関する試験を行った。その結果、試験地域における施工に適した土壌水分状態の下限境界値として、地表面下0～40 cmで9～15%、40～60 cmで15～19%（塑性限界付近）、60～80 cmで21～23%が得られた。また、カットドレーンを施工する前に施工ラインの畝間に灌水することで過剰な選択流の発生が軽減されることを示した。

- 低コスト浅層暗渠排水技術の効果

地下水流出が限定的な試験圃場に低コスト浅層暗渠排水を導入し、リーチング前後の水・塩分の流入・流出観測、綿花収量調査を行った。その結果、観測期間内（70日間）において、圃場への流入量（降水を含む）の約1/3が暗渠排水口から流出していた。塩分量は流入 3 t ha^{-1} に対して、流出 17 t ha^{-1} であった。地表面下1 mまでの塩分濃度は減少傾向が見られたものの、バラツキが多く、対照区と有意差は見られなかった。一方、水・塩分収支の結果から、排水路へ流出せず、1 mより深い層や周辺圃場に移動したまま残留していると考えられる水・塩分量は、暗渠区が対照区と比較して約1/3～1/4まで減少していた。また、綿花収量は対照区より20%程度の増加を示した ($p < 0.01$)。

以上、本研究では、乾燥地の灌漑農地において、塩類集積圃場の排水性を改良する低コスト浅層暗渠排水技術を提案し、カットドレーンの技術的課題と対策、技術の効果を明らかにした。新たな排水改善対策として本技術を採用するに当たり、環境への配慮、費用対効果、普及体制、水・塩分収支の検討・精査などの課題も残されている。しかしながら、本技術は、地下水流出が制限された圃場においても、リーチング浸透水を確実に流出させ、残留塩分量を減少させる有効な対策の一つである。農家自らが実践可能な技術であり、本研究が塩類集積に悩む地域、農家の一助になることを期待する。

9.2 英語摘要

This study revealed the applicability and effect of shallow subsurface drainage technology in combination with “cut-drain,” which was developed in Japan as a measure against salinization caused in irrigated land of drylands. Cut-drain has a feature that quickly forms continuous cavity on the subsurface without the use of any additional material aside from a drain drilling machine towed by a tractor. This is the first practice of cut-drain in drylands; there have not yet been any case studies on a salinization measure with cut-drain.

Agricultural productivity in the drylands, particularly in Central Asia, has increased with the development of irrigation. However, in some regions, continual agricultural land use without adequate water management has led to an increase in groundwater levels and resulted in secondary salinization. This study in Uzbekistan, Central Asia, showed the current status of drainage systems and salinization. I then proposed a low-cost shallow subsurface drainage technology with cut-drain to improve salt removal effect by leaching in fields under the conditions of limited groundwater discharge. I showed the technical problems and measures for cut-drain’s applicability to dry soil condition and revealed the effect of the proposed technology via water and salt balance analysis and cotton yield survey. The results of this study are as follows:

- Current status of drainage systems and salinization in Uzbekistan

As countermeasures for salinization in Uzbekistan, deep open drainage, subsurface drainage, and vertical drainage are constructed to control rising groundwater level, and leaching works are practiced to remove accumulated salt from the field. However, salinized land comprises approximately half of irrigated lands. Based on field surveys and data of groundwater and soil in Syrdarya Province in Uzbekistan, I have confirmed that sedimentation occurs in open drainages, some outlets of the subsurface drainage are under drainage water level or covered with soil, the current operation ratio of the vertical drainage is small, some fields are unable to control groundwater, and salinity level remains high. These suggest the possibility that there is no effect on drainage systems, and leaching works sufficiently.

To deal with this groundwater control, the government of Uzbekistan has initiated irrigated land reclamation projects. However, as the number of fields exceeds the number of undertaken projects, many of the fields are still awaiting the operation of land reclamation. In addition to these projects, drainage improvement technologies are required to achieve stable agricultural production and crop

diversification in Uzbekistan. These are designated to permit prompt and guaranteed removal of accumulated salt from fields, even from fields with less depth or where drainage conditions were not improved by the government.

- Problems and measures of a low-cost shallow subsurface drainage

One of the effective drainage improvement technologies for salt removal is shallow subsurface drainage. In general, it has restrictions with respect to cost and material supply in developing countries because it requires high construction density of tile drains. In this regard, I focused on the cut-drains, which function similarly to tile drains, and incorporated it into the shallow subsurface drainage network. It enables the network to be low-cost by reducing the construction density.

Employing cut-drain has presented two problems in farmers' fields. First, the machine rises up to the soil surface under hard dry soil conditions in operation. Further, there occurs excessive preferential flow during irrigation and leaching after the construction. To solve these problems, I examined the soil moisture conditions suitable for the construction of cut-drain and a method for mitigating excessive preferential flow on the farmer's fields. The results revealed that more than 9-15% moisture was required from the surface to 40 cm below it, 15-19% (near Plastic limit) from 40 cm to 60 cm, and 21-23% from 60 to 80 cm, as a lower border of the soil moisture condition suitable for the construction in the study region. With regard to the countermeasure for the occurrence of excessive preferential flow, I verified that irrigating the furrows before the construction enables cut-drain to mitigate the excessive preferential flow.

- Effect of low-cost shallow subsurface drainage technology

I introduced the low-cost shallow subsurface drainage into an experimental field, which has limitations in discharging groundwater to the open drainages. I observed the amount of inflow and outflow for water and salt before and after leaching and conducted a cotton yield survey. The results of a 70-day observation period revealed that the volume of discharged water monitored at the outlet was approximately one-third of the inflow water, including precipitation. The salt mass removed via the outlet to the open drainage was estimated to be 17 t ha^{-1} , which contrasts with the 3 t ha^{-1} of salt contained in the inflow water. The soil salinity data below the surface to 1 m have a large dispersion, showing decreasing trend without significantly comparing with the control. In contrast, based on the water and salt balance, other than discharge to the open drainage, the

remaining water and salt mass transferring into the layer deeper than 1 m or periphery fields of the subsurface drainage field was reduced to be approximately between one-third and one-fourth of the control. Furthermore, the cotton yield showed an approximately 20% increase as compared to the control ($p < 0.01$).

As mentioned above, I proposed a low-cost shallow subsurface drainage technology to improve field drainage condition with salinization in irrigated land of the drylands. In this study, I revealed the technical problems and measures for the applicability of cut-drain, as well as the effect of the technology. With the adoption of the technology as a new drainage improvement measure, environmental issues, cost-benefit analyses, extension systems, and detailed examinations of water and salt balance must be taken into consideration. However, the technology is an efficient measure to reduce remaining salt mass by discharging infiltrated leaching water certainly even in a field with limited groundwater discharge. It is an applicable technique that farmers can do by themselves. I expect that the results of this study will be of aid to the region and farmers struggling with salinization.

Table A1 水配分実績
Actual monthly distribution of irrigation water

2012												(million m ³)
Name of WCA	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Oq-Oltin	2.874	1.154	0.320	1.133	2.132	1.890	2.431	1.966	1.389	1.160	1.020	2.256
Mirzachul	2.577	1.083	1.731	1.750	2.076	2.329	2.276	1.837	1.979	1.561	1.434	1.231
Toshkent	1.896	0.757	1.391	1.332	1.647	2.353	2.284	1.891	2.074	1.917	1.676	1.205
Dehqonobod	2.786	1.255	1.089	1.941	2.223	3.177	4.658	4.063	2.979	2.424	2.557	3.618
Beruniy	0.930	0.078	0.438	0.541	0.523	0.833	1.234	0.753	0.397	0.189	0.181	0.216
Baxor	2.558	0.964	0.216	1.093	1.860	1.943	2.373	1.960	1.210	1.063	0.622	1.419
Guliston	1.850	0.910	1.710	1.060	2.060	2.270	2.230	1.530	1.030	1.890	2.600	2.070
Axmedov	2.398	0.670	0.780	1.272	1.348	1.517	2.708	2.080	1.359	1.020	1.158	1.466
Kulbekov	1.020	0.500	0.940	0.580	1.130	1.250	1.230	0.840	0.570	1.040	1.430	1.140
Mustaqillik	1.233	0.665	0.826	0.879	0.890	1.153	1.131	0.782	0.531	0.431	0.579	0.526
Dustlik												
Ulugbek	1.052	0.239	0.621	0.617	0.863	1.103	1.268	0.794	0.499	0.533	0.691	0.607
Yangiobod	2.627	1.242	1.571	1.913	2.444	2.988	3.071	2.911	2.728	2.075	1.624	1.408
Oxunboboyev	2.470	1.210	2.280	1.410	2.740	3.020	2.970	2.040	1.370	2.520	3.460	2.760
Yunusov	2.320	1.130	2.140	1.320	2.580	2.840	2.800	1.920	1.290	2.370	3.250	2.600
Barlos	0.250	0.120	0.230	0.140	0.280	0.310	0.300	0.210	0.140	0.260	0.350	0.280
Chinobod	0.200	0.100	0.180	0.110	0.220	0.240	0.240	0.160	0.110	0.200	0.280	0.220
Total	29.041	12.078	16.462	17.091	25.017	29.216	33.204	25.736	19.655	20.654	22.913	23.022

2013												(million m ³)
Name of WCA	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Oq-Oltin	3.017	1.718	0.638	0.809	0.654	1.846	1.909	2.255	1.566	0.987	2.614	3.010
Mirzachul	1.550	1.711	1.079	1.210	1.351	2.214	2.059	1.601	1.276	1.101	1.877	1.966
Toshkent	1.832	1.731	0.950	1.382	1.167	2.432	2.075	1.804	1.280	0.885	2.210	2.541
Dehqonobod	3.560	2.891	1.177	2.307	0.948	2.473	3.114	3.003	2.100	1.408	2.523	2.833
Beruniy	0.503	0.620	0.415	0.510	0.233	1.115	1.072	0.670	0.384	0.132	0.726	0.968
Baxor	1.581	1.168	0.747	0.309	0.715	1.583	1.649	1.541	1.228	0.797	1.672	2.150
Guliston	1.410	1.930	1.570	1.420	1.750	2.860	2.820	3.020	2.020	1.930	3.150	1.060
Axmedov	2.138	1.293	0.557	1.663	0.402	1.460	1.792	2.903	1.359	0.923	2.298	2.761
Kulbekov	0.860	1.180	0.960	0.860	1.070	1.740	1.720	1.840	1.230	1.180	1.920	0.650
Mustaqillik	0.912	0.845	0.654	0.950	0.321	1.032	0.864	0.545	0.378	0.097	0.971	1.128
Dustlik												
Ulugbek	0.676	0.856	0.667	0.542	0.630	1.417	1.432	1.235	0.844	0.595	1.064	0.665
Yangiobod	1.921	1.711	0.860	1.253	1.054	2.464	2.406	2.129	1.141	1.030	1.812	2.030
Oxunboboyev	1.750	2.390	1.950	1.760	2.170	3.540	3.490	3.730	2.500	2.390	3.900	1.310
Yunusov	2.650	3.620	2.950	2.660	3.290	5.370	5.290	5.660	3.780	3.620	5.900	1.990
Barlos	0.320	0.440	0.360	0.330	0.400	0.660	0.650	0.690	0.460	0.440	0.720	0.240
Chinobod	0.320	0.440	0.360	0.320	0.400	0.650	0.640	0.690	0.460	0.440	0.720	0.240
Total	24.998	24.544	15.895	18.284	16.556	32.857	32.983	33.315	22.006	17.953	34.078	25.541

2014												(million m ³)
Name of WCA	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Oq-Oltin	3.750	0.850	0.670	1.187	2.312	1.079	2.967	2.074	1.982	1.682	2.499	3.242
Mirzachul	2.330	0.530	0.900	1.810	1.597	2.983	2.253	1.911	1.634	1.220	2.673	2.100
Toshkent	2.420	0.460	0.680	1.604	1.688	1.455	1.489	1.266	0.799	0.694	1.785	1.050
Dehqonobod	0.270	0.310	0.850	3.980	3.230	6.478	6.478	2.700	0.569	0.742	0.731	0.975
Beruniy	1.790	0.070	0.510	0.803	0.673	0.309	0.559	0.526	0.317	0.306	1.281	0.884
Baxor	2.270	0.420	0.410	0.574	1.430	0.940	1.865	1.344	1.340	1.046	1.433	1.948
Guliston	2.995	0.007	1.726	2.498	2.234	1.965	2.682	2.321	1.092	1.113	2.784	2.937
Axmedov	3.520		0.220	1.033	1.778	1.661	2.524	1.963	1.202	1.500	1.710	2.060
Kulbekov	1.649	0.004	0.950	1.375	1.230	1.082	1.477	1.278	0.602	0.613	1.533	1.617
Mustaqillik	1.750	0.110	0.610	0.873	0.770	0.335	0.599	0.487	0.311	0.274	1.334	0.839
Dustlik												
Ulugbek	1.113	0.041	0.323	0.497	0.522	0.331	0.507	0.509	0.346	0.268	0.687	0.618
Yangiobod	2.860	0.610	0.970	1.839	2.047	2.481	2.342	2.226	1.765	1.270	2.608	1.920
Oxunboboyev	3.988	0.009	2.298	3.326	2.975	2.617	3.572	3.091	1.455	1.483	3.707	3.911
Yunusov	3.751	0.009	2.161	3.128	2.797	2.461	3.359	2.907	1.368	1.394	3.486	3.678
Barlos	0.406	0.001	0.234	0.339	0.303	0.266	0.364	0.315	0.148	0.151	0.377	0.398
Chinobod	0.318	0.001	0.183	0.265	0.237	0.208	0.284	0.246	0.116	0.118	0.295	0.311
Total	35.180	3.432	13.695	25.131	25.823	26.651	33.321	25.164	15.046	13.875	28.923	28.488

Table A2 綿花・小麦の栽培面積と生産量
Planting area and production of cotton and wheat

(ha)

Name of WCA	2012		2013		2014	
	Cotton	Wheat	Cotton	Wheat	Cotton	Wheat
Oq-Oltin	840	702	510	757	460	965
Mirzachul	476	382	896	960	718	798
Toshkent	236	224	576	977	467	745
Dehquonobod	717	438	203	363	561	988
Beruniy	351	226	291	518	293	603
Baxor	470	208	104	160	380	199
Guliston	945	663	538	1,169	438	987
Axmedov	731	489	615	937	840	702
Kulbekov	547	546	638	956	875	687
Mustaqillik	415	341	300	745	197	386
Dustlik						
Ulugbek	140	95	210	146	479	590
Yangiobod	618	397	317	392	461	436
Oxunboboyev	1,560	1,094	1,432	1,966	1,260	1,028
Yunusov	1,224	720	1,210	1,584	1,399	891
Barlos	100	84	124		87	80
Chinobod	91	0	139	85	98	60
Total	9,461	6,609	8,103	11,714	9,013	10,144

(ton)

Name of WCA	2012		2013		2014	
	Cotton	Wheat	Cotton	Wheat	Cotton	Wheat
Oq-Oltin	1,457	1,569	918	1,816	980	2,296
Mirzachul	781	731	1,523	2,064	1,335	1,819
Toshkent	372	568	806	1,954	729	1,475
Dehquonobod	1,295	1,032	426	798	1,043	2,113
Beruniy	513	561	551	693	419	1,097
Baxor	825	463	205	402	760	465
Guliston	1,696	1,257	753	2,280	692	1,836
Axmedov	1,428	1,843	1,446	2,614	1,587	1,495
Kulbekov	926	110	1,037	2,199	1,635	1,477
Mustaqillik	644	694	450	1,520	330	760
Dustlik						
Ulugbek	196	171	294	263	755	915
Yangiobod	1,112	762	507	862	849	885
Oxunboboyev	2,418	2,087	2,291	4,187	2,242	2,066
Yunusov	1,797	1,563	2,105	3,184	2,336	1,844
Barlos	152	174	184		127	1,256
Chinobod	139		217	167	133	103
Total	15,751	13,586	13,715	25,003	15,952	21,904

Table A3 土壤鹽分濃度區分別面積
Area with respect to soil salinity

2012 (ha)										
Name of WCA	April					October				
	None	Slightly	Medium	Heavy	Total	None	Slightly	Medium	Heavy	Total
Oq-Oltin	21	1,890	166		2,077		964	1,086	27	2,077
Mirzachul		2,551	244		2,795		1,309	1,486		2,795
Toshkent		1,258	810		2,068		314	1,720	34	2,068
Dehqonobod	51	1,785	562		2,398		1,990	408		2,398
Beruniy		325	1,612	286	2,223		714	902	607	2,223
Baxor		889	106		995		409	586		995
Guliston		2,673	619	8	3,300		1,832	1,398	70	3,300
Axmedov		1,367	622		1,989		1,166	784	39	1,989
Kulbekov		1,618	450		2,068		641	1,424	3	2,068
Mustaqillik		1,015	1,207		2,222		994	1,213	15	2,222
Dustlik		945	968	4	1,917		575	1,149	193	1,917
Ulugbek		197	1,471	31	1,699		118	1,210	371	1,699
Yangiobod		944	700		1,644		688	956		1,644
Oxunboboyev		3,642	1,268	64	4,974		414	4,130	430	4,974
Yunusov		1,008	4,905	342	6,255		645	3,890	1,720	6,255
Barlos		59	795	118	972			681	291	972
Chinobod		97	1,312	32	1,441		2	1,255	184	1,441
Total	72	22,263	17,817	885	41,037		12,775	24,278	3,984	41,037

2013 (ha)										
Name of WCA	April					October				
	None	Slightly	Medium	Heavy	Total	None	Slightly	Medium	Heavy	Total
Oq-Oltin		1,511	541		2,052		969	1,083		2,052
Mirzachul		2,202	589	4	2,795		1,068	1,727		2,795
Toshkent		1,746	322		2,068		815	1,253		2,068
Dehqonobod		2,065	332		2,397		2,033	364		2,397
Beruniy		492	1,227	504	2,223		859	948	416	2,223
Baxor		745	240		985		462	523		985
Guliston		1,129	2,117	54	3,300		1,885	1,399	16	3,300
Axmedov		1,758	230		1,988		961	1,027		1,988
Kulbekov		462	1,606		2,068		680	1,388		2,068
Mustaqillik		501	1,694	27	2,222		788	1,405	29	2,222
Dustlik		1,018	839	60	1,917		695	1,149	73	1,917
Ulugbek		541	1,043	115	1,699		275	1,126	298	1,699
Yangiobod		1,114	476	39	1,629		822	807		1,629
Oxunboboyev		997	3,887	90	4,974		373	3,760	841	4,974
Yunusov		1,485	4,174	596	6,255		611	4,727	917	6,255
Barlos		14	841	117	972		32	766	174	972
Chinobod		53	1,303	85	1,441		46	1,277	118	1,441
Total		17,833	21,461	1,691	40,985		13,374	24,729	2,882	40,985

2014 (ha)										
Name of WCA	April					October				
	None	Slightly	Medium	Heavy	Total	None	Slightly	Medium	Heavy	Total
Oq-Oltin	61	1,759	232		2,052		1,250	786	16	2,052
Mirzachul		2,446	343	6	2,795		1,432	1,361	2	2,795
Toshkent		1,348	592	128	2,068		1,064	1,004		2,068
Dehqonobod		2,216	181		2,397		2,015	321	61	2,397
Beruniy		1,434	310	479	2,223		936	1,116	171	2,223
Baxor		769	216		985		681	304		985
Guliston		2,314	932	54	3,300		2,064	1,171	65	3,300
Axmedov		1,873	115		1,988		1,631	357		1,988
Kulbekov		1,612	444	12	2,068		1,209	859		2,068
Mustaqillik		1,120	1,011	91	2,222		951	1,254	17	2,222
Dustlik		947	968	2	1,917		856	1,025	36	1,917
Ulugbek		680	860	159	1,699		680	768	251	1,699
Yangiobod		1,169	412	48	1,629		1,048	581		1,629
Oxunboboyev		2,217	2,426	331	4,974		249	3,791	934	4,974
Yunusov		4,188	1,416	651	6,255		2,645	2,592	1,018	6,255
Barlos		49	788	135	972		50	625	297	972
Chinobod		205	1,038	198	1,441		157	1,190	94	1,441
Total	61	26,346	12,284	2,294	40,985		18,918	19,105	2,962	40,985

Table A4 地下水位區分別面積
Area with respect to groundwater level

2012 (ha)																		
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total
Oq-Oltin	207	934	838	98		2,077			830	1,247		2,077			300	1,777		2,077
Mirzachul	117	517	2,005	146	10	2,795	254	527	2,014		2,795			463	2,102	230		2,795
Toshkent		553	1,476	39		2,068		1,554	514		2,068			296	1,772			2,068
Dehqonobod		169	2,117	112		2,398		788	1,610		2,398			75	2,323			2,398
Beruniy			182	1,716	325	2,223			1,353	870	2,223				1,417	806		2,223
Baxor		191	751	53		995		782	213		995			85	910			995
Guliston		206	726	2,269	99	3,300		825	2,293	182	3,300			314	2,556	430		3,300
Axmedov	975	800	214			1,989	254	1,597	138		1,989	29	1,472	488				1,989
Kulbekov			195	1,862	11	2,068		1,498	570		2,068		1,027	1,011	30			2,068
Mustaqillik		153	527	1,542		2,222		730	1,288	204	2,222			323	1,678	221		2,222
Dustlik		610	1,307			1,917		1,517	400		1,917			126	1,791			1,917
Ulugbek		9	341	1,307	42	1,699		110	1,432	157	1,699			83	1,246	370		1,699
Yangiobod	590	864	160	30		1,644	60	1,224	360		1,644			800	844			1,644
Oxunboboyev			313	4,650	11	4,974		300	4,460	214	4,974			7	4,567	400		4,974
Yunusov		108	1,116	3,555	1,476	6,255		1,764	3,735	756	6,255			90	4,365	1,800		6,255
Barlos		198	428	178	168	972		198	676	98	972		40	178	574	180		972
Chinobod		39	1,304	78	20	1,441		124	1,317		1,441			20	1,398	23		1,441
Total	1,889	5,351	14,000	17,635	2,162	41,037	568	14,368	23,620	2,481	41,037	69	5,659	30,819	4,490	41,037		

2013 (ha)																		
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total
Oq-Oltin			66	1,986		2,052			5	2,047		2,052						2,052
Mirzachul			1,167	1,604	24	2,795		280	2,194	321	2,795			427	2,233	135		2,795
Toshkent			1,208	860		2,068		134	1,910	24	2,068			842	1,151	75		2,068
Dehqonobod		21	144	2,232		2,397		75	2,322		2,397			566	1,825	6		2,397
Beruniy			48	1,101	1,074	2,223			981	1,242	2,223			40	1,221	962		2,223
Baxor				985		985			985		985			161	824			985
Guliston			1,222	1,565	513	3,300		139	2,693	468	3,300			599	2,214	487		3,300
Axmedov		122	1,369	497		1,988		975	1,013		1,988			1,325	663			1,988
Kulbekov			1,217	851		2,068		15	2,053		2,068			825	1,243			2,068
Mustaqillik			276	1,645	301	2,222			1,605	617	2,222			595	1,118	509		2,222
Dustlik			249	1,668		1,917		4	1,814	99	1,917			133	1,583	201		1,917
Ulugbek			560	583	556	1,699		91	837	771	1,699			454	855	390		1,699
Yangiobod		155	848	626		1,629		510	1,119		1,629			1,289	340			1,629
Oxunboboyev			739	4,138	97	4,974		8	4,219	747	4,974			173	4,306	495		4,974
Yunusov			1,036	2,275	2,944	6,255		365	3,183	2,707	6,255				4,268	1,987		6,255
Barlos			400	402	170	972		277	541	154	972			368	487	117		972
Chinobod			115	670	656	1,441			743	698	1,441			92	933	416		1,441
Total		298	10,664	23,688	6,335	40,985		2,878	30,259	7,848	40,985		7,889	27,316	5,780	40,985		

2014 (ha)																		
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total	0-1 m	1-1.5	1.5-2	2-3	>3	Total
Oq-Oltin	3	261	1,788			2,052			31	1,952	69	2,052			166	1,886		2,052
Mirzachul	459	872	1,169	163	132	2,795		169	2,457	169	2,795			350	2,266	179		2,795
Toshkent	170	527	1,281	90		2,068		37	186	1,654	191	2,068			148	1,827	93	2,068
Dehqonobod	6	130	2,258	3		2,397		2	345	2,050	2,397			131	2,266			2,397
Beruniy	135	128	257	1,291	412	2,223			62	1,353	808	2,223			25	1,319	879	2,223
Baxor		71	914			985			23	870	92	985			81	904		985
Guliston	216	800	1,150	1,080	54	3,300		23	158	2,745	374	3,300			525	2,204	571	3,300
Axmedov	459	992	537			1,988		29	353	1,550	56	1,988			396	1,592		1,988
Kulbekov	82	656	863	467		2,068			107	1,961		2,068			205	1,863		2,068
Mustaqillik	36	169	1,339	678		2,222			60	2,075	87	2,222			41	1,647	534	2,222
Dustlik			236	1,575	106	1,917			175	1,742		1,917			14	1,860	43	1,917
Ulugbek	91	561	214	794	39	1,699			257	1,366	76	1,699			606	808	285	1,699
Yangiobod	235	988	392	14		1,629			372	1,257		1,629			734	895		1,629
Oxunboboyev	328	1,456	1,864	1,183	143	4,974		83	539	4,209	143	4,974			66	4,546	362	4,974
Yunusov	522	819	681	1,775	2,458	6,255		264	728	3,668	1,595	6,255				3,894	2,361	6,255
Barlos	130	274	349	219		972		25	289	645	13	972			283	522	167	972
Chinobod	32	41	71	266	1,031	1,441			45	568	828	1,441			45	425	971	1,441
Total	2,904	8,981	16,702	8,129	4,269	40,985	463	3,899	32,122	4,501	40,985		3,816	30,724	6,445	40,985		

Table A5 地下水塩分濃度区分別面積
Area with respect to groundwater salinity

2012													(ha)					
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total
Oq-Oltin		643	1,112	322		2,077	705	1,372				2,077	249	1,662	166			2,077
Mirzachul		760	1,928	97	10	2,795	185	2,537	73			2,795	40	2,677	78			2,795
Toshkent		197	1,200	671		2,068	99	1,683	276	10		2,068	70	1,642	356			2,068
Dehquonobod	5	229	1,695	469		2,398	225	1,592	581			2,398	150	2,248				2,398
Beruniy		19	624	1,580		2,223	7	1,735	481			2,223		1,241	962	20		2,223
Baxor	10	649	315	21		995	340	655				995	74	900	21			995
Guliston		305	2,602	363	30	3,300		528	2,739	33		3,300	66	1,209	2,025			3,300
Axmedov		136	859	936	58	1,989	10	1,336	643			1,989	137	1,852				1,989
Kulbekov		615	1,274	157	22	2,068	37	1,821	210			2,068	105	1,753	210			2,068
Mustaqillik		1,244	867	85	26	2,222	433	1,730	59			2,222		2,086	136			2,222
Dustlik		714	1,140	63		1,917	1,029	888				1,917	189	1,581	147			1,917
Ulugbek		80	1,517	102		1,699		1,533	166			1,699	1,209	490				1,699
Yangiobod		580	644	400	20	1,644	140	1,174	320	10		1,644	120	954	560	10		1,644
Oxunboboyev		570	3,962	385	57	4,974	61	1,240	3,435	238		4,974		3,207	1,767			4,974
Yunusov		252	1,170	3,843	990	6,255	22	1,332	4,199	702		6,255	486	1,190	3,815	764		6,255
Barlos				69	903	972			844	128		972						972
Chinobod			28	1,316	97	1,441		97	1,318	26		1,441			1,389	52		1,441
Total	15	6,993	20,937	10,879	2,213	41,037	3,293	21,253	15,344	1,147		41,037	2,895	24,692	12,604	846		41,037

2013													(ha)					
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total
Oq-Oltin		142	1,698	212		2,052	288	1,764				2,052	567	1,329	156			2,052
Mirzachul		19	2,398	378		2,795	118	2,316	361			2,795	83	2,301	411			2,795
Toshkent		295	1,469	304		2,068	32	1,555	481			2,068	507	1,261	300			2,068
Dehquonobod		298	1,493	546	60	2,397	44	1,140	1,185	28		2,397	1,176	1,211	10			2,397
Beruniy			1,187	1,036		2,223	21	1,589	613			2,223	285	1,763	175			2,223
Baxor		190	756	39		985	103	849	33			985	355	630				985
Guliston		41	1,263	1,996		3,300	52	1,226	1,662	360		3,300	492	1,719	1,089			3,300
Axmedov		697	833	454	4	1,988		1,697	291			1,988	404	1,584				1,988
Kulbekov		14	604	1,450		2,068		1,869	199			2,068	172	1,116	780			2,068
Mustaqillik		43	1,323	853	3	2,222	128	1,807	287			2,222	156	1,553	513			2,222
Dustlik		344	1,445	108	20	1,917	295	1,443	179			1,917	403	1,273	241			1,917
Ulugbek		27	1,326	346		1,699		920	779			1,699	330	1,369				1,699
Yangiobod		219	1,044	333	33	1,629	4	1,330	295			1,629	408	838	383			1,629
Oxunboboyev		20	1,185	2,640	1,129	4,974	79	1,163	3,255	477		4,974	698	2,088	2,124	64		4,974
Yunusov		733	2,353	3,132	37	6,255		2,305	3,530	420		6,255	105	2,100	2,824	1,226		6,255
Barlos			10	962		972		38	919	15		972						972
Chinobod			502	919	20	1,441		675	730	36		1,441	15	279	846	301		1,441
Total		3,082	20,889	15,708	1,306	40,985	1,164	23,686	14,799	1,336		40,985	6,156	22,414	10,824	1,591		40,985

2014													(ha)					
Name of WCA	April						July						October					
	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total	0-1 g L ⁻¹	1-3	3-5	5-10	>10	Total
Oq-Oltin		99	1,840	113		2,052	1,887	101	38	26		2,052	127	1,701	224			2,052
Mirzachul		232	1,362	1,123	78	2,795	284	1,828	649	34		2,795	340	1,163	1,230	62		2,795
Toshkent		111	1,503	454		2,068		686	1,382			2,068	102	962	1,004			2,068
Dehquonobod		221	1,659	517		2,397	541	1,490	306	60		2,397	1,001	1,276	120			2,397
Beruniy		347	1,349	527		2,223	184	530	1,192	317		2,223	1,297	843	83			2,223
Baxor		226	752	7		985	833	150	2			985	445	540				985
Guliston			2,085	1,024	191	3,300	30	1,597	1,479	194		3,300	263	1,325	895	817		3,300
Axmedov		264	1,008	665	51	1,988	350	1,316	322			1,988	380	1,392	216			1,988
Kulbekov			1,186	882		2,068		1,192	876			2,068	844	1,158	66			2,068
Mustaqillik		94	1,780	348		2,222	86	913	1,223			2,222	187	413	1,597	25		2,222
Dustlik		237	1,281	399		1,917	558	890	466	3		1,917	152	1,437	328			1,917
Ulugbek			255	1,444		1,699	18	827	848	6		1,699	871	649	179			1,699
Yangiobod		97	1,474	58		1,629	275	991	363			1,629	385	802	442			1,629
Oxunboboyev		120	1,540	1,983	1,331	4,974		721	3,240	1,013		4,974	22	978	2,430	1,544		4,974
Yunusov		540	2,669	2,330	716	6,255	77	1,440	4,243	495		6,255	522	1,818	3,555	360		6,255
Barlos			936	36		972		39	933			972			2	407	563	972
Chinobod		32	1,017	363	29	1,441		184	1,198	59		1,441	91	182	787	381		1,441
Total		2,620	23,696	12,273	2,396	40,985	5,123	14,895	18,760	2,207		40,985	7,029	16,641	13,563	3,752		40,985

引用文献

- 1) Millennium Ecosystem Assessment Board (2005): Chapter 22. Dryland Systems, Part III: An Assessment of Systems from which Ecosystem Services Are Derived, Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Vol. 1, pp.623-662
- 2) Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., and von Maltitz, G. (Eds.) (2018): Rethinking land degradation and sustainable land management, World Atlas of Desertification Third Edition, Publication Office of the European Union, Luxembourg, pp.1-248, DOI:10.2760/06292
- 3) 農業農村工学会 (2003) : 農業土木標準用語事典, 農業農村工学会, p.62
- 4) 井上光弘 (2012) : 塩類化の現状と除塩技術, 地盤工学会誌, 60 (1), pp.12-15
- 5) Jacobsen, T. and Adams, R.M. (1958): Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture, Science, New Series, Vol. 128 (3334), pp.1251-1258
- 6) 前川和也 (1990) : 古代シュメール農業の技術と生産力, シリーズ世界史への問い 2 生活の技術 生産の技術,岩波書店, pp.47-74
- 7) 佐藤洋一郎, 渡邊紹裕 (2009) : 塩の文明誌 人と環境をめぐる 5000 年, NHK ブックス, pp.1-211
- 8) 北村義信 (1994) : アフリカの砂漠化と灌漑農業, 水文・水資源学会誌, Vol. 7 (6), pp.552-561
- 9) 佐藤政良 (1991) : エジプト・ナイル川の水利用, 農業土木学会誌, Vol. 59 (11), pp.93-98
- 10) 佐藤政良 (2016) : ナイル川の水資源とエジプトの水利用, ARDEC54 号, <http://www.jiid.or.jp/ardec/ardec54/ard54_key_note1.html>2019 年参照
- 11) Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R.J., Drechsel, P., and Noble, A.D. (2014): Economics of salt-induced land degradation and restoration, Natural Resources Forum, 38, pp.282-295, DOI:10.1111/1477-8947.12054
- 12) Herbert, E.R., Boon, P., Burgin, A.J., Neubauer, S.C., Franklin, R.B., Ard n, M., Hopfensperger, K.N., Lamers, L.P.M., and Gell, P. (2015): A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands, Ecosphere, Vol. 6 (10), pp.1-43
- 13) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017): World Population Prospects, The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables, Working Paper No. ESA/P/WP/248, pp.1-46
- 14) Alexandratos, N. and Bruinsma, J. (2012): World agriculture toward 2030/2050: the 2012 revision, ESA Working Paper No.12-03, Rome, FAO, pp.1-147
- 15) World Bank (2018): Atlas of Sustainable Development Goals 2018, World Development Indicators, Washington, DC: World Bank, pp.1-2, DOI:10.1596/978-1-4648-1250-7
- 16) 外務省 (2015) : 我々の世界を変革する-持続可能な開発のための 2030 アジェンダ (仮訳), 第 70 回国連総会採択<<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000101402.pdf>>2018 参照
- 17) FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO (2018): The State of Food Security and Nutrition in

- the World 2018, Building climate resilience for food security and nutrition, Rome, FAO, pp.1-181
- 18) Pimentel, D., Stachow, U., Takacs, D.A., Brubaker, H.W., Dumas, A.R., Meaney, J.J., O'Neil, J.A.S., Onsi, D.E., and Corzilius, D.B. (1992): Conserving Biological Diversity in Agricultural/Forestry Systems, American Institute of Biological Sciences, Vol. 42 (5), Oxford Journals, pp.354-362
 - 19) Bringezu, S., O'Brien, M., Pengue, W.A., Swilling, M., and Kauppi, L. (2010): Assessing Global Land Use and Soil Management for Sustainable Resource Policies, Scoping Paper of the WG Land & Soil of the International Panel for Sustainable Resource Management, UNEP, pp.1-32
 - 20) 坪田邦夫 (2016) : 国際機関等による世界食料需給見通しの一考察 (研究ノート 1), 日本農業研究所研究報告「農業研究」, Vol. 29, pp.95-125
 - 21) Qadir, M. (2016): Reversing Salt-Induced Land Degradation Requires Integrated Measures, Policy Nook, Water Economics and Policy, Vol. 2 (1), World Scientific, pp.1-8, DOI:10.1142/S2382624X16710016
 - 22) Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., and Sombroek, W.G. (1991): World map of the status of human-induced soil degradation, an explanatory note, Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD), International Soil Reference and Information Centre, United Nations Environment Programme, pp.1-34
 - 23) Dregne, H., Kassas, M., and Rozanov, B. (1991): A New Assessment of the World Status of Desertification, Desertification Control Bulletin, No.20, UNEP, pp.6-18
 - 24) Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L., and Schaepman, M.E. (2008): Global assessment of land degradation and improvement 1. Identification by remote sensing, Report 2008/01, ISRIC-World Soil Information, Wageningen, pp.1-70
 - 25) 松本聰 (2000) : 世界における塩類集積土壌の分布とその特性, 塩類集積土壌と農業, 日本土壌肥料学会編, 博友社, pp.11-38
 - 26) Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., and Faaij, A. (2011): The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils, Energy & Environmental Science 2011, 4, 2669, The Royal Society of Chemistry, pp.2669-2681, DOI: 10.1039/c1ee01029h
 - 27) 国際食糧農業協会編 (2002) : 世界の土壌資源—入門—, 古今書院, pp.124-131
 - 28) Metternicht, G.I. and Zinck, J.A. (2003): Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints, Remote Sensing of Environment, Vol. 85, Elsevier Science Inc., pp.1-20, DOI:10.1016/S0034-4257(02)00188-8
 - 29) Squires, V.R. and Glenn, E.P. (2009): Salination, Desertification, and Soil Erosion, In: The Role of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries in Human Nutrition, Vol. 3, EOLSS, pp.102-123
 - 30) 北村義信 (2016) : 乾燥地の水をめぐる知識とノウハウ, 技報堂出版, pp.171-187

- 31) 筒井暉, 荻野芳彦, 大槻恭一, 大上博基 (1995) : 中央アジア, アラル海流域における農業開発と灌漑水利, 農業土木学会誌, Vol. 63 (2), pp.13-18
- 32) ニコラス・ボロフカ (2012) : アラル海の歴史, 考古学から見た気候と湖水位の変遷, 中央ユーラシア環境史 1, 臨川書店, pp.209-239
- 33) Khamraev, S.R., Dukhovny, V.A., Kadyrov, A.A., and Sokolov, V.I. (eds.) (2011): Water Resources Management in Uzbekistan, Global Water Partnership of Central Asia and Caucasus, pp.1-104
- 34) 末尾至行 (1953) : ソ連報の灌漑・水力プラン (A.A.グリゴリエフ) , 人文地理, 5(2), pp.131-132
- 35) Funakawa S., Suzuki, R., Kanaya, S., Saljnikov (Karbozova), E., and Kosaki, T. (2007): Distribution patterns of soluble salts and gypsum in soils under large-scale irrigation agriculture in Central Asia, Soil Science and Plant Nutrition, 53, pp.150-161, DOI:10.1111/j.1747-0765.2007.00115.x
- 36) 荻野芳彦, 筒井暉 (1994) : 中央アジア, イリ川とウルムチ川の水利開発の現状と課題, 農業土木学会誌, Vol. 63 (2), pp.7-11
- 37) 福田仁志, 小林国司 (1962) : ソ連ウズベックの沙漠カンガイ, 農業土木研究, Vol. 29 (8) , pp.8-13
- 38) 川端良子 (2012) : 中央アジアのアラル海の縮小が漁業資源, 農業, 食糧生産に及ぼす影響について, 日本海水学会誌, Vol. 66 (2), pp.79-85
- 39) マイケル・H・グランツ, 中山幹康 (1996) : アラル海流域における「しのびよる環境問題」への国際協力, 農業土木学会誌, Vol. 64 (10), pp.23-26
- 40) 安成哲三 (2013) : 「ヒマラヤの上昇と人類の進化」再考: 第三紀末から第四紀におけるテクトニクス・気候生態系・人類進化をめぐって, ヒマラヤ学誌, 14, pp.19-38
- 41) 松本聰 (2011) : 湿潤地域で発生する農地の塩害と乾燥地における農地の塩類集積—まったく異なる被害の機構とそれらの修復をめぐる課題—, 国際農林業協力, Vol. 34 (2), 国際農林業協働協会, pp.2-10
- 42) 松本聰 (1988) : 乾燥地における水利用と塩類集積, 地理学評論, 61(Ser. A)-2, pp.155-169
- 43) 清水克之 (2012) : 中央アジアにおける灌漑農業, 中央ユーラシア環境史 3, 臨川書店, pp.121-152
- 44) 齋藤竜太 (2017) : ウズベキスタン水消費者組合をめぐるアクター研究: 水セキュリティ及び国際協力をめぐる規範と, 日本の役割, 筑波大学博士学位論文, pp.28-42
- 45) Abrol, I.P., Yadav, J.S.P., and Massoud, F.I. (1988): Salt-affected soils and their management, FAO Soils Bulletin 39, Rome, FAO, pp.13-92
- 46) Tanji, K.K. and Kielen, N.C. (2002): Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, FAO Irrigation and Drainage Paper 61, Rome, FAO, pp.183-186
- 47) Dukhovny, V., Umarov, P., Yakubov, H., and Madramootoo, C.A. (2007): Drainage in the Aral Sea Basin, Irrigation and Drainage, 56, Wiley InterScience, pp.91-100, DOI: 10.1002/ird.367
- 48) 北村義信, 矢野友久 (2002) : 中央アジア灌漑農地の塩類集積による水土の劣化と防

- 止対策, 農業土木学会誌, Vol. 70 (7), pp.21-25
- 49) Kitamura, Y., Yano, T., Honna, T., Yamamoto, S., and Inosako, K. (2006): Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Sea basin - Research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land, *Agricultural Water Management*, Vol. 85, pp.1-14, DOI:10.1016/j.agwat.2006.03.007
- 50) 舟川晋也, 小崎隆, 鈴木玲治, 石田紀郎 (1996) : カザフスタン大規模灌漑農地における土壌塩性化の実態, 農業土木学会誌, Vol. 64 (10), pp.41-45
- 51) 舟川晋也 (2012) : 中央ユーラシアの土壌と生産生態基盤, 中央ユーラシア環境史 3, 臨川書店, pp.220-266
- 52) 久米崇, 長野宇規, 渡邊紹裕, 三野徹 (2004) : 除塩灌漑に伴う排水不良農地の土壌塩分分布変動, 農業土木学会論文集, 233, pp.21-28
- 53) 安西俊彦, 清水克之, 北村義信, 池浦弘 (2014) : ウズベキスタン国内の効率的水利利用の取組み, 農業農村工学会誌, Vol. 82 (7), pp.19-22
- 54) 安西俊彦 (2014) : 乾燥地灌漑農業における農地・水利用と地下水変動に関する研究, 鳥取大学博士学位論文, pp.1-128
- 55) Okuda, Y., Ikeura, H., Onishi, J., Nitta, N., Fukuo, A., and Shiga, K. (2013): On-farm mitigation measures against salinization under high groundwater level conditions, *Guideline*, JIRCAS, pp.1-99
- 56) Okuda, Y., Omori, K., and Onishi, J. (2017): Shallow sub-surface drainage for mitigating salinization, *Technical Manual*, JIRCAS, pp.1-72
- 57) 大森圭祐 (2018) : アジア乾燥地灌漑農地における塩類土壌の特徴と塩類動態に関する研究, 筑波大学博士学位論文, pp.1-111
- 58) 大西純也, 池浦弘, 山中勇, 北村義信, 藤巻晴行 (2017) : 乾燥地の灌漑農地における簡易 Surge Flow 灌漑法による節水効果ーウズベキスタン共和国での適用事例ー, 沙漠研究, Vol. 27 (3), pp.91-101
- 59) Onishi, J., Okuda, Y., Paluashova, G.K., Shirokova, Y.I., Kitamura, Y., and Fujimaki, H. (2018): Salt pushing effect to the side of the ridge by fixed skip furrow irrigation. - case study in the Republic of Uzbekistan -, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 28(S), pp.155-158
- 60) World Bank (2010): Uzbekistan, *Climate Change and Agriculture Country Note*, pp.4-16, <<http://documents.worldbank.org/curated/en/362081468131400417/pdf/954120WP0uzbek00Box391416B00PUBLIC0.pdf>> 2019 年参照
- 61) 奥田幸夫, 大西純也 (2012) : ウズベキスタンにおける塩害農地の現状と課題, 農業農村工学会誌, Vol. 80 (2), pp.3-6
- 62) Mahmudov, M.M. (2006): *Country Pasture/Forage Resource Profiles, Uzbekistan*, FAO, <<http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/uzbekistan/uzbekistan.htm>> 2017 年参照, pp.1-21
- 63) Gintzburger, G., Toderich, K.N., Mardonov, B.K., and Mahmudov, M.M. (2003): *Rangelands of the arid and semi-arid zones in Uzbekistan*, CIRAD, ICARDA, pp.21-85

- 64) 奥田幸夫, 藤巻晴行, 北村義信, 北川巖 (2017) : ウズベキスタン国の土壌条件下におけるカットドレーンの適用上の課題と対策, 農業農村工学会論文集, 305 (85-2), pp.II_83-II_90
- 65) Kulmatov, R. (2014): Problems of Sustainable Use and Management of Water and Land Resources in Uzbekistan, *Journal of Water Resource and Protection*, 6, pp.35-42, <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.61006>> 2019 年参照
- 66) Kulmatov, R., Rasulov, A., Kulmatova, D., Rozilhodjaev, B., and Groll, M. (2015): The Modern Problems of Sustainable Use and Management of Irrigated Lands on the Example of the Bukhara Region (Uzbekistan), *Journal of Water Resource and Protection*, 7, pp.956-971, <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp2015.712078>> 2019 年参照
- 67) 北村浩二 (2007) : 中央アジアの農民水利組織の役割と課題, 農業農村工学会誌, Vol. 75 (7), pp.59-64
- 68) 野部公一 (2010) : ウズベキスタンにおける農業改革:1992~2009 年—「漸進的」改革下の「急進的」変化—, 専修経済学論集, Vol. 45 (1), pp.47~63
- 69) 斎藤竜太 (2015) : ウズベキスタンの水消費者組合—現状, 問題点, 展望—, 日本中央アジア学会報, 11, pp.29-54
- 70) 国際協力機構 (2012) : ウズベキスタン共和国 水管理改善プロジェクト 終了時評価調査報告書, pp.1-40
- 71) 山本太平編 (2008) : 乾燥地の土地劣化とその対策, 乾燥地科学シリーズ 3, 古今書院, pp.157-226
- 72) 国際協力機構 (2017) : ウズベキスタン国 ウズベキスタン農業セクター情報収集・確認調査, ファイナルレポート, pp.65-70
- 73) Dukhovny, V.A., Yakubov, K.I., and Umarov, P.D. (2005): Drainage and salinity control: Review of related problems in Central Asia, *Irrigation management for combating desertification in the Aral Sea basin. Assessment and tools, Findings of the Cooperative EU research Project*, pp.249-270
- 74) 奥田幸夫, 大森圭祐, 大西純也 (2015) : ウズベキスタンの塩害農地における垂直排水の実態, 農業農村工学会誌, Vol. 83 (5), pp.21-24
- 75) 奥田幸夫, 大西純也 (2015) : ウズベキスタンの灌漑農地における塩害モニタリングの現状, 日本海水学会誌, Vol. 69 (5), pp.293-300
- 76) 奥田幸夫, 池浦弘, 大西純也, 新田直人, 富久尾歩, 山中勇 (2012) : 平成 23 年度海外農業農村地球環境問題等調査事業農地塩害対策調査報告書 —ウズベキスタン国—, JIRCAS, pp.40-44
- 77) Bucknall, J., Klytchnikova, I., Lampietti, J., Lundell, M., Scatasta, M., and Thurman, M. (2003): *Irrigation in Central Asia - Social, Economic and Environmental Considerations*, The World Bank, p.21 (Annex)
- 78) Okuda, Y., Onishi, J., Omori, K., Oya, T., Fukuo, A., Kurvantaev, R., Shirokova, Y., and Nasonov, V. (2016): Current Status and Problems of the Drainage System in Uzbekistan,

Journal of Arid Land Studies, Vol. 25(3), pp.81-84

- 79) Kitamura, Y., Yano, T., Yasuda, S., and Oba, T. (2000b): Water and Salt Behavior in an Irrigation Block Under Rice-Based Cropping System in Central Asia, - Research on Water Management to Prevent Secondary Salinization in Arid Land (II)-, Trans. of JSIDRE, 206, pp.47-56
- 80) 北村義信, 矢野友久 (2000): 中央アジア乾燥地における二次的塩類集積防止のための広域水管理研究, 地球環境, Vol. 5 (1&2), pp.27-36
- 81) 奥田幸夫, 富久尾歩, ラフモン・クルバンタエフ (2013): ウズベキスタンにおける排水機能からみた地下水位と塩類集積の変動, 平成 25 年度農業農村工学大会講演会講演要旨集, pp.338-339
- 82) 奥田幸夫 (2016): ウズベキスタンにおける排水システム改善の取り組みについて, 沙漠研究, Vol. 25 (4), pp.283-288
- 83) 兼子健男, 村川雅己, 小財伸, 身次幸二郎 (2002): 塩類が集積した水田の暗渠排水を利用した急速除塩技術, 農業土木学会誌, Vol. 70 (7), pp.27-30
- 84) 千葉克己, 加藤徹, 富樫千之, 冠秀明 (2012): 縦浸透除塩の有効性と宮城県の津波被災農地の除塩対策, 農業農村工学会誌, Vol. 80 (7), pp.3-6
- 85) 千葉克己, 冠秀昭, 加藤徹 (2012): 津波被災農地における暗渠を利用した雨による浸透水除塩, 土壌の物理性, Vol. 121, pp.29-34
- 86) 北川巖, 常田大輔, 原口暢朗, 若杉晃介 (2010): 高生産性農地の段階的整備を実現する低コスト排水改良技術, 農業農村工学会誌, Vol. 78 (11), pp.7-10
- 87) 北村義信, 清水克之 (2010): 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, Vol. 115, pp.37-41
- 88) 北川巖, 竹内晴信, 小谷晴夫, 千葉佳彦 (2010): 切断掘削方式による穿孔暗渠「カッティングドレーン工法」の効果と適用性, 農業農村工学会論文集, 267, pp.11-16.
- 89) 奥田幸夫, 後藤幸輝, 北川巖 (2015): ウズベキスタンにおける穿孔暗渠を活用した除塩の試行, 農業農村工学会誌, Vol. 83 (7), pp.7-10
- 90) 冠秀昭, 大谷隆二, 関矢博幸, 千葉克己 (2014): 農業用トラクタで利用できる浅層暗渠施工器の開発と排水効果, 農業農村工学会論文集, 292, pp.93-101
- 91) 北川巖, 竹内晴信, 横井義雄 (2006): トレンチャ掘削式穿孔暗渠の耐久性と適用条件, 農業農村工学会論文集, 243, pp.73-78
- 92) 杉山満丸, 津田豊 (1990): シートパイプクロス暗渠工法と施工後の状態, 農業土木学会誌, Vol. 58 (2), pp.33-41
- 93) 北川巖 (2016): 農家が簡単・スピーディに無資材の暗渠を作れる穿孔暗渠機「カットドレーン」, 農耕と園芸, Vol. 71 (9), pp.50-53
- 94) 井上啓司, 澤孝平, 中山義久, 上原久典, 白木音信, 寺本広紀, 萩家正次, 稲角健 (2006): 土の基礎的な試験結果の精度・信頼性の現状分析, 地盤の環境と計測技術に関するシンポジウム 2006 論文集, pp.31-36
- 95) 塩沢昌 (1991): サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定, 土壌の物理性 Vol.

- 62, pp.53-61
- 96) 新垣雅裕 (1988) : 土壌のレオロジー的挙動からみた階段畑の弾丸暗渠の施工法に関する一考察, 農業土木学会論文集, 135, pp.83-89
- 97) 甲谷潤, 足立健夫, 川戸義行 (1990) : 土壌改良材注入による弾丸暗渠の耐久性向上技術, 農業土木学会誌, Vol. 58 (4), pp.33-38
- 98) 宮崎毅 (2000) : 環境地水学, 東京大学出版会, pp.22-149
- 99) 奥田幸夫, 北川巖, 大森圭祐 (2016) : ウズベキスタン国塩類集積農地における穿孔暗渠機の課題について, 平成 28 年農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.699-700
- 100) 冠秀昭, 岩佐郁夫, 星信幸, 加藤誠 (2007) : 水田輪作における弾丸暗渠の排水効果持続性と施工意義, 農業農村工学会論文集, 250, pp.107-115
- 101) Ritzema, H.P., Satyanarayana, T.V., Raman, S., and Boonstra, J. (2008): Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farmers' fields, *Agricultural Water Management*, Vol. 95, pp.179-189, DOI:10.1016/j.agwat.2007.09.012
- 102) Kitamura, Y., Yano, T., Yasuda, S., and Oba, T. (2000a): Water 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*, 205, pp.55-64
- 103) Shirokova, Y., Forkutsa, I., and Sharafutdinova, N. (2000): Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia, *Irrigation and Drainage Systems*, 14, pp.199-205
- 104) Bezborodov, G.A., Shadmanov, D.K., Mirhashimov, R.T., Yuldashev, T., Qureshi, A.S., Noblee, A.D., and Qadir, M. (2010): Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138, pp.95-102, DOI:10.1016/j.agee.2010.04.005
- 105) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guideline for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*, Rome, FAO, pp. 89-210
- 106) Okuda, Y., Onishi, J., Shirokova, Y.I., Kitagawa, I., Kitamura, Y., and Fujimaki, H. (2019): Salt removal technology by shallow subsurface drainage in combination with a cut-drain, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 28(S), pp.127-130
- 107) 久米崇, 長野宇規, 渡邊紹裕, 三野徹 (2004) : 排水不良農地における不均一塩分分布の形成要因, 農業土木学会論文集, 234, pp.19-26
- 108) 大西純也, 奥田幸夫 (2018) : インド共和国パンジャブ農業大学の研究開発と普及体制, 農業農村工学会誌, Vol. 86 (12), pp.31-34
- 109) Wang, S., Kitamura, Y., and Yano, T. (1998): Leaching Efficiency, Desalinization and Desodification Processes in Highly Saline Soil Reclamation - A column Study -, *Trans of JSIDRE*, 196, pp.59-67

謝 辞

この博士論文は、国際農林水産業研究センター（JIRCAS）において、筆者が行ってきました研究成果をまとめたものです。

鳥取大学乾燥地研究センター 藤巻晴行教授には指導教官および主査として、これまでの公表論文から本研究論文までご指導いただきました。鳥取大学 猪迫耕二教授，清水克之教授，島根大学 増永二之教授，山口大学 鈴木賢士教授には副査として，貴重なご助言とご指導をいただきました。また，鳥取大学 北村義信名誉教授にはウズベキスタンでの研究を始めた時点から乾燥地の塩類集積問題のご指導をいただき，本研究論文執筆の機会を与えていただきました。農業・食品産業技術総合研究機構 北川巖上級研究員，株式会社北海コーキ 後藤幸輝代表取締役には，本論文の研究テーマであるカットドレーンの国内での知見をご教授いただき，穿孔機の現地導入にも多大な協力をいただきました。改めて，ここに深く感謝申し上げます。

本研究は農林水産省の補助（農地塩害対策調査）を受け，JIRCAS 研究プログラムの下，2008 年から現地調査を行ってきました。国内では，北村名誉教授のほか，大阪府立大学 荻野芳彦名誉教授，亜細亜大学 角田宇子教授，専修大学 野部公一教授，鳥取大学乾燥地研究センター 安萍准教授，農研機構農業環境変動研究センター 江口定夫上席研究員から多くのご助言をいただきました。現地の活動では，ウズベキスタン国農業・水資源省，フェルメル評議会，在ウズベキスタン日本国大使館，国際協力機構など多くの組織からご協力をいただきました。研究データの収集では，灌漑・水問題研究所 Yulia. I. Shirokova 博士をはじめとして多くの現地研究者，シルダリア州の技術者，農家，調査スタッフの方々からご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

そして，ウズベキスタンの調査メンバー池浦弘氏，大森圭祐氏，大西純也氏，成岡道男氏，大矢徹治氏，富久尾歩氏，山中勇氏らには本研究活動への助言やデータ収集に協力をいただきました。改めて，お礼申し上げます。また，本論文の執筆作業を支えていただきました株式会社復建技術コンサルタントの関係者の皆様に感謝申し上げます。その他，ここに名前を記すことができませんでしたが，多数の方々からいただきましたご指導・ご協力に感謝申し上げます。

最後に，本論文執筆を応援してくれた両親，そして長年に亘り，ウズベキスタンでの研究活動を励まし，支えてくれた妻と子供たちに心から感謝します。

学位論文の基礎となる学会誌公表論文

1. ウズベキスタンにおける塩害農地の現状と課題
奥田幸夫, 大西純也 (2012)
農業農村工学会誌 第 80 巻第 2 号 pp.3-6
【第 2 章】
2. ウズベキスタンの塩害農地における垂直排水の実態
奥田幸夫, 大森圭祐, 大西純也 (2015)
農業農村工学会誌 第 83 巻第 5 号 pp.21-24
【第 2 章, 第 3 章, 第 4 章】
3. ウズベキスタンにおける穿孔暗渠を活用した除塩の試行
奥田幸夫, 後藤幸輝, 北川巖 (2015)
農業農村工学会誌 第 83 巻第 7 号 pp.7-10
【第 5 章】
4. Current status and problems of the drainage system in Uzbekistan
Yukio OKUDA, Junya ONISHI, Keisuke OMORI, Tetsuji OYA, Ayumi FUKUO, Rakhmon
KURVANTAEV, Yulia SHIROKOVA, and Vladimir NASONOV (2016)
Journal of Arid Land Studies Vol. 25-3, pp.81-84
【第 3 章, 第 4 章】
5. ウズベキスタン国の土壌条件下におけるカットドレーンの適用上の課題と対策
奥田幸夫, 藤巻晴行, 北村義信, 北川巖 (2017)
農業農村工学会論文集 第 305 号 (85-2) pp.II_83-II_90 (農業農村工学会優秀報文賞)
【第 2 章, 第 5 章, 第 6 章, 第 8 章】
6. Salt removal technology by shallow subsurface drainage in combination with a cut-drain
Yukio OKUDA, Junya ONISHI, Yulia I. SHIROKOVA, Iwao KITAGAWA, Yoshinobu
KITAMURA, and Haruyuki FUJIMAKI (2019)
Journal of Arid Land Studies Vol. 28-S, pp.127-130
【第 7 章】