

乾燥地の塩類化農地における
畝間灌漑の改良による節水と除塩に関する研究
(Studies on water-saving and removal of accumulated salt
by improvement of furrow irrigation in salt affected
farmland in dry land)

大西 純也

2020

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	世界人口	1
1.2	食料問題	2
1.3	灌漑農業	4
1.4	乾燥地域	6
1.5	土壌劣化	8
1.6	塩類集積	11
1.7	研究の目的	20
1.8	本論文の構成と概要	22
第 2 章	研究対象地域（ウズベキスタン）	23
2.1	ウズベキスタンの概要	23
2.2	ウズベキスタンの農業	25
2.3	ウズベキスタンの灌漑	28
2.4	ウズベキスタンの塩類集積	32
2.5	ウズベキスタンの塩類集積対策	34
2.6	ウズベキスタンにおける塩類集積の研究	36
2.7	試験圃場	40
2.8	まとめ	46
第 3 章	簡易サージフロー法（簡易 SF 法）による節水効果	47
3.1	簡易サージフロー法（簡易 SF）とは	47
3.2	試験方法	49
3.3	結果	54

3.3.1	畝間浸透量	54
3.3.2	水足前進時間	55
3.3.3	水足退去時間	57
3.3.4	節水効果	57
3.3.5	浸透水量の推定	58
3.4	まとめ	60
第 4 章	隔畝間灌漑法 (Skip Furrow Irrigation: SFI) による節水効果	61
4.1	隔畝間灌漑法 (Skip Furrow Irrigation: SFI) とは	61
4.2	試験方法	62
4.3	結果	65
4.3.1	節水効果と綿花収量への影響	65
4.3.2	固定隔畝間灌漑法 (FSFI) の適用による畝内の塩分挙動	67
4.4	まとめ	70
第 5 章	簡易 SF 法と SFI の組み合わせによる節水効果	71
5.1	試験方法	71
5.2	結果	73
5.2.1	畝間浸透量	73
5.2.2	水足前進時間	74
5.2.3	節水効果	76
5.2.4	浸透水量の推定	77
5.3	まとめ	79
第 6 章	Dehydration 法と SFI との組合せによる除塩	80
6.1	Dehydration 法とは	80
6.2	試験方法	81

6.3	結果	86
6.3.1	室内試験	86
6.3.2	圃場試験	88
6.4	まとめ	90
第7章	社会実装に向けて（パンジャブ農業大学の事例）	91
7.1	生産現場に近い研究開発	91
7.2	インド共和国の概要	91
7.3	インドにおける農業研究	92
7.4	パンジャブ農業大学（Panjab Agricultural University: PAU）	92
7.4.1	PAUの研究開発体制	93
7.4.2	PAUの普及体制	94
7.4	まとめ	98
第8章	総括	100
謝辞	.....	102
引用文献	.....	103
摘要	.....	111
日本語摘要	.....	111
英語摘要	.....	113
学位論文の基礎となる学会誌公表論文	.....	115

図一覧

Fig. 1-1	世界人口の推移と今後の増加予測（1804 - 2100 年）	1
Fig. 1-2	世界の穀物生産と収穫面積（1961 - 2017 年）	2
Fig. 1-3	世界の栄養不足人口の推移（2000 - 2018 年）	4
Fig. 1-4	世界の農地面積の推移（1961 - 2017 年）	5
Fig. 1-5	世界の灌漑農地の分布	6
Fig. 1-6	世界の乾燥地の分布	7
Fig. 1-7	世界の土壌劣化	9
Fig. 1-8	世界の塩類化土壌の分布	15
Fig. 1-9	灌漑による塩類化土壌の分布	18
Fig. 1-10	乾燥地での灌漑農業に伴う塩類集積の過程	19
Fig. 1-11	灌漑農地における二次的塩類集積の主要因	21
Fig. 2-1	ウズベキスタン共和国およびシルダリア州の位置	23
Fig. 2-2	シルダリア州の平均気温と降水量（2004 - 2015）	24
Fig. 2-3	農業企業（シルカット）、フェルメル、デフカンの割合	26
Fig. 2-4	綿花・小麦の栽培状況	27
Fig. 2-5	ウズベキスタンの主な農産物の生産量	27
Fig. 2-6	灌漑面積と綿花生産量の推移	28
Fig. 2-7	漏水と過剰灌漑	31
Fig. 2-8	ウズベキスタンでの塩類集積状況	32
Fig. 2-9	ウズベキスタンの塩類集積分布	33
Fig. 2-10	ウズベキスタン各州の塩類化面積（2011 年）	33
Fig. 2-11	ウズベキスタンの塩類化面積の推移（2000 - 2011）	35
Fig. 2-12	リーチングの状況	35
Fig. 2-13	シルダリア州各地区の塩類化面積（2010 年）	40
Fig. 2-14	試験圃場の位置	41
Fig. 2-15	Y 圃場における綿花の根群分布	45
Fig. 2-16	A 圃場における土壌水分消費	45
Fig. 3-1	SF 法の概念	47

Fig. 3-2	SF 法の導入例	48
Fig. 3-3	簡易 SF 法の概念	49
Fig. 3-4	試験圃場の概要	50
Fig. 3-5	B および A 圃場における試験区の設定	51
Fig. 3-6	B および A 圃場における積算浸入水量	54
Fig. 3-7	B および A 圃場における水足前進時間	55
Fig. 3-8	簡易 SF 法による通水状況	56
Fig. 3-9	B 圃場における水足退去時間	57
Fig. 3-10	灌漑時間中の畝間各地点における積算浸透水量の分布	59
Fig. 4-1	隔畝間灌漑法 (SFI) の概念	61
Fig. 4-2	試験区の設定 (2014 - 2015 年)	63
Fig. 4-3	2017 年の圃場試験における灌漑処理	63
Fig. 4-4	試験区の設定 (2017 年)	64
Fig. 4-5	対照区および SFI における灌漑水量と綿花収量	65
Fig. 4-6	圃場試験の状況	66
Fig. 4-7	対照区における灌漑前後の塩分分布	67
Fig. 4-8	ASFI における灌漑前後の塩分分布	68
Fig. 4-9	FSFI における灌漑前後の塩分分布	68
Fig. 4-10	対照区, ASFI, SFI における綿収量 (2017)	69
Fig. 5-1	試験圃場の概要 (Y 圃場)	71
Fig. 5-2	試験区の設定 (Y 圃場)	72
Fig. 5-3	Y 圃場における積算浸入水量	73
Fig. 5-4	各灌漑処理における水足前進時間	75
Fig. 5-5	圃場試験の状況 (2012)	77
Fig. 5-6	灌漑時間中の畝間各地点における積算浸透水量の分布	78
Fig. 6-1	Dehydration 法の概念	80
Fig. 6-2	Dehydration 法とリーチングの概念	81
Fig. 6-3	室内試験用アクリルカラム	82
Fig. 6-4	捕集布	83
Fig. 6-5	毛管飽和の状況	83

Fig. 6-6	除塩試験の状況	84
Fig. 6-7	Dehydration 法と FSFI の組み合わせによる除塩の概念	85
Fig. 6-8	Dehydration 試験区の設定（2017 年）	86
Fig. 6-9	各処理における各層の塩分含量	87
Fig. 6-10	各処理における各層の体積含水率	87
Fig. 6-11	各処理における積算蒸発量	88
Fig. 6-12	捕集布と圃場試験（Dehydration 法）の状況	89
Fig. 6-13	除塩率の変化	89
Fig. 7-1	パンジャブ州の位置	93
Fig. 7-2	PAU における研究開発体制	94
Fig. 7-3	PAU における普及・教育部署の構成	95
Fig. 7-4	植物診断所がもたらす利益	96
Fig. 7-5	パンジャブ州における FASS と KVK の設置場所	97
Fig. 7-6	農家との対話・交流の経路	99

表一覧

Table 1-1	インド共和国パンジャブ州における小麦・米の生産量の増大	3
Table 1-2	乾燥地の面積と人口	7
Table 1-3	乾燥地における土地利用	8
Table 1-4	土壌劣化の要因と程度	10
Table 1-5	世界の土壌劣化面積の推計	10
Table 1-6	乾燥地における土壌劣化面積の推計	11
Table 1-7	塩類土壌の分類	12
Table 1-8	EC _e による塩類化程度の区分	12
Table 1-9	塩類土壌の地域別面積 (Szabolcs)	13
Table 1-10	塩類土壌の地域別面積 (FAO)	14
Table 1-11	作物の耐塩性	16
Table 1-12	灌漑による塩類化土壌の地域別面積	17
Table 1-13	灌漑による塩類化土壌の面積が大きい国	17
Table 1-14	塩類集積対策	20
Table 2-1	ウズベキスタンにおける灌漑排水施設の整備状況	29
Table 2-2	中央アジアにおける水資源の配分	30
Table 2-3	中央アジアにおける塩類化した灌漑農地の面積	32
Table 2-4	HGME が推奨するリーチング水量	36
Table 2-5	HGME が推奨するリーチング区画	36
Table 2-6	CAC のコンソーシアムメンバーと資金提供機関	37
Table 2-7	各試験圃場の乾燥密度, 飽和透水係数, 土性	42
Table 2-8	各試験圃場の土壌水分特性	43
Table 2-9	B 圃場, A 圃場北側の圃場および Y 圃場の土壌化学性	44
Table 3-1	B および A 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW	53
Table 3-2	B および A 圃場における Intake 定数と Basic intake rate (I_b)	55
Table 3-3	B および A 圃場における水足前進式の定数	56
Table 3-4	各流入量における簡易 SF 法による節水効果	58
Table 3-5	各流入量における簡易 SF 法による浸透水量の削減効果 (推定)	60

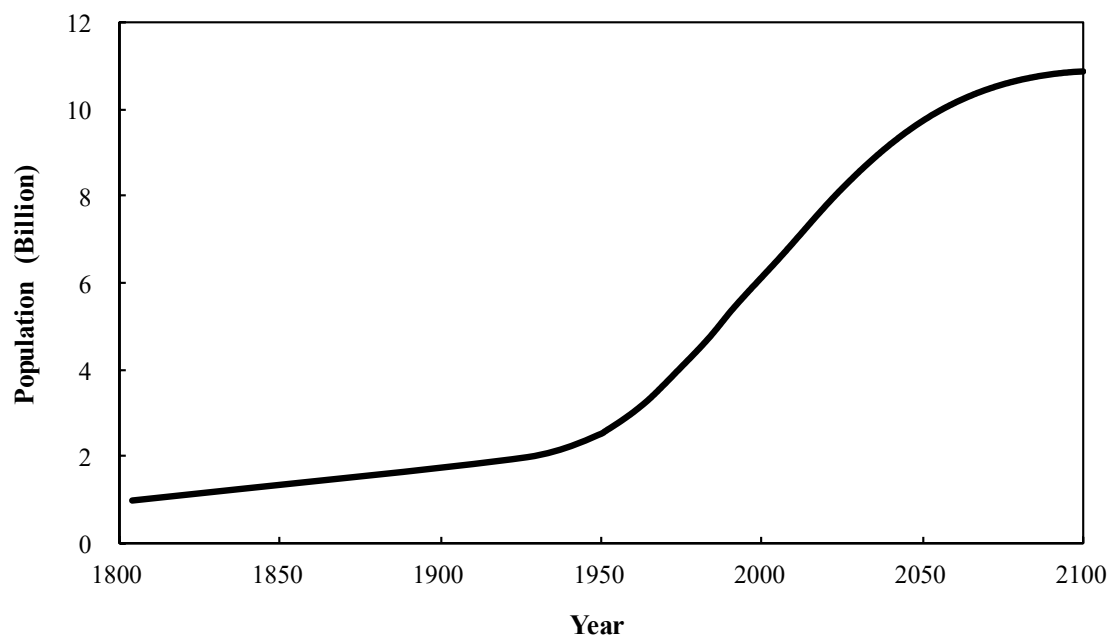
Table 4-1	流入量と適用効率	66
Table 5-1	Y 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW	73
Table 5-2	Y 圃場における Intake 定数と Basic intake rate (I_b)	74
Table 5-3	各灌漑処理における水足前進式の定数	76
Table 5-4	各灌漑処理における節水効果	76
Table 5-5	各灌漑処理における浸透水量の削減効果	77

第1章 緒言

1.1 世界人口

世界人口は、2011 年 10 月 31 日に 70 億人に到達し¹⁻¹⁾、現在、77 億人（2019）と推計されている¹⁻²⁾。約 2000 年前の世界人口は 3 億人程度であり、そこから 6 億人へと倍増するまでに、約 1600 年もの月日を要した。しかし、第二次世界大戦後の 1950 年頃から、世界人口が急激に増加するようになり、1950 年から 2000 年までの僅か 50 年間で、25 億人から 61 億人（約 2.5 倍）へと急増している。世界人口は開発途上地域における死亡率の低下に伴って増加してきたが、一方で先進国等での出生率は低下しているため、人口増加率は 1965 年から 1970 年までの 2.0 %をピークに低下傾向にある¹⁻¹⁾ (Fig. 1-1)。

しかしながら、国連経済社会局人口部（United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division）が発表した「世界人口推計 2019 年版」では、今後も出生率の低下が継続するシナリオであっても、2030 年に 85 億人、2050 年に 97 億人、2100 年には 109 億人に到達する可能性があるとしている¹⁻²⁾。



Source:

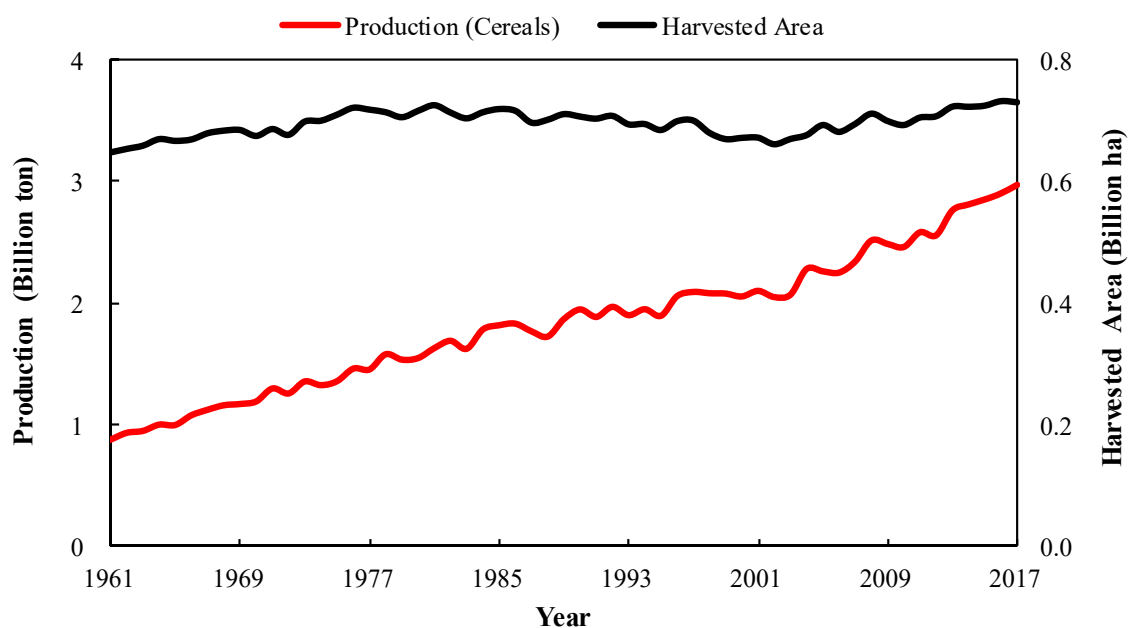
世界人口白書（日本語抜粋版）2011¹⁻¹⁾, World Population Prospects 2019, Accessed date: 24th Sep, 2019

Fig. 1-1 世界人口の推移と今後の増加予測（1804 - 2100 年）

Trend of world population and forecast of future increase (1804 - 2100)

1.2 食料問題

世界人口は 1961 年から 2017 年までの 57 年間に、推計 31 億人から 71 億人（約 2.4 倍）へと急増しているが、世界の穀物生産は 9 億トンから 30 億トン（3.4 倍）へと人口増加を上回るペースでの増産を達成している。この期間、収穫面積の増加は約 6 億 ha から 7 億 ha（約 1.1 倍）と僅であることから、この増産は、農業技術の革新等により、単位面積当たりの生産量（以下、単位収量）が飛躍的に向上したことが主な要因である（Fig. 1-2）。



Source: FAOSTAT, Accessed date: 24th Sep, 2019

Fig. 1-2 世界の穀物生産と収穫面積（1961 - 2017 年）

Changes in world grain yield and harvested area (1961 - 2017)

このような穀物生産の増大は、先進国よりも開発途上地域で顕著であり、1960 年代頃からの開発途上地域における農業技術の発展は「緑の革命」と呼ばれている。「緑の革命」は①高収量品種、②化学肥料の増投、③農薬による病虫害防除、④灌漑施設の整備の 4 要素に支えられたものであり¹⁻³⁾、インド共和国（以下、インド）のパンジャブ州において、最も典型的に進展したとされている。インド北西部に位置するパンジャブ州では、1960 年代半ばより小麦を中心とした「緑の革命」が開始され、1970 年代以降は灌漑基盤の拡充とともに雨期の水稲栽培が普及した。小麦および米の生産量は 1960 年と比較して、それぞれ、1970 年に 3 倍と 6 倍、1990 年に 7 倍と 28 倍へと大幅に増加している¹⁻⁴⁾（Table 1-1）。

Table 1-1 インド共和国パンジャブ州における小麦・米の生産量の増大

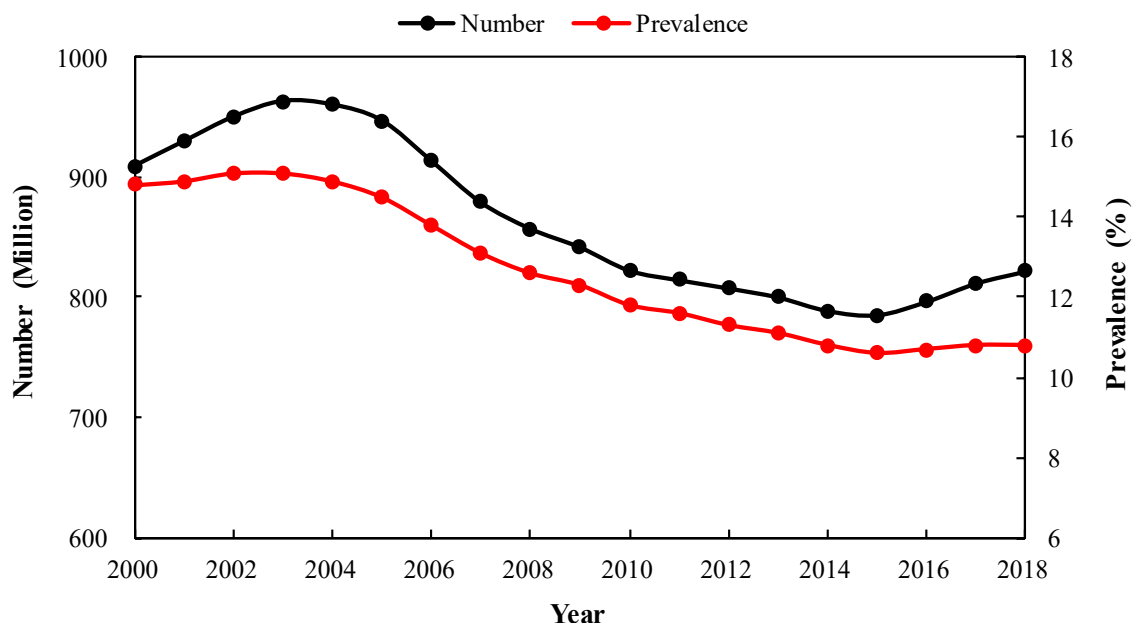
Increasing wheat and rice production in Punjab region, Republic of India

年	小麦			米		
	生産量 (1,000 t)	作付面積 (1,000 ha)	1 haあたり 収量	生産量 (1,000 t)	作付面積 (1,000 ha)	1 haあたり 収量
1960	1,742	1,400	1.2	229	227	1.0
1965	1,916	1,550	1.2	292	292	1.0
1970	5,145	2,299	2.2	688	390	1.8
1975	5,788	2,439	2.4	1,447	567	2.6
1980	7,677	2,812	2.7	3,233	1,178	2.7
1985	10,988	3,112	3.5	5,449	1,714	3.2
1990	12,159	3,273	3.7	6,506	2,015	3.2

Source: 杉本大三 (2001) ¹⁻⁴⁾から著者作成

人口増加に伴って拡大する食料需要に対し、これまで、農業技術の革新による単位収量の向上によって対応してきた。しかし、国連食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization of United Nations: FAO) は、2011 年に発表した「The State of The World's Land and Water Resources for Food and Agriculture¹⁻⁵⁾」において、世界人口が 90 億人を超える 2050 年までに、更に毎年 10 億 ton の穀物と 2 億 ton の畜産製品を生産する必要があるとし、国連環境計画 (United Nations Environment Programm: UNEP) は、2019 年に発表した「Global Environment Outlook 6¹⁻⁶⁾」において、2050 年までに食料生産を 50 %増加させる必要があるとしている。また、2015 年 9 月の国連サミットにて全会一致で採択された Sustainable Development Goals (SDGs) では、「誰一人取り残さない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現に向け、「あらゆる場所あらゆる形態での貧困を終わらせる」「飢餓を終わらせ、食料安全保障および栄養の改善を実現し、持続可能な農業を促進する」ことを先進国も含めた普遍的な目標として掲げている ^{1-7, 8)}。

さらに、FAO、国際農業開発基金 (International Fund for Agricultural Development: IFAD)、国際連合児童基金 (United Nations Children's Fund: UNICEF)、世界食糧計画 (World Food Programme: WFP)、世界保健機関 (WHO : World Health Organization) が共同で作成した「世界の食料安全保障と栄養の現状 2018 (The state of Food Security and Nutrition in the World 2018)」では、長らく減少傾向にあった世界の飢餓人口が 2015 年頃より増加に転じているとしており、2018 年の飢餓人口は約 8 億 2,200 万人 (FAOSTAT) で、その蔓延率は 10.8 % に及んでいるとしている ¹⁻⁹⁾ (Fig. 1-3)。



Source: FAOSTAT, Accessed date: 24th Sep, 2019

Fig. 1-3 世界の栄養不足人口の推移（2000 - 2018 年）

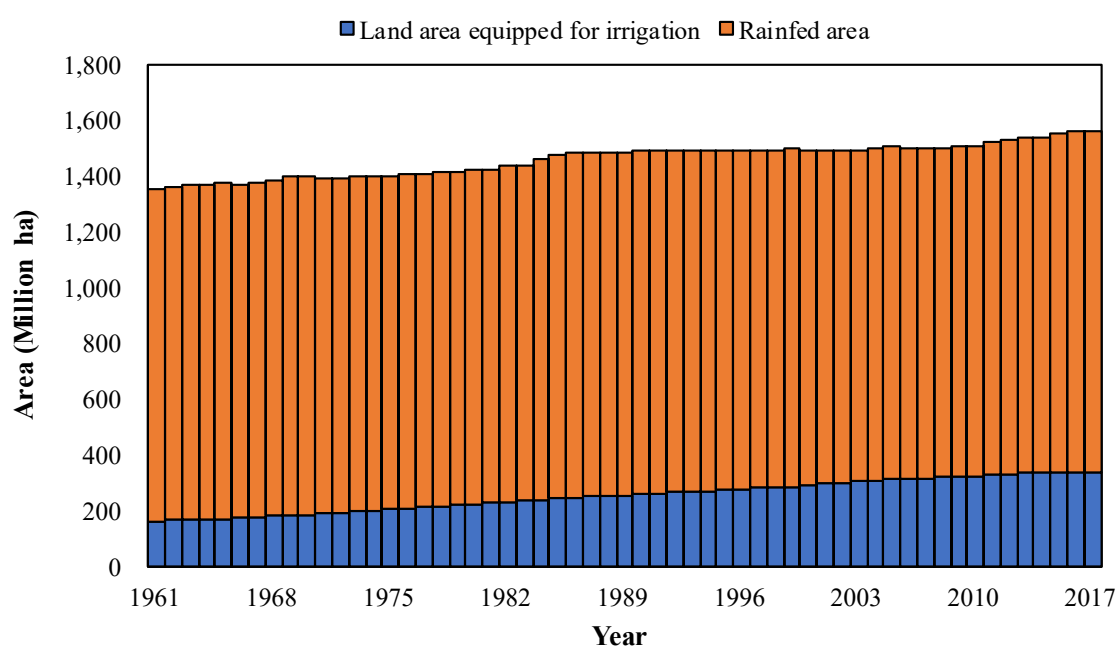
Trends in the world's undernourished population (2000 - 2018)

以上から、人口増加に応じた食料の確保と貧困・飢餓の終結は、依然として、人類共通の課題である。

1.3 灌漑農業

農業に水は必要不可欠であり、水が無ければ作物は育たない。農業と水との関係を考えてとき、世界の農業は天水農業と灌漑農業に分けることができる¹⁻¹⁰⁾。天水農業は水の供給を自然の降雨に依存するため、生産性が不安定である。一方、灌漑農業は、必要な時期に水を人為的に供給するため生産性が高い。世界の土地面積約 130 億 ha（2017 年）の内、農地面積（Cropland）は約 15.6 億 ha（約 12 %）であり、灌漑農地は約 3.4 億 ha で農地面積の約 22 %程度を占める。この灌漑農地では、世界の作物生産量の約 44 %，穀物生産量の 42 %を生産しており，特に開発途上地域では，作物生産量の約 49 %，穀物生産量の約 60 %を生産している¹⁻¹¹⁾。世界人口が急増した 1961 年から 2017 年までの 57 年間に，農地面積は 13.5 億 ha から 15.6 億 ha へと約 2.1 億 ha 増加したが，その内，灌漑農地は 1.6 億 ha から 3.4 億 ha へと約 1.8 億 ha も増加しており，増加した農地面積の約 86 %を占めている（Fig. 1-4）。また，灌漑に伴う水の使用量も過去 50 年間（1960 - 2010）に $650 \text{ km}^3\text{y}^{-1}$ か

ら $1,400 \text{ km}^3\text{y}^{-1}$ へと倍増したと推計されている¹⁻¹²⁾。以上から、灌漑農業の発展が過去 57 年間に達成された大幅な食料増産に大きく貢献してきたことが明らかである。仮に灌漑しなければ、ナツメヤシ、米、綿花、柑橘類、サトウキビの生産量が、それぞれ、60 %、39 %、38 %、32 %、31 %減少するとされており、また、灌漑農地での穀物生産は 47 %減少し、穀物生産量全体の 20 %が損失すると試算されている¹⁻¹³⁾。したがって、今後も灌漑の拡大と水管理の改善は、将来の食料安全保障を確保する上で非常に重要である。



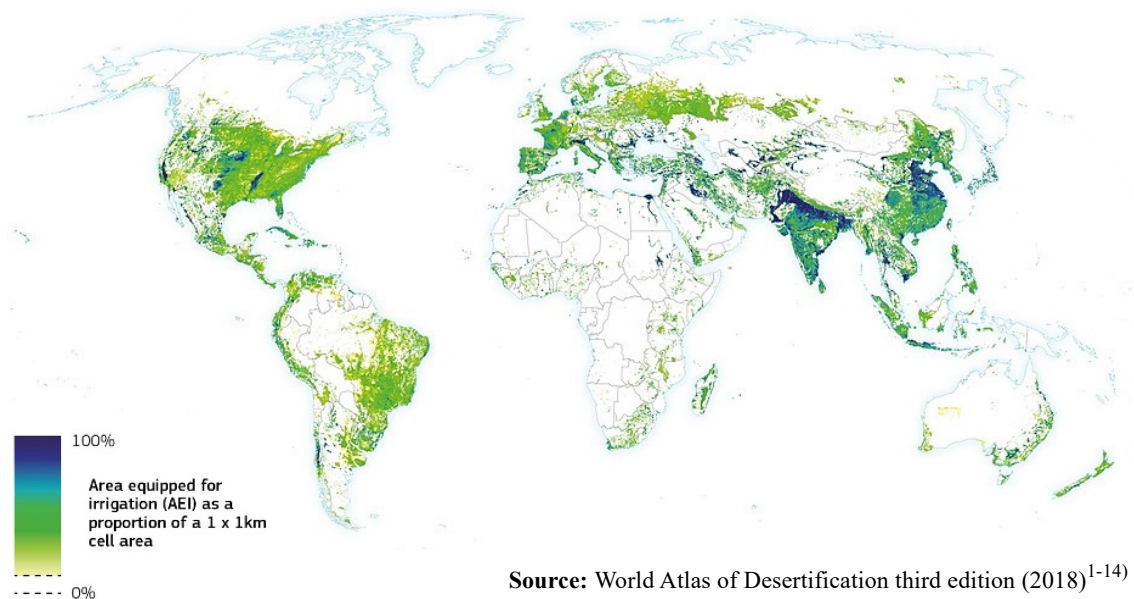
Source: FAOSTAT, Accessed date: 24th Sep, 2019

注) 天水面積は農地面積から灌漑面積を差し引いたものである

Fig. 1-4 世界の農地面積の推移 (1961 - 2017 年)

Changes in world cropland area (1961 - 2017)

灌漑は世界のほぼすべての国で行われており、灌漑農地は広範囲に分布している (Fig. 1-5)。特に、アジア大陸が約 71 %を占めており、人口密度が高く、一人当たりの農地面積が小さいインドおよび中国の割合が高い¹⁻¹⁴⁾。また、アラビア半島、イラン、中央アジア、北アフリカ、オーストラリア、北米西部などの乾燥・半乾燥地域においても、広く灌漑が行われている¹⁻¹³⁾。



Source: World Atlas of Desertification third edition (2018)¹⁻¹⁴⁾

Fig. 1-5 世界の灌漑農地の分布

Distribution of farmland area equipped for irrigation around the world

1.4 乾燥地域

乾燥地域では、降水量が少なく可能蒸発量・可能蒸発散量が多いため、水のひっ迫度が高く、元来、生産性が低い¹⁻¹⁵⁾。しかし、乾燥地域は日射が豊富であるため、水と肥料を十分に与えれば、生産性の向上が期待でき、農業の適地となる可能性がある¹⁻¹⁶⁾。乾燥地での安定的な作物栽培には灌漑が必須であり、世界の灌漑農地の約 60 %が乾燥地域に分布している¹⁻¹⁷⁾。

乾燥地の定義は様々であるが、ここでは、年間の降水量を可能蒸発散量で割った比の値である乾燥度指数 (Aridity Index: AI) を用いる。ミレニアム生態系評価 (Millennium Ecosystem Assessment: MA)¹⁻¹⁸⁾および欧州委員会 (European commission: EC) 共同研究センター (Joint Research Centre)¹⁻¹⁴⁾は、AI が 0.65 より低い地域を乾燥地として定義している。世界の乾燥地の面積は、地球上の総陸地面積 153 億 ha のうち、約 60.9 億 ha (約 40 %) を占めており、2000 年時点で約 21 億人 (2000 年時点) もの人々が生活している (Table 1-2)。

Table 1-2 乾燥地の面積と人口

Drylands area and population

Subtype	Aridity Index	Area		Dominant Broad Biome	Population	
		Size (mill km ²)	Share of Global (%)		Toal (thousand)	Share of Global (%)
Hyper-arid	<0.05	9.8	6.6	desert	101,336	1.7
Arid	0.05-0.20	15.7	10.6	desert	242,780	4.1
Semiarid	0.20-0.50	22.6	15.2	grassland	855,333	14.4
Dry subhumid	0.50-0.65	12.8	8.7	forest	909,972	15.3
Total		60.9	41.1		2,109,421	35.5

Source: Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005)¹⁻¹⁸⁾

乾燥地は、乾燥度指数によって、乾燥の激しい順から極乾燥 (Hyper-arid)、乾燥 (Arid)、半乾燥 (Semiarid)、乾燥亜湿潤 (Dry sub humid) に分類される。年間降水量の目安は、おおよそ、極乾燥・乾燥地域は 200 mm 以下、半乾燥地域は 200 - 800 mm、乾燥亜湿潤は 800 - 1,500 mm に対応する¹⁻¹⁹⁾。

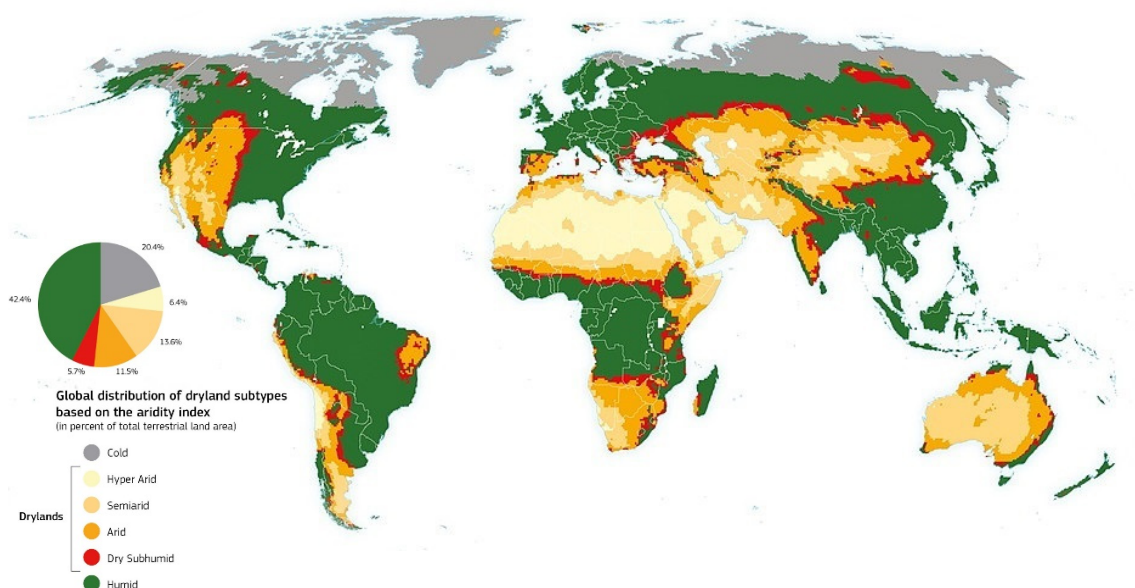
Source: World Atlas of Desertification third edition (2018)¹⁻¹⁴⁾

Fig. 1-6 世界の乾燥地の分布

Distribution of drylands around the world

乾燥地は、世界の砂漠を取り巻くように広がり、アフリカの開発途上地域に多くみられるが、アメリカ西部やオーストラリアなどの先進国にも分布している¹⁻²⁰⁾ (Fig. 1-6)。

乾燥地の土地利用は、極乾燥から乾燥は放牧地が主体であり、特に極乾燥では、遊牧やオアシス農業などの限られた生活が営まれている。半乾燥、乾燥亜湿潤へと降水量が増えるに従い、耕地、特に天水農業が増加する¹⁻²⁰⁾。

Table 1-3 乾燥地における土地利用

Land use in drylands

Subtype	Rangeland		Cultivated		Urban		Others	
	Area	Share of	Area	Share of	Area	Share of	Area	Share of
	(km ²)	Dryland Subtypes (%)	(km ²)	Dryland Subtypes (%)	(km ²)	Dryland Subtypes (%)	(km ²)	Dryland Subtypes (%)
Hyper-arid	9,497,470	97	55,592	0.6	74,050	1	149,026	2
Arid	13,629,625	87	1,059,648	7	152,447	1	822,075	5
Semiarid	12,170,274	54	7,992,020	35	556,515	2	1,871,146	8
Dry subhumid	4,344,897	34	6,096,558	47	457,851	4	1,971,907	16
Total	39,642,266	65	15,203,818	25	1,240,863	2	4,814,154	8

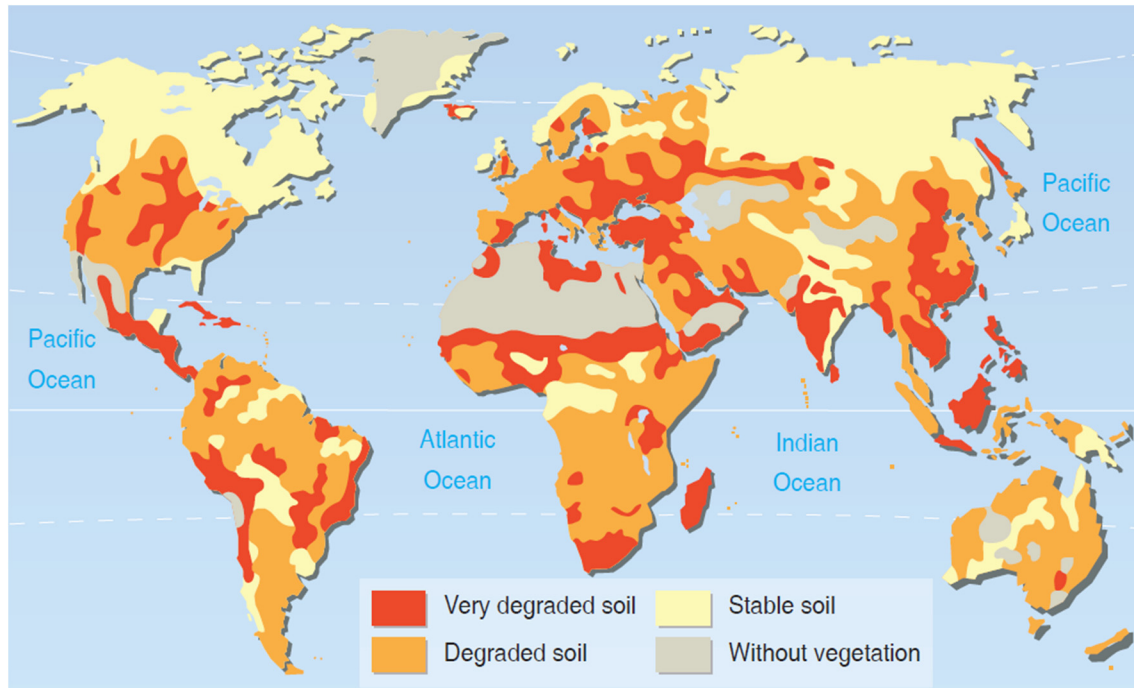
Source: Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005)¹⁻¹⁸⁾

半世紀前まで、乾燥地面積は 47 億 ha (約 30 %) とされており、極乾燥、乾燥、半乾燥の 3 分類であった。ここでの乾燥地面積の増大は、新しい乾燥地定義に基づく乾燥亜湿潤の追加と、20 世紀の急速な人間社会の発展に伴う乾燥地の砂漠化に起因するものと推察される¹⁻²¹⁾。

1.5 土壌劣化

生産性の高い農地は、食料安全保障を確保する上で重要な土地資源であるが、その一部では土壌（土地）の劣化が生じ、生産性が低下している。土壌劣化は「不十分な土壌および水の管理」、「森林の伐採」、「自然植生の除去」、「重機の頻繁な使用」、「過放牧」、「不適切な輪作」、「粗放な灌漑」といった人間活動と、「干ばつ」、「洪水」、「地滑り」などの自然災害によって引き起こされる¹⁻²²⁾。このような土壌の劣化は、貯水池の堆積や二酸化炭素の排出など、農業区域外にも影響を及ぼしている¹⁻⁵⁾。国連は 1992 年の地球サミット（国連環境開発会議: UNCED）において、土壌劣化の対策が開発途上地域の貧困・飢餓撲滅に

不可欠であるとの合意形成から、行動計画であるアジェンダ 21¹⁻²³⁾において、砂漠化の防止と持続可能な農業開発の推進を定めている¹⁻²⁴⁾。また、国連環境計画（UNEP）は 1990 年代に世界の土壌劣化の現状をとりまとめ、世界の土壌劣化図（Fig.1-7）および土壌劣化の要因と程度（Table 1-4）を公表している¹⁻²⁵⁾。



Source: UNEP, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC),
World Atlas of Desertification (1997), Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arendal

Fig. 1-7 世界の土壌劣化

Distribution of soil degradation area around the world

世界の多くの地域で土壌劣化が生じており、その面積は約 20 億 ha に及ぶ。水食（約 10.9 億 ha）および風食（約 5.5 億 ha）による劣化が大きく、塩類集積を含む化学的劣化は 2.4 億 ha、物理的劣化は 0.8 億 ha である¹⁻²⁵⁾。

Table 1-4 土壌劣化の要因と程度

Factors and extent of soil degradation

	(Million ha)			
	Light	Moderate	Strong and Extreme	Total
Water	343	527	224	1,094
Wind	269	254	26	549
Chemical degradation	93	103	43	239
Loss of nutrients	52	63	20	135
Salinization	35	20	21	76
Pollution	4	17	1	22
Acidification	2	3	1	6
Physical degradation	44	27	12	83
Total	749	911	305	1,965

Source: Global Extent of Soil Degradation (1991)¹⁻²⁵⁾

次に、土地利用毎の土壌劣化面積の推計を Table 1-5 に示す。

Table 1-5 世界の土壌劣化面積の推計

Soil degradation area for each land use

	(Million ha)											
	Crop land			Permanent pasture			Forest and woodland			Total		
	Total	Degraded	%	Total	Degraded	%	Total	Degraded	%	Total	Degraded	%
Africa	187	121	65	793	243	31	683	130	19	1,663	494	30
Asia	536	206	38	978	197	20	1,273	344	27	2,787	747	27
S. America	142	64	45	478	68	14	896	112	13	1,516	244	16
C. America	38	28	74	94	10	11	66	25	38	198	63	32
N. America	236	63	27	274	29	11	621	4	1	1,131	96	8
Europe	287	72	25	156	54	35	353	92	26	796	218	27
Oceania	49	8	16	439	84	19	156	12	8	644	104	16
World	1,475	562	38	3,212	685	21	4,048	719	18	8,735	1,966	23

Source: Global Extent of Soil Degradation (1991)¹⁻²⁵⁾

劣化面積は、森林の約 7.2 億 ha が最も大きく、農地は約 5.6 億 ha である。農地の劣化は、アジアおよびアフリカ大陸で激しく、オセアニア大陸では小さい。乾燥地での土壌劣化は、約 36 億 ha（極乾燥地を除く）と推定されている。そのうち、人為的要因による劣化は約 10 億 ha であり、灌漑農地が 0.4 億 ha を占めている¹⁻²⁶⁾ (Table 1-6)。このような劣化した土地が、農村地域に居住する 15 億人もの人々の生活を支えている¹⁻²⁷⁾。

Table 1-6 乾燥地における土壌劣化面積の推計

Soil degradation area in dryland

(Million ha)		
	Degraded Area	% of total drylands
Human-induced soil degradation in dryland		
Irrigated lands	43	0.8
Rainfed lands	216	4.2
Rangelands	777	14.6
Total	1,036	19.5
Vegetation degradation without recorded of soil degradation		
Rangelands	2,556	50.0
Total	2,556	50.0
Total degraded drylands	3,592	69.5
Non-degraded drylands	1,580	30.5
Total area of drylands	5,172	100.0

*Hyper and deserts are excluded from further consideration as not being subject to desertification

Source: Desertification Control Bulletin, No.20 (1991)¹⁻²⁶⁾

1.6 塩類集積

化学的な土壌劣化の一つである塩類集積とは、可溶性の塩が土壌に蓄積することである¹⁻²⁸⁾。塩類集積は生産性の低下に関与する主要な非生物的ストレスのひとつであり、ここ数十年で農地の塩類集積が劇的に増加している¹⁻²⁹⁾。特に、降水量が少なく規則的な降水の土壌への浸透を維持できない乾燥地域での塩類集積が顕著である¹⁻³⁰⁾。また、乾燥地では、土壌に塩類が集積する前兆の段階であっても、植物の生長が阻害される¹⁻³¹⁾。

塩類土壌 (Salt affected soil) は、集積する塩の量と組成により塩性土壌 (Saline soil) とソーダ質土壌 (Sodic soil) に分類される¹⁻¹⁶⁾。土壌溶液 (飽和抽出液) の電気伝導度 (Electrical Conductivity: EC_e)、土壌溶液 (飽和抽出液) のナトリウム吸着比 (Sodium Adsorption Ratio: SAR)、交換性ナトリウム率 (Exchangeable Sodium Percentage: ESP, %) による塩類土壌の分類を Table 1-7 に示す¹⁻³²⁾。また、塩類集積の程度は土壌溶液 (飽和抽出液) の電気伝導度 (EC_e) によって区分されている¹⁻³³⁾ (Table 1-8)。

Table 1-7 塩類土壌の分類
Classification of salt affected soil

Class	EC _e (dS m ⁻¹)	SAR	ESP (%)
Normal	< 4.0	< 13.0	< 15.0
Saline	≥ 4.0	< 13.0	< 15.0
Sodic	< 4.0	≥ 13.0	≥ 15.0
Saline-Sodic	≥ 4.0	≥ 13.0	≥ 15.0

Source: Soil Salinity, Testing Data Interpretation and Recommendations (2015)¹⁻³²⁾

Table 1-8 EC_e による塩類化程度の区分
Soil salinity level by soil EC_e

Soil Salinity level	EC _e (dS/m)	Effect on Crop Plants
Non-saline	< 2	Salinity effects are negligible
Slightly	2 - 4	Yields of sensitive crops may be restricted
Moderately	4 - 8	Yields of many crops are restricted
Highly	8 - 16	Only the yields of tolerant crops are satisfactory
Extremely	> 16	Only yields of very tolerant crops are satisfactory

Source: Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas,
Irrigation and drainage paper No. 61 (FAO, 2002)¹⁻³³⁾

塩類化土壌の面積推計は、著者によって様々であるが、一般的に、約 10 億 ha 程度であり、地球の陸地面積の約 7 %に相当する。以下に、塩類土壌の推計面積の例を示す。

Szabolcs は 1979 年に発表した「Review of research on salt-affected soil¹⁻³⁴⁾」において、世界の塩類土壌の面積を 9.3 億 ha（塩性土壌約 3.5 億 ha，ソーダ質土壌約 5.8 億 ha）と推計している（Table 1-9）。

Table 1-9 塩類土壌の地域別面積 (Szabolcs)

Area of salt affected soil by region

				(thousand ha)			
Area	Saline	Alkaline	Total	Area	Saline	Alkaline	Total
North America				South Asia			
Canada	264	6,974	7,238	Afghanistan	3,101	0	3,101
United State of America	5,927	2,590	8,517	Bangladesh	2,479	538	3,017
Total	6,191	9,564	15,755	Burma	634	0	634
Mexico and Central America				India	23,222	574	23,796
Cuba	316	0	316	Iran	26,399	686	27,085
Mexico	1,649	0	1,649	Iraq	6,726	0	6,726
Total	1,965	0	1,965	Israel	28	0	28
South America				Jordan	180	0	180
Argentina	32,473	53,139	85,612	Kuwait	209	0	209
Bolivia	5,233	716	5,949	Muscat and Oman	290	0	290
Brazil	4,141	362	4,503	Pakistan	10,456	0	10,456
Chile	5,000	3,642	8,642	Qatar	255	0	255
Colombia	907	0	907	Sarawak	1,538	0	1,538
Ecuador	387	0	387	Saudi Arabia	6,002	0	6,002
Paraguay	20,008	1,894	21,902	Sri Lanka	200	0	200
Peru	21	0	21	Syrian Arab Republic	532	0	532
Venezuela	1,240	0	1,240	United Arab Emirates	1,089	0	1,089
Total	69,410	59,753	129,163	Total	83,340	1,798	85,138
Africa				North and Central Asia			
Afars and Issas	1,741	0	1,741	China	36,221	437	36,658
Algeria	3,021	129	3,150	Mongolia	4,070	0	4,070
Angola	440	86	526	Solomon Island	238	0	238
Botswana	5,009	670	5,679	U.S.S.R.	51,092	119,628	170,720
Chad	2,417	5,850	8,267	Total	91,621	120,065	211,686
Egypt	7,360	0	7,360	South-East Asia			
Ethiopia	10,608	425	11,033	Democratic Kampuchea	1,291	0	1,291
Gambia	150	0	150	Indonesia	13,213	0	13,213
Ghana	200	118	318	Malaysia	3,040	0	3,040
Guinea	525	0	525	Socialist Republic of Viet Nam	983	0	983
Guinea-Bissau	194	0	194	Thailand	1,456	0	1,456
Kenya	4,410	448	4,858	Total	19,983	0	19,983
Liberia	362	44	406	Australasia			
Libyan Arab Jamahiriya	2,457	0	2,457	Australia	17,269	339,971	357,240
Madagascar	37	1,287	1,324	Fiji	90	0	90
Mali	2,770	0	2,770	Total	17,359	339,971	357,330
Mauritania	640	0	640	Europe			
Morocco	1,148	0	1,148	Austria	1	0	1
Namibia	562	1,751	2,313	Bulgaria	5	20	25
Niger	0	1,389	1,389	Czechoslovakia	6	15	21
Nigeria	665	5,837	6,502	France	175	75	250
Rhodesia	0	26	26	Greece	0	0	0
Senegal	765	0	765	Hungary	2	385	386
Sierra Leone	307	0	307	Italy	50	0	50
Somalia	1,569	4,033	5,602	Portugal	0	0	0
Sudan	2,138	2,736	4,874	Romania	40	200	240
Tunisia	990	0	990	Spain	0	0	0
United Republic of Cameroon	0	671	671	U.S.S.R.	7,546	21,998	29,544
United Republic of Tanzania	2,954	583	3,537	Yugoslavia	20	235	255
Zaire	53	0	53	Total	7,844	22,927	30,771
Zambia	0	863	863	Total	351,205	581,024	932,229
Total	53,492	26,946	80,438				

*U.S.S.R: Union of Soviet Socialist Republics

Source: Review of research on salt-affected soil (1979)¹⁻³⁴⁾

FAO による世界土壌地図 (FAO, UNESCO, 1970 - 1980) を用いた推計では、塩類土壌の面積を約 8.3 億 ha (塩性土壌約 4.0 億 ha, ソーダ質土壌約 4.3 億 ha) としている¹⁻³⁵⁾ (Table 1-10)。この推計では、地球の陸地面積の約 6.5 %が塩類化していることになる。いずれの面積推計においても、アジア大陸の占める割合が大きい。

Table 1-10 塩類土壌の地域別面積 (FAO)

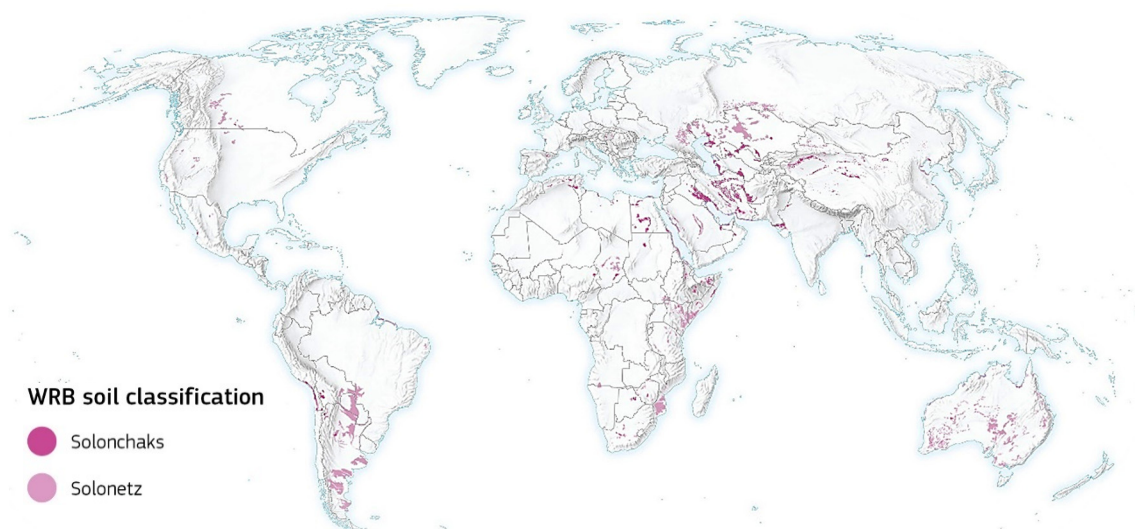
Area of salt affected soil by region

Regions	Total area	(million ha)			
		Saline soils		Sodic soils	
		Area	Ratio (%)	Area	Ratio (%)
Africa	1,899.1	38.7	2.0	33.5	1.8
Asia and the pacific and australia	3,107.2	195.1	6.3	248.6	8.0
Europe	2,010.8	6.7	0.3	72.7	3.6
Latin America	2,038.6	60.5	3.0	50.9	2.5
Near East	1,801.9	91.5	5.1	14.1	0.8
North America	1,923.7	4.6	0.2	14.5	0.8
Total	12,781.3	397.1	3.1	434.3	3.4

*Figures included arable and non arable soils.

Source: Land and Plant Nutrition Management Service (FAO)¹⁻³⁵, Accessed date: 10th Nov, 2019

旧ソ連などによる塩類土壌の分類に、ソロンチャック (Solonchaks) とソロネッツ (Solonetz) がある。ソロンチャックは、1 年のうちのある時期に高濃度の可溶性塩を含む土壌で、主に乾燥および半乾燥気候帯と沿岸地域に存在する¹⁻³⁶⁾。ソロネッツは、吸着されたナトリウム (Na) またはマグネシウム (Mg) イオンの割合が高く、緻密で強い粘土質土壌であり、炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) を含む場合に強アルカリ性を示す。ソロネッツは、主に草原気候 (乾燥した夏と 400 - 500 mm 以下の年間降水量) で排水が不十分な平坦な土地に存在する¹⁻³⁶⁾。前者が塩性土壌、後者がソーダ質および塩性ソーダ質土壌に対応している¹⁻³⁷⁾。ソロンチャックは主に北半球、特にアフリカ北部の乾燥および半乾燥地域、中東、旧ソビエト連邦、中央アジアに分布し、オーストラリアとアメリカにも広く分布している (Fig. 1-8)。ソロネッツは、ウクライナ、ロシア連邦、カザフスタン、ハンガリー、ブルガリア、ルーマニア、中国、アメリカ、カナダ、南アフリカ、アルゼンチン、オーストラリアに分布している (Fig. 1-8)。FAO が 2006 年に発表した「World reference base for soil resources¹⁻³⁶⁾」によれば、世界のソロンチャックの面積は約 2.6 億 ha、ソロネッツの面積は約 1.4 億 ha と推計されている。



Source: World Atlas of Desertification third edition (2018)¹⁻¹⁴⁾

Fig. 1-8 世界の塩類化土壌の分布

Distribution of salinity soil around the world

塩類集積による被害が大きい地域として、中央アジアのアラル海流域（アムダリア川およびシルダリア川流域）、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、シリアと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・バレーなどがある。

塩類集積の増加が農業に及ぼす影響は大きく、1年間に失われる農地面積は、少なく見積もって16 - 30万ha、大きく見積もって150万haであり、生産性が低下している農地は2,000 - 4,600万haと推計されている¹⁻³⁸⁾。また、ある推計では、塩類集積によって、2028年までに農地の30%、2050年までに最大で農地の50%が失われるとしている¹⁻³⁹⁾。国際農業研究グループ（CGIAR）とFAOの見積もりは厳しく、毎年、約150万haの農地が塩類集積によって耕作放棄されていると推計している¹⁻⁴⁰⁾。

塩類集積は作物の収量に悪影響を及ぼすが、その程度は作物によって異なる。作物収量と灌漑水の塩濃度（EC_w）および土壌塩分（EC_e）との関係（0、10、25、50%まで収量を減少させる値と、栽培に耐え得る最大値）をTable 1-11に示す¹⁻⁴¹⁾。綿花や小麦などは耐塩性が高く、大根、玉ねぎ、人参などは耐塩性が低い。

Table 1-11 作物の耐塩性

Salt tolerance of crops

Crop	Salinity (dS m ⁻¹)								
	0%		10%		25%		50%		Max
	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e
Barley ⁴⁾ (<i>Hordeum vulgare</i>)	8.0	5.3	10.0	6.7	13.0	8.7	18.0	12.0	28.0
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27.0
Sugar beet ⁵⁾ (<i>Beta vulgaris</i>)	7.0	4.7	8.7	5.8	11.0	7.5	15.0	10.0	24.0
Wheat ^{4),5)} (<i>Triticum aestivum</i>)	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13.0	8.7	20.0
Safflower (<i>Carthamus tinctorius</i>)	5.3	3.5	6.2	4.1	7.6	5.0	9.9	6.6	14.5
Soybean (<i>Glycine max</i>)	5.0	3.3	5.5	3.7	6.2	4.2	7.5	5.0	10.0
Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.2	18.0
Groundnut (<i>Arachis hypogaea</i>)	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.5
Rice (<i>Oryza sativa</i>)	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11.5
Corn (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Broad bean (<i>Vicia faba</i>)	1.6	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12.0
Cowpea (<i>Vigna sinensis</i>)	1.3	0.9	2.0	1.3	3.1	2.1	4.9	3.2	8.5
Beans (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.5
Beets ⁵⁾ (<i>Beta vulgaris</i>)	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15.0
Broccoli (<i>Brassica oleracea italica</i>)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	13.5
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	12.5
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i>)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10.0
Cantaloupe (<i>Cucumis melo</i>)	2.2	1.5	3.6	2.4	5.7	3.8	9.1	6.1	16.0
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15.0
Cabbage (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12.0
Potato (<i>Solanum tuberosum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Sweet corn (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Sweet potato (<i>Ipomea batatas</i>)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	10.5
Pepper (<i>Capsicum frutescens</i>)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.5
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.2	3.4	9.0
Radish (<i>Raphanus sativus</i>)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	9.0
Onion (<i>Allium cepa</i>)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.5
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.1	8.0
Beans (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.5

Source: Water quality for agriculture, Irrigation and drainage paper No.29 (FAO,1994)¹⁻⁴¹⁾Accessed date: 11th Nov, 2019

塩類集積は発生の過程によって「一次的」と「二次的」の二つに分けられる。一次的塩類集積は塩湖、塩性湿地、干潟など自然に生じるものであり、二次的塩類集積は都市化や農業（灌漑）といった人間活動によって引き起こされるものである¹⁻⁴²⁾。Metternicht らは、世界で生じている一次的塩類集積の面積を約 9.6 億 ha、二次的塩類集積の面積を約 0.8 億 ha と推計し、二次的塩類集積のうち、約 58 % (約 0.4 億 ha) が灌漑農地で生じているとしている¹⁻⁴³⁾。また、この面積は全灌漑農地の 20 % 近くに及んでおり、様々な対策が行われているにも関わらず、増加傾向にあるとしている¹⁻⁴³⁾。一方、FAO は、灌漑に起因する塩類化面積を大陸毎に推計し、世界全体で約 0.3 億 ha としている¹⁻⁴⁴⁾ (Table 1-12)。

Table 1-12 灌漑による塩類化土壌の地域別面積

Area salinized by irrigation per region

Region	Area (Mill ha)
South Asia	10.30
East Asia	6.70
Western Asia	6.12
Northern America	5.34
Central Asia	3.21
Southern America	0.95
Sub-Saharan Africa	0.68
Northern Africa	0.68
Australia and New Zealand	0.20
Total	34.19

AQUASTAT, different years.

Source: Agriculture and water quality interactions, a global overview (2011)¹⁻⁴⁴⁾

また、塩類化面積が大きい国として、パキスタン、中国、アメリカ、インド、ウズベキスタンなどを挙げている¹⁻⁴⁴⁾ (Table 1-13)。灌漑に起因する塩類集積の世界分布を Fig. 1-9 に示す。

FAO は、毎年、1 - 2 %の灌漑農地が塩類集積によって失われており、その影響は、特に乾燥地域で大きいとしている¹⁻⁴⁵⁾。

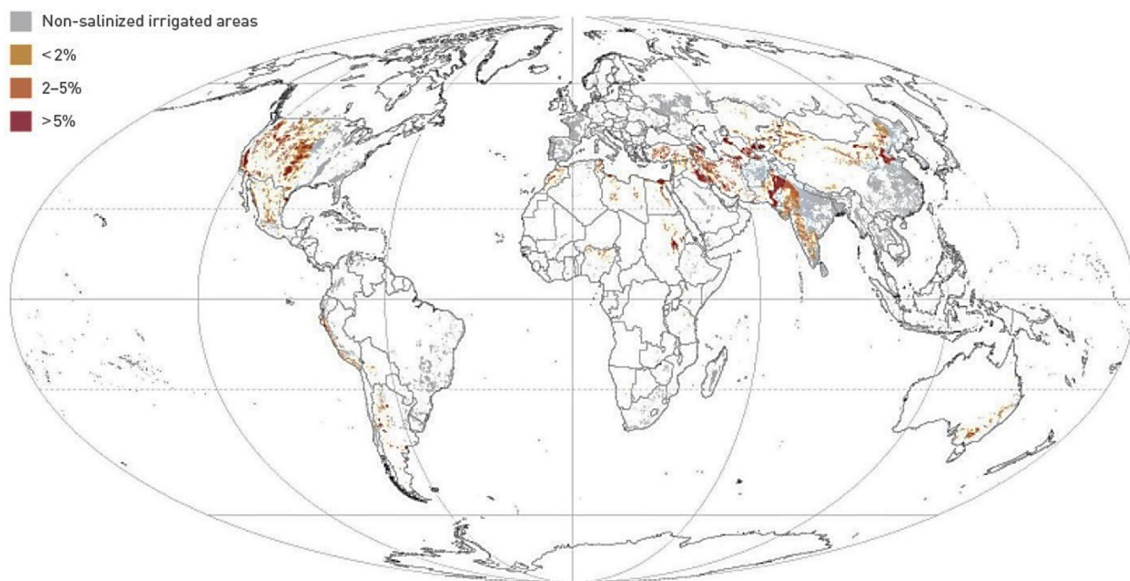
Table 1-13 灌漑による塩類化土壌の面積が大きい国

Countries with the largest areas salinized by irrigation

Country	Area (Mill ha)
Pakistan	7.00
China	6.70
United States of America	4.90
India	3.30
Uzbekistan	2.14
Iran (Islamic Republic of)	2.10
Iraq	1.75
Turkey	1.52

AQUASTAT different years and Ghassemi (1995)

Source: Agriculture and water quality interactions, a global overview (2011)¹⁻⁴⁴⁾



Source: The State of The World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (2011) ¹⁻⁵⁾

Fig. 1-9 灌漑による塩類化土壌の分布

Distribution of salinity soil by irrigation

塩類集積による収量の低下は、経済的な損失も大きい。灌漑農地を約 3.1 億 ha, その内、約 20 % (約 0.6 億 ha) において塩類集積が生じていると想定したとき、273 億ドルの経済損失が生じると試算されている ¹⁻⁴⁶⁾。しかし、この試算は、収量損失のみを考慮したものであり、実際の経済損失は、さらに大きいものと考えられる。

乾燥地の灌漑農業で生じる塩類集積の過程を以下に示す。①多くの乾燥地域の灌漑水は塩分を含んでおり、灌漑によって塩分が農地に流入する。②灌漑に伴って地下水位が上昇し、上層土層の塩分が溶脱することで地下水の塩分濃度が上昇する。③排水不良などを要因に地下水位が地表面付近にまで上昇すると、毛管現象により地下水が地表面へ移動する。④地表面へ移動した地下水は、塩分を残して蒸発する (Fig. 1-10)。この地表面に残った塩分をリーチング等で除去しなければ、塩類が集積していく ¹⁻⁴⁷⁾。

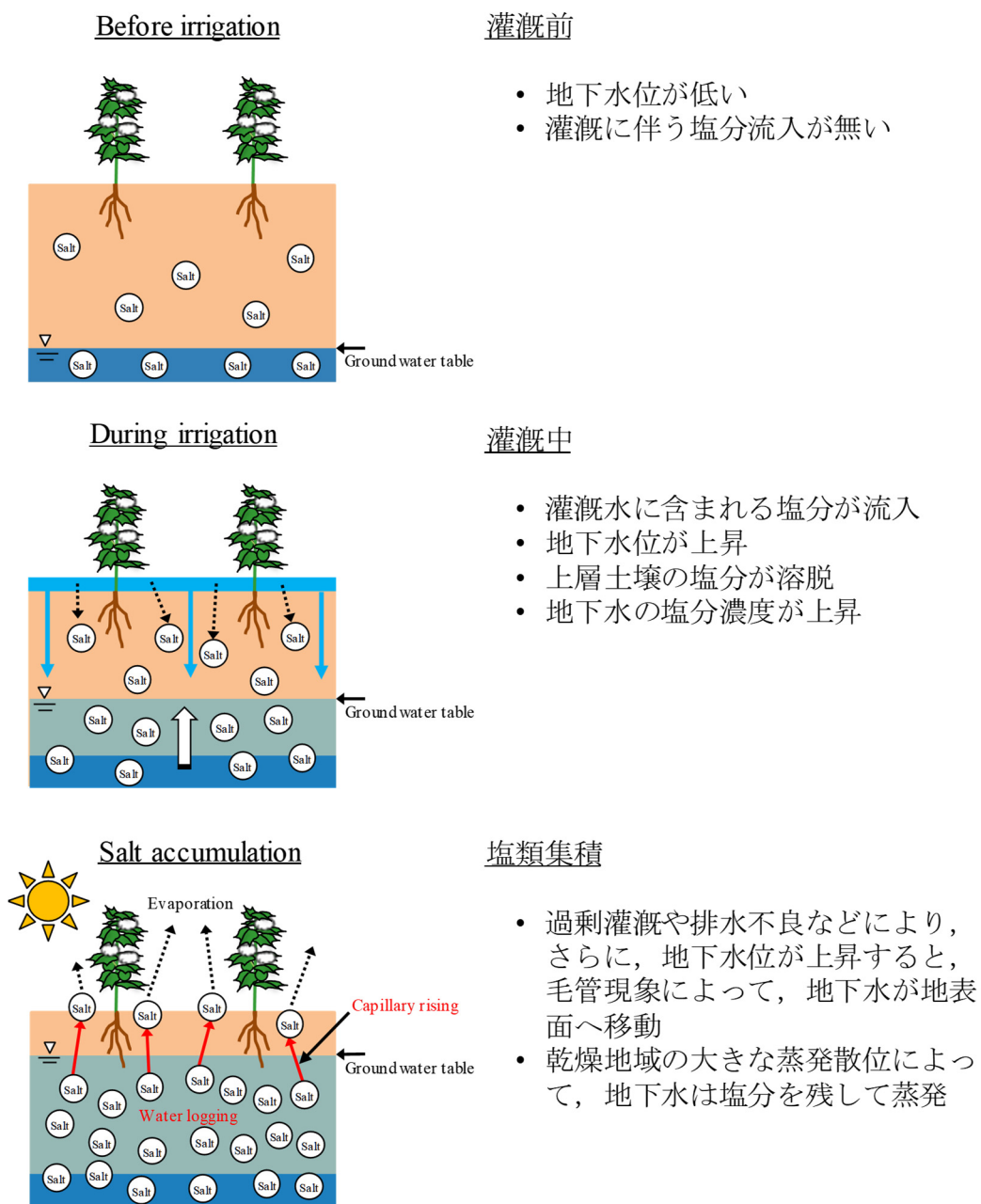


Fig. 1-10 乾燥地での灌漑農業に伴う塩類集積の過程

Process of salt accumulation by irrigation agriculture in dry land

これまで、塩類集積について、世界中で様々な研究が行われてきたが、その対策は、塩類の集積を抑制する予防策と集積した塩分を取り除く除塩策に分類できる。予防策は、節水、排水機能の確保（明渠・暗渠・ポンプ排水などの整備）、マルチングなどがあり、除塩策は、リーチング、ソーダ質土への石膏散布、Dehydration 法などがある¹⁻⁴⁸⁾ (Table 2-2)。

Table 1-14 塩類集積対策

Measures against salt accumulation

予 防	除 塩
節水 用水路のライニング 排水機能の改善 排水路（明渠）の整備 暗渠排水の埋設 垂直排水などのポンプ排水の整備 生物的排水 用水路と排水路の分離 マルチング 深耕 キャピラリーバリア 海水の飛散侵入への防潮堤や防風林	水資源が豊富な場合 地表面付近の塩分を多量の水で除去（表面流出除去法） 圃場に湛水し、塩分が溶出してから明渠に除去（表面溶出排水法） 水資源が乏しい場合 塩クラストや高塩分土層を除去（表面剥離法、スクレイピング法） シートや布に塩分を吸着除去（Dehydration法、塩吸着捕獲除去法） 集積塩分をピンポイントで節水吸引にて除去（表層吸引溶脱法） その他 石膏散布（ソーダ質土）などの土壌改良 生物的除塩技術（ファイトレメディエーション）

Source: 塩類化の現状と除塩技術¹⁻⁴⁸⁾より筆者作成

灌漑農業の発展は、人口増加に応じた食料生産を確保する上で非常に重要な役割を果たしてきた。しかしながら、乾燥地域での集中的な灌漑がもたらした塩類集積による減収は、今後も増加が見込まれる世界人口を養っていく上で、深刻な問題である。

1.7 研究の目的

世界人口が増加の一途を辿るなか、生産性の高い灌漑農業は、世界の食料安全保障に大きく貢献しており、今後も重要な役割を担うと考えられる。しかし、農業生産を安定化する上で灌漑が必須である乾燥・半乾燥地域では、灌漑農業に起因する塩類集積（二次的塩類集積）が生じており、農業生産に悪影響を及ぼしている。これまで、塩類集積へ対し、様々な対策が施されてきたが、依然として、塩類化した農地面積は増加傾向にあり、特に、灌漑・排水施設や水管理体制が不十分な開発途上地域での被害が深刻になっている。

二次的塩類集積の主な要因は、①灌漑水からの塩分流入と、②過剰灌漑や排水不良に伴う地下水位の上昇である（Fig. 1-11）。有効な対策として、「スプリンクラ灌漑や点滴灌漑の導入による節水」、「排水路の造成や暗渠の埋設などによる排水改良」などが挙げられる。しかし、これらは、綿密な設計や初期投資、そして、導入後の維持管理費が必要となるため、開発途上地域の農家による導入が困難である。

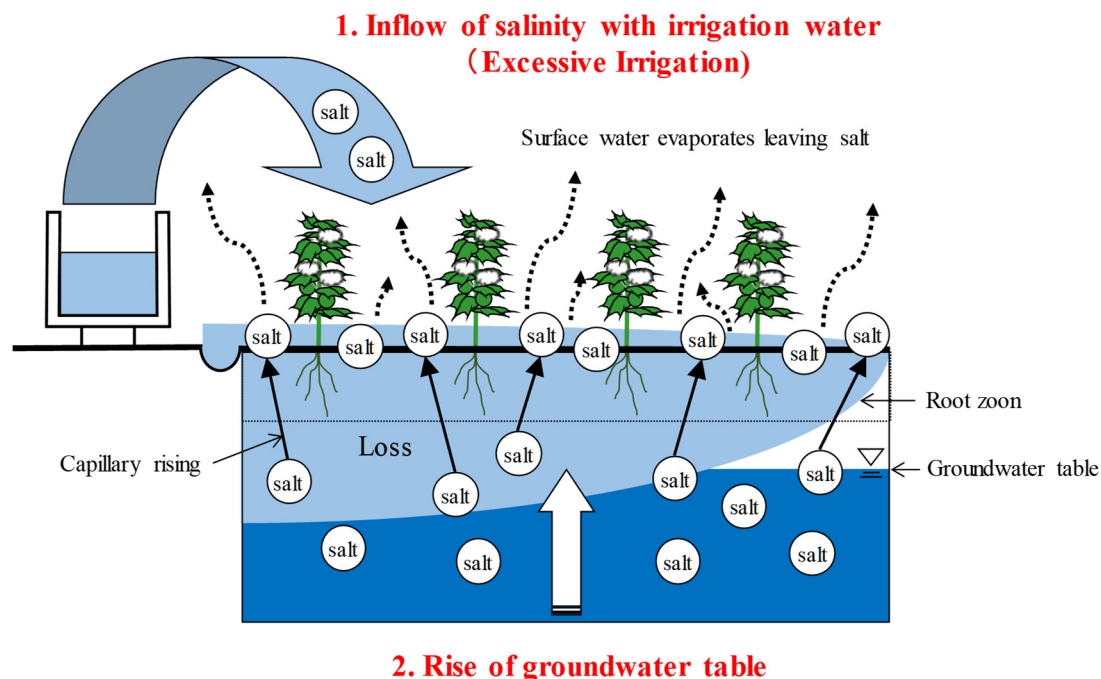


Fig. 1-11 灌漑農地における二次的塩類集積の主要因

Main cause of secondary salinization in irrigated farmland

そこで、本研究では、開発途上地域の農家が営農活動の一環として持続的に取り組める対策であることを念頭に、新たな資金や大幅な労力の増加を伴わない技術の検討に焦点を当てることとした。研究対象地域は、二次的塩類集積が顕著な中央アジアのウズベキスタン共和国（以下、ウズベキスタン）とし、ウズベキスタンで広く用いられている畝間灌漑を改良することによる低コストの「節水」および「除塩」を検討した。

農林水産研究では、元来、基礎的な研究が期待されている大学においても、広く農家に使われることを意識した「生産現場に近い研究開発」が求められている。本研究での成果を最大化し、社会実装を実現するためには、農家への周知等、幅広い活用に向けた努力が必要である。緑の革命が最も典型的に進行したとされるインドのパンジャブ州では、パンジャブ農業大学を中心とした生産現場に近い研究開発と普及体制が構築されており、インド農業の発展に大きく貢献している。このことから、パンジャブ農業大学の研究開発および普及体制を分析し、ウズベキスタンでの社会実装の実現に向けた組織体制を検討した。

1.8 本論文の構成と概要

第 2 章では、まず、本研究の対象地域であるウズベキスタンの概要を説明し、その後、農業、灌漑、塩類集積の現状と対策、そして、研究開発の状況を論述する。最後に、試験圃場を設定したシルダリア州の状況と試験圃場の土壌条件について説明する。

第 3 章では、畝間に間断的に給水することによって節水効果を得るサージフロー法と、低コスト化を図るためにサージフロー法を極めて簡素化した簡易サージフロー法について説明する。その後、簡易サージフロー法を適用した圃場試験の内容を説明し、試験で得られた結果から、節水効果を考察する。

第 4 章では、畝間ひとつおきに通水することで節水効果を得る隔畝間灌漑法について説明する。その後、隔畝間灌漑法を適用した圃場試験の内容を説明し、試験で得られた結果から、節水効果を考察する。

第 5 章では、上述の簡易サージフロー法と隔畝間灌漑法を組み合わせ適用した圃場試験の内容を説明し、試験で得られた結果から、両技術を組み合わせることによる節水効果を考察する。

第 6 章では、乾燥地域の大きな蒸発散位を利用して土壌の塩分を除去する Dehydration 法について説明する。その後、Dehydration 法による除塩性能を検討した室内試験の内容を説明し、室内試験で得られた結果を考察する。また、Dehydration 法と隔畝間灌漑法とを組み合わせた圃場試験の内容を説明し、試験で得られた結果から、除塩効果を考察する。

第 7 章では、生産現場に近い研究開発と普及体制を構築しているインドのパンジャブ農業大学の研究開発および普及体制について分析した結果を説明し、ウズベキスタンでの社会実装に向けた組織体制について考察する。

第 8 章では、ウズベキスタンでの圃場試験で得られた結果を総合的に考察し、簡易サージフロー法、隔畝間灌漑法、そして、Dehydration 法の有用性と現地での適用に向けた、今後の課題を論述する。

第2章 研究対象地域（ウズベキスタン）

2.1 ウズベキスタンの概要

ウズベキスタンはユーラシア大陸の内奥に位置し、すべての中央アジア国（カザフスタン、キルギス、タジキスタン、トルクメニスタン）およびアフガニスタンと国境を接する。国境を接する国は海に面しておらず、世界でも稀な「二重内陸国」である。12 の州（アンディジャン、ブハラ、ジザク、カシカダリヤ、ナボイ、ナマンガン、サマルカンド、スルハンダリア、シルダリア、タシケント、フェルガナ、ホラズム）と1つの自治共和国（カラカルパクスタン自治共和国）で構成されている。

国土面積は約 45 万 km²（日本の約 1.2 倍）で、北西部には国土の約 60%を占める砂漠とステップの乾燥地域が広がっている。南東部および東部には、パミール高原や天山山脈から続く、急峻な山間部と山麓平野部がある²⁻¹⁾。気候は気温の年較差・日較差が大きい乾燥大陸性気候である。ウズベキスタンの北側にシルダリア川、南側にアムダリア川がアラル海へ流下している。

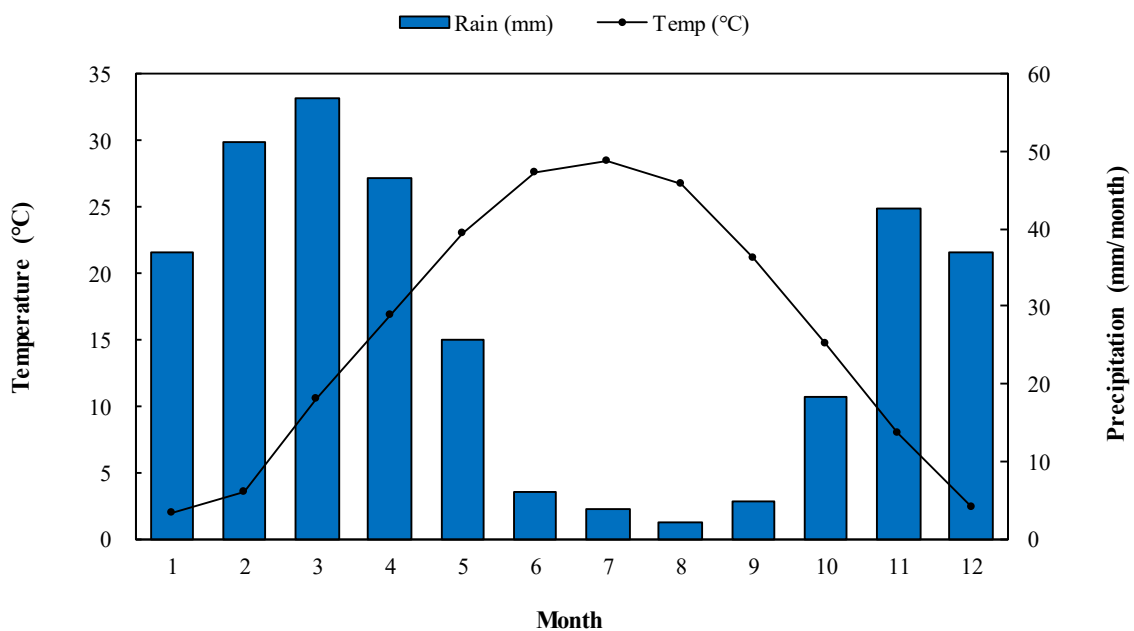


Fig. 2-1 ウズベキスタン共和国およびシルダリア州の位置

Location of Uzbekistan and Syrdarya region

研究対象地域であるシルダリア州は、北でカザフスタン、南でタジキスタンと国境を接し、東のタシケント州、西のジザク州に挟まれ、面積は 5,100 km² である (Fig. 2-1)。

ウズベキスタンの平均年間降水量は、砂漠のある平野地域では 80 - 200 mm、東部の高地山岳地域では 600 - 800 mm である²⁻²⁾。シルダリア州の日平均気温は夏場に 30 °C にまで上昇し、冬場は 0 °C 付近にまで低下する。年間の降水量は約 330 mm 程度であるが、6 月から 9 月にかけての積算降水量は約 17 mm 程度と非常に少ない (Fig. 2-2)。乾燥指数は 0.28 であり、半乾燥地域である²⁻³⁾。



Source: Average of Syrdarya and Yangiyer weather stations

Fig. 2-2 シルダリア州の平均気温と降水量 (2004 - 2015)

Average temperature and precipitation in Syrdarya region (2004 - 2015)

人口は 3,280 万人 (2019)²⁻⁴⁾で 1 人当たり GDP が 1,550 ドル (2018)²⁻⁵⁾である。GDP 成長率は 5.5 % (2018) であるが、失業率は 9.3 % (2018)²⁻⁵⁾と高い。1 日 2.0 ドル未満で暮らす人々は、2010 年時点で 1,248 万人²⁻⁶⁾と推定されており、国民の 40 %近くが貧困層にあると考えられる。また、国連開発計画 (United Nations Development Programme: UNDP) が発行した「人間開発報告書 (2016)²⁻⁷⁾」では、成人識字率は 99.6 %であるが、人間開発指数 (保健・教育・所得という人間開発の 3 つの側面に関して、平均達成度を測る簡便な指標、Human Development Index: HDI) は 0.701 であり、188 カ国中 105 位と下位である。

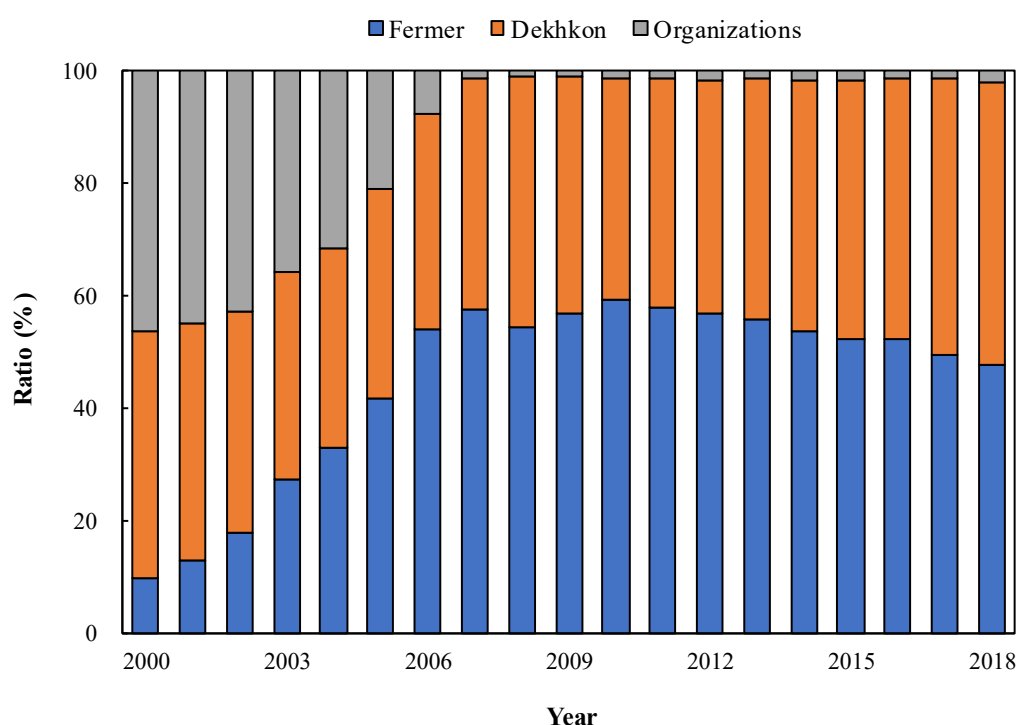
国家元首である大統領は、1991年の独立から2016年に死去するまでの25年間、ウズベク・ソビエト社会主義共和国大統領であったイスラム・カリモフがその職にあり、強力な指導力のもと安定政権を築いていた。2016年にカリモフ大統領が死去した後、シャヴカト・ミルズィヤエフがカリモフ氏の支持基盤と手法を受け継いでいる。ミルズィヤエフ大統領は就任後、徐々に独自色を発揮し、政治、経済、社会、外交等の幅広い分野で改革路線を打ち出している²⁻⁸⁾。また、タシケント灌漑農業技術大学の出身であることから、農業分野での改革にも積極的に取り組んでいる。

2.2 ウズベキスタンの農業

ウズベキスタンの農地面積（Cropland）は、約442万ha（2017）であり、そのほぼ全て（約95%）となる422万ha（2017）を灌漑農地が占めている。GDPに占める農業の割合は約17%であり、農業への就業人口は総人口の約29%である²⁻⁹⁾。19世紀までウズベキスタンは、他の中央アジアの国々と同様に広大な国土を利用した遊牧と河川流域でオアシス農業を営んでいた。しかし、1918年にソ連の一員となってからは、1921年の「定住化政策」や1960年頃から始まった「自然改造計画」によって遊牧民の定住化が進められ、その生業も牧畜業から農業に変更された。特に「自然改造計画」では、アムダリア川とシルダリア川を水源とした大規模な灌漑開発が行われ、ウズベキスタンは綿花栽培の役割を割当てられた²⁻¹⁰⁾。ソ連時代の農業は、国営農場（ソフホーズ）・集団農場（コルホーズ）を主体としていたが、1991年の独立以降、改編・民営化が進められた。改編・民営化に伴い様々な形態の農業企業が併存していたが、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（農家経営）法、デフカン（個人副業経営）法により、3形態に整理された。シルカットは国民への継続的な食料供給を目的に設立され、効率・収益性の向上が期待された。2000年までに様々な形態で存在していた農業企業はシルカットに再編されることとなったが、この路線は長くは続かなかった。早くも1998-2000年の間に、赤字および収益性の低いシルカットのフェルメルへの分割が試験的に実施された。フェルメルは法人格を有する独立した経営主体であり、長期賃貸借で供与される農地を利用して農産物の生産を行なう。2003年3月24日付大統領令3226「農業における改革深化の最重要の方向性について」では、将来の農業主体としてフェルメルの発展を優先させること、赤字で低収益・展望のないシルカットを廃止し、フェルメルを創出すべきことが指示された。この大統領令により、フェルメルは耕種生産において急速にウズベキスタン農業の主体となっ

ていった²⁻¹¹⁾。デフカン（個人副業経営）は、家長に提供される終身所有で継承可能な宅地
 付属の農地において、家族労働を基礎にした小規模農家である²⁻¹²⁾。デフカンは、野菜・果
 物・牛乳・肉を自給用に生産し、余剰分は市場で売却する。ウズベキスタンの食卓の野菜、
 牛乳や羊肉の供給を担っている。

農業企業（シルカット）、フェルメル、デフカンの割合を Fig. 2-3 に示す。



Source: The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics, Open data, Agriculture²⁻¹³⁾
 Accessed 17th Nov, 2019

Fig. 2-3 農業企業（シルカット）、フェルメル、デフカンの割合

Ratio of Organizations (Silkat), Fermer, Dekhkon

1991 年の独立後、綿花の重点的な栽培が継続されるとともに食料自給を目的とした小麦
 栽培が拡大した。多くのフェルメル圃場では、綿花と小麦を 2 年サイクルの作付体系で栽
 培している。4 月から 9 月にかけて綿花を栽培し、その後、同一区画で 10 月から翌年 6
 月にかけて小麦を栽培している。小麦の栽培後は休耕し、12 月のリーチングを経て、翌年
 4 月から再度、綿花を栽培している²⁻¹⁴⁾。



Fig. 2-4 綿花・小麦の栽培状況

Cultivation situation of cotton and wheat

独立から 25 年以上が経過した現在においても、国家による綿花・小麦の作付計画と生産割当は存続しており、生産・流通が厳しく管理されている。特に、外貨獲得のための戦略的作物として位置づけられている綿花は、生産割当の 100%，小麦は 50%が政府によって買い上げられている。ウズベキスタンの主な農産生産品の生産量を Fig. 2-5 に示す。

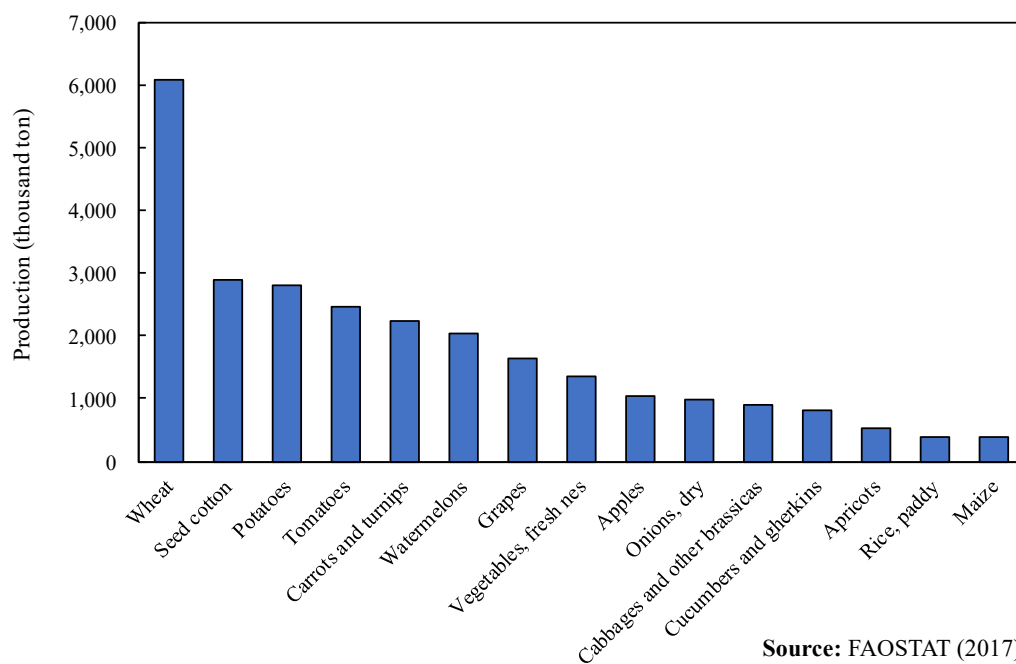


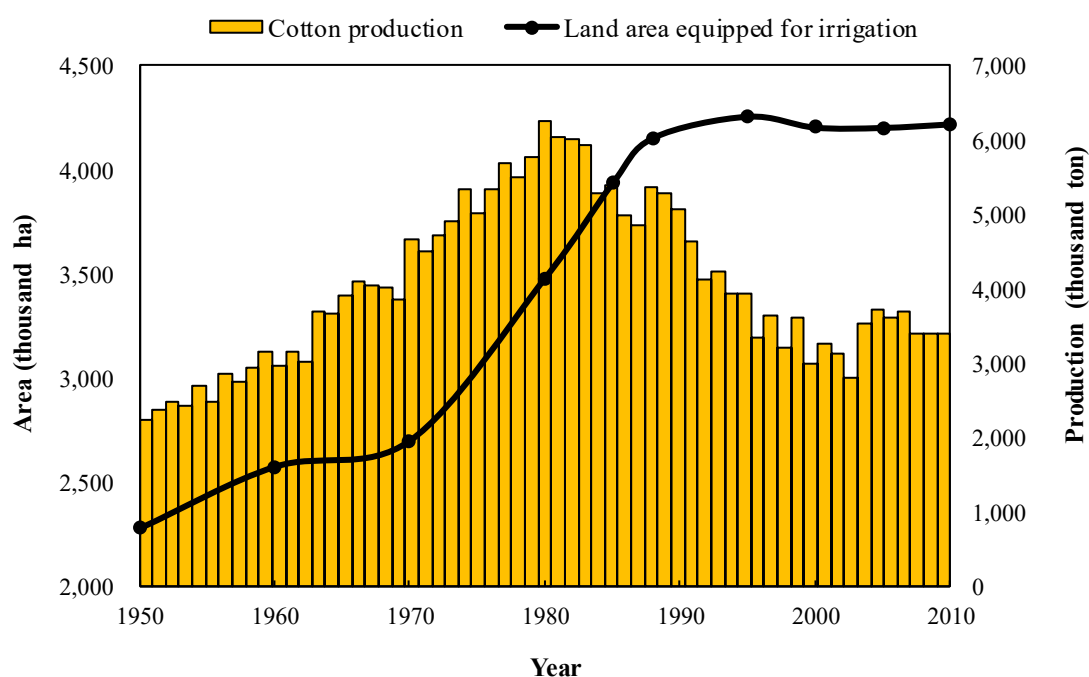
Fig. 2-5 ウズベキスタンの主な農産物の生産量

Main agricultural production in Uzbekistan

一方で、国家政策として、従来の小麦・綿花栽培から、より付加価値の高い園芸作物への転換を推進している。ミルズィヤエフ大統領の就任以降、園芸作物への転換はさらに加速しており、温室の導入（今後 5 年間で約 8 万 ha）やブハラの自由貿易地域（Free Economic Zone: FEZ）での外資企業の誘致などが行われている²⁻⁹⁾。

2.3 ウズベキスタンの灌漑

ウズベキスタンでは、1950 年代から 1980 年代にかけて、アムダリア・シルダリア川を水源に大規模な灌漑開発が行われた²⁻¹⁵⁾。灌漑農地は 1950 年の約 228 万 ha から 1988 年の 415 万 ha（約 1.8 倍）へと増加し²⁻¹⁶⁾、綿花生産量は 1950 年の 223 万 ton から 1988 年の 537 万 ton（約 2.4 倍）²⁻¹⁷⁾へと飛躍的に増加した（Fig. 2-6）。このような灌漑農業の拡大は、灌漑排水施設網の整備によって支えられたものであり²⁻¹⁸⁾、ウズベキスタンには、用水路約 18.3 万 km、排水路約 14.1 万 km、そして、灌漑排水用の井戸約 7,900 カ所が整備されている²⁻¹⁹⁾（Table 2-1）。



Source: 中央アジアの農業問題²⁻¹⁶⁾, 旧ソ連中央アジア長期農業統計²⁻¹⁷⁾, FAOSTAT (2017)

Fig. 2-6 灌漑面積と綿花生産量の推移

Changes in irrigation area and cotton Production

Table 2-1 ウズベキスタンにおける灌漑排水施設の整備状況

Development status of irrigation and drainage facilities in Uzbekistan

Hydraulic structures		Location in the system	
Irrigation canal	Inter-farm	27,868	km
	earth channel (60 %)	16,721	km
	On-farm	154,957	km
	earth channel (77 %)	119,317	km
	Total	182,825	km
Drainage network	Main and Inter-farm	33,675	km
	On-farm	72,144	km
	subsurface	36,740	km
	Others	35,681	km
	Total	141,500	km
Tube well	Irrigation	4,069	place
	Drainage	3,802	place
	Total	7,871	place

Source: Water Resources Management in Uzbekistan Second Edition²⁻¹⁹⁾

しかし、灌漑面積の増大に伴う河川からの大量取水は、両河川の流量を激減させ、下流に位置するアラル海の水面積が急激に縮小する深刻な環境問題を引き起こした²⁻²⁰⁾。また、過剰な灌漑や排水の軽視に伴う塩類集積の進行により、綿花の生産量は 1980 年の 624 万 ton をピークに減少した^{2-16, 17)}。

水資源の配分は、中央アジアの上流国と下流国との間にアンバランスが生じている。上流国であるキルギスとタジキスタンは多くの水を流出させているが、使用量は少ない。一方、下流国のウズベキスタン、カザフスタン、トルクメニスタンは水の流出は少ないが、使用量が多い。特に、灌漑面積の大きいウズベキスタンでは、水の流出量が 10 %程度であるが約 52 %もの水を使用している²⁻²¹⁾ (Table 2-2)。また、International Crisis Group が発表した「Water Pressures in Central Asia²⁻²²⁾」では、ウズベキスタンで使用された灌漑用水のうち、約 50 - 80 %もの水が失われおり、有効利用された水は、わずか 25 - 35 %であると推計している。このような、水資源の非効率な利用は人為的なものであり、ウズベキスタンにとって灌漑システムの近代化は切実な課題となっている。

Table 2-2 中央アジアにおける水資源の配分

Allocation of water resources in Central Asia

Country	Water production ratio (%)		Water consumption ratio (%)
	Syrdarya	Amudarya	
Uzbekistan	11	6	52
Kyrgyz	74	3	16
Tajikistan	3	80	
Kazakhstan	12	0	10-12
Turkmenistan	0	3	20
Iran	0		0-1
Afghanistan	0	8	0-1
Total	100	100	100

Source: 中央アジア地域における水管理政策と諸国間関係²⁻²¹⁾

ウズベキスタンの水政策を規制する主な文書は「水と水使用に関する法律」である。法的枠組みは継続的に改善されており、2009年12月25日に新しい規范文書として「水と農業部門の改革を強化するための法律改正」が発行されている²⁻¹⁹⁾。これらの法律に基づいて、これまで、農業水資源省が水資源の管理を行っていた。しかし、2018年2月17日付の大統領令第5330号によって農業水資源省が農業省と水資源省(Ministry of Water Resource: MWR)に分離され、現在、MWRが水資源を管理している²⁻²³⁾。

灌漑管理の実務は、2003年7月21日付けの閣僚会議決定第320号「水資源管理の制度設定の改善について」により、当時の農業水資源省内に設置された、13の流域灌漑システム管理局(Basin Irrigation Systems Administrations: BISA)および、その下部組織である主要運河管理局(Main Canal Administrations: MCA)、灌漑システム管理局(Irrigation System Administrations: ISA)が担っている^{2-23, 24)}。BISAは流域単位での取水量の把握、MWRへの取水量の申請、そして、幹線用水路や貯水池の維持管理などを行い、MCAおよびISAは幹線水路から末端水路への水配分などを行っている²⁻²⁵⁾。支線から末端用水路の維持管理は、フェルメルで構成される水消費者組合(Water Consumers' Associations: WCA)が担っている²⁻²⁶⁾。独立後、国営農場や集団農場の民営化が進む中で、農村地域での水資源管理はフェルメルなどの水使用者が担うこととなり、その過程で組織されたのがWCAである。これらは、他の発展途上国においても、海外ドナーの支援の下に数多く編成されており、水利用者である農家自身が管理する「参加型水管理(Participatory Irrigation Management: PIM)」を通じて、民主的かつ国家財政の負担軽減を目指すという国際的な流れを反映している。ウズベキスタンにおいても海外ドナーが深く関与しているが、独立した民主的組織

というよりも、ウズベキスタン政府の強力なリーダーシップの下、公的なヒエラルキーの末端組織として組み込まれているのが実態である²⁻²⁷⁾。2009 年時点で、WCA 数は約 1,700^{2-27, 28)}であったが、現在、組合統合による大型化が進んでおり、2009 - 2010 年をピークに減少している²⁻²⁷⁾。なお、WCA の活動経費はフェルメルが支払う組合員費が財源である。

ウズベキスタンの灌漑農地 428 万 ha (1994) のほぼ全てとなる 427.6 万 ha (1994) において、地表灌漑が行われている²⁻²⁹⁾。また、作付けされた灌漑農地 370 万 ha (2005) のうち、綿花が約 141 万 ha (2005)、小麦が約 130 万 ha (2005) を占め、政府統制による作付けが約 73 %に及んでいる²⁻²⁹⁾。綿花・小麦栽培では、広く畝間灌漑が用いられている。畝間灌漑は下方への浸透損失が大きく、圃場に到達した水のうち、作物によって水分消費される土層（以下、「有効土層」）に貯留される水の割合（以下、「適用効率」）が散水灌漑の 80 - 90 %と比べ 70 %程度と小さい²⁻³⁰⁾。また、下方に浸透した灌漑水が地下水を涵養し、地下水位が上昇する要因にもなっている。灌漑・水問題研究所 (Research Institute of Irrigation and Water Problem: RIIWP) は、綿花への 1 回の灌漑水量は 50 - 80 mm と推奨しているが²⁻³¹⁾、シルダリア州のフェルメルへの聞き取りでは、BISM の指導のもと 1 回あたり 220 - 240 mm もの水量を灌漑しているとのことであった。フェルメルによれば、RIIWP が推奨する灌漑水量では、相当、高い精度で均平化された圃場でなければ、圃場全体に水が行き届かないとのことであった。多くのフェルメルは資金および労働力が不足しており、灌漑管理が粗放になっている²⁻³²⁾。その結果、しばしば、漏水や過剰灌漑 (Fig. 2-7) が生じており、塩類集積が進行している。



Fig. 2-7 漏水と過剰灌漑

Leakage and excessive irrigation

2.4 ウズベキスタンの塩類集積

中央アジア地域における平原部の土壌は、元来、塩類を豊富に含んでおり、灌漑農業に伴う二次的塩類集積が生じる危険性が高い²⁻³³⁾。灌漑農地の面積が大きいウズベキスタンは、中央アジアの中で最も塩類化した農地面積が大きく、約 51 %を占めている (Table 2-3)。ここで言う塩類化面積は、土壌の飽和抽出液の電気伝導度 (EC_e) が 2.0 dSm⁻¹ 以上を示す灌漑農地のことである。

Table 2-3 中央アジアにおける塩類化した灌漑農地の面積

Salt affected area under irrigation in Central Asia

Country	Area equipped for irrigation		Salt affected area by irrigation		
	Year	ha	Year	ha	(%)
Uzbekistan	2005	4,198,000	1994	2,141,000	51
Kyrgyz	2005	1,021,400	2005	49,503	5
Tajikistan	2009	742,051	2009	23,235	3
Kazakhstan	2010	2,065,900	2010	404,300	20
Turkmenistan	2006	1,990,800	2002	1,353,744	68
Total		10,018,151		3,971,782	40

Source: Irrigation in Central Asia in figures, AQUASTAT Survey-2012²⁻²⁹⁾



Fig. 2-8 ウズベキスタンでの塩類集積状況

Salt accumulation in Uzbekistan

ウズベキスタンの塩類集積は、平野部の 6 州（カラカルパクスタン自治共和国、ブハラ州、ジザク州、ナボイ州、シルダリア州、ホラズム州）での塩類化面積が大きい。特に、アムダリア川の下流域に位置し、アラル海に面するカラカルパクスタン自治共和国での作物生産への被害が深刻である²⁻³⁴⁾ (Fig. 2-9)。

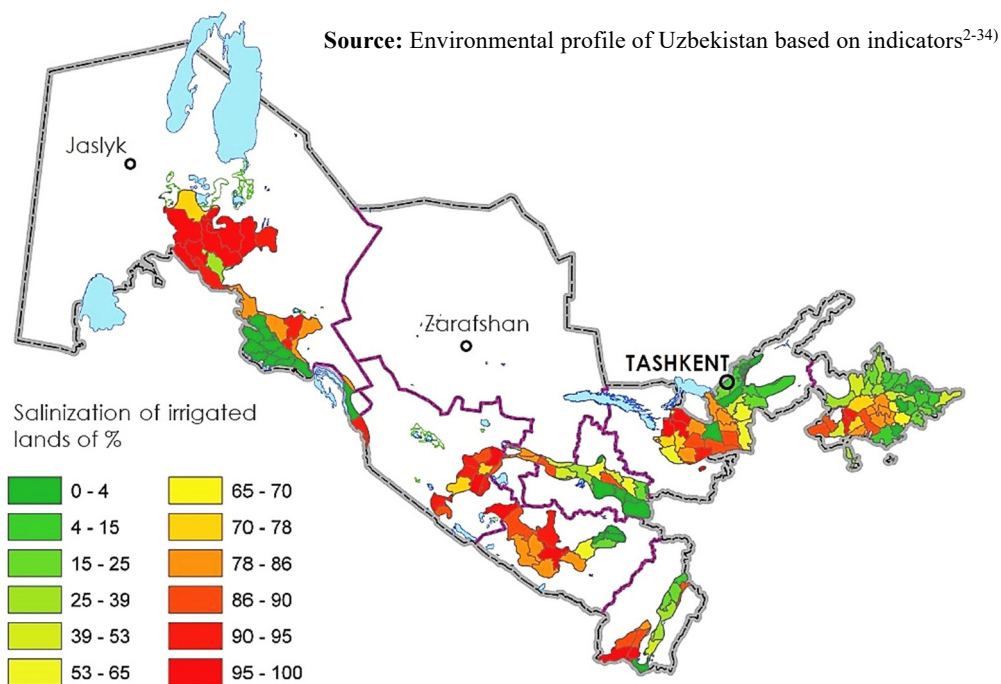


Fig. 2-9 ウズベキスタンの塩類集積分布

Distribution of salt accumulation area in Uzbekistan

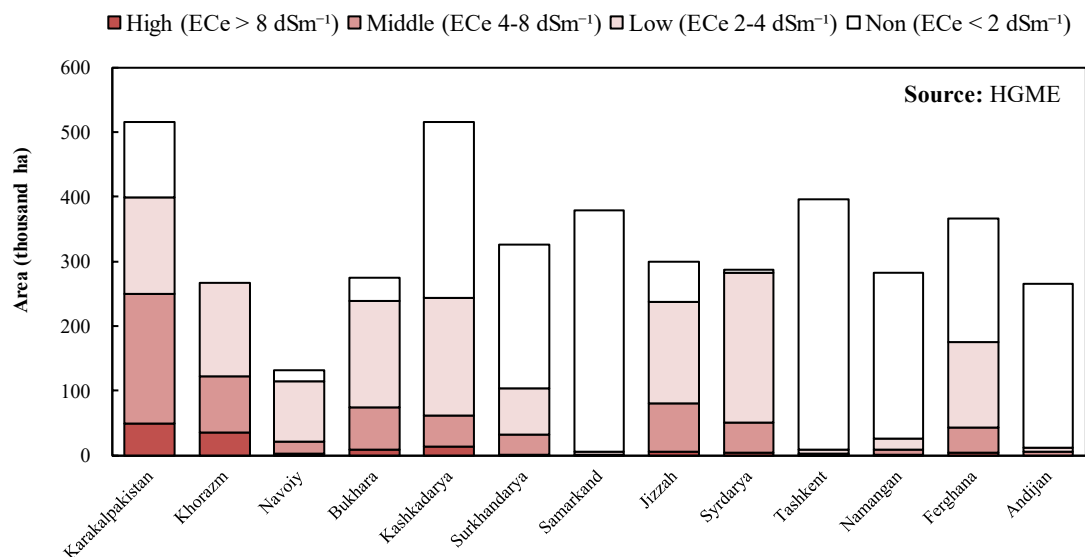


Fig. 2-10 ウズベキスタン各州の塩類化面積 (2011 年)

Salt affected area by region in Uzbekistan (2011)

一方、シルダリア川中流域に位置するシルダリア州においても塩類化が進行しており、灌漑農地の約 98 %で塩類集積が生じている (Fig. 2-10)。通常、塩類集積の程度は 5 段階で

区分されるが、ウズベキスタンでは、重度と極めて重度をひとつにした ($EC_e > 8$) 4段階に区分している。ウズベキスタンでの塩類集積による被害額は、年間 10 億ドルにも及ぶと推計されている²⁻³⁵⁾。

2.5 ウズベキスタンの塩類集積対策

ウズベキスタンの塩類化農地への対策は、BISA の傘下機関である水文・地質土地改良事務所 (Hydro-geology Melioration Expedition: HGME) が担当している²⁻²⁵⁾。HGME は各州に設置されており、圃場および地下水のモニタリング (塩分濃度, 地下水位) を行っている。このモニタリングの結果を基に、HGME は BISA や WCA と連携して、必要な土地改良事業 (塩害対策) の計画を作成する。事業計画は州知事の承認を経て MWR へ提出され、その後、MWR および財務省での検討を経て予算額が決定される。HGME は承認された予算を用いて、排水路の浚渫やポンプの整備を行う。

HGME による塩類集積への対策が行われてきたが、十分な資金による統合的かつ体系的なアプローチの欠如、フェルメルと WCA との連携不足等から、その成果は十分ではなかった。その結果、2007 年時点で灌漑農地の半分以上が塩類化した状態にあり、フェルメルなどが所有する灌漑農地の 16 % 以上において、満足のいく収量が得られなかった²⁻¹⁹⁾。そこで、カリモフ前大統領は、抜本的な灌漑農地の再生に向け、2007 年 10 月に土地改良基金を設立した。

土地改良基金による事業は、第 1 期 : 2008 - 2012 年、第 2 期 : 2013 - 2017 年の各 5 年間実施され、年間約 1.1 億ドルの予算により、大量の重機 (ブルドーザー、掘削機など) 購入等が行われた。また、第 2 期からは、節水灌漑も事業対象となった²⁻²⁵⁾。その結果、わずかではあるが、塩類化面積は減少傾向にある (Fig. 2-11)。

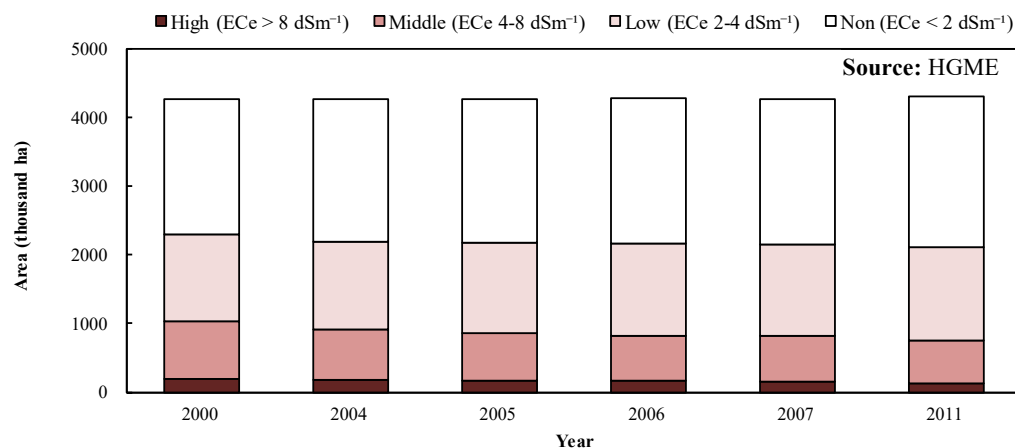


Fig. 2-11 ウズベキスタンの塩類化面積の推移（2000 - 2011）

Change in salt affected area in Uzbekistan (2000 - 2011)

さらに、ミルズィヤエフ大統領は、2017年11月27日に大統領令を公布し、土地改良基金による第3期（2018-2021年）事業を開始した。第3期では、排水路網2,227 km、垂直排水238カ所の建設と近代化を図り、排水路網34,800 km、垂直排水1,087カ所の修理を行うとしている²⁻¹⁹。

フェルメルによる伝統的な塩類集積対策として、小麦作後の冬場にリーチングが行われている（Fig. 2-12）。HGMEは、圃場の塩分濃度や勾配に応じた、最適なリーチング水量と区画割をフェルメルやWCAに示している（Table 2-4, 5）。



Fig. 2-12 リーチングの状況

Situation of leaching

Table 2-4 HGME が推奨するリーチング水量

Leaching water amount recommended by HGME

Degree of salinization	Water volume (m ³ /ha)
Weak (EC _e 2-4)	2,500
Moderated (EC _e 4-8)	3,000
Strong (EC _e >8)	First time 3,000, Second time 1,000

Source: Hydro-geological Melioration Expedition (HGME) in Syrdarya Region

Table 2-5 HGME が推奨するリーチング区画

Leaching plot recommended by HGME

Slope (%)	Size
<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: Hydro-geological Melioration Expedition (HGME) in Syrdarya Region

HGME による推奨があるものの、比較的、冬場は水資源が豊富であることから、フェルメルは可能な限り多くの水を用いてリーチングを行う傾向があり、地下水位が上昇する要因となっている。また、フェルメルの圃場には、長年の農業機械による踏圧によって硬盤層が形成されており、排水不良に伴うリーチング効果の低下も懸念される。

2.6 ウズベキスタンにおける塩類集積の研究

ウズベキスタンにおける研究開発は、1998 年に国際農業研究協議グループ (Consultative Group on International Agricultural Research: CGIAR) の支援を受けて設立された「中央アジアおよびコーカサス地域における持続可能な農業開発に向けたプログラム (Regional Program for Sustainable Agricultural Development in Central Asia and Caucasus: CAC)」が中心的な役割を担っている。CAC は、CGIAR メンバーの 8 つの国際農業研究機関と 3 つの先進的な研究機関の合計 11 機関で構成されるコンソーシアムによって運営されており (Table 2-6)、本部はウズベキスタンの首都タシケントに設置されている²⁻³⁶⁾。CAC は、ウズベキスタン政府とコンソーシアムの代表 (ICARDA) との法的合意の下で活動を行っており、FAO、アジア開発銀行 (Asian Development Bank: ADB)、米国国際開発庁 (United States Agency

for International Development: USAID)など、合計 9 つの国際機関から資金提供を受けている (Table 2-6) ²⁻³⁶⁾。CAC の目的は、技術開発・適用・移転を通じて作物と家畜の生産性を持続的に向上させるための国家研究システム (自然資源管理・保全戦略, 社会経済的知見) の開発支援である ²⁻³⁶⁾。

Table 2-6 CAC のコンソーシアムメンバーと資金提供機関

Consortium member of CAC and donors
コンソーシアムメンバー Consortium Member
国際農業研究協議グループ (Consultative Group on International Agricultural Research: CGIAR)
国際乾燥地農業研究センター (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas: ICARDA)
国際水管理研究所 (International Water Management Institute: IWMI)
国際半乾燥熱帯作物研究所 (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics: ICRISAT)
国際トウモロコシ・小麦改良センター (International Maize and Wheat Improvement Center: CIMMYT)
国際ポテトセンター (International Potato Center: CIP)
国際家畜研究所 (International Livestock Research Institute: ILRI)
国際植物遺伝資源研究所 (Bioversity International)
国際食糧政策研究所 (International Food Policy Research Institute: IFPRI)
国際塩水農業研究センター (International Center for Biosaline Agriculture: ICBA)
ミシガン州立大学 (Michigan State University: MSU)
野菜システム研究開発のための中央アジアおよびコーカサス地域ネットワーク (Central Asia and Caucasus Regional Network for Vegetable Systems Research and Development)
資金提供機関 Donors
国連食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization of United Nations: FAO)
アジア開発銀行 (Asian Development Bank: ADB)
オーストラリア国際農業研究センター Australian Center for International Agricultural Research: ACIAR
地球環境ファシリティ (Global Environmental Facility: GEF)
ドイツ技術協力公社 (GTZ - Germany)
国際農業開発基金 (International Fund for Agricultural Development: IFAD)
スイス開発協力局 (Swiss Development Corporation: SDC)
米国国際開発庁 (United States Agency for International Development: USAID)
世界銀行 (World Bank: WB)
Source: Regional Program for Sustainable Agricultural Development in Central Asia and Caucasus (CAC), homepage, Access date: Nov 23 th , 2019

CAC はウズベキスタン政府と連携し、統合的水資源管理 (Integrated Water Resources Management: IWRM) の実現を目指している。IWRM は、包括的な概念であり、世界的な水

資源のひっ迫に伴って、水資源の管理を供給管理型から需要調整・管理型に転換し、水資源の適正な配分を目指そうとする考え方である²⁻³⁷⁾。IWRMは、1992年にアイルランドのダブリンで開催された「水と環境に関する国際会議（ダブリン会議）」、ブラジルのリオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議（地球環境サミット）」において、ひっ迫した淡水資源を有効に利用するための概念として示された。ダブリン会議で提案された、①水は生命・開発・環境に欠かせない有限で貴重な資源、②水開発と管理へのステークホルダーの参加、③水管理への女性の参画、④水は経済財として認識されるべきである、という4原則は、以降のIWRMの概念形成の基礎となった²⁻³⁷⁾。IWRMの統一された定義はないが、世界水パートナーシップ（Global Water Partnership: GWP）によれば、「IWRMとは水、土地および関連資源の開発管理を有機的に行い、その結果もたらされる経済・社会的繁栄を、貴重な生態系の持続可能性を損なうことなく、公平な形で最大化する過程である」としている²⁻³⁸⁾。

CACは、様々なプロジェクトの下に、節水や塩類集積に関する研究を行っている。ICARDAは、2013 - 2015年にかけて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）と連携し、蒸発散量に基づいた灌漑計画法を検討している。その結果、慣行法と比べ、綿花栽培において25 - 35%、冬場の小麦栽培において32 - 53%の節水効果が得られたことを示している²⁻³⁹⁾。IWMIは2012年に国際ポテトセンター（International Potato Center: CIP）と連携し、ポテト栽培における節水法を検討している。ポテト栽培に畝間灌漑（慣行法）、頻繁畝間灌漑、根域部分灌漑（Partial root zone drying irrigation）、そして、点滴灌漑を適用した結果、頻繁畝間灌漑と点滴灌漑の効率が高かったことを示している²⁻⁴⁰⁾。また、IWMIは国際食料政策研究所（International Food Policy Research Institute: IFPRI）と連携し、水利経済モデルを用いた、圃場レベルでの効率改善について検討している。その結果、稲作地域では、点滴灌漑もしくは隔畝間灌漑（Skip Furrow Irrigation: SFI、引用文献ではAlternate Wet and Dry Irrigationと表現されているが、本報ではSFIを用いる）による効率改善が必要であるとしている²⁻⁴¹⁾。レーザーレベリングによる節水効果については、様々な報告がなされているが、CACも参画して取りまとめた「Manual on Conservation Agriculture Practices in Uzbekistan²⁻⁴²⁾」では、レーザー均平化による25 - 30%の節水効果、収量の10%向上、雑草の40%抑制が示されている。その他、国際塩水農業研究センターは、塩生植物の栽培と再生可能エネルギー生産に向けた低品質の水（高塩分濃度の水）の利用に関する

研究を行っている²⁻⁴³⁾。多くの CAC のプロジェクトでは、研究開発だけではなく、ワークショップ、セミナー、研修などを通じた技術移転・普及にも積極的に取り組んでおり、生産現場に近い研究開発が行われている。

ウズベキスタン国内の研究機関では、タシケント灌漑・土地改良大学 (Tashkent Institute of Irrigation Melioration : TIIM)、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して設立された灌漑・水問題研究所 (Research Institute of Irrigation and Water Problems : RIIWP)、国立綿花栽培研究所 (Uzbekistan National Cotton Growing Research Institute)、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・地質工字研究所 (Institute of Hydrogeology and Engineering Geology) などがある。ソ連時代、中央アジアの拠点として、ウズベキスタンに多くの研究所が設置されたことから、ウズベキスタンの研究機関は多くの知見を蓄積している。独立後は、資金不足等によって研究設備が老朽化し、十分な活動が行えていないように見受けられた。そのような状況下にあっても、国立綿花栽培研究所は米国農務省農業研究サービス (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service: USDA-ARS) と連携し、綿花栽培への点滴灌漑の導入を試みている。その結果、土壌水分の減少に応じて点滴灌漑によって給水した場合、畝間灌漑と比べて、18-42%の節水効果が得られたことを示している²⁻⁴⁴⁾。また、RIIWP は、フェルメルの実情に沿った観点から、圃場内に早く水を導入するためのカウンター灌漑法 (圃場の両端より給水する) について検討している。現在も、ウズベキスタンの各研究機関は、塩類集積の軽減に向け、意欲的に研究活動を行っている。

以上、ウズベキスタンでは、CAC を中心に国内の研究機関と連携し、IWRM の概念の下、塩類集積を軽減するための様々な研究開発が行われている。これらは、点滴灌漑やレーザ一均平化など、一定の効果が見込まれるものを実際の圃場で検証したものが多く、また、これらの導入には、初期投資と維持管理費が必要になる。一方、現在、多くのフェルメルが用いている畝間灌漑の改良に関する研究は SFI に限定されており、検討・研究事例が少ない。したがって、ウズベキスタンで広く用いられている畝間灌漑を改良することによる節水および除塩については、検討の余地があると考えられる。

2.7 試験圃場

研究の対象地域は、灌漑農地の約 98 %で塩類集積が生じているシルダリア州とした。シルダリア州は、8 つの地区に分かれており、州の中央部に幹線排水路が整備されている。幹線排水路より北側の地区はオールドゾーンと呼ばれており、シルダリア川に近く水が豊富であったことから、古くから農業が営まれている。一方、幹線排水路の南側はニューゾーンと呼ばれており、1950 年代に砂漠地帯を開拓した地帯である。シルダリア州各地区の塩類化面積を Fig. 2-13 に示す。

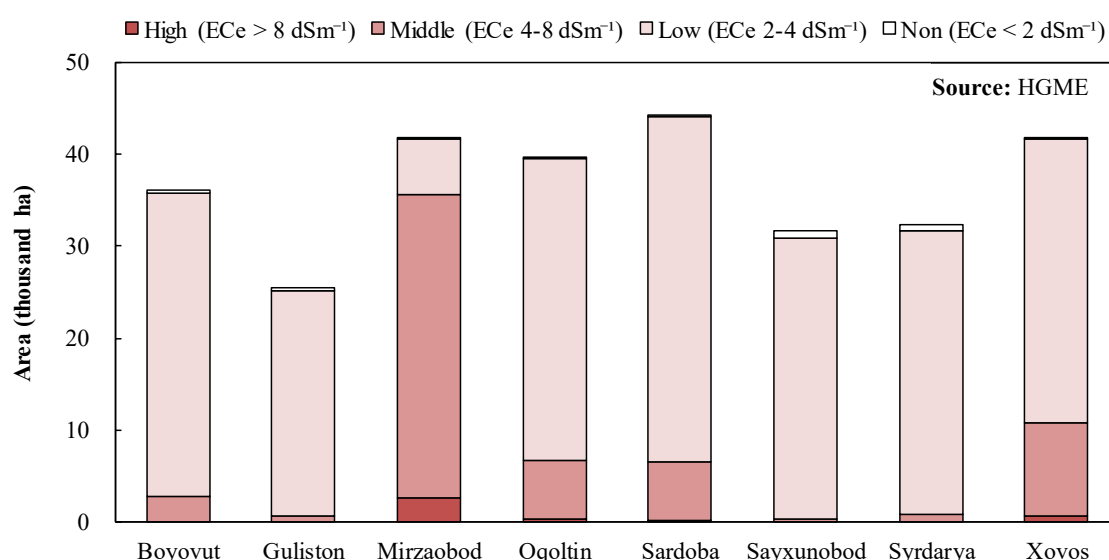


Fig. 2-13 シルダリア州各地区の塩類化面積 (2010 年)

Salt affected area by district in Syrdarya region (2010)

全ての地区のほぼ全ての灌漑農地で塩類化が生じており、オールドゾーンに位置するミルザバット (Mirzaobod) 地区の塩類化が極端に酷い状況にある。現地での聞き取りでは、ミルザバット地区は、すり鉢の底の様な低い位置にあり、排水が難しいことから、塩類化が進行しているとのことであった。ニューゾーン (Oqoltin, Sardoba, Xovos および Mirzabod 南部) においては、灌漑農地の 15 - 25 %程度が、中程度にまで塩類化が進行している。

試験圃場は、ニューゾーンのオコルティン (Oqoltin) 地区, Bobur WCA に属する Paxtakor 圃場 (以下, B 圃場), 最も塩類化が酷いオールドゾーンのミルザバット地区の Axmedov WCA に属する Nozima Durdona Fayz 圃場 (以下, A 圃場), および, Yangiobod WCA に属する Nurafshon Qulb Sehri 圃場 (以下, Y 圃場) に設定した。試験圃場を設定した WCA の

位置を Fig. 2-13 に示す．Axmedov WCA と Yangiobad WCA はミルザバット地区のオールドゾーンに位置するが，塩類化程度は異なり，Yangiobad WCA の方がより酷い状況にある．

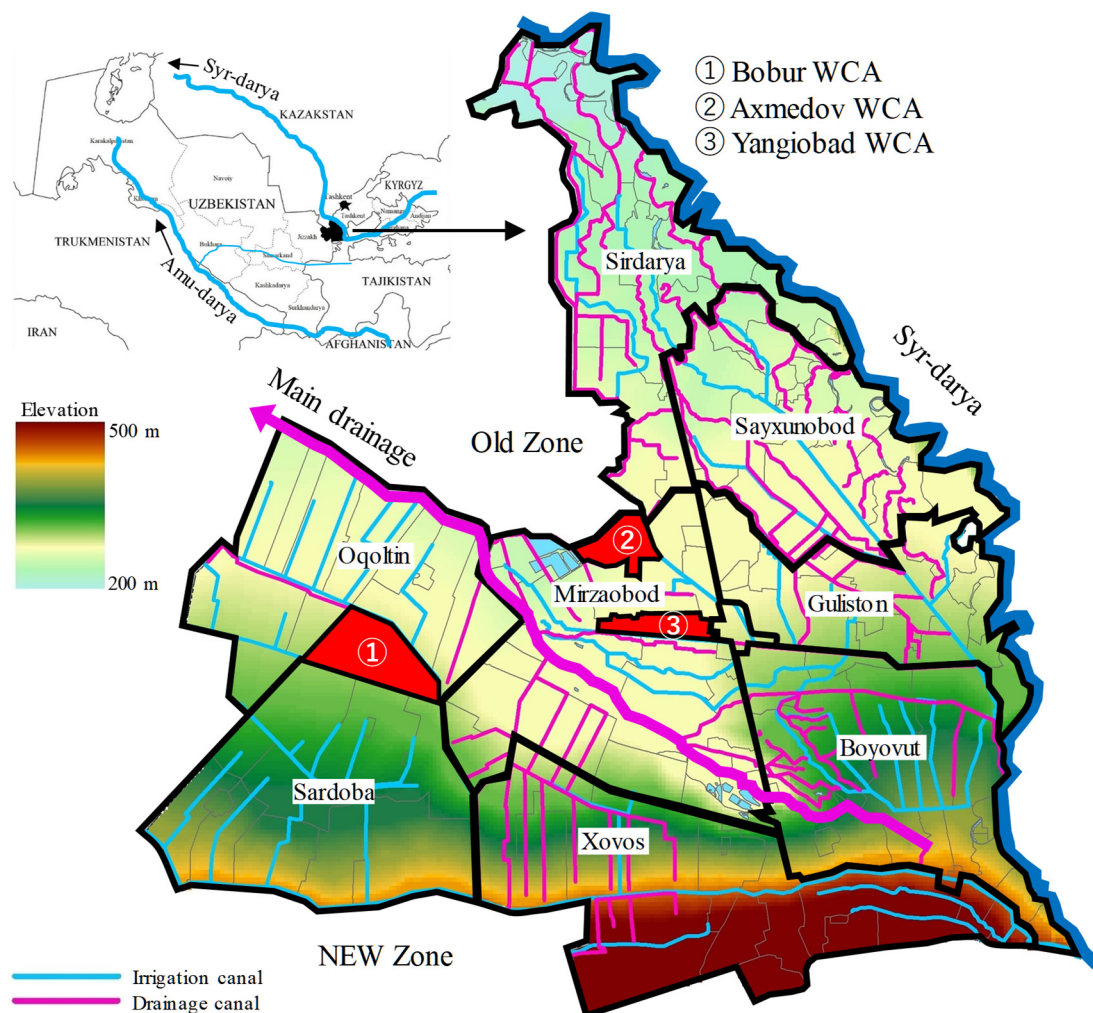


Fig. 2-14 試験圃場の位置

Location of experimental site

各試験圃場の土壌密度，飽和透水係数および土性を Table 2-7 に示す．各試験圃場の乾燥密度は，表層で 1.4 g cm^{-3} 程度であるが，深さ 10 - 50 cm は 1.6 g cm^{-3} 程度と高いことから，長年の農業機械による踏圧などによって硬盤層が形成されているものと考えられる．飽和透水係数は， $10^{-4} - 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$ であり，硬盤層で低くなる傾向が認められた．土性は，B 圃場は Silt Loam，A 圃場および Y 圃場は Loam もしくは Clay Loam である．

Table 2-7 各試験圃場の乾燥密度，飽和透水係数，土性

Bulk density, saturated hydraulic conductivity, soil texture of each experimental site

Site	Depth (cm)	Bulk density (g cm ⁻³)	Saturated hydraulic conductivity (cm s ⁻¹)	Texture ^{*)}			Soil type
				Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	
Bobur	5	1.43	2.16×10 ⁻⁵				
Paxtakor	15	1.62	1.05×10 ⁻⁵	13.1 - 26.4	48.9 - 62.2	24.7	Silt Loam
	25	1.60	3.79×10 ⁻⁶				
	35	1.64	1.85×10 ⁻⁵	13.6 - 27.4	47.4 - 61.2	25.3	Silt Loam
	50	1.60	1.39×10 ⁻⁵				
	70	1.42	-	12.9 - 28.2	49.6 - 64.9	22.3	Silt Loam
Axmedov	5	1.37	3.07×10 ⁻⁴	12.8	32.8	54.4	Loam
Nozima Durdona Fayz	15	1.40	6.03×10 ⁻⁴	13.2	31.2	55.6	Loam
	25	1.56	4.06×10 ⁻⁵	16.8	29.0	54.2	Clay Loam
	35	1.62	4.62×10 ⁻⁵	14.1	31.8	54.2	Loam
	50	1.49	2.26×10 ⁻⁴	15.6	29.0	55.3	Clay Loam
	70	1.46	4.03×10 ⁻⁴	9.3	35.2	55.5	Loam
Yangiobad	5	1.43	2.16×10 ⁻⁴	15.5	21.1	63.3	Clay Loam
Nurafshon Qulb Sehri	15	1.55	6.27×10 ⁻⁵	13.6	26.7	59.7	Loam
	25	1.61	5.09×10 ⁻⁵	15.7	25.9	58.4	Clay Loam
	35	1.60	5.57×10 ⁻⁵	14.5	26.0	59.5	Loam
	50	1.61	4.17×10 ⁻⁵	11.7	30.5	57.9	Loam
	70	1.44	9.12×10 ⁻⁵	11.5	33.1	55.4	Loam

*) Soil texture of Bobur was classed by USDA,

Yangiobad and Axmedov was classed by standard of the International Society of Soil Science

各試験圃場から採取し，日本へ輸入した土壌について，水分特性を加圧板法（DIK-3483：芝本式多容量土壌 pF 測定器，DIK-3404：広域土壌 pF 測定器，大起理化工業）にて測定した．各試験圃場の土壌水分特性を Table 2-8 に示す．

圃場容水量を pF 1.8 と想定した場合の体積含水率は 0.340 - 0.443 m³m⁻³ であり，pF 2.6 と想定した場合は 0.242 - 0.324 m³m⁻³ であった．生長阻害水分点（pF 3.0）の体積含水率は 0.174 - 0.246 m³m⁻³ であった．容易有効水分量は pF 1.8 - 3.0 と想定した場合に 0.094 - 0.219 m³m⁻³ となり，pF 2.6 - 3.0 と想定した場合は 0.030 - 0.102 m³m⁻³ となった．容易有効水分量は，硬盤層が形成されている深さ 20 - 40 cm までの土層で低い傾向が認められた．

本研究では，圃場容水量を pF 1.8 と想定し，容易有効水分量を pF 1.8 - 3.0 として，必要用水量を算出した．

Table 2-8 各試験圃場の土壌水分特性

Soil moisture characteristics of each experimental site

Site	Depth (cm)	Field capacity		Depletion of moisture content for normal growth	Readily available water (RAW)	
		(pF 1.8)	(pF 2.6)	(pF 3.0)	(pF 1.8-3.0)	(pF 2.6-3.0)
Bobur Paxtakor ^{*)}	-	0.418	0.284	0.233	0.185	0.051
Axmedov	5	0.353	0.255	0.202	0.151	0.053
Nozima Durdona Fayz	15	0.349	0.250	0.206	0.143	0.044
	25	0.352	0.286	0.245	0.106	0.041
	35	0.340	0.276	0.246	0.094	0.030
	50	0.365	0.257	0.198	0.167	0.058
	70	0.388	0.276	0.174	0.214	0.102
Yangiobad	5	0.410	0.242	0.191	0.219	0.051
Nurafshon Qulb Sehri	15	0.392	0.270	0.224	0.168	0.046
	25	0.387	0.286	0.240	0.147	0.046
	35	0.391	0.291	0.241	0.150	0.050
	50	0.399	0.286	0.228	0.170	0.058
	70	0.443	0.324	0.230	0.213	0.094

^{*)} Soil moisture characteristics of Bour was measured by disturbed soil,
Yangiobad and Axmedv was measured by undisturbed soil

次に、B 圃場、A 圃場北側の圃場、Y 圃場で採取した深さ 100 cm までの土壌について、水溶性イオン濃度と pH を Table 2-8 に示す。

全ての圃場において、pH は 7.7 付近の中性を示し、水溶性イオンは Ca と SO₄ の占める割合が高かった。イオン濃度は、B 圃場、A 圃場北側の圃場と比べ、Y 圃場で高かったことから、Y 圃場での塩類集積が、より進行しているものと思われる。

Table 2-9 B 圃場, A 圃場北側の圃場および Y 圃場の土壌化学性

Chemical properties of soil in Farm B, farmland on the north side of Farm A and Farm Y

Site	Deps (cm)	pH	Cations (cmolc kg ⁻¹)				Anions (cmolc kg ⁻¹)		
			Ca	Mg	Na	K	H ₂ CO ₃	Cl	SO ₄
Bobur	0-30	7.7	2.34	1.60	1.09	0.07	0.39	0.56	4.59
Paxtakor	30-50	7.7	2.01	1.48	1.14	0.06	0.40	0.57	3.75
	50-70	7.7	2.12	1.61	1.30	0.05	0.39	0.65	4.54
	70-100	7.6	4.42	2.33	1.44	0.03	0.37	0.71	7.95
Axmedov	0-30	7.7	2.66	1.56	1.56	0.05	0.45	0.63	4.94
The farmland on the north side of Nozima Durdona Fayz	30-50	7.7	2.94	1.89	1.60	0.04	0.44	0.62	5.54
	50-70	7.8	2.60	1.73	1.81	0.04	0.44	0.81	5.32
	70-100	7.8	2.54	1.69	1.82	0.05	0.43	0.93	5.27
Yangiobad	0-30	7.7	6.19	2.92	1.71	0.07	0.39	0.81	10.43
Nurafshon Qulb Sehri	30-50	7.7	5.82	3.05	2.12	0.07	0.38	1.05	10.67
	50-70	7.7	6.89	3.33	2.25	0.04	0.36	1.28	12.08
	70-100	7.7	7.81	3.26	1.97	0.04	0.35	1.20	12.87

2011 年に, Y 圃場の綿花を対象とした根群調査を実施した. 綿花の播種後 28 日および 49 日に根群試料を採取し, 主根を除いた重量を計測した. 重量は, 採取した根群試料を深さ 5.0 cm 毎に区分し, 60 °C で 24 時間乾燥させた後に計測した. 根の重量分布を Fig. 2-15 に示す. 綿花の根は播種から 28 日後に深さ 15 cm, 49 日後に深さ 25 cm まで分布していたが, いずれの時期も深さ 10 cm までに 90 % 以上の根が集中していた.

2017 年に, A 圃場において, 綿花栽培時の土壌水分の消費状況を調査した. 灌漑 1 日 (24 時間) 後および 12 日後に, 採土管 (100 cc) にて深さ 5 - 95 cm までの土層から 10 cm 毎に土壌を採取し, 体積含水率を計測した. その結果と日本で計測した pF 2.6 の値を Fig. 2-16 に示す. 灌漑 1 日後からは深さ 30 cm まで, pF 2.6 からは深さ 40 cm までの土層で土壌水分が消費されており, その内, 50 % 以上が表層 (深さ 10 cm) での消費であった.

以上の根群分布および土壌水分消費の状況から, 綿花栽培における制限土層 (有効土層の水分消費に最も支配的な役割を果たす土層) は深さ 10 cm までの土層と考えられる.

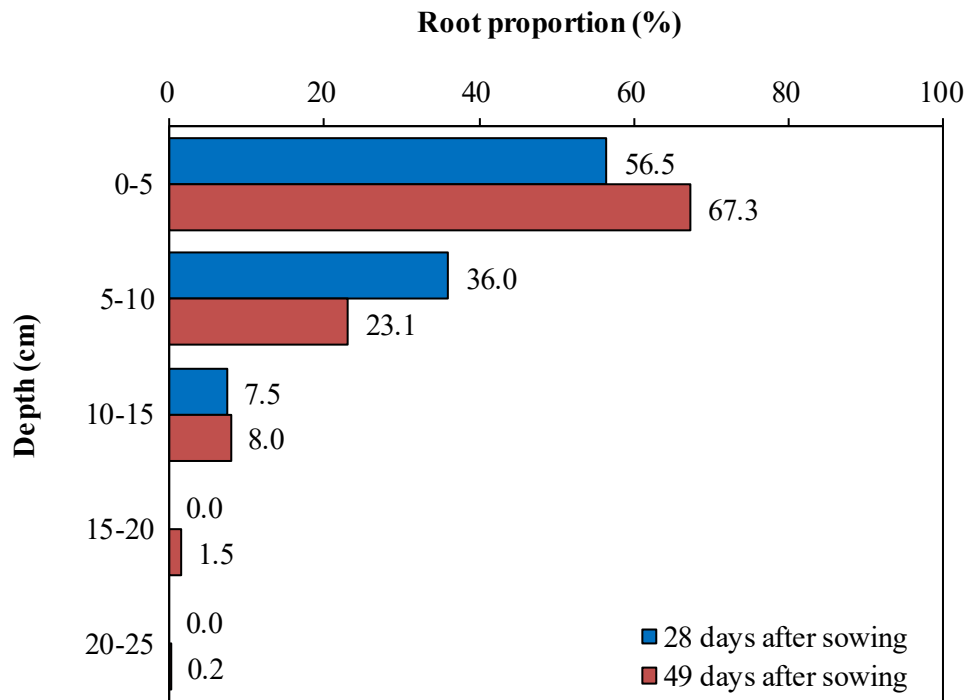


Fig. 2-15 Y 圃場における綿花の根群分布

Root proportion in Y field

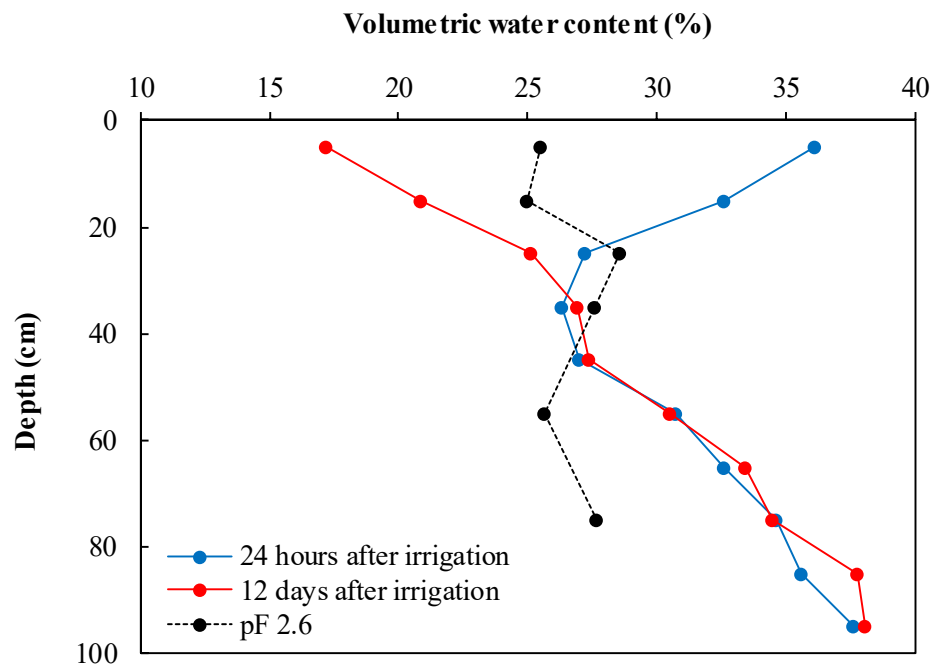


Fig. 2-16 A 圃場における土壌水分消費

Soil moisture consumption in A field

2.8 まとめ

ウズベキスタンは、1950年代からの大規模な灌漑開発によって造成された灌漑農地において綿花生産の役割を担い、ソ連経済の発展に大きく貢献してきた。しかし、不適切な水管理に伴う二次的塩類集積が進行するにつれ、綿花生産は伸び悩み、独立から25年以上が経過した現在も、塩類集積による被害に苦しんでいる。研究対象地域であるシルダリア州は、シルダリア川中流域に位置するが、灌漑農地の約98%において塩類集積が生じており、その被害が深刻な課題となっている。

ウズベキスタン政府やフェルメルは、塩類集積の問題を十分に理解しており、これまで、土地改良基金による排水路浚渫や伝統的な冬場のリーチングなどの対策を講じている。また、積極的に国際機関や研究所と連携し、塩類集積に関する様々なプロジェクトも実施している。その結果、僅かではあるが塩類化農地の面積は減少している。

2016年に就任したミルズィヤエフ大統領は、農業分野での改革に積極的であり、従来の小麦・綿花栽培から、より付加価値の高い園芸作物への転換を推進している。しかし、作物転換や新技術の導入は、比較的、条件の良い地域から進められているため、多くの塩類化した灌漑農地では、綿花・小麦栽培を継続せざるを得ない状況である。

したがって、ウズベキスタンの塩類化した灌漑農地において、持続的な農業生産を実現していくためには、フェルメルやWCAなどの実務者が営農活動の一環として継続的に取り組める安価で容易な対策の確立と、それらを実践する環境の整備が重要であると考えられる。

第3章 簡易サージフロー法（簡易 SF 法）による節水効果

3.1 簡易サージフロー法（簡易 SF）とは

畝間灌漑において、節水効果が期待できる手法のひとつにサージフロー（Surge Flow）灌漑法がある。（以下、SF 法）。畝間灌漑の欠点である「灌漑水の水足前進速度が遅い」、
「表面水の過剰な流亡」を改善するため、1979 年に Stringham と Keller が SF 法を提案した³⁻¹⁾。1988 年に Stringham は、SF 法を「一定または可変の間隔で一連の給水と停止による灌漑水の断続的な適用」と定義した³⁻²⁾。SF 法は、灌漑水が湿潤土壌よりも乾燥土壌において、速く浸透するという原理に基づき、断続的に給水することで、均一な灌漑および浸透損失の削減を図る手法である³⁻³⁾（Fig. 3-1）。SF 法では、1 回目の給水で畝間の浸透性を抑制し、2 回目以降の給水による灌漑水の水足前進速度の向上によって、畝間への通水時間を短縮させる効果が期待できる。

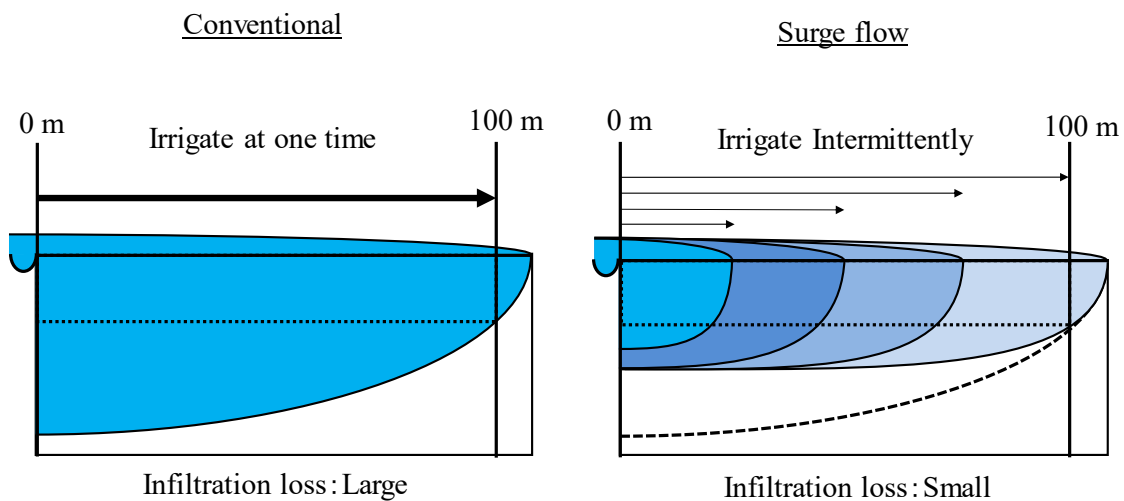
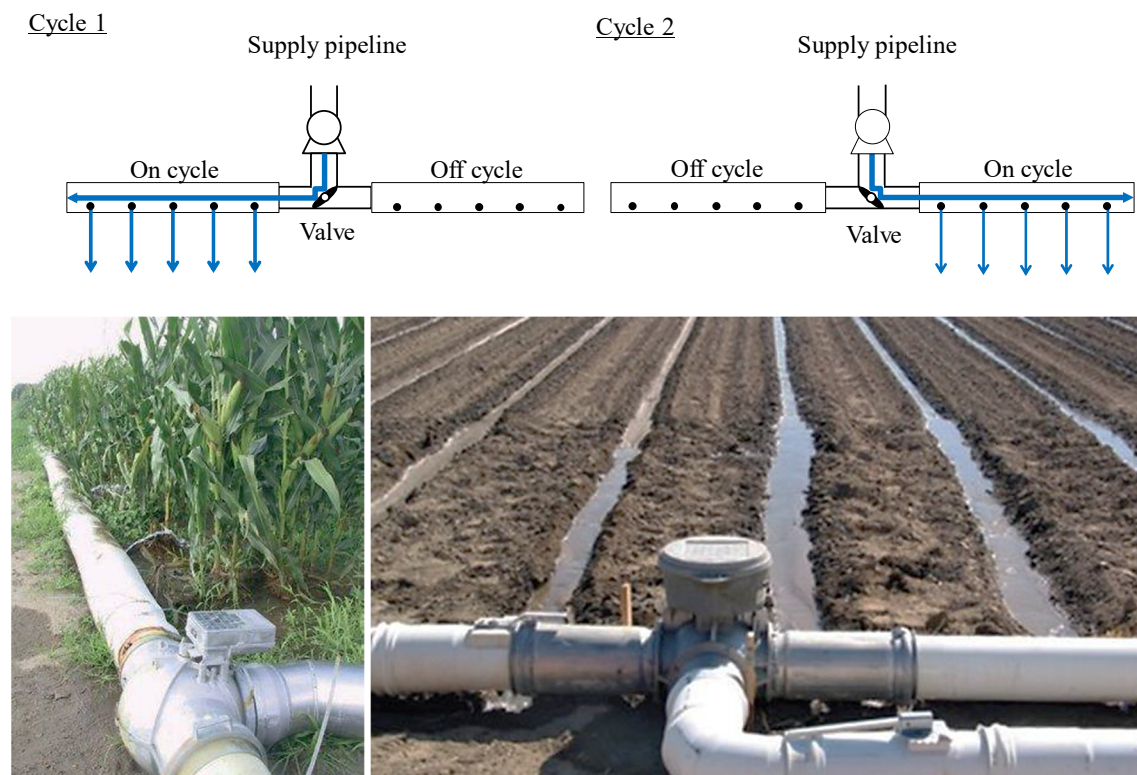


Fig. 3-1 SF 法 の 概 念

Concept of SF irrigation

SF 法による浸透性の低下は「土の移動と再配列による土壌の高密度化」、「土壌空隙への空気の封じ込め」、「水の再配分による浸透速度の減少」、「通水面の平滑化」といった四つの物理過程によって生じている³⁻⁴⁾。SF 法は、1980 年代頃よりアメリカ合衆国で広く適用されるようになり、世界中で知られる技術となった。Horst によれば、SF 法は 1970 年代

に、ブルガリアで開発・導入され、ソ連時代のキルギスやウズベキスタンにおいても導入が試みられたが、幅広い普及には至らなかったとのことである³⁻⁵⁾。しかしながら、ウズベキスタンにおいても SF 法による節水効果は検証されており、フェルガナ州での事例では、約 21 %の節水効果が得られている³⁻⁶⁾。SF 法は散水灌漑や点滴灌漑と比べ、比較的安価で容易な手法であるが、圃場に給水管やバルブを設置する必要がある (Fig. 3-2)。



Source: Grower's Guide to Surge Flow Irrigation³⁻⁷⁾

Fig. 3-2 SF 法の導入例

Example of introducing SF

ウズベキスタンの農村地域では、SF 法で必要となる給水管やバルブの調達が難しい状況にあり、仮に調達できたとしてもフェルメルによる費用負担が生じる。このことから、フェルメルが採用し易い手法とするため、新たな施設や大幅な労力増加を要しない、簡易 SF 法を考案した (以下、簡易 SF 法) (Fig 3-3)。簡易 SF 法は、SF 法の利点を活かしつつ、極めて簡素化し、通水対象の畝間に通常 4 回程度に分けて給水する SF 法を、1 日間隔で 2 回の給水に減らす手法である³⁻⁸⁾。

Simplified Surge Flow

Divides the water supply into two phases at 1-day intervals

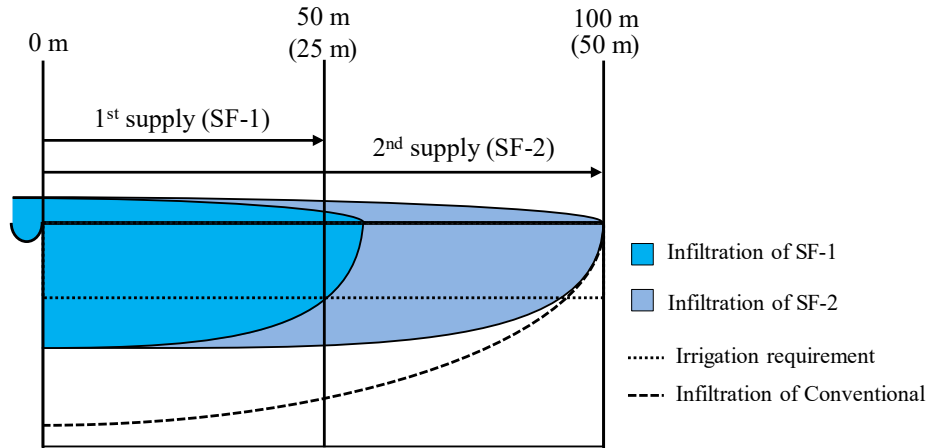


Fig. 3-3 簡易 SF 法の概念

Concept of Simplified SF irrigation

簡易 SF 法による畝間延長 100 m への給水は、第 1 回給水 (SF-1) において、畝間 0-50m 区間を通水し、灌漑水先端が 50 m に到達した時点で給水を停止する。SF-1 による表面水が畝間から完全に退去した後 (給水翌日)、第 2 回給水 (SF-2) によって、畝間 0-100 m 区間へ通水する (Fig. 3-3)。

この簡易 SF 法 を、ウズベキスタンのフェルメル圃場へ適用し、節水効果および最適な流入量・畝間長の検討を行った。

3.2 試験方法

圃場試験は、まず、2011 年に B 圃場において簡易 SF 法による節水効果を検証し、その後、2017 年に A 圃場において、最適な畝間への流入量 (Ls^{-1}) および畝間長を検証した。試験圃場の概要を Fig. 3-4 に示す。

B 圃場は東西約 460 m、南北約 1,020 m と広大で、東側に用水路、西側に排水路が整備されており、南から北に向かって灌漑が行われている。試験区は B 圃場の南側に設定した。B 圃場では、2009 年にレーザー均平が行われ、2010 年 4 月から 9 月に綿花、2010 年 10 月から 2011 年 6 月に小麦を栽培している。試験は小麦収穫後 (2011 年 7 月) に実施し、畝間の平均勾配は約 1/800 であった。

A 圃場の試験区は、北側の区画（東西約 820 m、南北約 330 m）内に設定した。区画の東側に用水路、北および西側に排水路が整備されており、東から西に向かって灌漑が行われている。試験は、2017 年の綿花栽培時（2017 年 7 月）に実施し、畝間の平均勾配は 1/1000 であった。

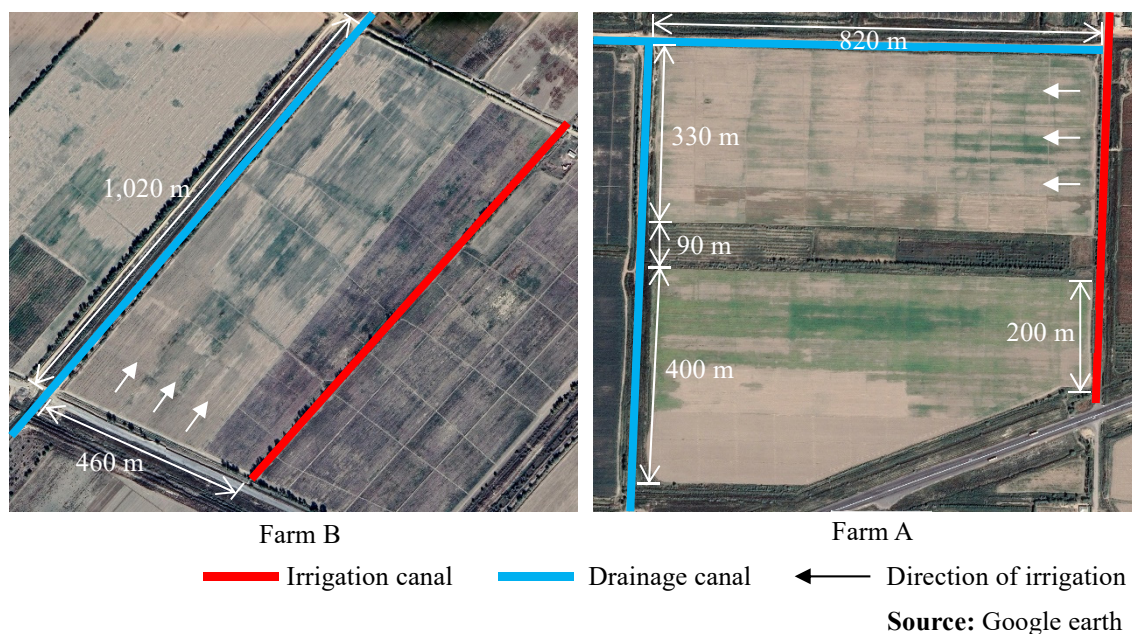


Fig. 3-4 試験圃場の概要

Overview of the experimental site

B 圃場では、延長 100 m の畝間 5 本を対象に、慣行法（Control）および簡易 SF 法による通水試験を実施した。畝間への通水は、フェルメルによる通常の灌漑と同様に、圃場内に造成した小水路から給水し、流入量が約 0.45 Ls^{-1} となるように調整した。試験では、畝間浸透量、水足前進・退去時間、そして、灌漑水量を水口に設置した三角堰にて計測した。

A 圃場では、延長 100 m および 50 m の畝間 3 本を対象に、慣行法および簡易 SF 法による通水試験を実施した。畝間への通水は、流入量を調整するためにガソリンポンプ(LGP 20-A, Leo Group, discharge rate 5.00 Ls^{-1})を用いて給水した。流入量は、ガソリンポンプ 1 台から給水する畝間を 3 本（流入量 1.70 Ls^{-1} ）と 1 本（流入量 5.00 Ls^{-1} ）に分けることで調整した。試験では、畝間浸透量、水足前進時間を計測し、灌漑水量は給水時間より算出した。なお、延長 50 m の畝間での通水試験は、流入量 1.70 Ls^{-1} にて実施した。

通水試験では、両試験ともに、Controlにおいて1回の給水で灌漑水を畝間末端の100 mにまで到達させ、その時点で給水を停止した。簡易SF法では、第1回給水(SF-1)にて、畝間延長の半分(25, 50 m)まで通水し、灌漑水先端が25 mおよび50 mに到達した時点で給水を停止した。第2回給水(SF-2)は、SF-1の完了後、約20 - 24時間が経過した後(翌日)に実施し、灌漑水先端が畝間末端の50 mおよび100 mに到達した時点で給水を停止した。なお、慣行法および簡易SF法ともに、通水対象の末端を閉塞せず、灌漑水を通水対象の先まで流下させた。

畝間湛水試験は、両試験ともに乾燥状態および湿潤状態の畝間にて実施した。通水前の畝間(乾燥状態)と通水後約20 - 24時間が経過した畝間(湿潤状態)にマリOTTタンク(定水頭で給水する貯水槽)を用いて定水位で湛水し、湛水後60分までの浸透量を計測した。乾燥畝間での結果は、慣行法、SF-1 および SF-2 の25 - 50 m, 50 - 100 m 区間の浸透条件とし、湿潤畝間での結果はSF-2 の0 - 25 m, 0 - 50 m 区間の浸透条件とした。

両試験ともに、畝はトラクタにて造成し、畝間隔はウズベキスタンで最も一般的な畝幅0.5 m, 畝間0.4 mとした。試験区の配置をFig. 3-5に示す。

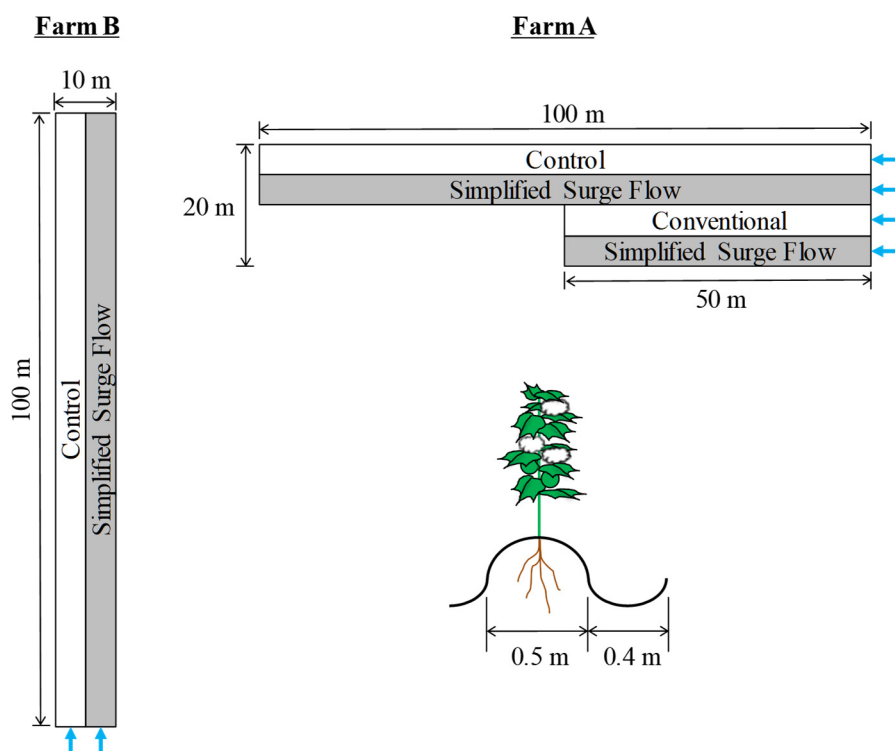


Fig. 3-5 B および A 圃場における試験区の設定

Set up of test plots in Farm B and A

本試験では、慣行法および簡易 SF 法による供給水量の比較を行うとともに、畝間浸透水量および水足前進・退去時間から浸透水量の推定を行った。

浸透水量の推定には、Kostiakov 式 (3-1) を用いた。

$$D = ct_i^n \quad (3-1)$$

ここで、 D ：時間 t_i の積算浸入水深 (mm)， t_i ：経過時間 (min)， c ， n ：Intake 定数である。

次に、畝間各地点における灌漑水の湛水時間を推定するため、各地点での灌漑水の到達時間（以下、「水足前進時間」）と浸透・退去するまでの時間（以下、「退去時間」）を水口から 10 m 毎に計測した。

水足前進時間の推定には、池浦らが提案した水足前進式 (3-2) ³⁻⁹⁾ を用いた。

$$t_a = al^3 + bl \quad (3-2)$$

ここで、 t_a ：距離 l に灌漑水が流下するまでの時間 (sec)， l ：水口からの距離 (m)， a ， b ：定数である。

灌漑水の退去時間には、ばらつきがみられるが、ここでは、上流側から下流側にかけて線形に減少するものとし、退去時間の推定には、以下に示す式 (3-3) を用いた。

$$t_r = el + f \quad (3-3)$$

ここで、 t_r ：給水開始から距離 l 地点の表面水が退去するまでの時間 (sec)， l ：水口からの距離， e ， f ：定数である。

式 (3-2)，(3-3) によって推定される畝間内各地点 (1 m 間隔) での湛水開始時間と湛水終了時間から、灌漑水の湛水時間を算出し、その時間から浸透式 (3-1) を用いて 1 m 当たりの浸透水深 (mm) を算出した。算出式を式 (3-4) に示す。

$$D = c \left(\frac{t_r - t_a}{60} \right)^n \quad (3-4)$$

本研究において、適用効率（圃場内に灌水された水量のうち、有効土層内にとどまる水量の割合：application efficiency）を検討するにあたり、必要用水量を超えて供給された水量を損失水量とし、また、各地点で浸透した水量のうち、必要用水量を超えて浸透した水量を浸透損失とした。必要用水量は土壤水分の消費状況、綿花の根群分布、そして、有効水分（作物の生長に有効な水分量）より決定した。

土壤水分の消費状況および根群分布から、制限土層は表層 10 cm とし、式 (3-5) を用いて、全容易有効水分量 (Total readily available moisture: TRAM) を算出した。

$$TRAM = (f_c - M_L) \times D_{ls} \times \frac{1}{C_p} \quad (3-5)$$

ここで, f_c : 圃場容水量 (pF 1.8, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), M_L : 生長阻害水分点 (pF 3.0, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), D_{ls} : 制限土層厚 (mm), C_p : 制限土層の土壤水分消費割合である. なお, B 圃場での C_p は根重割合で代用した.

次に, 乾燥・半乾燥地域の塩類化農地において見込んでおくべきリーチング要求量 (Leaching requirement: LR) は, 式 (3-6) より算出した³⁻¹⁰⁾.

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} \quad (3-6)$$

ここで, LR : リーチング要求量, EC_w : 灌漑水の電気伝導度 (Electric Conductivity), EC_e : 綿花の減収が生じないとされる土壤の電気伝導度 (飽和抽出液) の上限値 (dSm^{-1}) である. EC_e は FAO の基準値 (7.7 dSm^{-1}) を用いた.

得られた $TRAM$ および LR の値から, 必要用水量 (Required water: RW) を以下の式 (3-7) より算出した³⁻¹⁰⁾.

$$RW = \frac{TRAM}{1 - LR} \quad (3-7)$$

B 圃場および A 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW を Table 3-1 に示す.

Table 3-1 B および A 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW
 $TRAM$, EC_w , LR and RW in Farm B and A

<i>Site</i>	<i>TRAM</i> (mm)	<i>EC_w</i> (dSm^{-1})	<i>LR</i>	<i>RW</i> (mm)
Farm B	20.5	1.20	0.032	21.2
Farm A	26.1	1.42	0.038	27.2

3.3 結果

3.3.1 畝間浸透量

B および A 圃場での畝間湛水試験から得られた積算浸入水量を Fig. 3-6 に示す．なお，数値は 3 回の試験で得られた結果の平均値である．

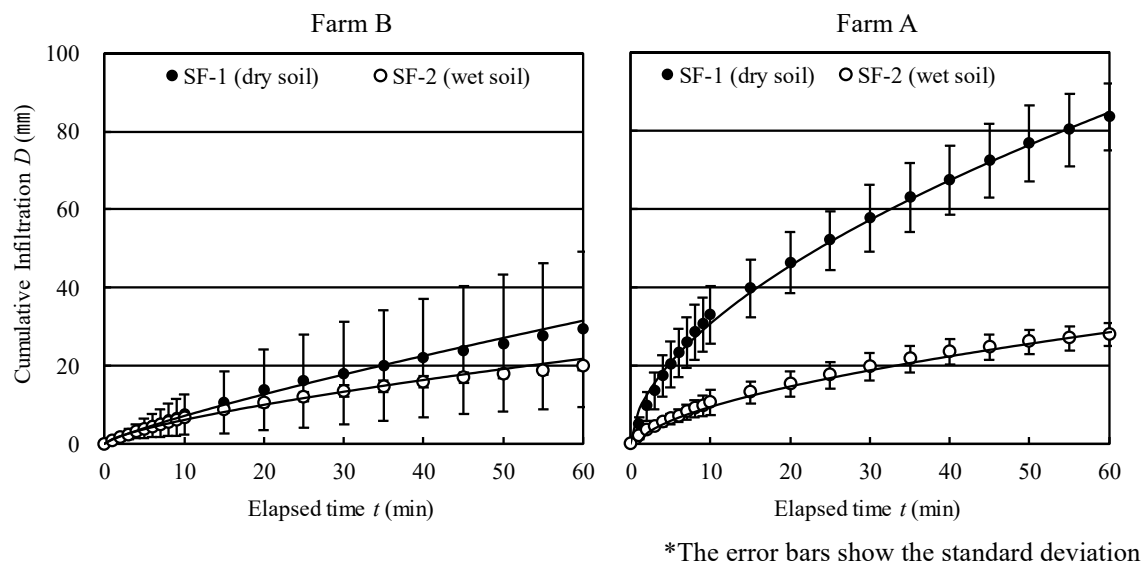


Fig. 3-6 B および A 圃場における積算浸入水量

Cumulative infiltration curve in Farm B and A

乾燥状態の畝間の浸透量 (SF-1) は，圃場 B よりも圃場 A の方が大きく，60 分後の積算浸透水量は，圃場 B で 29.4 mm，圃場 A で 83.4 mm であった．湿潤状態の畝間の浸透量 (SF-2) は，両圃場ともに SF-1 よりも減少し，圃場 B で 20.0 mm，圃場 A で 27.9mm となった．このことから，事前通水によって畝間の浸透性は低下し，その効果は，浸透性の高い圃場で大きいものと考えられる．また，測定結果のバラツキが SF-1 で大きく，SF-2 で小さいことから，浸透性にムラがある畝間であっても，事前通水によって，一様に浸透性を低下させることが出来ると考えられる．

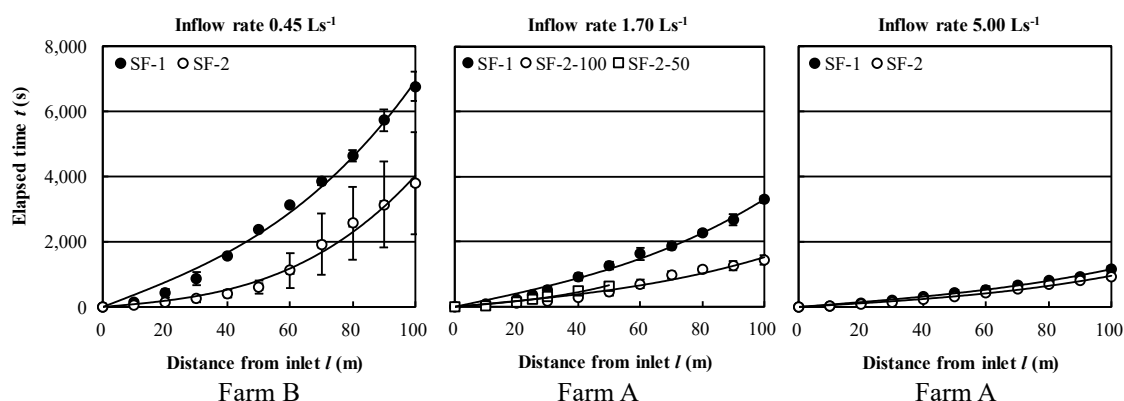
測定結果をもとに回帰分析で得られた浸入式の Intake 定数と Basic intake rate (I_b) を Table 3-2 に示す．両圃場ともに，SF-2 の I_b は，SF-1 の I_b の 50 %以下にまで減少した．

Table 3-2 B および A 圃場における Intake 定数と Basic intake rate (I_b)Intake constants c , n , and basic intake rate I_b in Farm B and A

Site	Treatment	c	n	I_b (mm)
Farm B	SF-1	1.06	0.83	24.0
	SF-2	1.20	0.71	11.5
Farm A	SF-1	8.36	0.57	25.4
	SF-2	2.60	0.59	9.5

3.3.2 水足前進時間

各試験圃場における乾燥状態 (SF-1) と一部湿潤状態 (SF-2) の畝間での水足前進時間 (灌漑水先端の移動距離と経過時間) を Fig. 3-7 に示す.



*The error bars show the standard deviation

Fig. 3-7 B および A 圃場における水足前進時間

Water advanced time by SF-1 and SF-2 at every 10 m in Farm B and A

水足前進時間は、流入量が大きくなるにつれ、短縮される傾向が認められた。流入量が大きいく程、水に勢いがあり、水足前進速度が大きくなるものと考えられる。

圃場 B での流入量が 0.45 Ls^{-1} による通水試験では、事前通水によって水足前進速度が向上し、100 m 地点までの到達時間が SF-1 (慣行法) の 6,768 秒に対し、SF-2 (50 m を事前通水) では 3,806 秒となり、給水時間が約 56% にまで短縮された。圃場 A の流入量 1.70 Ls^{-1} においても同様の効果が得られ、畝間 100 m 地点までの到達時間が SF-1 の 3,289 秒に対

し，SF-2 では 1,431 秒となり，給水時間が約 44 %にまで短縮された．畝間 50 m を対象とした通水試験でも同様に，50 m 地点までの到達時間が SF-1 の 1,299 秒に対し，SF-2（25m を事前通水）では 640 秒となり，給水時間が約 49 %にまで短縮された．



Fig. 3-8 簡易 SF 法による通水状況

Water flow situation by the simplified SF

一方，圃場 A で流入量を 5.00 Ls^{-1} とした通水試験では，畝間 100 m 地点までの灌漑水の到達時間が SF-1 の 1,148 秒に対し，SF-2 では 930 秒となり，約 81 %までの時間短縮に留まった．これは，流入量が多い 5.00 Ls^{-1} は水足の勢いが強く，SF-1 であっても短時間で 100 m 地点に到達できたことが要因として考えられる．

測定結果をもとに回帰分析で得られた水足前進式の定数を Table 3-3 に示す．

Table 3-3 B および A 圃場における水足前進式の定数

Water advance constants a , b in Farm B and A

Site	Inflow rate (Ls^{-1})	Length (m)	Treatment	a	b
Farm B	0.45	100	SF-1	0.0033	36.72
	0.45	100 (wet 50)	SF-2	0.0032	8.21
Farm A	1.70	100	SF-1	0.0013	19.88
	1.70	100 (wet 50)	SF-2	0.0007	8.63
	1.70	50 (wet 25)	SF-2	0.0022	7.67
	5.00	100	SF-1	0.0004	7.23
	5.00	100 (wet 50)	SF-2	0.0004	5.51

3.3.3 水足退去時間

圃場 B において測定した，畝間各地点の水足退去時間を Fig. 3-7 に示す．同一のトラクタで畝を造成し，近隣の畝間を用いて通水試験を実施したことから，畝間の整備水準を同一であったと考えられる．しかしながら，慣行法，簡易 SF 法ともに各地点の水足退去時間に大きなバラツキがみられた．実際の圃場において，高精度に均一な畝・畝間を造成することは非常に困難であり，畝間内の局所的な不陸による湛水深の違いなどが，バラツキが生じた要因と考えられる．水足退去時間について，慣行法と簡易 SF とに明確な差は認められなかったが，平均値に着目すると，両処理ともに水口側から水尻側にかけて退去時間が減少する傾向があった．

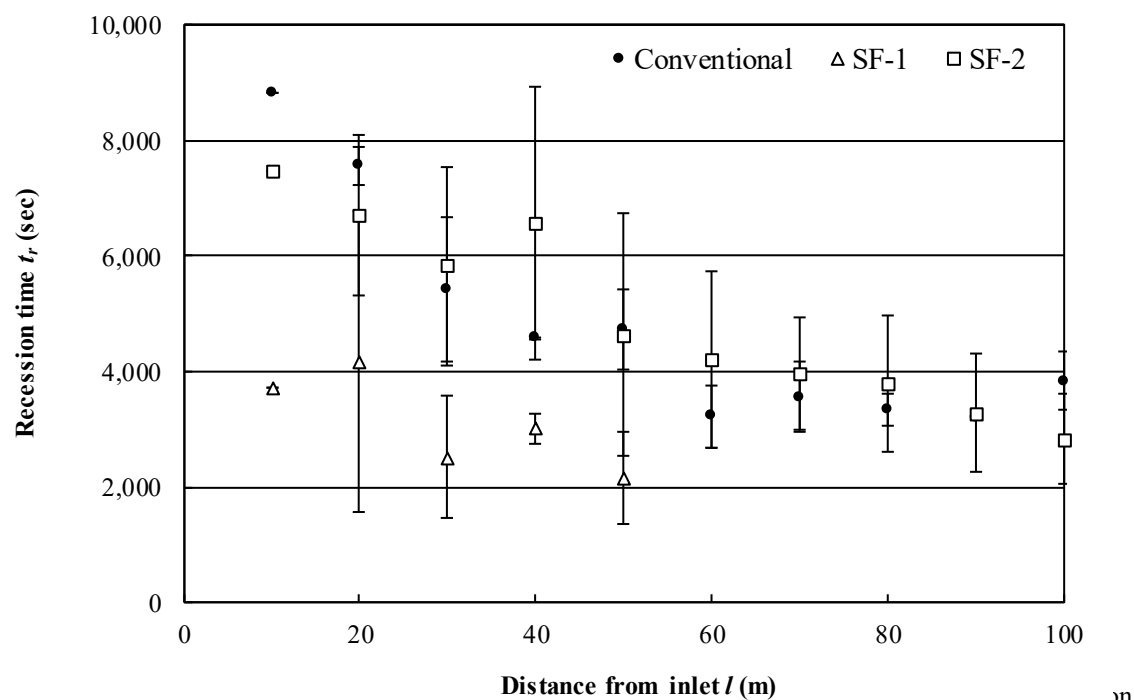


Fig. 3-9 B 圃場における水足退去時間

Water recession time in Farm B

3.3.4 節水効果

各試験区，各流入量における灌漑時間，供給水量，適用効率，そして，簡易 SF 法の適用による節水効果を Table 3-4 に示す．このとき，適用効率は灌漑水量に占める必要用水量の割合とし，節水効果は，簡易 SF 法の適用による慣行法（Control）からの減少量とした．

Table 3-4 各流入量における簡易 SF 法による節水効果

Water saving effect by simplified SF for each inflow rate

Site	Slope	Inflow rate	Treat ment	Length	Required water	Irrigation time			Supplied water		Application efficiency	Water-saving
		[RW]			Ave (sec)			[SW]	(m ³)	[RW/SW]	ratio ^{*)}	
		(Ls ⁻¹)		(m)	(m ³)	SF-1	SF-2	Total	Ave	Std	(%)	(%)
Farm B	1/800	0.45	Control	100	1.91	6,768	0	6,768	3.05	0.21	62.6	-
			Simplified SF	100	1.91	2,220	3,806	6,026	2.71	1.19	70.5	11.1
Farm A	1/1000	1.70	Control	100	2.45	3,289	0	3,289	5.59	0.15	43.8	-
			Simplified SF	100	2.45	1,236	1,431	2,667	4.53	0.39	54.1	19.0
			Control	50	1.22	1,299	0	1,299	2.21	0.26	55.2	-
			Simplified SF	50	1.22	374	640	1,014	1.72	0.10	70.9	22.2
	1/1000	5.00	Control	100	2.45	1,148	0	1,148	5.74	0.48	42.7	-
			Simplified SF	100	2.45	462	930	1,392	6.96	0.50	35.2	-21.3

*) Ratio of water-saving amount by Simplified SF to amount of supplied water by conventional over the same length of the furrow

流入量が $0.45 Ls^{-1}$, $1.70 Ls^{-1}$ では、簡易 SF 法による効果が認められ、それぞれ、約 11.1 % と 19.0 % の節水効果が得られた。さらに、流量量 $1.70 Ls^{-1}$ にて、畝間延長を 50 m に短縮した時、節水効果は約 22.2 % にまで向上した。適用効率についても 7.9 - 15.7 % の改善が見られた。一方、流入量 $5.00 Ls^{-1}$ では、流量が多いことから、慣行法および SF-1 であっても水足前進速度が早く、供給時間が短かったことから、簡易 SF 法による節水効果は得られず、供給水量が約 21.3 % 多くなり、適用効率も約 7.5 % 低下する結果となった。

3.3.5 浸透水量の推定

畝間湛水試験および通水試験で得られた浸透式と水足前進式から、各流入量における慣行法および簡易 SF 法の浸透水量を推定した。B 圃場で測定した水足退去時間に大きなバラツキがあったことから、灌漑時間中の浸透水量を推定の対象とすることとし、浸透水量 (m^3) は灌漑水が湛水する畝間幅 (0.4 m) を基に算出した。各流入量における浸透水量の分布を Fig. 3-10 に示す。

簡易 SF 法における浸透水量は、全ての流入量および畝間延長において慣行法よりも少ない分布となった。簡易 SF 法の浸透水量は、0 m 地点 (水口) を最大に、事前に通水した区間の末端である 50 m および 25 m 地点にかけて減少した。通水区間を通過すると急激に増加し、その後、100 m 地点 (水尻) にかけて慣行法と同等にまで減少した。

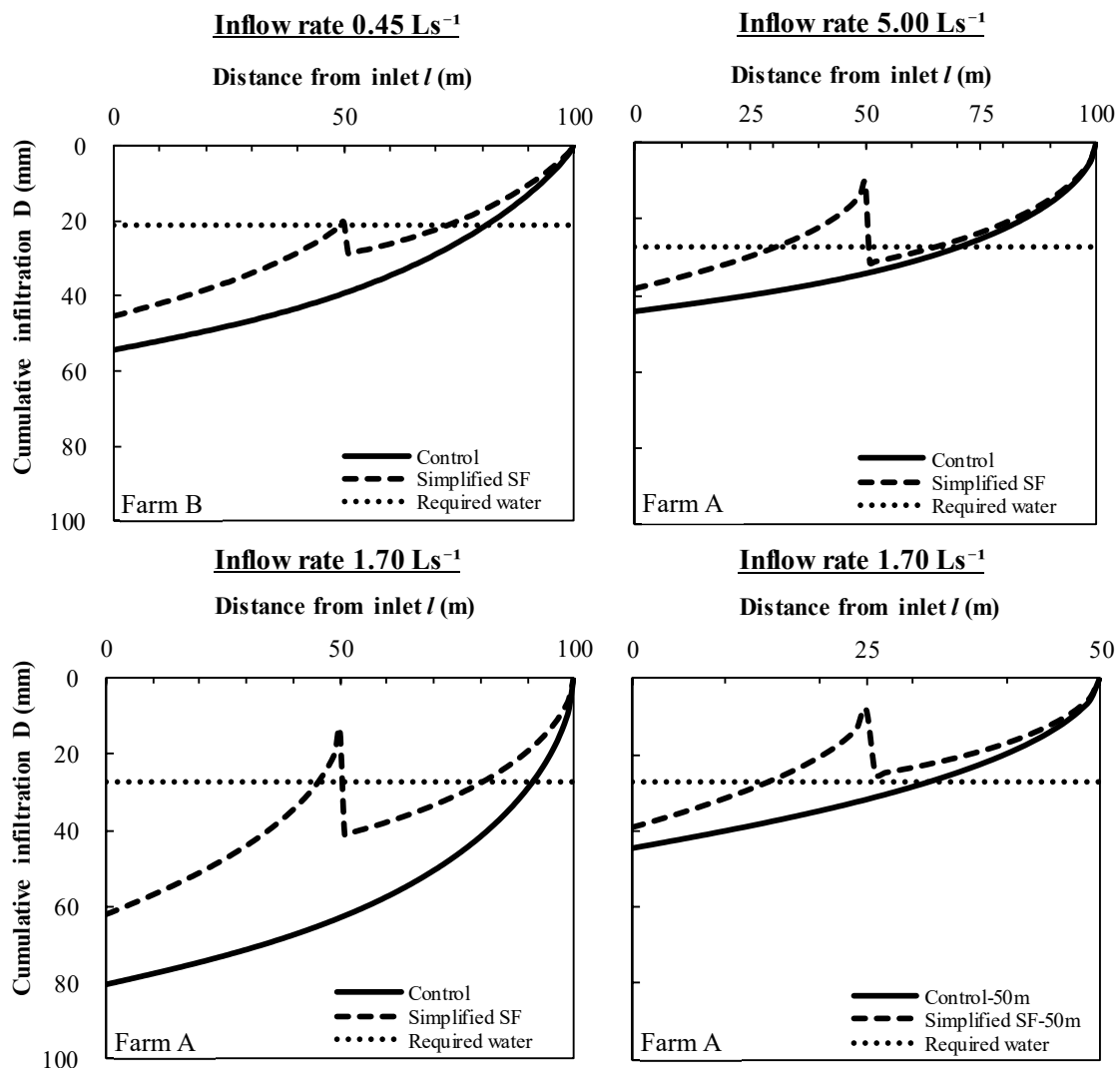


Fig. 3-10 灌漑時間中の畝間各地点における積算浸透水量の分布

Distribution of cumulative infiltration water during irrigation time

各流入量における慣行法および簡易 SF 法の積算浸透水量の推定値と簡易 SF 法による浸透水量の削減効果を Table 3-5 に示す。全ての通水条件にて積算浸透水量の削減効果が得られる結果となり、流入量 1.70 L s^{-1} にて畝間 100 m を通水した場合が最も高い 36.2 %、流入量 0.45 L s^{-1} にて畝間 100 m を通水した場合が最も低い 6.1 % となった。

節水効果が得られなかった、流入量 5.00 L s^{-1} にて畝間 100 m を通水した場合であっても、21.3 % の削減効果が得られていることから、簡易 SF 法の適用により灌漑中の浸透水量が削減されているものと考えられる。

Table 3-5 各流入量における簡易 SF 法による浸透水量の削減効果（推定）

Reduction of infiltration water volume by simplified SF for each inflow rate (estimated)

Site	Slope	Inflow rate	Treatment	Length (m)	Infiltration		Reduction effect (%)
		(Ls^{-1})			Ave depth (mm)	Volume (m^3)	
Farm B	1/800	0.45	Control	100	28.5	1.14	-
			Simplified SF	100	26.8	1.07	6.1
Farm A	1/1000	1.70	Control	100	58.0	2.32	-
			Simplified SF	100	37.0	1.48	36.2
			Control	50	30.0	0.60	-
			Simplified SF	50	22.5	0.45	25.0
	1/1000	5.00	Control	100	31.8	1.27	-
			Simplified SF	100	25.0	1.00	21.3

3.4 まとめ

本章では、間断的な給水によって節水効果を得る SF 法の利点を活かしつつ、極めて簡素化した簡易 SF による節水効果を検証した。簡易 SF 法は、給水管もバルブも設置せず、通常の畝間灌漑を 1 日間隔で 2 回に分けて行うだけの安価で容易な技術である。

圃場試験の結果、この簡易 SF 法であっても、畝間への流入量が標準的な $0.45 Ls^{-1}$ と $1.70 Ls^{-1}$ である場合、事前通水 (SF-1) によって、畝間の浸透性低下と平滑化が生じ、畝間 100 m への通水で 11.1 - 19.0 %、畝間 50 m への通水で 22.2 % の節水効果を得ることができた。一方、畝間への流入量が $5.00 Ls^{-1}$ と多量であるとき、灌漑水の水足前進に勢いがあり、乾燥状態の畝間であっても、短時間で畝末端に到達することから、簡易 SF 法による節水効果を得ることができなかった。しかしながら、流入量が $5.00 Ls^{-1}$ であっても、事前通水 (SF-1) による畝間の浸透性の低下は生じているものと考えられ、灌漑時間中の浸透水量の推定では、慣行法 (Control) と比べ、21.3 % 浸透水量が少なくなった。

以上から、簡易 SF 法は灌漑・排水施設や水管理体制が不十分な開発途上地域においても、現状の畝間灌漑に安価で容易に適用できるため、節水への取り組みの第一歩として有効な手法になり得ると考えられる。また、圃場の均平化³⁻¹¹⁾や第 4 章で述べる隔畝間灌漑法 (SFI) と簡易 SF 法を組み合わせることで、さらなる節水が図れるものと考えられる。

今回の通水試験では、畝間の局所的な不陸などにより、水足の前進に滞留が生じた。このため、簡易 SF 法による節水効果を十分に得るには、均一な畝間の造成や水足前進速度を最適化する流入量の調整が必要と考えられる。

第4章 隔畝間灌漑法（Skip Furrow Irrigation: SFI）による節水効果

4.1 隔畝間灌漑法（Skip Furrow Irrigation: SFI）とは

畝間灌漑において節水効果が期待できる手法として、上述した SF 法の他に、隔畝間灌漑法（Skip Furrow Irrigation: SFI）がある。SFI は、すべての畝間ではなく、ひとつおきに灌漑する手法である⁴⁻¹⁾。

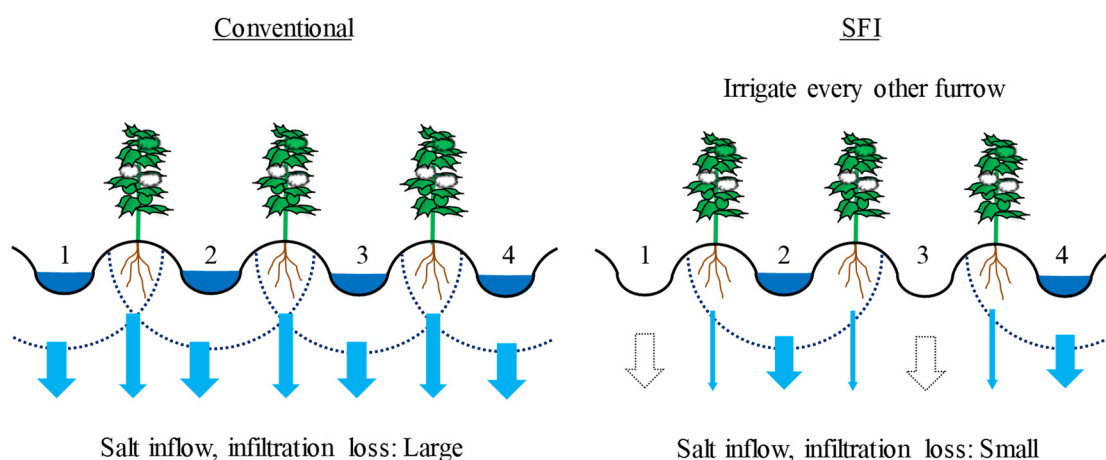


Fig. 4-1 隔畝間灌漑法（SFI）の概念

Concept of Skip Furrow Irrigation (SFI)

例えば、通常の畝間灌漑では播種の 10 日後に畝間 No.1 から No.4 までの全ての畝間を通水するが、SFI では、播種 5 日後に畝間 No.1 と No.3 を通水し、播種 10 日後に畝間 No.2 と No.4 を通水する (Fig. 4-1)。このように、SFI は播種から 10 日後に大量の灌漑を行うのではなく、播種から 5 日毎など、少量で頻繁に灌漑する手法である⁴⁻²⁾。なお、FAO や多くの研究者は、隔畝間灌漑法のことを Alternate Furrow Irrigation (AFI) と表現しているが、本研究では、畝間をひとつとばして (Skip) で灌漑する手法であることから、Skip Furrow Irrigation (SFI) という表現を用いることとした。

SFI の利点は、通常の畝間灌漑と比べ、表層土壌の湿潤域が大幅に減少することから、蒸発散量の低減と下方浸透を抑制する効果が期待できる⁴⁻³⁾。また、水資源が限られている時、通常の畝間灌漑よりも広い範囲に水を供給することができる⁴⁻⁴⁾。さらに、表層土壌に乾燥域が残っていることから、灌漑直後に降雨があった場合でも、その水分を保持するこ

とができる⁴⁻⁴⁾.

SFI の適用によって灌漑水量が大幅に減少するため、作物への影響が懸念されるが、John らは、ソルガム栽培に SFI を適用し、わずかな減収で 20 - 50 %の節水効果が得られたことを報告している⁴⁻⁵⁾。Yvan らも、大豆栽培に SFI を適用し、大きな減収無しで、約 50 %の節水効果が得られたことを報告している⁴⁻³⁾。また、Khan らは、パキスタンにおいて綿花栽培に SFI を適用し、僅かな減収で約 40 %の節水効果が得られたことを報告している⁴⁻⁶⁾。なお、Mitchell らは、ペパーミントに SFI を適用し、明確な減収無しで約 58 %の節水効果があったことを報告しているが、SFI の欠点として、水量が少ないために灌漑に時間を要すること、灌漑毎に畝間の開閉といった作業が必要になることを挙げている³⁻⁴⁾。ウズベキスタンにおいては、Horst らが綿花栽培に SFI を適用し、僅かな減収で約 29 %の節水効果が得られたことを報告している³⁻⁶⁾。

本研究では、SFI をウズベキスタンのフェルメル圃場へ適用し、先行研究と同等の節水効果が得られるかを検証するとともに、SFI の適用による畝内の塩分の動きを観測した。

4.2 試験方法

圃場試験は A 圃場の北側において、2014 年から 2015 年と 2017 年の綿花栽培時期に実施した。2014 年と 2015 年の試験では、SFI 法の適用による節水効果と収量への影響を検証し、2017 年の試験では、SFI 法の適用による畝内の土壌塩分の動きを観察した。

2014 年から 2015 年の圃場試験は、A 圃場の北側に東から西に向けて、トラクタにて畝幅 0.5 m、畝間幅 0.4 m の畝を造成し、畝間 4 本、延長 50 m (3.6 m×50 m, 180 m²) の試験区を設定した。試験区は 2 処理 (Control と SFI) 3 反復の合計 6 区とした (Fig 4-2)。

2014 年 7 月 22 日と 2015 年の 6 月 27 日に、圃場内の小水路から慣行法 (Control) と SFI によって灌漑し、水口に設置した四角堰で灌漑水量を測定した。2014 年 9 月 20 日と 2015 年 9 月 20 日に綿花の収量調査を行い、試験区の上流、中流、下流に設定した坪刈区 (幅 1.8 m, 長さ 1.1 m, 1.98 m²) において、綿重量を測定した。

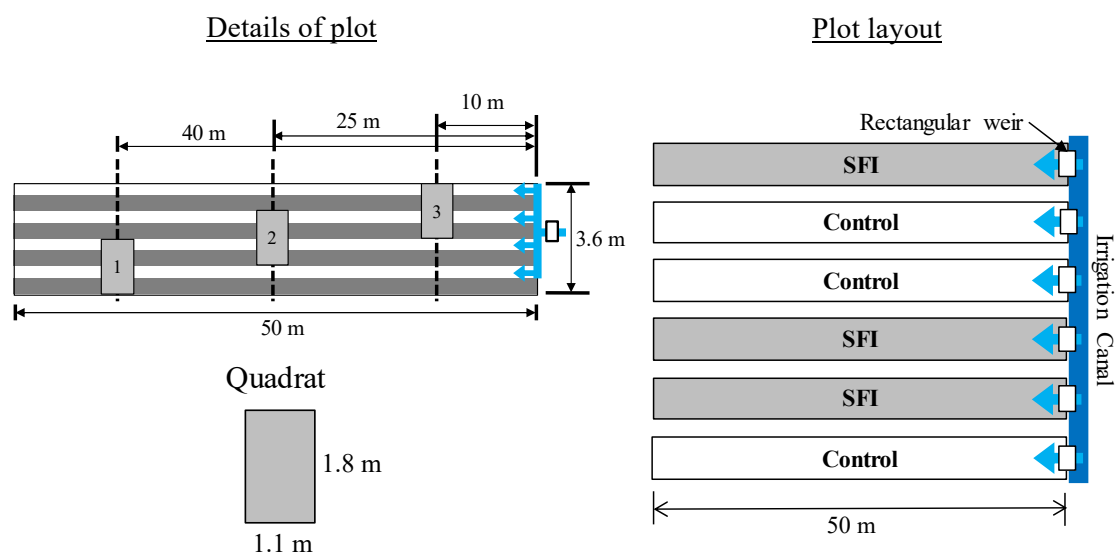


Fig. 4-2 試験区の設定 (2014 - 2015 年)

Set up of test plot (2014 - 2015)

通常の SFI では、灌漑毎に通水する畝間を入れ替える（交互隔畝間灌漑法，Alternate Skip Furrow Irrigation: ASFI）ため、第 1 回灌漑で畝の右側、第 2 回灌漑で畝の左側を灌漑することにより、畝中央に塩分が集積してしまう．このような土壌塩分の動きを防止するには、通水する畝間を固定（固定隔畝間灌漑法，Fixed Skip Furrow Irrigation: FSFI）し、絶えず同じ方向から灌漑する方法が有効と考えられる．そこで、2017 年の圃場試験では、FSFI の適用による畝内の土壌塩分の動きを把握するため、慣行法（Control）、ASFI、FSFI の適用 (Fig. 4-3) に伴う畝内の塩分変化を観察した．

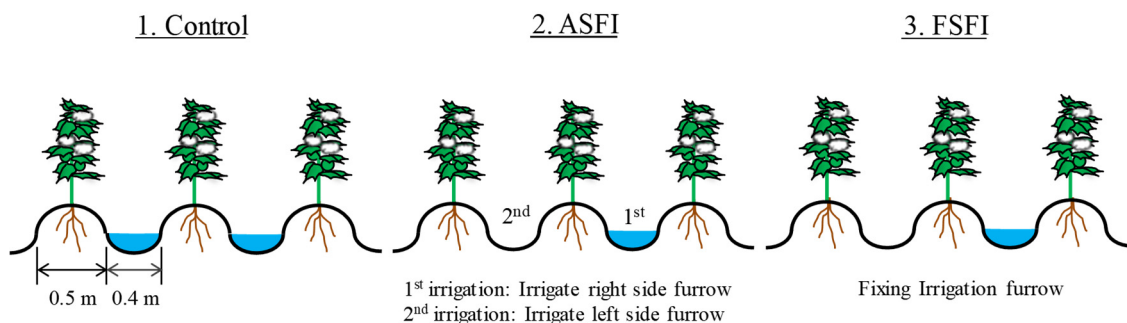


Fig. 4-3 2017 年の圃場試験における灌漑処理

Irrigation treatment of field test in 2017

試験は、A 圃場の北側に東から西に向けてトラクタにて畝幅 0.5 m、畝間幅 0.4 m の畝を造成し、畝 1 本と畝間 2 本（幅 1.3 m）、延長 4 m の試験区（5.2 m²）を設定した。灌漑はガソリンポンプ（LGP 20-A, Leo Group, discharge rate 5.00 Ls⁻¹）にて行い、灌漑水量は、RIIWP が推奨する 100 mm を基準に、EFI は 0.52 m³、ASFI および FSFI には、Control の半分となる 0.26 m³ とした。Devkota らによれば、灌漑に伴う土壌塩分の動きは、深い土層よりも深さ 15 cm までの表層土層で大きいとのことから^{4,7)}、表層 10 cm までの土壌塩分の動きを観察することとした。土壌は、灌漑の前後に畝の右、左、中央の深さ 0, 1, 5, 10 cm より採取し、乾燥土壌と水の混合比 1:1 にて EC_{1:1} を測定した。綿花収量は試験区全体の綿重量を測定した。試験区は 3 処理 3 反復の合計 9 区とした（Fig 4-4）。

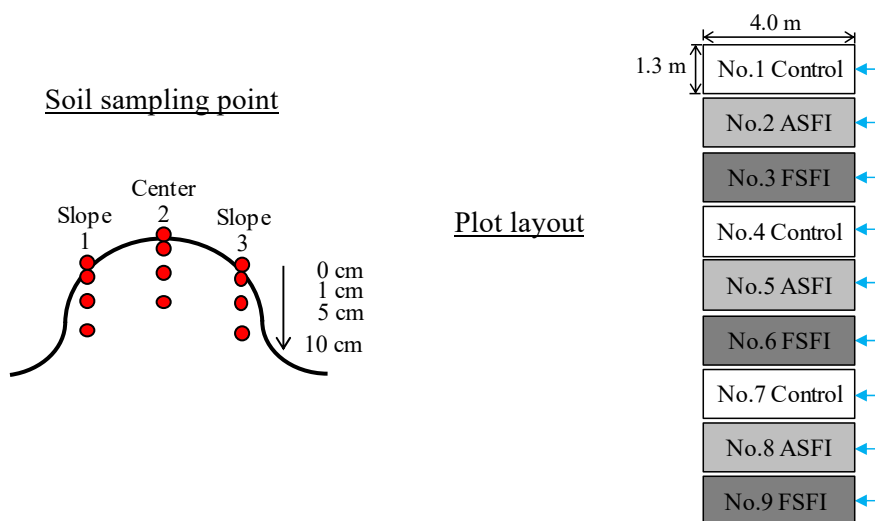


Fig. 4-4 試験区の設定（2017 年）

Set up of test plot (2017)

畝内の塩分量は、採取土壌で測定した EC_{1:1} から単位当たりの塩分量（mg cm⁻³）を算出して、各手法の適用に伴う塩分の動きを比較した。浸出溶液の塩濃度（g L⁻¹）は、浸出された懸濁液の電気伝導度（dS m⁻¹）と関係しており、実験室での測定結果から、CaCl₂ の場合、次式で表される。

$$c = 0.423\sigma^{1.184} \quad (4-1)$$

ここで、 c ：浸出溶液の塩濃度（g L⁻¹）， σ ：電気伝導度（dSm⁻¹）である。

EC_{1:1} から、式 (4-1) によって塩濃度 (g L⁻¹) に換算し、得られた塩濃度から、以下の式 (4-2) を用いて、単位体積当たりの塩分量を算出した。

$$\theta_c = c \frac{M_{add}}{V} \quad (4-2)$$

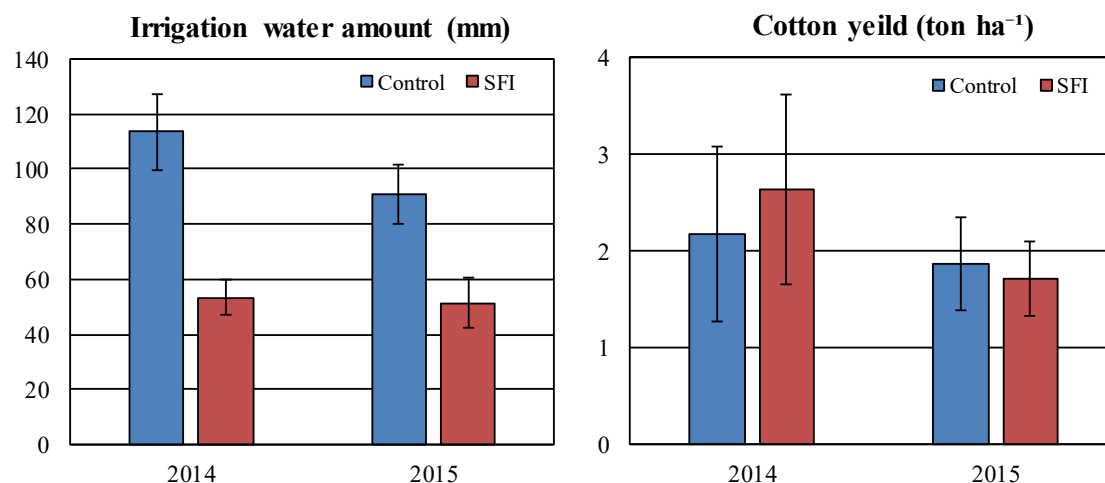
ここで、 θ_c : 単位体積当たりの CaCl₂ の重量 (mg cm⁻³)、 c : 浸出溶液の塩濃度 (g L⁻¹)、 M_{add} 加えた蒸留水の重量 (g)、 V : 土壌の体積 (cm³) である。

4.3 結果

4.3.1 節水効果と綿花収量への影響

2014 年および 2015 年の試験で得られた、Control と SFI における灌漑水量と綿花収量を Fig. 4-5 に示す。灌漑水量は、Control と比べ SFI の方が低くなり、2014 年、2015 年において、それぞれ、52.9 %および 42.9 %の節水効果が得られた。綿花収量は、2014 年において、Control よりも SFI の方が 21.5 %高くなり、2015 年は Control よりも SFI の方が 8.7 %低い結果となった。2014 年の綿花収量に幅が見られたが、土壌水分・塩分などの灌漑的な要素以外にも、施肥や防除などの営農活動も収量に影響を及ぼしていると思われる。

今回、SFI をフェルメル圃場に適用した結果、大幅な減収は認められなかったことから、シルダリア州においても SFI による効果が得られるものと考えられる。



*The error bars show the standard deviation

Fig. 4-5 対照区および SFI における灌漑水量と綿花収量

Irrigation water amount and cotton yield under Control and SFI



Fig. 4-6 圃場試験の状況

Situation of field test (2014-2015)

次に、試験で得られたデータから算出した流入量および適用効率を Table 4-1 に示す。必要用水量 (m^3) は、Table 3-2 に示した RW (27.2 mm) を用いて、畝間 1 本への必要用水量を求め、その値に通水畝間の本数を乗じて算出した。

Table 4-1 流入量と適用効率

Inflow rate and application efficiency

Site	Slope	Year	Length (m)	Required water [RW] (m^3)	Treatment	Ave Inflow (Ls^{-1})	Ave Irrigation time (sec)	Supplied water [SW] (m^3)		Application efficiency [RW/SW] (%)	Water- saving ratio ^{*)} (%)
								Ave	Std		
Axmedov	1/1000	2014	50	4.90	Control	7.16	2,900	20.4	2.5	24.0	-
			50	3.81	SFI	4.51	2,200	9.6	2.0	39.7	52.9
		2015	50	4.90	Control	6.65	2,480	16.3	1.1	30.1	-
			50	3.81	SFI	5.37	1,740	9.3	1.7	41.0	42.9

本試験では、試験区の水口において三角堰にて流量を測定し、その後、Control では 4 本、SFI では 2 本の畝間に通水した。そのため、試験区への流入量が標準的な畝間 1 本への流入量よりも大きくなった。このため、SFI 法の適用によって約 42.9 - 52.9 % という、大きな節水効果が得られたが、適用効率は 8.9 - 15.7 % 程度の改善に留まった。

4.3.2 固定隔畝間灌漑法 (FSFI) の適用による畝内の塩分挙動

2017 年の圃場試験では、7 月 11 日と 7 月 24 日に灌漑を行い、土壌採取は 7 月 11 日（第 1 回灌漑前）、7 月 14 日（第 1 回灌漑後）、7 月 24 日（第 2 回灌漑前）そして 7 月 27 日（第 2 回灌漑後）に実施した。採取した土壌で測定した $EC_{1:1}$ から算出した、Control における畝内の塩分分布を Fig. 4-7 に示す。

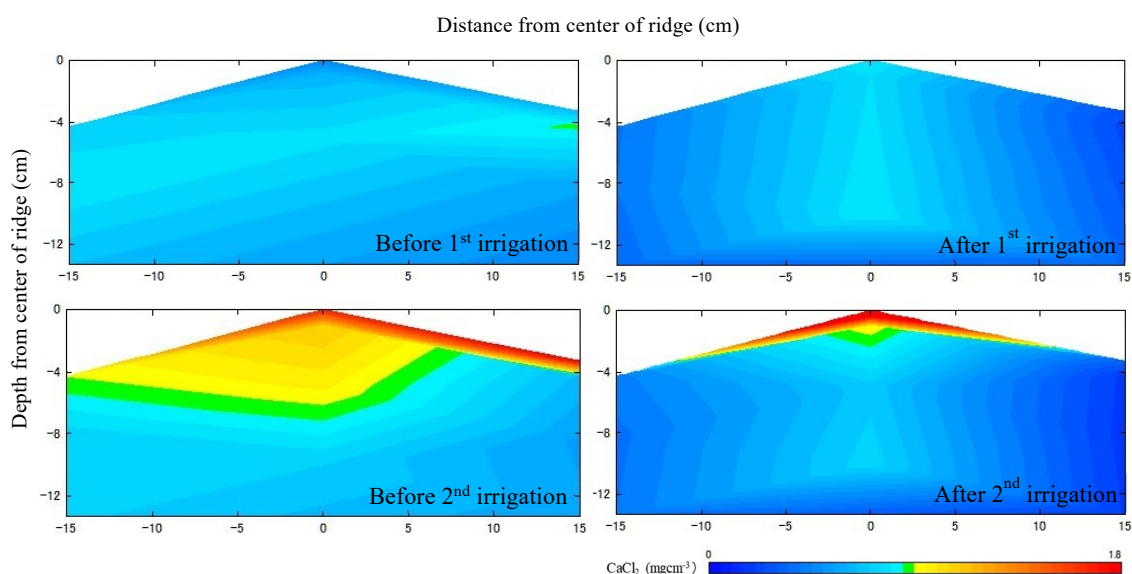


Fig. 4-7 対照区における灌漑前後の塩分分布

Salt distribution before and after irrigation under Control

Control では、畝両側の畝間を通水するため、灌漑毎に塩分が畝中央に移動し、第 2 回灌漑後、畝中央の表層部分に塩分が集積した。次に、ASFI および FSFI における畝内の塩分分布を Fig. 4-8, Fig. 4-9 に示す。

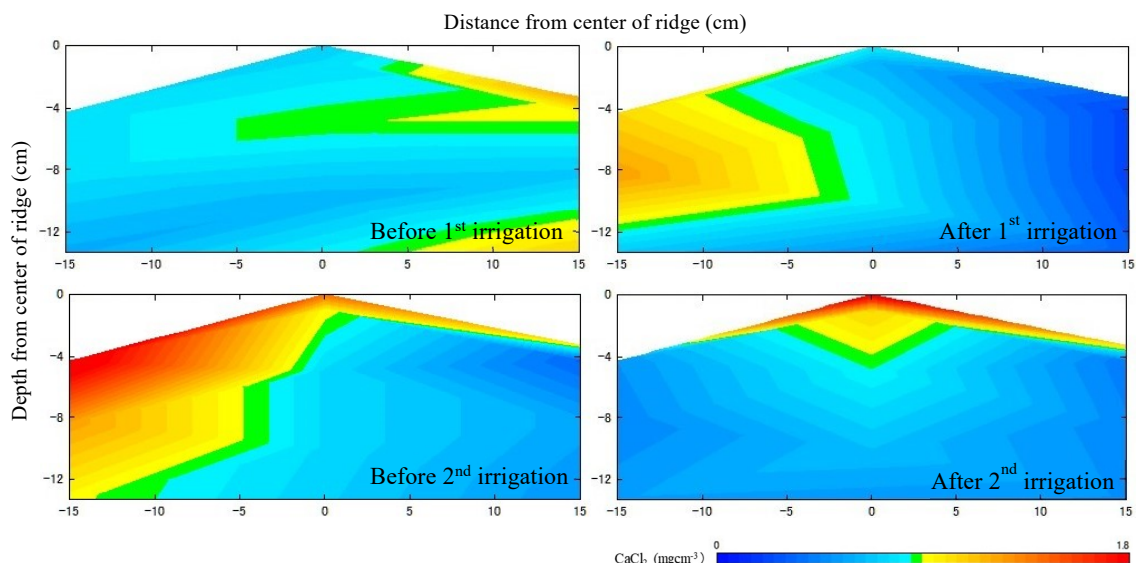


Fig. 4-8 ASFI における灌漑前後の塩分分布

Salt distribution before and after irrigation under ASFI

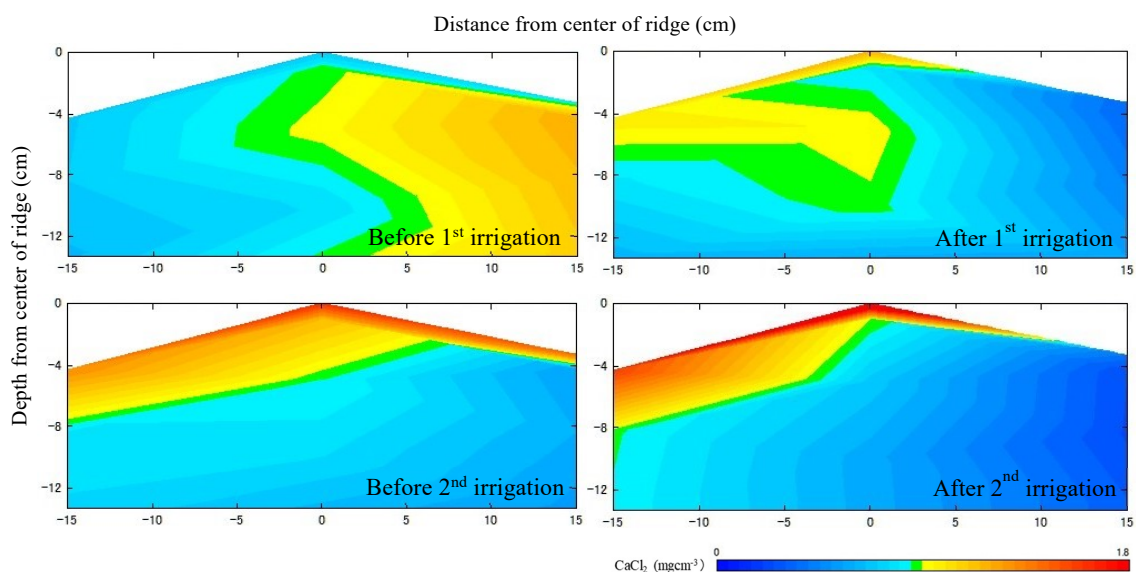


Fig. 4-9 FSFI における灌漑前後の塩分分布

Salt distribution before and after irrigation under FSFI

ASFI では、第 1 回灌漑にて畝右側の畝間を通水したことから、灌漑後、塩分は畝の左側に移動した。しかし、第 2 回灌漑において、畝左側の畝間を通水したために、畝の左側に移動した塩分が、再度、畝の右側へ移動し、その結果、塩分は Control と同様に畝中央に集積した。一方、FSFI では、第 1 回および第 2 回灌漑において、畝右側の畝間を通水したこ

とから、塩分は継続して畝左側への移動し、第2回灌漑後、塩分は畝の左側に集積した。

以上の結果から、通水する畝間を固定する FSFI によって畝内の塩分が畝の側面に押し出される効果があるものと考えられる。

2017 年 9 月 11 日に、綿花の収量調査を行い、試験区全体の綿重量を測定した。収量調査の結果を Fig. 4-10 に示す。

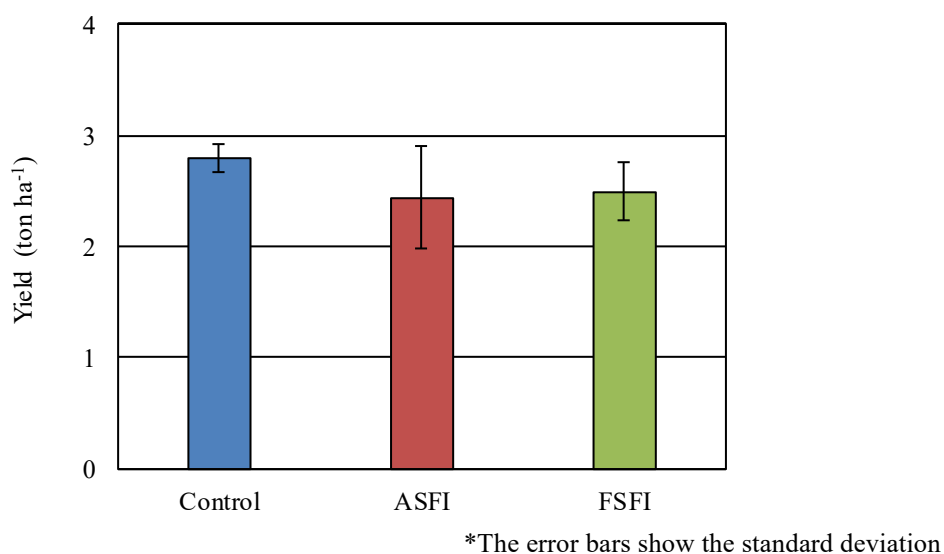


Fig. 4-10 対照区, ASFI, SFI における綿収量 (2017)

Cotton yield under Control, ASFI, FSFI (2017)

ASFI および FSFI には、Control (0.52 m^3) の半分の水量 (0.26 m^3) にて灌漑したが、綿花収量は、Control と比べ、ASFI で約 13 %、FSFI で約 11 %の減少に留まった。その結果、単位水量あたりの収量を示す水生産性 (Water productivity) は、Control の $1,397 \text{ g m}^{-3}$ に対し、ASFI, FSFI は、それぞれ、 $2,441 \text{ g m}^{-3}$, $2,492 \text{ g m}^{-3}$ と大きく向上した。

以上から、SFI の適用することで約 50 %の節水が可能であり、水生産性を大きく向上させる効果が期待できる。また、通水畝間を固定し (FSFI)、塩分を畝中央から側面に押し出すことで、土壌塩分が植物に及ぼす悪影響を軽減できる可能性もある。

4.4 まとめ

本章では、畝間ひとつおきに通水することで節水効果を得る SFI の適用による節水効果と綿花収量への影響を検証した。通常、SFI は灌漑毎に通水する畝間を入れ替えるが、本章では、通水する畝間を入れ替えずに固定する FSFI を適用し、畝内の土壌塩分に及ぼす影響についても検証した。

圃場試験の結果、先行研究と同様に SFI の適用によって、綿花収量の大幅な減少を伴わずに 42.9 - 52.9 %の節水効果を得ることができた。このことから、SFI も簡易 SF 法と同様に灌漑・排水施設や水管理体制が不十分な開発途上地域において、現状の畝間灌漑に安価で容易に適用できることから、節水への取り組みの第一歩として有効な手法になり得ると考えられる。また、SFI も簡易 SF 法や圃場の均平化と組み合わせることで、さらなる節水が期待できると考えられる。

FSFI の適用により、畝内の土壌塩分は畝側面の表層部分へ移動することが確認できた。この効果は、土壌塩分が植物に及ぼす悪影響を軽減できる可能性がある。また、この集積した塩分を第 6 章で述べる Dehydration 法にて効率的に取り除くことができれば、リーチングを補う効率的な除塩技術になり得るものと考えられる。

しかし、SFI の適用にあたり、「畝間の開閉」という圃場内での新たな作業が生じてしまうため、この作業量の増加が幅広い普及へ向けた障害となる可能性がある。

第5章 簡易 SF 法と SFI の組み合わせによる節水効果

これまで、畝間灌漑の改良によって節水を図る簡易 SF 法と SFI を、実際にウズベキスタンのフェルメル圃場へ適用し、その効果を検証してきた。その結果、簡易 SF 法で約 11.1 - 22.2 %, SFI で約 42.9 - 52.9 %の節水効果が認められた。

ここでは、このふたつの手法を組み合わせることによる相乗効果を検証する。

5.1 試験方法

圃場試験は、2012 年 7 月に Y 圃場の綿花栽培時に実施した。Y 圃場は東西約 480 m, 南北約 340 m であり、西側にコンクリートの用水路が設置されている。圃場の東側と西側に排水路が整備されており、圃場の中央にも排水路がある (Fig. 5-1)。

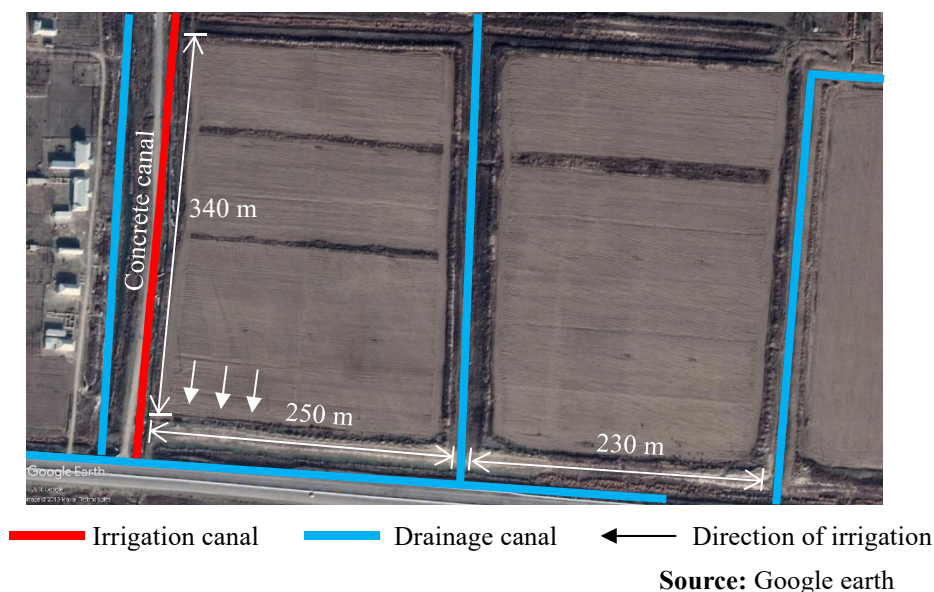


Fig. 5-1 試験圃場の概要 (Y 圃場)

Overview of the experimental site (Y farm)

圃場試験は、Y 圃場の南西部で行うこととし、試験開始前の 2012 年の 3 月に 1/1000 の勾配でレーザー均平化を実施した。その後、トラクタにて畝幅 0.5 m, 畝間幅 0.4 m で畝を造成し、2012 年 4 月より綿花栽培を開始した。

試験区は、畝および畝間 8 本 (幅 7.2 m), 延長 100 m とし、①慣行法 (Control), ②SFI,

③簡易 SF 法，④SFI と簡易 SF 法の 4 処理 3 反復，合計 12 区を設定した．灌漑は圃場内に設置した小水路より北から南に向けて給水した．試験区全体への灌漑水量は四角堰で測定し，各畝間への灌漑水量は三角堰で測定した．試験では，乾燥状態と湿潤状態における畝間の浸透量を測定し，通水時に各処理 3 本の畝間を対象に水足前進時間を測定した．

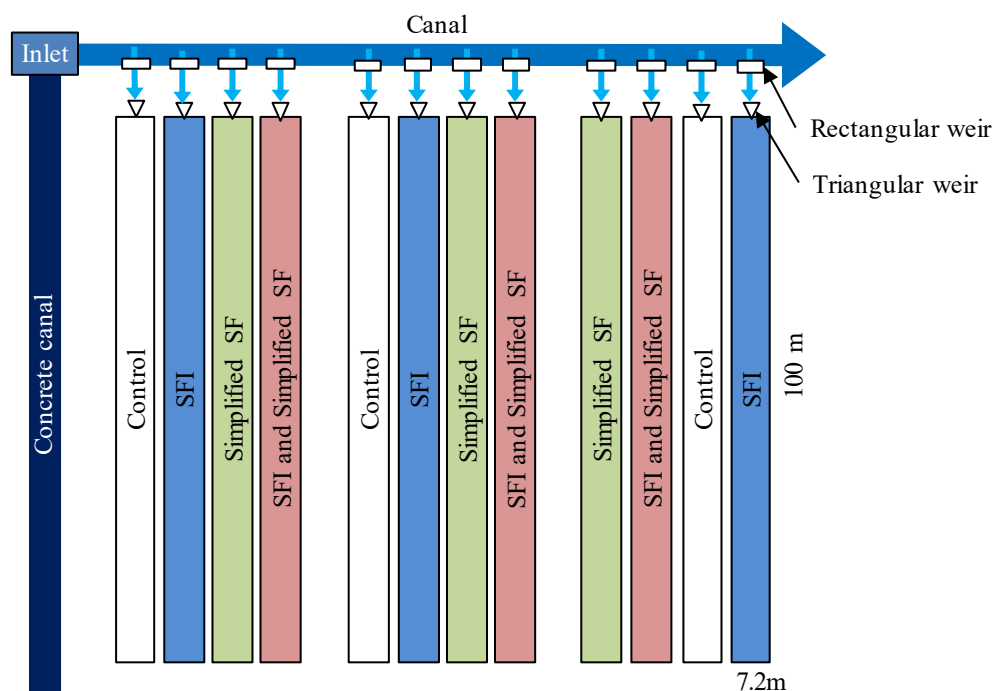


Fig. 5-2 試験区の設定（Y 圃場）

Set up of test plots (Y farm)

通常，畝間湛水試験は，灌漑時の条件を再現するために，湛水した畝間の両側の畝間も湛水する．しかし，SFI を適用した場合には，通水する畝間の両側の畝間は乾燥状態のままである．このことから，本試験では，湛水畝間の両側の畝間を湛水しない場合の畝間浸透量も測定し，SFI 適用時の浸透条件とした．

各灌漑処理における通水方法は，第 3 章および第 4 章で述べた方法と同様であるが，本試験での給水停止のタイミングは，灌漑水の水足が 100 m に到達した時点ではなく，100m 地点における灌漑水の水深が必要用水量に到達した時点で停止することとした．なお，簡易 SF 法における第 1 回灌漑では，通水対象の中間（50 m 地点）を閉塞せず，灌漑水の水

足が 50 m 地点に到達した時点で給水を停止し、灌漑水を 50 m 以降にまで流下させた。

第 3 章の式 (3-5) - (3-7) を用いて算出した、Y 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW を Table 5-1 に示す。

Table 5-1 Y 圃場における $TRAM$, EC_w , LR , RW

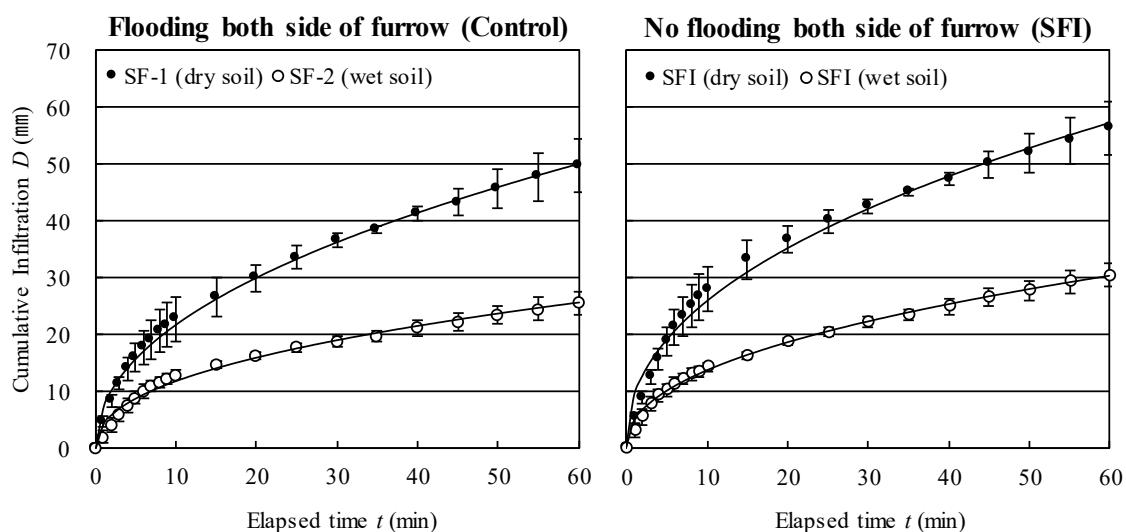
$TRAM$, EC_w , LR and RW in Farm Y

<i>Site</i>	<i>TRAM</i> (mm)	<i>EC_w</i> (dSm ⁻¹)	<i>LR</i>	<i>RW</i> (mm)
<i>Farm Y</i>	37.9	1.20	0.032	39.2

5.2 結果

5.2.1 畝間浸透量

畝間湛水試験は 2012 年 7 月に実施した。湛水畝間の両側の畝間を湛水した場合 (Control) と湛水しなかった場合 (SFI) の積算浸入水量を Fig. 5-2 に示す。なお、数値は 3 回の試験で得られた結果の平均値である。



*The error bars show the standard deviation

Fig. 5-3 Y 圃場における積算浸入水量

Cumulative infiltration curve in Farm Y

乾燥状態における 60 分間の畝間浸透量 (SF-1) は, Control で 49.7 mm, SFI で 56.2mm であり, SFI の浸透性が大きかった. 湿潤状態における 60 分間の畝間浸透量 (SF-2) においても, Control で 25.5 mm, SFI で 30.3 mm となり, SFI の浸透性が大きかった. Control, SFI とともに, 事前通水によって畝間の浸透性が大幅に減少しており, Control で 49 %, SFI で 46 %減少した. 測定結果をもとに回帰分析で得られた浸入式の Intake 定数と Basic Intake rate (I_b) を Table 5-2 に示す. 両条件ともに SF-2 の I_b は, SF-1 の I_b の 50%程度にまで減少した.

Table 5-2 Y 圃場における Intake 定数と Basic intake rate (I_b)

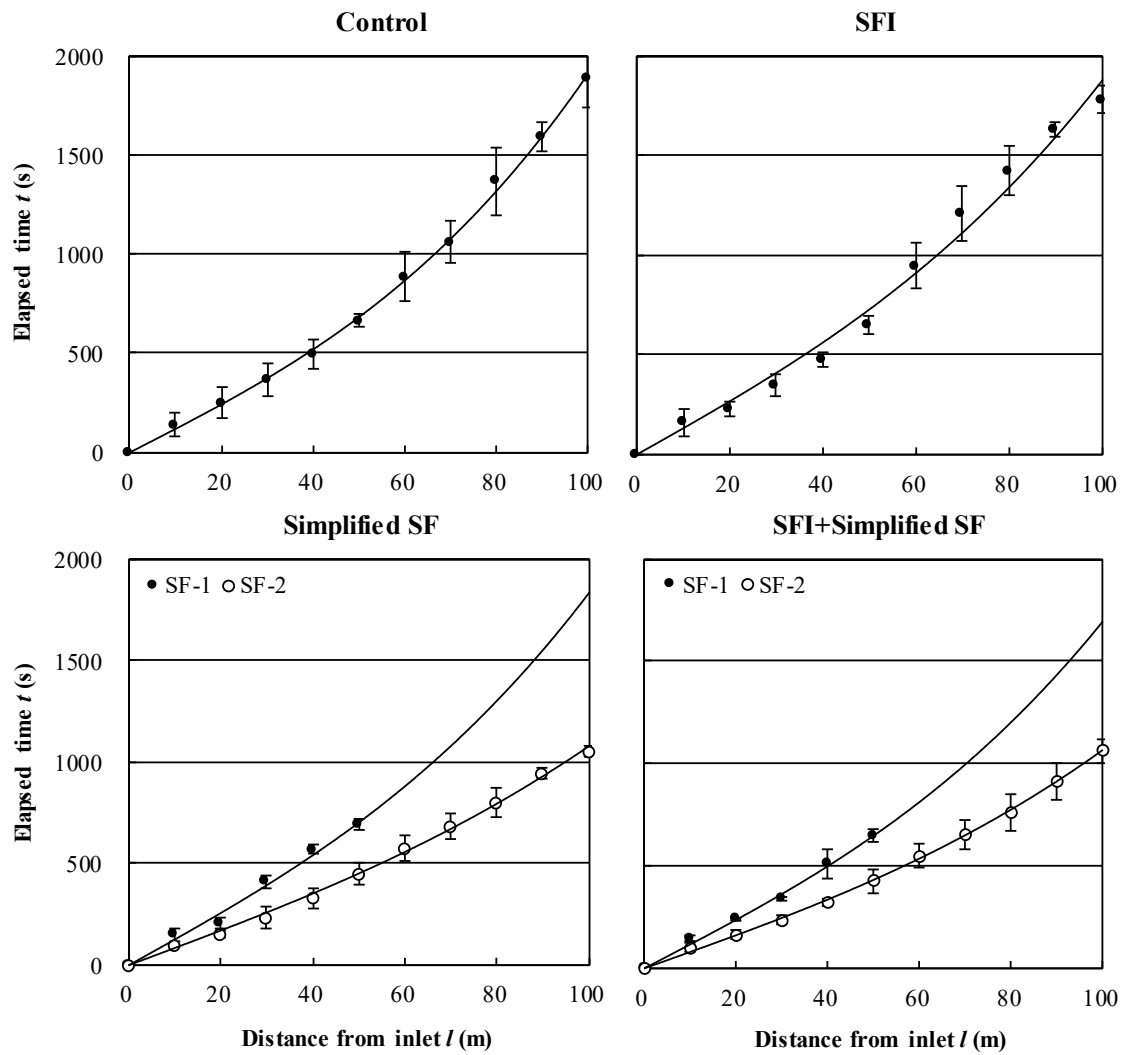
Intake constants c , n , and basic intake rate I_b in Farm Y

<i>Site</i>	<i>Treatment</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>I_b</i> (mm)
Control	SF-1	7.46	0.46	9.5
	SF-2	4.36	0.43	4.1
SFI	SF-1	9.28	0.44	9.8
	SF-2	4.90	0.44	5.2

5.2.2 水足前進時間

水足前進時間は, 各試験区 3 本で 3 反復の測定を行い, 各灌漑処理で合計 9 本のデータを得た. しかしながら, 本試験では, 圃場内の小水路より給水したため, 畝間への流入量にバラツキが生じた. このことから, 9 本の内, 流入量の近い 3 本のデータを抽出して分析を行った. 各灌漑処理における水足前進時間を Fig.5-4 に示す.

100 m までの到達時間が慣行法 で 1,892 秒, SFI で 1,783 秒となり, その差は, 109 秒と僅かであった. 一方, 簡易 SF 法と SFI+簡易 SF 法の SF-2 では, それぞれ, 1,057 秒, 1,062 秒となり, 給水時間が約 56 %にまで短縮された. このことから, 本試験においても, 事前通水による水足前進速度の向上効果が認められた.



*The error bars show the standard deviation

Fig. 5-4 各灌漑処理における水足前進時間

Water advanced time under each irrigation treatment

測定結果をもとに回帰分析で得られた、各灌漑処理における水足前進式の定数を Table 5-3 に示す.

Table 5-3 各灌漑処理における水足前進式の定数

Water advance constants a , b under each irrigation treatment

	<i>Inflow rate</i> (Ls^{-1})	<i>Length</i> (m)	<i>Treatment</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Control	1.80	100	-	0.0007	11.83
SFI	1.80	100	-	0.0006	13.17
Simplified SF	1.31	100	SF-1	0.0006	12.68
	1.48	100 (wet 50)	SF-2	0.0002	8.44
SFI+Simplified SF	1.43	100	SF-1	0.0005	11.62
	1.43	100 (wet 50)	SF-2	0.0003	7.94

5.2.3 節水効果

各灌漑処理において、通水試験で得られた灌漑時間、灌漑水量、慣行法（Control）に対する節水効果、そして、必要用水量から算出した適用効率を Table 5-4 に示す。必要用水量（ m^3 ）は、Table 5-1 に示した RW（39.2 mm）を用いて、畝間 1 本への必要用水量を求め、その値に通水畝間の本数を乗じて算出した。

Table 5-4 各灌漑処理における節水効果

Water-saving effect by each treatment

<i>Treatment</i>	<i>Inflow rate</i> (Ls^{-1})	<i>Required water</i> (m^3)		<i>Irrigation time</i> <i>Ave</i> (sec)			<i>Supplied water</i> (m^3)		<i>Application efficiency</i> (%)		<i>Water-saving ratio</i> (%)	
		<i>Furrow</i>	<i>Plot</i>	<i>SF-1</i>	<i>SF-2</i>	<i>Total</i>	<i>Furrow</i>	<i>Plot</i>	<i>Furrow</i>	<i>Plot</i>	<i>Furrow</i>	<i>Plot</i>
Control	1.79	3.52	28.19	1,892	0	1,892	3.64	29.15	96.7	96.7	-	-
SFI	1.82	5.48	21.92	1,783	0	1,783	3.55	14.19	154.5	154.5	2.7	51.3
Simplified SF	1.40	3.52	28.19	692	1,057	1,749	3.01	24.11	116.9	116.9	17.3	17.3
SFI+Simplified SF	1.43	5.48	21.92	648	1,062	1,710	3.16	12.65	173.3	173.3	13.2	56.6

節水効果は SFI 区で高く、SFI と簡易 SF 法との組み合わせ区で最も高い結果となった。一方、適用効率は SFI 区で 150 %を超えており、必要用水量が大幅に供給できていない結果となった。第 4 章の結果では、SFI の適用に伴う大幅な減収は認められなかったが、供給水量の不足による減収リスクがあるものと考えられる。簡易 SF 法は、本試験においても 17.3 %の節水効果が得られたが、適用効率は 116.9 %となり、必要用水量が供給できていない結果となった。



Fig. 5-5 圃場試験の状況（2012）

Situation of field test (2012)

5.2.4 浸透水量の推定

畝間湛水試験および通水試験で得られた，浸透式と水足前進式から，各灌漑処理における灌漑時間中の浸透水量を推定した．浸透水量は，灌漑水が湛水する畝間幅を基に算出した．各灌漑処理における浸透水量とその削減効果を Table 5-5，各灌漑処理における浸透水量の分布を Fig. 5-6 に示す．

Table 5-5 各灌漑処理における浸透水量の削減効果
Reduction of infiltration water volume by each irrigation treatment

<i>Treatment</i>	<i>Slope</i>	<i>Inflow rate</i>	<i>Length</i>	<i>Infiltration</i>		<i>Reduction effect</i>
		<i>(Ls^{-1})</i>	<i>(m)</i>	<i>Ave depth</i> <i>(mm)</i>	<i>Volume</i> <i>(m^3)</i>	
Control	1/1000	1.79	100	28.0	1.12	-
SFI		1.82	100	30.5	1.22	-8.9
Simplified SF		1.40	100	23.0	0.92	17.9
SFI+Simplified SF		1.43	100	27.0	1.08	3.6

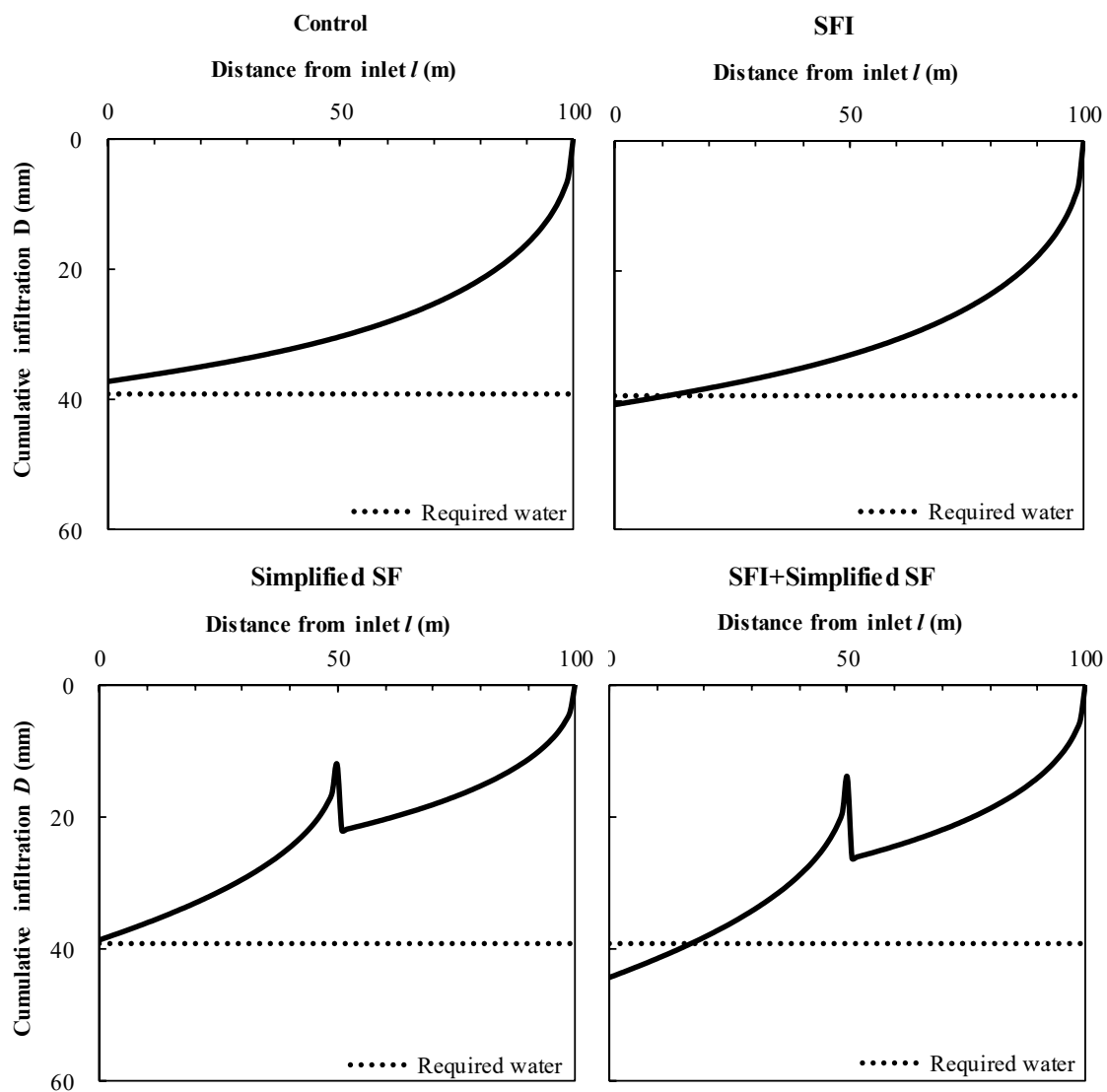


Fig. 5-6 灌漑時間中の畝間各地点における積算浸透水量の分布

Distribution of cumulative infiltration water during irrigation time

積算浸透水量は慣行法（Control）と比べ、SFI では 8.9 %増加し、簡易 SF 法では 17.9 %削減された。SFI と簡易 SF 法との組み合わせでは、互いの作用が相殺される形となり、Control と比べて 3.6 %削減された。このことから、SFI は、畝間ひとつおきに灌漑するため、確実に灌漑水量を減らせるが、通水する畝間への灌漑水量が多くなるため、通水畝間の浸透量が多くなるものと考えられる。一方、簡易 SF 法では、事前通水によって畝間の浸透性が約半分にまで低下するため、通水畝間の浸透水量が抑制できると考えられる。

5.3 まとめ

本章では、簡易 SF 法と SFI の組み合わせによる相乗効果を検証した。圃場試験の結果、SFI で 51.3 %、簡易 SF 法で 17.3 %、SFI と簡易 SF 法で 56.6 %の節水効果が得られ、SFI と簡易 SF の組み合わせによる節水効果が最も大きくなった。

一方、TRAM から算出した必要用水量に対する適用効率では、「SFI」、「簡易 SF 法」そして「SFI+簡易 SF 法」において、適用効率が 100 %を超えており、必要用水量が供給されていない結果となった。特に SFI 適用区では、適用効率が 150 %を超えており、必要用水量よりもかなり少ない供給水量となった。本試験は、第 4 章で述べた圃場試験と比べ、畝間への灌漑水量を綿密に管理し、畝間末端において必要水深に到達した時点で、速やかに給水を停止したことが、適用効率が 100 %を超えてしまった要因と思われる。このことから、SFI を適用により、大きな節水効果が得られ、水生産性が向上するが、必要用水量が供給されない可能性があるため、減収リスクに留意する必要がある。

浸透水量の推定では、「SFI」の浸透水量が大きく、慣行法（Control）よりも増加する結果となった。「簡易 SF」と「SFI+簡易 SF 法」では、事前通水による畝間浸透の抑制が有効に作用し、簡易 SF では、浸透水量が 17.9 %削減され、SFI を適用した「SFI+簡易 SF 法」においても 3.6 %の削減効果が得られた。

以上の結果から、節水効果は「SFI+簡易 SF 法」が最も高く、浸透水量も抑制されると考えられるが、供給水量の不足による減収リスクがあるため、「SFI+簡易 SF 法」を適用する際には、作物の生育状況に応じて、適宜、追加の灌漑を行う必要があると思われる。

第6章 Dehydration 法と SFI との組合せによる除塩

6.1 Dehydration 法とは

第 4 章で述べたとおり，畝間をひとつとばしに灌漑し，通水する畝間を固定する FSFI は，土壤塩分を畝側面（乾燥側）の表層に押し出す効果が期待できる．しかしながら，FSFI によって上手く塩分を畝側面に追いやったとしても，畝側面に集積した塩分を取り除かなければ，再度，塩分が作土層に戻ってしまう恐れがある．

乾燥・半乾燥地の環境条件を活かして，表面に集積した塩分を取り除く手法として，安部らが提案した「Dehydration 法」がある⁶⁻¹⁾．Dehydration 法は，乾燥地域の大きな蒸発散位による土壤溶液の上昇移動を利用して除塩する手法である．Dehydration 法による除塩方法は以下のとおりである．①まず，ガーゼや布などの透水性の高いシートを土壤表面に敷設する．②シート表面で蒸発が始まると，毛管上昇によって溶液が上向きに移動する．シート上まで上昇した溶液は水分の蒸発に従い，塩分が濃縮して析出していく．③その後，析出した塩分を含む乾燥したシートを取り除くことによって塩分を除去する（Fig. 6-1）．

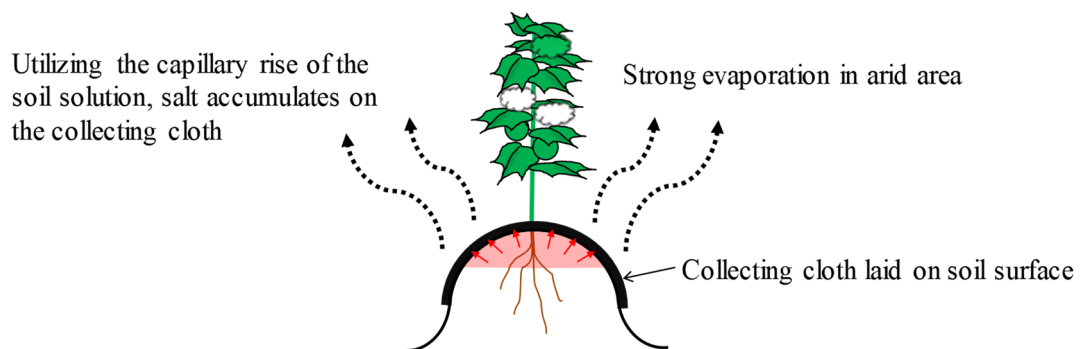
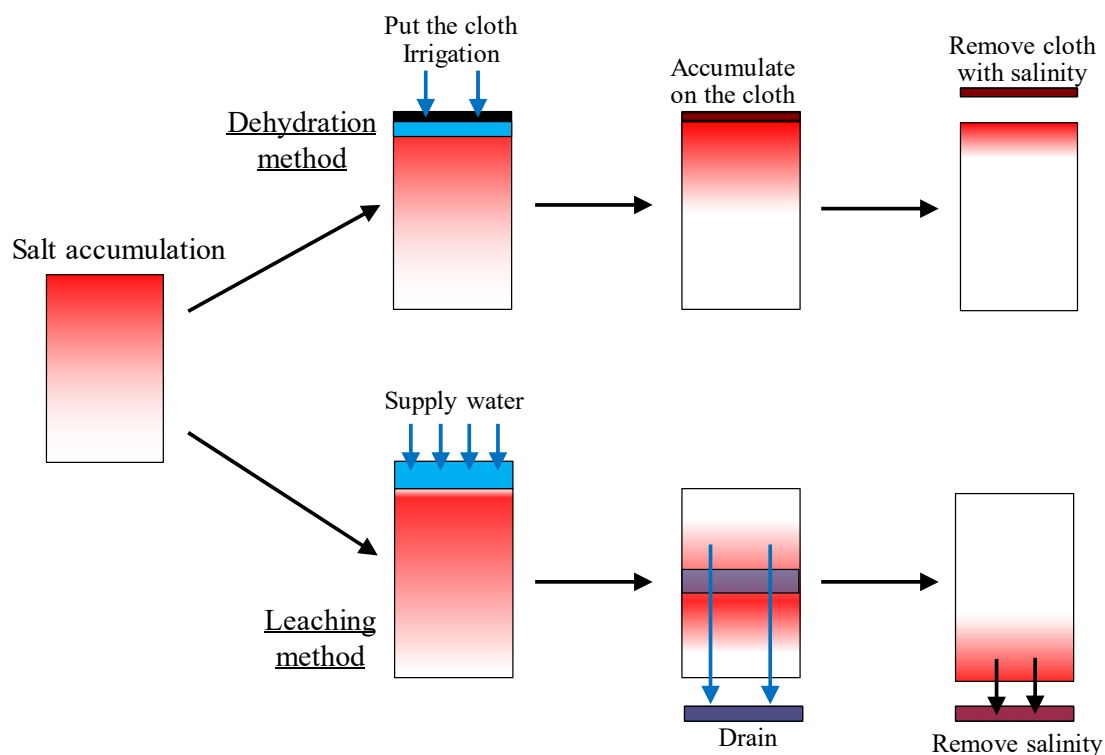


Fig. 6-1 Dehydration 法の概念

Concept of Dehydration method

ウズベキスタンでは，これまでに伝統的な除塩手法として，冬場のリーチングを実施してきた．しかしながら，乾燥地域では低塩濃度の水の確保が難しく，また，系外に排出された塩性排水の処理が問題となっている⁶⁻²⁾．このことから，Dehydration 法はウズベキスタンにおいて，有効な除塩手法になり得る可能性がある．

リーチングでは、地表灌漑によって圃場に多量の水を湛水させ、湛水によって溶解した塩分を下方に浸透させて排水路へ除去するものであるが、Dehydration 法は少量の水とシート、そして、乾燥地域の大きな蒸発散位を活かして、圃場面から除塩する手法である。Dehydration 法とリーチングの概念を Fig.6-2 に示す。



Source: Comparative Study on New Desalination Method (Dehydration) by Evaporative Force and Leaching Method⁶⁻¹⁾

Fig. 6-2 Dehydration 法とリーチングの概念
Concept of Dehydration method and Leaching

本研究では、上述の Dehydration 法による除塩性能を室内試験で確認するとともに、実際の圃場にて、Dehydration 法と FSFI との組み合わせによる除塩効果を検証した。

6.2 試験方法

Dehydration 法による除塩性能を検証する日本での室内試験と、Dehydration 法と FSFI との組み合わせによる除塩効果を検証するウズベキスタンでの圃場試験を実施した。

乾燥地域では、大きな蒸発散位や灌漑による土壌塩分の動きが表層土壌で大きいことか

ら，室内試験では，表層部分を細分化したアクリル製の円形カラム（内径 5.0 cm，外形 6.0 cm）を用いて実施することとした．試験カラムは表面から深さ 0.50 cm までは，高さ 0.25 cm のカラムを 2 個，深さ 0.50 cm から 2.00 cm までは，高さ 0.50 cm のカラムを 3 個，深さ 2.00 cm から 11.00 cm までは，高さ 1.00 cm のカラム 9 個を配置し，合計高さを 11 cm とした．試験カラムの構造を Fig. 6-3 に示す．

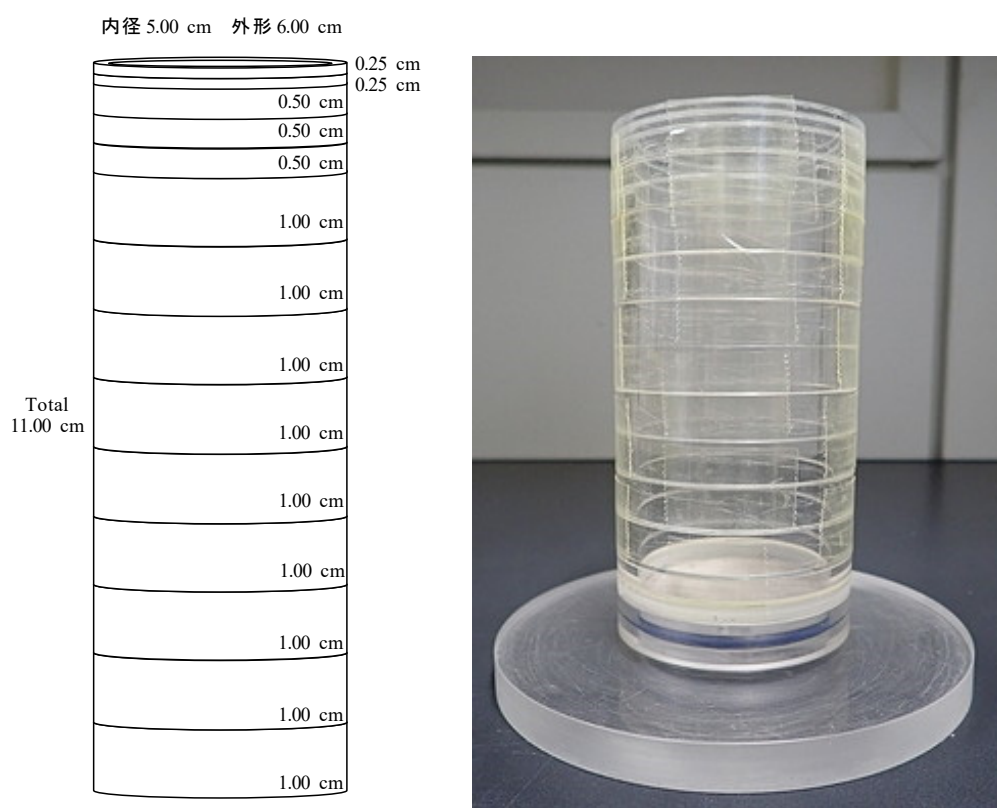
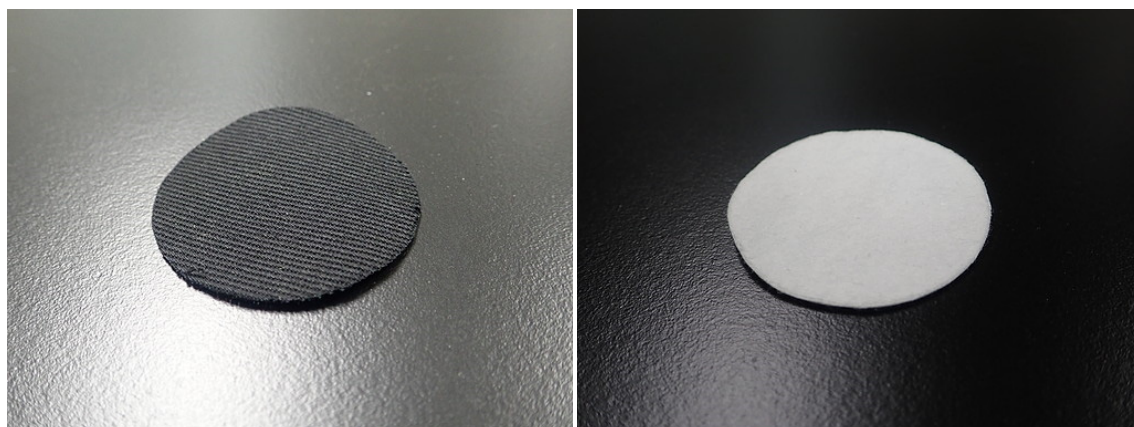


Fig. 6-3 室内試験用アクリルカラム

Acrylic column for laboratory test

処理は，①土壌のみ（Control），②黒色の木綿布（カツラギ 10 番，厚さ約 0.5 mm: D-b）による Dehydration 法，そして，③白色のユニチカ製спанレース不織布（厚さ約 1.0 mm: D-w）による Dehydration 法の 3 処理とした．除塩試験で用いた捕集布を Fig. 6-4 に示す．



黒色の木綿布 (カツラギ 10 番)

白色のユニチカ製спанレース不織布

Fig. 6-4 捕集布

Collecting cloth

供試土壌は、2017 年 9 月にウズベキスタンのシルダリア州ミルザバット地区にて採取した土壌を、水道水にて上澄み液の電気伝導度が 0.50 dSm^{-1} 以下になるまで洗浄したものを使用した。カラムへの土壌の充填密度は、A 圃場で計測した表層土壌（深さ 10 cm まで）の乾燥密度 1.37 gcm^{-3} と同等とした。土壌の充填後、カラムを電気伝導度 4.00 dSm^{-1} 塩化カルシウム水溶液 (0.015 mol CaCl_2) を入れた容器に浸し、24 時間放置して下方より毛管飽和させた。Dehydration 法では毛管飽和の前に、直径 5.0 cm の円形に切断した捕集布を表面土壌に密着するように敷設した (Fig. 6-5)。



Fig. 6-5 毛管飽和の状況

Situation of capillary saturation

毛管飽和の完了後、室温を 25°C に設定した実験室にて除塩試験を実施した。除塩試験では、カラムを電子天秤（エーアンドデイ，FX-3000i）に静置し，10 分毎に 5,760 分間（4 日間）の重量変化を観測した。観測期間中，供試土壌の地温を 25°C に維持するため，表面土壌に埋設した熱電対とカラムの上部 10 cm に設置した投光器（ヤザワ，クリップライトレフランプ 100W）を温度調整器（アズワン，TR-KN-T）に接続し，地温低下に応じて投光器からの照射を行った。また，蒸発に伴う塩類集積を促進させるため，カラム側面から 30 cm の位置に扇風機（サンワサプライ，USB 扇風機 USB-TOY93BK）を設置し，送風を行った。

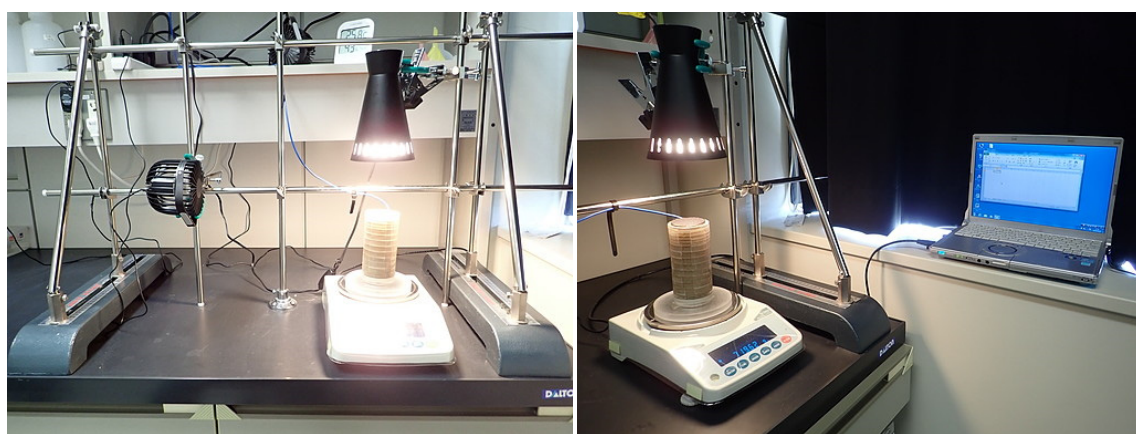


Fig. 6-6 除塩試験の状況

Situation of salt removal test

4 日間の重量観測が完了した後，カラムを解体し，各層の土壌および捕集布をビーカーに採取して含水比と電気伝導度を測定した。土壌の電気伝導度は 1:2 浸出法で測定し，捕集布は試料重の 100 倍の蒸留水で浸出して測定した。電気伝導度の測定は，平面電極型電気伝導率計（HORIBA，LAQUAtwin-EC-33B）を用いた。

採取土壌で測定した $EC_{1:2}$ から，第 4 章で示した以下の (4-1) 式を用いて，浸出溶液の塩濃度 (g L^{-1}) を算出した。

$$c = 0.423\sigma^{1.184} \quad (4-1)$$

ここで， c ：浸出溶液の塩濃度 (g L^{-1})， σ ：電気伝導度 (dS m^{-1}) である。

式 (4-1) で得られた塩濃度と加えた蒸留水量から，各層の塩分量を算出した。捕集布に集積した塩分量が，カラムの深さ 10 cm までの塩分量に占める割合を除塩率とした。除塩率は下記の式 (6-1) により算出し，各捕集布による除塩率を比較した。

$$D_s = \left(\frac{C}{C_0} \right) \times 100 \quad (6-1)$$

ここで、 D_s ：除塩率（%）， C ：捕集布の塩分量（mg）， C_0 ：カラム全体の塩分量（mg）である．

圃場試験は，2017 年に A 圃場において綿花栽培時に実施し，Dehydration 法と FSFI との組み合わせによる除塩率を検証した (Fig.6-7)．捕集布は，黒色の木綿布（カツラギ 10 番，厚さ約 0.5 mm: Black）を使用した．

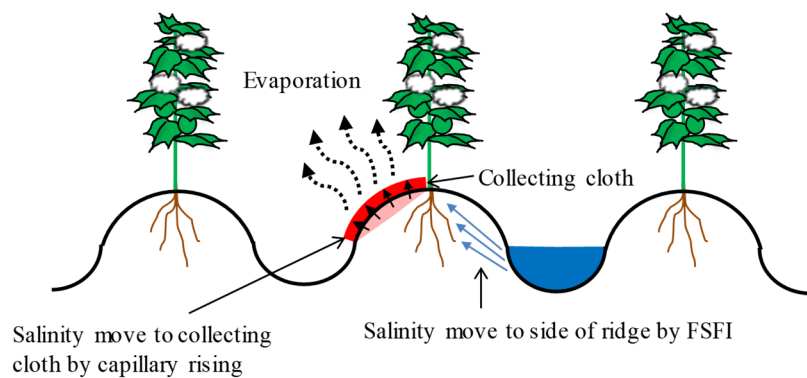


Fig. 6-7 Dehydration 法と FSFI の組み合わせによる除塩の概念

Concept of salt removal by combination of Dehydration method and FSFI

試験は，A 圃場の北側に東から西に向けてトラクタにて畝幅 0.5 m，畝間幅 0.4 m の畝を造成し，畝 1 本と畝間 2 本（幅 1.3 m），延長 4.0 m の試験区（5.2 m²）を設定した．捕集布（Black）は，幅 0.3 m，長さ 4.0 m にカットして畝の左側に敷設し，灌漑前後に約 5.0 cm 四方で切り取って採取した．採取した捕集布は試料重の 100 倍の蒸留水で浸出して EC を測定した．土壌は，灌漑の前後に畝の右，左，中央の深さ 0，1，5，10 cm より採取し，乾燥土壌と水の混合比 1:1 にて EC_{1:1} を測定した．灌漑はガソリンポンプ（LGP 20-A, Leo Group, discharge rate 5.00 Ls⁻¹）にて行い，灌漑水量は，RIIWP が推奨する 100 mm を基準に 0.26 m³ とした．試験区は 1 処理 3 反復の合計 3 試験区とした（Fig. 6-8）．

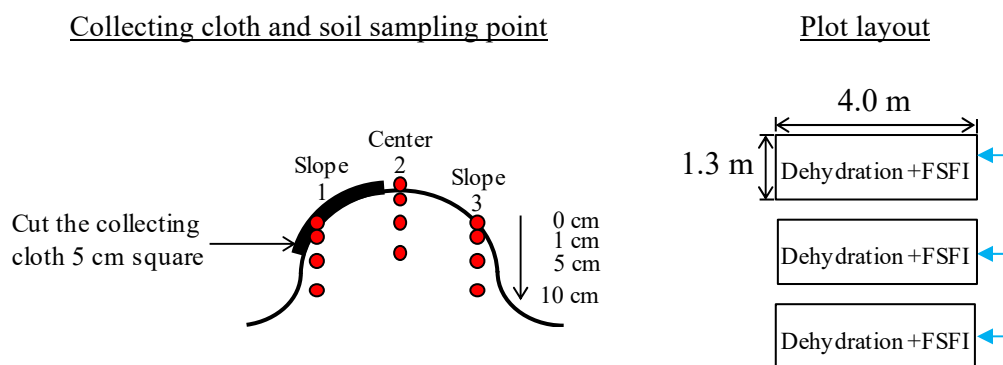


Fig. 6-8 Dehydration 試験区の設定 (2017 年)

Set up of Dehydration test (2017)

室内試験と同様に、得られた EC 値から、式 (4-1) を用いて浸出溶液の塩濃度 (gL^{-1}) を算出し、区分求積法で求めた畝左側の面積と上述の式 (6-1) より、深さ 10 cm までの土壌における除塩率を算出した。

6.3 結果

6.3.1 室内試験

除塩試験後、各処理共に 45 %以上もの塩分が深さ 0.25 cm までの表面土層に集積した。除塩率は、D-b で 22.4 % (20.4 - 25.2 %), D-w で 16.7 % (14.8 - 19.9 %) となり、黒い木綿布が高い除塩性能を示した。

次に、各層の塩分含量を Fig 6-9 に示す。Control は、D-b や D-w と比べ、深さ 0.50 cm, 1.00 cm の層の塩分含量が高く、多くの塩分が表面に集積している。D-b や D-w は表面に上昇した塩分が捕集布にまで移動するため、表層土層の塩分が比較的、低くなったものと考えられる。したがって、Dehydration 法の適用により、一定の除塩効果が得られているものと思われる。

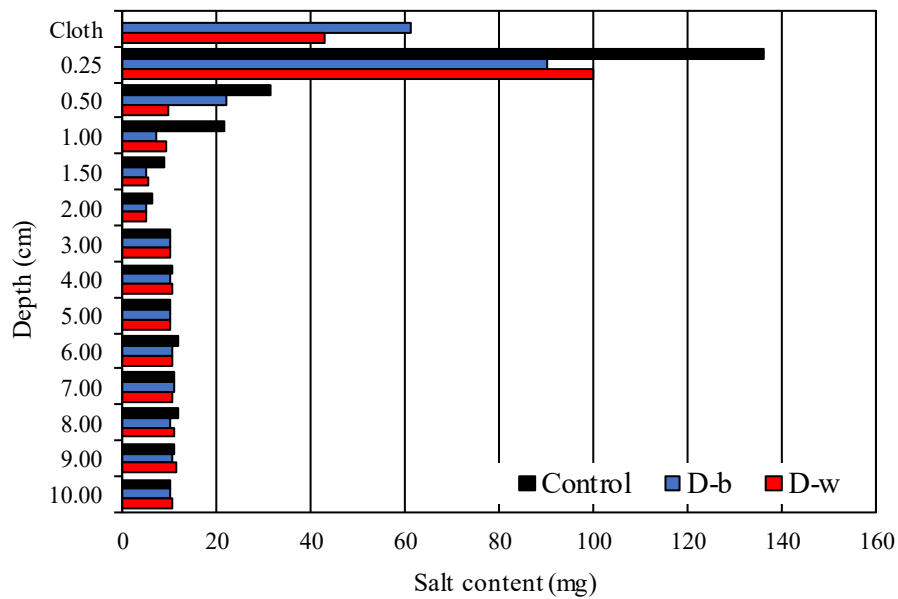


Fig. 6-9 各処理における各層の塩分含量

Salt content of each layer under each treatment

次に、各層毎に測定した体積含水率を Fig 6-10 に示す。体積含水率は、測定した含水比に土壌の充填密度（乾燥密度 1.37 g cm^{-3} ）を乗じて算出した。なお、飽和状態の体積含水率の平均は、Control で 45.6 %、D-b で 44.4 %、D-w で 44.5 %であった。

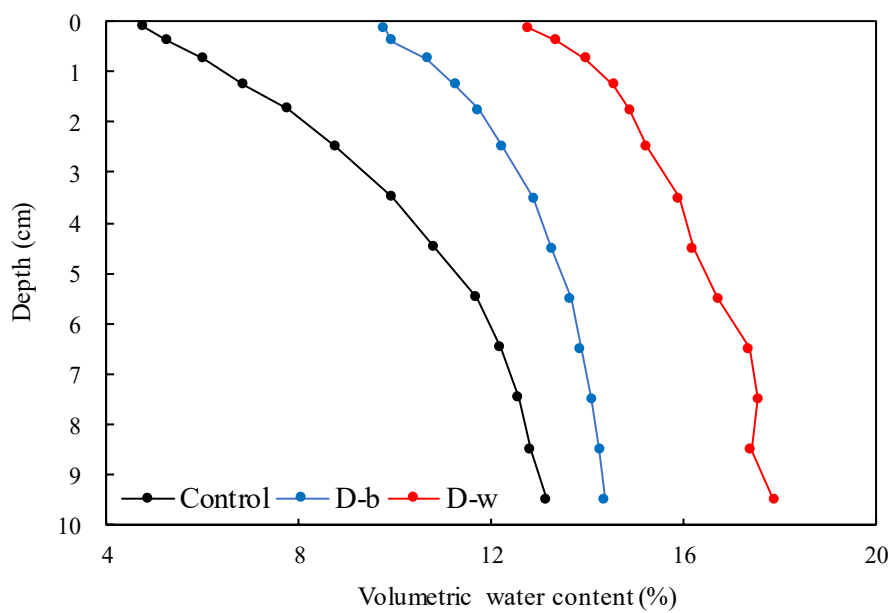


Fig. 6-10 各処理における各層の体積含水率

Volumetric water content of each layer under each treatment

体積含水率は、Control と比較して D-b, D-w が高かったことから、Dehydration 法で敷設する捕集布が乾燥すると、マルチ効果が生じ、土壌塩分の蒸発を抑制するものと考えられる。この効果は D-w で最も高かった。

4 日間の重量観測から算出した、各処理における積算蒸発量 (mm) を Fig.6-11 に示す。

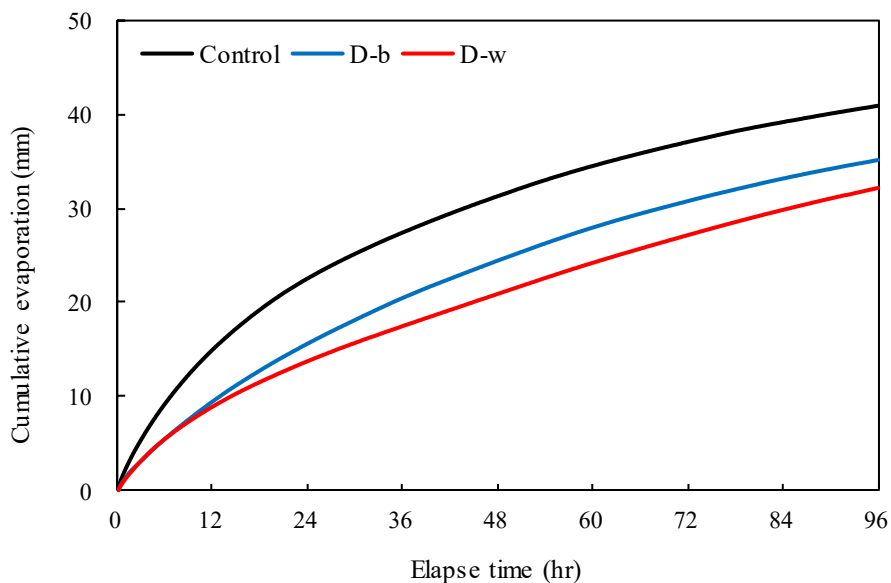


Fig. 6-11 各処理における積算蒸発量

Cumulative evaporation in each treatment

4 日間の積算蒸発量は Control が最も多く、次に D-b、そして、D-w が最も少ないことから、Dehydration 法の適用に伴う捕集布の敷設によって、土壌からの蒸発が抑制されている。

以上の結果から、D-w の除塩効果が低い要因として、通気・通水性が悪く、蒸発を抑制していることが考えられる。しかしながら、D-w は高いマルチ効果も示していることから、実際に現場に適用するときの条件（敷設期間、灌漑頻度）を考慮して、品質を改良していく必要がある。

6.3.2 圃場試験

圃場試験では、2017 年 7 月 11 日に第 1 回灌漑、7 月 24 日に第 2 回灌漑を行い、捕集布および土壌は 7 月 11 日、7 月 14 日、7 月 24 日、そして、7 月 27 日に採取した。

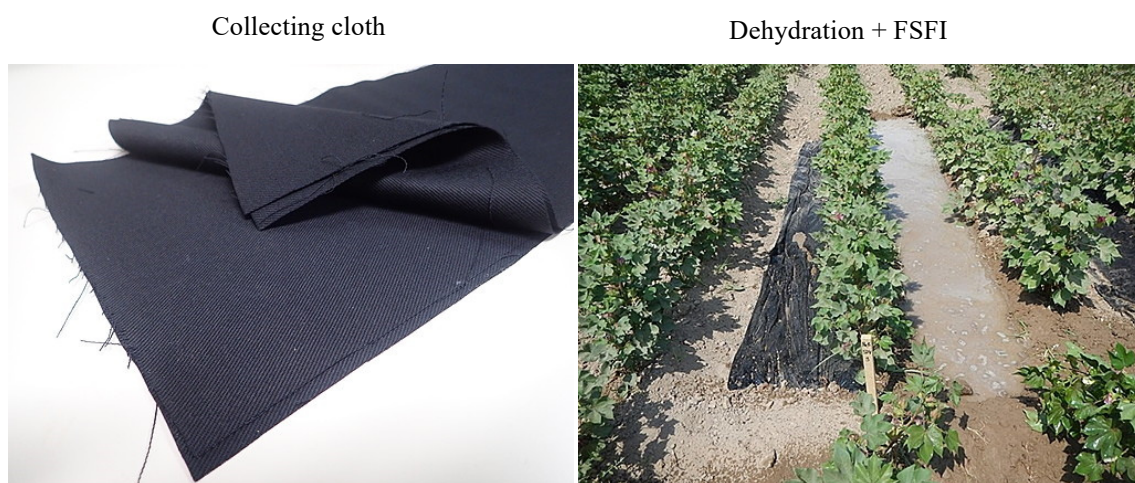


Fig. 6-12 捕集布と圃場試験（Dehydration 法）の状況

Collecting cloth and situation of field test (Dehydration)

採取した捕集布および土壌の EC より算出した，除塩率の変化を Fig. 6-13 に示す．

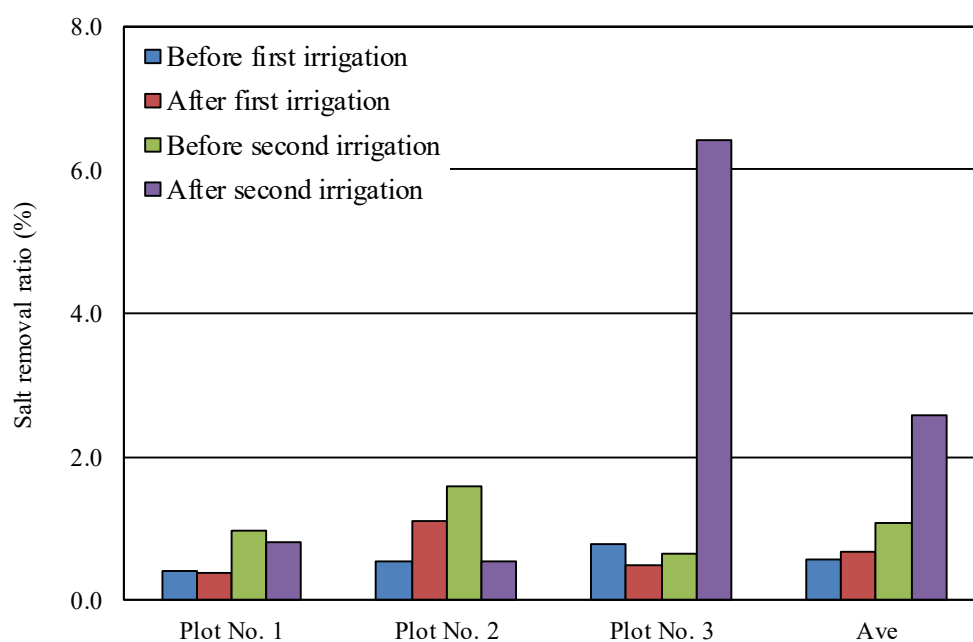


Fig. 6-13 除塩率の変化

Change in salt removal ratio

第 1 回灌漑後の除塩率は，ほとんど変化が無く，Plot No. 2 において，第 1 回灌漑前より僅か 0.6 %上昇しただけであった．第 2 回灌漑後，Plot No. 3 のみで除塩率が 6.4 %にまで

上昇し、第2回灌漑前より5.8%向上した。しかしながら、室内試験で得られた除塩率22.4%よりも、かなり低い結果となった。その要因として、敷設時に捕集布に与える水が少なく、捕集布と土壌との密着性が確保できていなかったこと、敷設後の管理が粗放であったことなどが考えられる。引き続き、Dehydration法の現地適用に向け、敷設範囲・期間、管理体制等、様々な検討を行っていく必要がある。

6.4 まとめ

本章では、室内試験において Dehydration 法による除塩性能を検証し、圃場試験では、Dehydration 法と FSFI との組み合わせによる除塩効果を検証した。

ウズベキスタンの土壌を用いた室内試験の結果、Dehydration 法による除塩率は、黒い木綿布 (D-b) で 22.4 % (20.4 - 25.2 %), 白いユニチカ製のспанレース不織布 (D-w) で 16.7 % (14.8 - 19.9 %) となり、高い除塩性能を示した。また、土壌表面に敷設する捕集布は、乾燥後するとマルチの役割も果たすものと考えられ、4 日後の体積含水率が Control (土壌のみ) と比べて高くなった。この結果から、Dehydration 法を適切に塩類化農地に適用できれば、有用な除塩技術になるものと考えられた。

しかし、黒色の木綿布による Dehydration 法と FSFI とを組み合わせた圃場試験では、第2回灌漑後の1反復分のみ捕集布の塩分が上昇した。この時の除塩率は6.4%であり、室内試験の22.4%よりもかなり低い結果であった。期待した除塩効果が得られなかった要因として、敷設時に捕集布に与える水が少なく、捕集布と土壌との密着性が確保できていなかったこと、敷設後の管理が粗放であったことなどが考えられる。

コスト面では、黒色の木綿布 (カツラギ 10 番) の価格は、 m^2 当たり約 500 円、ha 当たり約 500 万と高額である。このため、広大なフェルメルの農地全面に Dehydration 法の適用を図ることは現実的ではない。

以上から、Dehydration 法の実用化を目指すには、土壌との密着性の確保、敷設範囲と期間、灌漑との連携、捕集布の再利用などを検討し、費用対効果を実現可能なレベルにするための取り組みが必要である。

第7章 社会実装に向けて（パンジャブ農業大学の事例）

7.1 生産現場に近い研究開発

農林水産分野では、生産現場で広く活用される研究開発の成果が求められている。我が国の農林水産研究基本計画⁷⁻¹⁾（以下、基本計画）においても「生産現場が直面する課題を速やかに解決するための研究開発」が最優先課題として位置付けられている。さらに、基本計画には「国の研究開発が生産現場から遠ざかったものになっており、生産現場のニーズを知る農林漁業者や普及組織が、もっと研究開発に参画できる仕組みに見直すべき等の指摘が寄せられている」とあり、研究開発を生産現場に近づける必要性が強調されている。

本研究では、ウズベキスタンの農業を担うフェルメルが取り組み易い技術であることに焦点を当て、簡易 SF 法、SFI、そして、Dehydration 法の効果を明らかにしてきた。しかし、研究開発成果の最大化を図り、社会実装を実現するには、これらの成果をフェルメルに周知し、幅広い活用に向けた努力が必要である。

自主技術の開発や国際機関での活動に積極的なインドでは、北部のパンジャブ州において、生産現場に近い研究開発および普及体制がパンジャブ農業大学（Punjab Agricultural University: PAU）を中心に構築されており、インド農業の発展に大きく貢献している。本章では、2013 年に実施したインドでの調査を基に、PAU が実践している生産現場に近い研究開発と普及体制を分析し、ウズベキスタンにおける社会実装に向けた取り組みを検討する。

7.2 インド共和国の概要

インドは南アジアに位置し、世界第 7 位の国土面積 328,726 千 ha（2016）と世界第 2 位の人口 1,339,180 千人（2017）を有する⁷⁻²⁾。名目 GDP は世界第 7 位の 2,726,322 百万ドル（2018）と経済発展がめざましいが、1 人当たり GDP は 2,016 ドル（2018）と低く、世界第 142 位に留まっている。1 日 1.9 ドル未満で暮らす貧困者の比率は 21.2 %（2011）であり⁷⁻³⁾、約 2.8 億人が貧困状態にあると考えられる。

インドは 1947 年にイギリスから独立し、1960 年台からの小麦を中心とした「緑の革命」によって 1970 年代に食糧の自給を達成した。その後も国内需要を満たす生産を維持している。耕地面積は 169,463 千 ha（2016）で国土面積の約 52 %を占めており、農村人口は 899,379 千人（2017）で総人口の約 67 %にも及ぶ⁷⁻²⁾。名目 GDP に占める農業部門の割合は約 15.4 %（2016）であるが、総人口の約 47 %（2014）が農業に従事しており⁷⁻⁴⁾、依然

として、農村地域の発展が貧困削減に向けた大きな課題となっている。

インドの農業はモンスーンに依存しており、7-9月にインド洋から吹き込む南西モンスーンが年間降雨量の80%をもたらしている。このモンスーンの雨季をカリフ (Kharif) 季、この時季の作付けをカリフ作という⁷⁻⁵⁾。冬季は北東モンスーンとなり、10月中旬から12月にかけて南インドに少ない雨をもたらす。この雨季をラビ (Rabi) 季、この雨による作付けをラビ作という⁷⁻⁵⁾。カリフ季に米、綿花、パールミレット、ラビ季に小麦、マスタードなどが栽培されている。

7.3 インドにおける農業研究

インドにおける水産・畜産も含めた農業分野での研究開発は、インド国立農業研究委員会 (Indian Council of Agricultural Research: ICAR) が統括している。ICAR は、1929年に農業省農業研究教育部傘下の組織として設立され、インド全土に所在する97の研究所と53の農業大学を管轄している⁷⁻⁶⁾。ICARは政府機関として、農業政策に沿って農業研究を先導すると同時に普及・教育にも力を注いでいる。

ICARは、管轄する研究機関に農業技術情報センター (Agricultural Technology Information Centre, 以下「ATIC」という) を配置し、「新しい品種・商品・技術の提供」、「植物・土壌の診断」、「農業情報の提供」といった農業技術情報サービスを大学および研究所内で一元的に提供する体制を構築している。また、インド全土の農村地域には農業科学センター (Kirish Vigyan Kendras と呼ばれている。以下、KVK) を607箇所配置し、生産現場に近い場所で、得られた研究成果の中から、農家へ推奨すべきと評価された技術の実演や各種研修が行える体制を整備している。一方、教育では、専門家約2,400名が、毎年、約90回開催される夏季・冬季講習を通じて、先端技術を含む新たな農業分野についての研修を行っている。その他、奨学金給付、留学斡旋、農業大学への資金補助などを行っている。

これらの活動に加え ICAR は、インド全土、州、地区の各レベルで定期的に研究者、普及員、農家が集う会議を開催し、研究者と農家が対話・交流できる場を提供している。

7.4 パンジャブ農業大学 (Panjab Agricultural University: PAU)

インド北部に位置するパンジャブ州 (Fig. 7-1) は、州面積がインド全土の約1.5%と小さいにもかかわらず、インド全体の作物生産量の内、小麦の19.6%、米の10.9%、綿花の12.9%を生産する農業先進州である⁷⁻⁷⁾。このような、パンジャブ州での高生産性の実現に

は、農家の意見・要望を研究開発にフィードバックできるプラットフォームを提供してきた PAU の貢献が大きい。1960 年、ウッタラーカンド州にインドで最初の農業大学として G. B. Pant 農業技術大学が設立され、PAU は、その 2 年後の 1962 年にルディアナに設立された。当時、インドは深刻な食糧不足に苦しんでいたが、パンジャブ州は、PAU の尽力の下、適切な栽培管理によって高生産性品種の導入に成功し、その後、農産物の一大生産地となった。



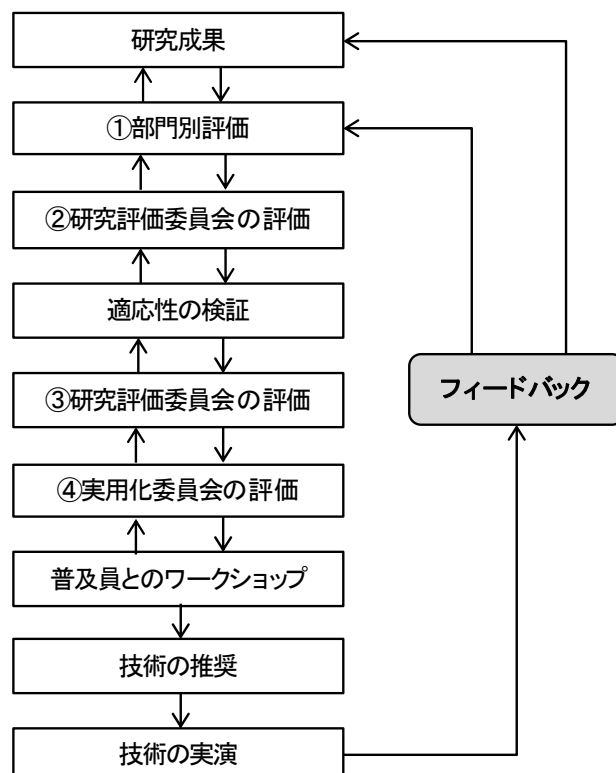
Fig. 7-1 パンジャブ州の位置

Location of Punjab region

7.4.1 PAU の研究開発体制

PAU における研究開発は、普及員、農家と連携したものとなっており、「評価」と「フィードバック」が繰り返される仕組みとなっている。PAU での研究成果は、まず「①部門別評価」を受ける。そこで承認されると、次に「②研究評価委員会の評価」において総合的な評価を受ける。この二段階の評価で承認が得られた成果は、生産現場への適応性が検証される。検証結果は、再度、「③研究評価委員会の評価」を受け、適用性が認められた成果については「④実用化委員会」において農家へ推奨すべき成果かどうかの審査を受ける。審査の結果、推奨すべき成果として認定されると、ワークショップを通じて、その内容が普及員に説明される。その後、普及員による農家説明や実演といった普及活動が行われる。これらの普及活動で生じた問題や農家からの要望は、研究開発の初期段階にまでフィード

バックされ、再び、同じフローによる評価・検証が行われる。このように、4度に亘る評価と生産現場からのフィードバックが繰り返されることで、研究成果が生産現場に適した技術に改良される。



Directorate of Extension Education⁷⁻⁷⁾から著者作成

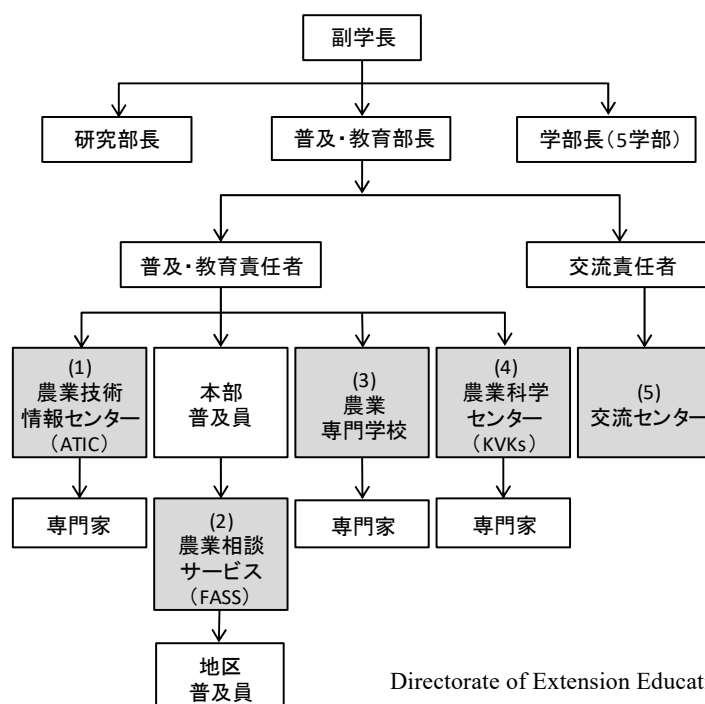
Fig. 7-2 PAUにおける研究開発体制

Research and development system at PAU

7.4.2 PAUの普及体制

PAUは州・地区政府と連携し、大学内や各地域に設置された各部署において様々な普及・教育活動をおこなっている。普及活動では、単に農家へ新品種・商品・技術などを伝達するのではなく、農家がその内容・特性を十分に理解し、自身で調整できるようになるまでを目指しており、対話・交流を重要視している。PAUの普及・教育部署の構成をFig. 7-3に示す。副学長の下に研究部長、普及・教育部長、学部長が配置され、普及・教育部長の下

に普及・教育と交流の責任者が置かれている。ここでは、PAU の普及・教育活動において、特に重要な役割を果たしている ATIC、KVK、農業相談サービス（Farm Advisory Service Scheme: FASS）、農業専門学校（Institute of Agriculture）、交流センターの活動内容について紹介する。



Directorate of Extension Education⁷⁻⁷⁾から著者作成

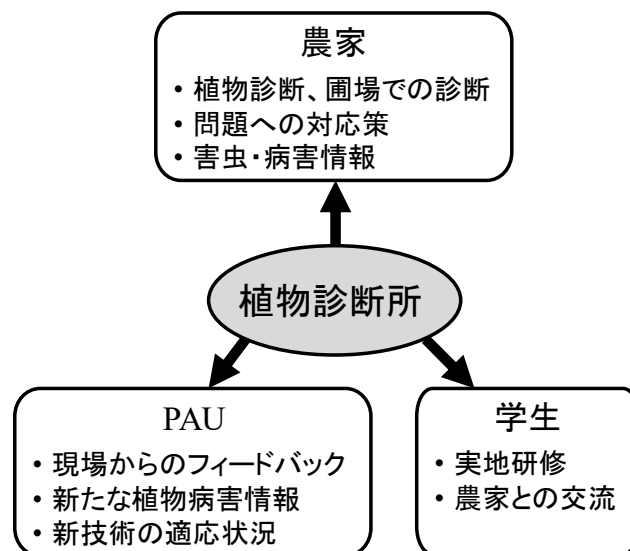
Fig. 7-3 PAU における普及・教育部署の構成

Composition of extension and education departments at PAU

(1) 農業技術情報センター（ATIC）

PAU は、ICAR の政策によって大学内に設置された ATIC において、農業技術情報サービスの一元的提供（Single Window Delivery System）を行っている。まず、ATIC には新しい品種、肥料、殺虫剤などを扱う販売所があり、いつでも関心のある農家が購入できる環境が整備されている。PAU によれば、ここでの販売を通じて生物肥料の使用が農家の間で一般的になったとのことである。また、ATIC は、最新の農業文献や農業雑誌も取り扱っており、農家が積極的に最新の農業情報にアクセスすることを推奨している。さらに、ATIC には生産現場が直面する問題へ対応するため「植物診断所」が設置されている。毎年、10,000 人以上もの農家が相談に訪れ、その内、約 2,500 人が実際に植物サンプルを持参して診断を受けている。また、PAU を訪問できない農家のための相談窓口も設置されている。植物

診断所では大学内での診断に加え、実際に問題が生じている圃場での調査も行っており、その調査結果と対応策が広く公開されている。また、植物診断所に寄せられた生産現場での問題や農家の要望は PAU の研究開発にフィードバックされている。これらの活動は、農家のみならず PAU の研究開発および学生にも多くの利益をもたらしている (Fig. 7-4)。



Directorate of Extension Education⁷⁻⁷⁾から著者作成

Fig. 7-4 植物診断所がもたらす利益

Benefits of plant diagnostics section

以上のように農業技術情報サービスを一元化することで、部門間での「速やかな情報共有」と「相乗効果の発揮」を実現していることから、日本でも、農業技術情報サービスの集約・一元化は有効と思われる。

(2) 農業相談サービス (FASS)

FASS は、研究開発成果の迅速な普及とフィードバックを目的に 1962 年から始まった取り組みである。FASS は PAU 内ではなくパンジャブ州内の各地区に 11 箇所（新しい行政区は除く）設置されている (Fig. 7-5)。FASS では州・地区政府と連携した適用化試験、推奨すべき技術の実演、地区、村での研修が行われている。これらを通じて研究成果の実用化に必要な改良点を明確にし、PAU の研究開発にフィードバックしている。また、農家の理解向上を目的に適用化試験および実演圃場への見学会も開催している。その他、各種相談、調査、PAU 出版物の紹介を行っている。

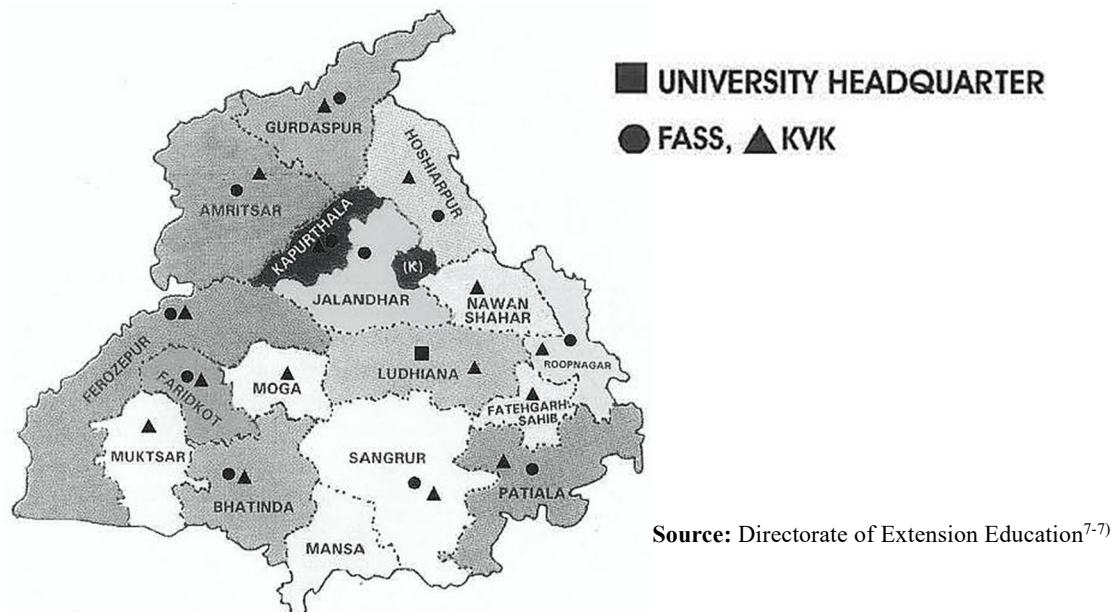


Fig. 7-5 パンジャブ州における FASS と KVK の設置場所

Location of FASS and KVK in Punjab region

研究開発を生産現場に近づけるには、自治体等と連携した生産現場での取り組みが重要であり、日本やウズベキスタンでも FASS の様な活動は効果的と思われる。

(3) 農業専門学校 (Institute of Agriculture)

PAU は、研究開発と農家を繋ぐ架け橋として、普及員および技術者を重要な存在として位置づけている。多様化する農業において、今後、多くの普及員と技術者が必要になってくるとの予測から、農業専門学校での専門家の養成に力を注いでいる。農業専門学校では、農業全般に亘る知識習得を目的とした 2 年間のコースが提供されており、毎年 30 名程度が入学している。また、1 年間の造園学コースもある。卒業生は普及員または技術者として、州・地区政府や民間企業などで活躍している。

(4) 農業科学センター (KVK)

パンジャブ州にも ICAR の政策として、KVK が 15 箇所 (Fig. 7-5) 設置されており、PAU と連携した活動が行われている。KVK では、PAU から派遣された各分野の専門家が実演

圃場を用いて、より実践的（学習と実施）な研修を行っている。また、KVK では通常の研修に加え、職を持たない若者や女性を対象に所得向上を目的とした職業訓練的な研修も行っている。その内容は、芳香・薬用植物の栽培方法、養蜂技術、裁縫、刺繍、編物、玩具づくり、野菜の保存法など多岐に亘る。さらに、すべての KVK には、PAU を委員長とする科学諮問委員会（Scientific Advisory Committee）が設置されており、年 2 回、生産現場での問題と農家の要望をテーマとした会議を開催し、農家との対話と交流に努めている。

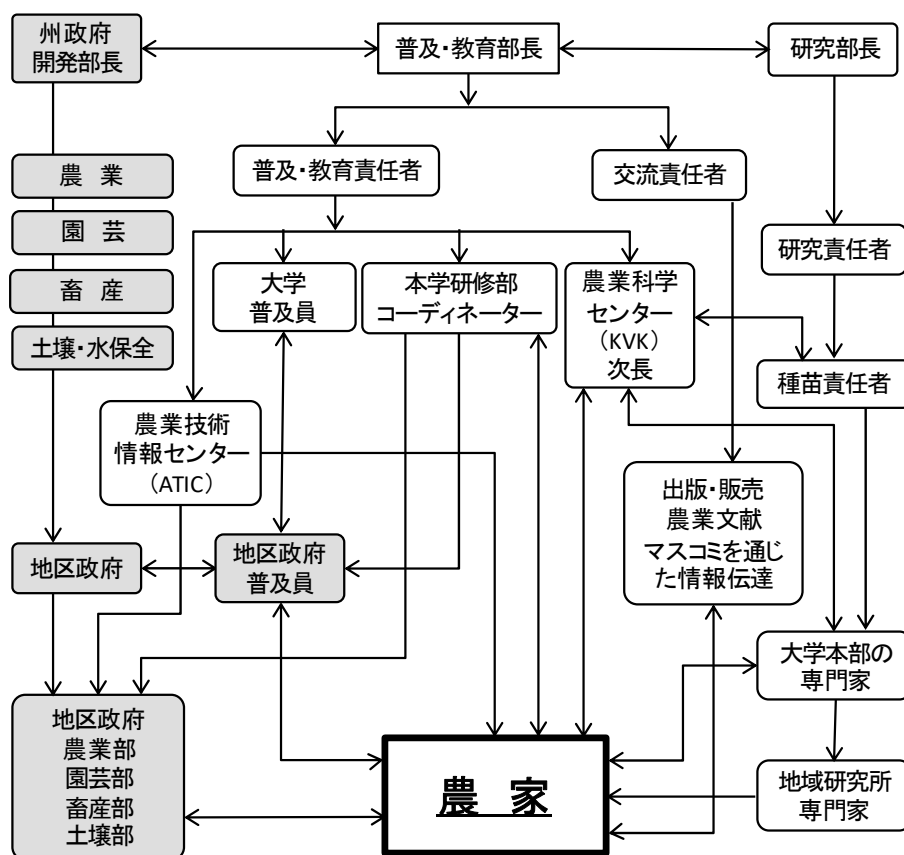
（5）交流センター

PAU 内の交流センターでは、研究者と農家との対話・交流の促進を目的に、テレビ・ラジオ放送や農業書籍の発行が行われている。テレビでは最新の農業情報を伝える 30 分番組が週 4 回放送されており、ラジオでは農家の質問に専門家が回答する番組が週 1 回放送されている。農業書籍は、穀物、野菜、農業機械などの分野別専門書、生産現場での問題と対策をとりまとめたもの、農業雑誌（月刊誌）などが発行されている。また、これらの農業情報を収めた CD も配布されている。

これまでに紹介した 5 部署での活動の他、PAU は 1967 年より、多くの農家が集う Kisan Melas（Farmer's Fairs）を年 2 回開催している。Kisan Melas では、PAU から優良農家へ権威ある賞を授与するなど、営農意欲の向上に向けた取り組みが行われている。

7.4 まとめ

PAU の研究開発では、専門的・総合的な評価に加え生産現場からのフィードバックが繰り返されることから、絶えず研究者が生産現場を意識する仕組みとなっている。普及体制においては、農業技術情報サービスの一元化による速やかな情報共有と生産現場での実演等を通じた的確な課題抽出により、社会実装を加速させる仕組みが構築されている。さらに、PAU は州・地区政府と綿密に連携することで、多くのチャンネルで農家と双方向にリンクした状態を維持している（Fig. 7-6）。



Directorate of Extension Education⁷⁻⁷⁾から著者作成

Fig. 7-6 農家との対話・交流の経路

The path of dialogue and exchanges with farmers

このことから、研究開発を生産現場に近づけるには「速やかな情報共有」、「的確な課題抽出」および「継続的な対話・交流」に努めるとともに研究開発と生産現場を繋ぐ人材の育成と確保が重要と考えられる。これまで、日本の農業研究においても、生産現場のニーズに基づいた様々な問題解決型研究が行われてきており、農業・食品産業技術総合研究機構では、新たに生産者や農協、普及・指導組織を含めたアドバイザリーボード⁷⁻⁸⁾を設置し、関係者との対話・交流を深める試みが行われている。

インド、日本、ウズベキスタンには文化や社会的な違いがあるが、本章で分析した PAU の事例は参考になる得ると思われる。ウズベキスタンに普及組織は存在しないが、フェルメルと密接に関係する WCA や BISA や HGME がある。これらの機関がタシケントの研究機関と連携し、生産現場の課題把握、フェルメルからのフィードバック等、継続的な対話・交流を維持する体制を構築できれば、社会実装の実現に大きく寄与すると思われる。

第8章 総括

乾燥・半乾燥地の灌漑農業では、不適切な水管理による塩類集積が生じており、農業生産に悪影響を及ぼしている。本研究では、開発途上地域の農家が営農活動の一環として持続的に取り組める対策であることを念頭に、畝間灌漑を改良することによる低コストの「節水」および「除塩」をウズベキスタンのフェルメル圃場にて検討した。

間断的な給水によって節水効果を得るサージフロー（Surge Flow）灌漑法（SF 法）の利点を活かしつつ、極めて簡素化した「簡易 SF 法」を考案した。簡易 SF 法は、通常の畝間灌漑を 1 日間隔で 2 回に分けるものであり、その節水効果を圃場試験にて検証した。その結果、畝間への流入量が標準的な 0.45 Ls^{-1} と 1.70 Ls^{-1} である場合、事前通水（SF-1）によって、畝間の浸透性低下と平滑化が生じ、畝間 100 m への通水で 11 - 19 %，畝間 50 m への通水で 22 % の節水効果を得ることができた。一方、畝間への流入量が 5.00 Ls^{-1} と多量であるとき、灌漑水の水足前進に勢いがあり、乾燥状態の畝間であっても、短時間で畝末端に到達したため、簡易 SF 法による節水効果が得られなかった。しかし、流入量が 5.00 Ls^{-1} であっても、事前通水（SF-1）による畝間の浸透性の低下は生じているものと考えられ、灌漑時間中の浸透水量の推定では、浸透水量が慣行法（Control）と比べ、21 % 削減された。

畝間ひとつおきに通水する隔畝間灌漑（SFI）の節水効果と綿花収量への影響を圃場試験にて検証した。また、通水する畝間を入れ替えずに固定する固定隔畝間灌漑（FSFI）が畝内の土壌塩分に及ぼす影響も検証した。その結果、先行研究と同様に SFI の適用によって、綿花収量の大きな減少を伴わずに 43 - 53 % の節水効果を得た。また、FSFI の適用により、畝内の土壌塩分は畝側面の表層へ移動することを確認した。

簡易 SF 法と SFI の適用による節水効果が得られたことから、さらなる節水を図るため、簡易 SF 法と SFI との組み合わせによる相乗効果を圃場試験で検証した。その結果、SFI で 51 %，簡易 SF 法で 17 %，SFI と簡易 SF 法で 57 % の節水効果が得られた。しかし、SFI は大きな節水効果が得られるが、必要用水量が供給されない可能性がある。浸透水量の推定では、Control よりも SFI で浸透水量が大きくなったが、SFI と簡易 SF 法の組み合わせでは、事前通水による畝間浸透の抑制が有効に作用しており、3.6 % の削減効果が得られた。

以上から、簡易 SF 法および SFI は灌漑・排水施設や水管理体制が不十分な開発途上地域においても、現状の畝間灌漑に安価で容易に適用できるため、節水への取り組みの第一歩として有効な手法になり得ると考えられる。また、圃場の均平化と組み合わせることで、

さらなる節水効果も期待できる。なお、簡易 SF 法は畝間の不陸による影響を強く受けるため、簡易 SF 法による十分な節水効果を得るには、均一な畝間の造成や水足前進速度を最適化する流入量の調整が必要である。簡易 SF 法と SFI の普及に向けた課題は、「給水の開始・停止」および「畝間の開閉」といった新たな作業が生じることである。これらの作業を省力化するには、用水路の再整備やサイフォン管の導入が有効と考えられる。

FSFI によって畝側面の表層に移動した塩分を、乾燥地域の大きな蒸発散位を利用して塩分を除去する「Dehydration 法」で取り除くことができれば、効率的な除塩技術となり得る。このことから、Dehydration 法による除塩性能を室内試験にて評価し、圃場試験にて「Dehydration 法と FSFI」による除塩効果を検証した。室内試験の結果、Dehydration 法による除塩率は、黒い木綿布 (D-b) で 22 % (20 - 25 %), 白いユニチカ製のспанレース不織布 (D-w) で 17 % (15 - 20 %) となり、高い除塩性能を示した。また、捕集布は乾燥後にマルチ効果を示した。一方、黒色の木綿布を用いた圃場試験では、「Dehydration 法と FSFI」による 3 反復の試験を行ったが、捕集布の塩分は第 2 回灌漑後の 1 反復のみ上昇した。このときの除塩率は 6.4 % に留まり、室内試験の 22 % よりもかなり低い結果となった。その要因として、捕集布と土壌との密着性が確保できていなかったことなどが考えられる。さらに、黒色の捕集布はコストが高いため、Dehydration 法の実用化には、土壌との密着性の確保や敷設範囲・期間、捕集布の再利用など、費用対効果を考慮した検討が必要である。

本研究で得られた成果の最大化を図り、ウズベキスタンにおける社会実装の実現に向けた取り組みを検討するため、生産現場に近い研究開発および普及体制を構築しているインドのパンジャブ農業大学 (PAU) の組織体制を分析した。PAU の研究開発では、専門的・総合的な評価に加え生産現場からのフィードバックが繰り返されており、絶えず研究者が生産現場を意識する仕組みとなっていた。普及体制は、農業技術情報サービスの一元化による速やかな情報共有と生産現場での実演等を通じた的確な課題抽出が実践されており、社会実装を加速させる仕組みが構築されていた。このことから、研究開発を生産現場に近づけるには「速やかな情報共有」、「的確な課題抽出」および「継続的な対話・交流」が重要と考えられる。ウズベキスタンにおいても、フェルメルに密接な組織とタシケントの研究機関が連携し、継続的な対話と交流が維持できる体制が構築できれば、社会実装の実現に大きく寄与すると思われる。

本研究が、今後、乾燥地域における塩類集積の軽減を図る持続的な対策を構築する一助となれば幸いである。

謝辞

この博士論文は、国際農林水産業研究センター（JIRCAS）の研究者として、農林水産省の補助金事業である海外農業農村地球環境問題等調査「農地塩害対策調査」への参画を契機に、2008年から2017年までのウズベキスタンでの研究成果をとりまとめたものである。

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、試験計画、データ分析、論文執筆などについて、数多くのご指導を頂きました。鳥取大学清水克之准教授、島根大学増永二之教授には副査として、貴重なアドバイスとご指導を頂きました。鳥取大学北村義信名誉教授におかれましては、ウズベキスタンで活動を始めた当初から、現在に至るまで、数多くのご指導を頂きました。ここに深く感謝と御礼を申し上げます。

これまでの研究活動において、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アドバイスを頂きました。Dehydration法の検討では、ユニチカ株式会社の稲垣孝司氏、宮西健次氏、沖田祐介氏より、多くのご支援を頂きました。現地の活動では、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のご協力を賜りました。研究データの収集・分析においては、灌漑・水問題研究所 Yulia. I. Shirokova 博士、Gaukhar K. Paluashova 博士、現地研究者、シルダリア州の技術者、フェルメルの方々から、大変、有難い協力を頂きました。そして、ウズベキスタンで活動を共にした、奥田幸夫氏、成岡道夫氏、池浦弘氏、大森圭祐氏、大矢徹治氏、山中勇氏、富久尾歩氏、新田直人氏、志賀薫氏、現地スタッフの皆様、大変、お世話になりました。ここに改めて深く感謝と御礼を申し上げます。

最後に、このような私の海外での活動を理解し、元気付けてくれた家族に、心から感謝いたします。

引用文献

第 1 章

- 1-1 国連人口基金 (United Nations Population Fund, UNFPA) 東京事務所 (2011): 世界人口白書 2011 (日本語抜粋版), 公益財団法人ジョイセフ
- 1-2 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019): World Population Prospects 2019 Highlights, United Nations, New York, pp.1-39
- 1-3 第 29 回東京大学農学部公開セミナー, どこまで食料増産は可能か? (2005): 『緑の革命』から学ぶもの, 講演要旨集, pp. 1-9
- 1-4 杉本大三 (2001): 「緑の革命」先進地域における農地保有構造の変容と地主像の変化ーインド・パンジャール州を事例にー, アジア研究, Vol.47 (3), pp.50-80
DOI: https://doi.org/10.11479/asianstudies.47.3_50
- 1-5 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) and Earthscan (2011): The State of The World's land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW), Managing systems at risk, FAO, Rome, Earthscan and London, pp.19-60, 101-134
- 1-6 United Nations Environment Programme (UNEP) (2019): The Sixth Global Environment Outlook (GEO-6), Healthy planet, Healthy People, UNEP, United Kingdom, pp. 201-232
- 1-7 外務省 (2019): 「持続可能な開発目標」(SDGs) について,
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/about_sdgs_summary.pdf>
Accessed 30th Sep, 2019
- 1-8 外務省国際協力局 (2017): 持続可能な開発のための 2030 アジェンダと日本の取組, pp.1-7
- 1-9 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), United Nations Children's Fund (UNICEF), World Food Programme (WFP), World Health Organization (WHO) (2018): The state of Food Security and Nutrition in the World 2018, FAO, Rome, pp.1-181
- 1-10 川島博之(2008): 水資源と世界の食料生産, 海外情報誌 “ARDEC”, April 2008,
<http://www.jiic.or.jp/files/04public/02ardec/ardec38/key_note1.htm>,
Accessed 30th Sep, 2019
- 1-11 Alexandratos, N., and Bruinsma, J. (2012): World agriculture towards 2030/2050, the 2012 Revision, ESA Working Paper No. 12-03, FAO, Rome, pp.1-147
- 1-12 Wada, Y., and Bierkens, M. F. P. (2014): Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections, Environmental Research Letters 9, pp. 1-17
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104003>
- 1-13 Siebert, S., Döll, P. (2010): Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation, Journal of Hydrology, 384, pp.198-217
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.031>
- 1-14 Joint research centre of European commission (2018): World Atlas of Desertification, Third Edition, Rethinking land degradation and sustainable land management, pp. 1-248
- 1-15 北村義信 (2016): 乾燥地の水をめぐる知識とノウハウ, 食料・農業・環境を守る水

- 利用・水管理学, 博報堂出版, pp.1-19, 171-187
- 1-16 藤山英保 (2019): 持続可能な乾燥地農業のために, ー土壤塩類化防止と塩類土壤修復ー, 博報堂出版, pp. 27-68
- 1-17 八丁信正, 筒井暉 (1998): 乾燥地域における塩害とその対策, 農業土木学会誌, 第66巻第8号, pp. 801-805
- 1-18 Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005): Chapter 22 Dryland Systems, Ecosystems and Human Well-being, Current State and Trends, pp.623-662
- 1-19 日本沙漠学会 (2009): 沙漠の事典, 丸善出版, pp. 1-10
- 1-20 恒川篤史 (2014): 乾燥地を救う知恵と技術 砂漠化・土地劣化・干ばつ問題への対処法, 丸善出版, pp. 8-27
- 1-21 山本太平 (2008): 乾燥地科学シリーズ第3巻, 乾燥地の土壤劣化とその対策, 古今書院, pp. 1-32
- 1-22 United Nations Environment Programm (UNEP) (2002): The Third Global Environment Outlook (GEO-3), Past present and future perspectives, UNEP, United Kingdom, pp. 29-300
- 1-23 United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janerio, Brazil (1992): Agenda 21, Chapter 12 12-2
- 1-24 大倉利明 (2010): 世界の土壤劣化, 地球環境, Vol.15 No.1, pp. 3-7
- 1-25 Oldeman, L. R. (1991): Global Extent of Soil Degradation, ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992, Wageningen, pp. 19-36
- 1-26 Dregne, H., Kassas, M., and Rozanov, B. (1991): Desertification Control Bulletin, A bulletin of World Events in the Control of Desertification Restoration of Degraded Lands and Reforestation, No.20, UNEP, pp.6-18
- 1-27 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, LADA ISRIC FAO, Wageningen, pp.23-38
- 1-28 United States Department of Agriculture (USDA) (1998): Soil Quality Resource Concerns: Salinization, USDA Natural Resources Conservation Service, pp. 1-2
- 1-29 Martin, C. R., Glover-Cutter, K., James, C., and Baldwin Dombrowski E. J (2012): Identification and characterization of a salt stress-inducible zinc finger protein from *Festuca arundinacea*, BMC Research Notes 2012,
DOI: <https://doi.org/10.1186/1756-0500-5-66>
- 1-30 Farifteh, J., Farshada, A., and Georgeb, R.J. (2006): Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics, Geoderma, 130, pp. 191-206,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.003>
- 1-31 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, pp. 62
- 1-32 Leticia, S. S., Uttam, S., and David, E. K. (2015): Soil Salinity, Testing Data Interpretation and Recommendations, UGA Cooperative Extension Circular 1019, pp. 1-6
- 1-33 Kenneth, K. T., and Neeltje, C. K. (2002): Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, Irrigation and drainage paper No. 61, FAO, Rome, pp. 183
- 1-34 Szabolcs, I (1979): Review of research on salt-affected soil, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, pp. 11-30
- 1-35 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO): Land and Plant Nutrition Management Service, <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of->

[some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/](#)>

Accessed 10th Nov, 2019

- 1-36 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2006): World reference base for soil resources 2006 edition, A framework for international classification, correlation and communication, FAO, Rome, pp. 92-95
- 1-37 松本聡 (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
- 1-38 Squires, V.R. and Glenn, E.P. (2009): Salination Desertification and Soil Erosion, The Role of Food Agriculture Forestry and Fisheries in Human Nutrition Vol. 3, EOLSS, pp. 102-123
- 1-39 Wang, W., Vinocur, B., and Altman, A. (2003): Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures towards genetic engineering for stress tolerance, *Planta* 218, pp. 1-14, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>
- 1-40 Place, F., and Meybeck, A. (2013): Food security and sustainable resource use what are the resource challenges to food security, Background paper for the conference, “Food Security Futures: Research Priorities for the 21st Century”, 11-12 April 2013, Dublin, Ireland, pp. 8
- 1-41 Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1994): Water quality for agriculture, 2.4.3 Crop Tolerance to Salinity, Irrigation and drainage paper No. 29, FAO, Rome, <<http://www.fao.org/3/T0234e/T0234E03.htm#tab4>>, Accessed 11th Nov, 2019
- 1-42 State of New South Wales through Department of Industry and Investment (Industry & Investment NSW) (2009): Irrigation salinity, causes and impacts, Primefact 937, pp. 1-4
- 1-43 Metternicht, G.I., and Zinck, J.A. (2003): Remote sensing of soil salinity, potentials and constraints, *Remote Sensing of Environment* 85, pp. 1-20, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8)
- 1-44 Mateo, S. J., and Burke, J., (2011): Agriculture and water quality interactions, a global overview, SOLAW Background Thematic Report-TR08, FAO, Rome, pp. 11-24
- 1-45 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2002): The salt of the earth, hazardous for food production, <<http://www.fao.org/worldfoodsummit/english/newsroom/focus/focus1.htm>>, Accessed 11th Nov, 2019
- 1-46 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: <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- 1-47 Devkota, M., Martius, C., Gupta R.K., Devkota, K.P., McDonald, A. J., and Lamers, J. P. A (2015): Managing soil salinity with permanent bed planting in irrigated production systems in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 202, pp. 90-97, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.006>
- 1-48 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

第 2 章

- 2-1 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
- 2-2 World Bank (2010): Uzbekistan, Climate Change and Agriculture Country Note, pp.4-16
- 2-3 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
- 2-4 United Nations Population Fund (UNFPA): World Population Dashboard Uzbekistan, Overview, <<https://www.unfpa.org/data/world-population/UZ>>, Accessed 15th Nov, 2019
- 2-5 International Monetary Fund (IMF) (2019): Republic of Uzbekistan, 2019 Article IV Consultation Press Release and Staff Report, pp. 22, 40
- 2-6 Guanhua, W., and Sebastian, I (2011): Poverty in Asia and the Pacific, An Update, Asia Development Bank (ADB), Manila, pp. 10
- 2-7 United Nations Development Programme (UNDP) (2016): Human Development Report 2016, UNDP, New York, pp. 199, 231
- 2-8 外務省: ウズベキスタン共和国 (Republic of Uzbekistan), 基礎データ, <<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/uzbekistan/data.html>>, Accessed 16th Nov, 2019
- 2-9 野村総合研究所 (2019): シルクロード沿線諸国の現状と日本企業のビジネスチャンス, 第 4 回シルクロード沿線諸国の農業ビジネス拡大可能性と日本企業の事業機会, 知的資産創造, 2019 年 2 月号, pp. 68-81
- 2-10 大西純也 (2012): ウズベキスタンにおける農業生産と塩類集積対策, 大日本農会誌, No.1555, pp. 64-67.
- 2-11 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, No.1, pp. 47-63
- 2-12 野村政修 (2008): CIS 諸国における農業改革, 平成 20 年度主要国の農業情報調査分析報告書, 農林水産省, pp. 199-203
- 2-13 The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics, Open data, Agriculture, <<https://stat.uz/en/open-data>>, Accessed 17th Nov, 2019
- 2-14 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, DOI: https://doi.org/10.14976/jals.27.3_91
- 2-15 野村政修 (1996): ウズベキスタンにおける灌漑開発と綿作の展開ーアムダリヤ下流域を中心にー, 経済論叢別冊, 調査と研究, 10, pp. 86-101
DOI: <https://doi.org/10.14989/44422>
- 2-16 石田進 (1994): 中央アジアの農業問題, 国際大学中東研究所, 紀要, 第 8 号, pp.1-17
- 2-17 野部公一 (2013): 旧ソ連中央アジア長期農業統計, 1920 年代末からの動向分析, 一橋大学経済研究所ロシア研究センター, ワーキングペーパーNo.38, 付録 B 統計表
- 2-18 Rakhmatullaev, S., Huneau, F., Coustumer, P. L., Motelica, H. M. (2011): Sustainable Irrigated Agricultural Production of Countries in economic Transition, Challenges and Opportunities A case study of Uzbekistan, Central Asia, Nova Science Publishers, Agricultural Production, Franck Columbus ed, pp. 139-161
- 2-19 Khamraev, S.R., Dukhovny, V.A., Kadyrov, A.A., and Sokolov, V.I. (2018): Water Resources

- Management in Uzbekistan, Second Edition, pp. 55-75
- 2-20 筒井暉, 荻野芳彦, 大槻恭, 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, 小特集・海外プロジェクト(II)-3, 農業土木学会誌, Vol. 63 (2), pp. 13-18
- 2-21 ティムール・ダダバエフ (2008): 中央アジア地域における水管理政策と諸国間関係ー現状, 課題と展望ー, 地域研究 (29), 筑波大学, pp. 23-40
- 2-22 International Crisis Group (2014): Water Pressures in Central Asia, Europe and Central Asia Report, No 233, pp. 2-8
- 2-23 Scientific-Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of the Central Asia (SIC ICWC): CAWater-Info, Portal of Knowledge for Water and Environmental Issues in Central Asia, <http://www.cawater-info.net/water_world/uzbekistan_e.htm>, Accessed 22th Nov 2019
- 2-24 Khamraev, S.R., Dukhovny, V.A., Kadyrov, A.A., and Sokolov, V.I. (2011): Water Resources Management in Uzbekistan, First Edition, pp.55-71
- 2-25 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
- 2-26 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, DOI: <https://doi.org/10.11457/swsj.69.293>
- 2-27 斎藤竜太 (2015): ウズベキスタンの水消費者組合ー現状, 問題点, 展望ー, 日本中央アジア学会報, 11, pp. 29-54
- 2-28 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
- 2-29 Karen, F. (2013): Irrigation in Central Asia in figures, FAO Water Reports 39, AQUASTAT Survey-2012, FAO, Rome, pp 68, 183-205.
- 2-30 丸山利輔, 中村良太, 水谷正一, 渡辺紹裕, 黒田正治, 豊田勝, 荻野芳彦, 中曽根英雄, 三野徹 (1998): 水利環境工学, 朝倉書店, pp. 75-91
- 2-31 Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y. I., Lamers, J. P. A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C., and Vlek, P. L. G. (2009): Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan, I. Water dynamics, Irrigation Science, 27 (4), pp. 331-346, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0148-1>
- 2-32 Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y. I., Lamers, J. P. A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C., and Vlek, P. L. G. (2009): Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan, II. Soil salinity dynamics, Irrigation Science, 27 (4), pp. 319-330, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0149-0>
- 2-33 Shirokova, Y. I., and Morozov, A. N. (2006): Salinity of irrigated land of Uzbekistan: causes and present stage. Sabkha Ecosystems Volume II, West and Central Asia, pp. 249-259.
- 2-34 United Nations Development Programme (UNDP) (2008): Environmental profile of Uzbekistan based on indicators, UNDP, Tashkent, pp. 42-57
- 2-35 United Nations Development Programme (UNDP): National Irrigated Land Reclamation Fund Capacity Development Project, Project Document, <https://www.uz.undp.org/content/uzbekistan/en/home/operations/projects1/environment_and_energy/Capacity_building_of_the_national_irrigated_land_reclamation_fund.html>.

- Accessed 19th Nov 2019
- 2-36 Regional Program for Sustainable Agricultural Development in Central Asia and Caucasus (CAC), homepage, About the Program,
<<http://cac-program.org/about>>, Accessed 23th Nov 2019
- 2-37 落井康裕 (2009): 「河川流域における総合水資源管理のためのガイドライン」について, ARDEC, November, 2009,
<http://www.jiid.or.jp/files/04public/02ardec/ardec41/key_note2.htm>
Accessed 24th Nov 2019
- 2-38 Global Water Partnership (GWP), About IWRM,
<<https://www.gwp.org/en/gwp-SAS/ABOUT-GWP-SAS/WHY/About-IWRM/>>
Accessed 24th Nov 2019
- 2-39 Dukhovny, V. A., Mukhamedjanov, S., Mukhamedjanov, A., and Nangia, V. (2015): Improving Water Use Efficiency Through Innovative Technologies in Irrigation and Agriculture in the Fergana Valley, ICARDA, SIC-ICWC, Tashkent, pp. 1-26
- 2-40 Djumaboev, K, Reddy, J. M., Carli, C., Yuldashev, T., Anarbekov, O., and Eshmuratov, D. (2015): 3rd World Irrigation Forum, Development for Water, Food and Nutrition Security in a Competitive Environment, Full Papers of WIF3 and International Workshops, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), pp. 181
- 2-41 Bekchanov, M., Ringler, C., Bhaduri, A., and Jeuland, M (2016): Optimizing irrigation efficiency improvements in the Aral Sea Basin, Water Resources and Economics, 13, pp. 30-45, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wre.2015.08.003>
- 2-42 Nurbekov, A. (2008): Conservation Agriculture Practices in Uzbekistan, MAWR, FAO, ICARDA, Tashkent, pp. 1-40
- 2-43 Toderich, K., Ismail, S. (2014): Utilization of low quality water for halophytic forage and renewable energy production, Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER), Annual Scientific Report, USAID, ICBA, Tashkent, pp. 1-26
- 2-44 Ibragimov, N., Evett, S. R., Esanbekov, Y., Kamilov, B. S., Mirzaev, L., and Lamers, J. P. A. (2007): Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation, Agricultural water management, 90, pp. 112-120,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.016>

第 3 章

- 3-1 Walker, W.R. (1989): Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, FAO Irrigation and drainage paper, 45, FAO, Rome,
<http://www.fao.org/3/T0231E/t0231e09.htm#7.2_surge_flow>, Accessed 28th Nov 2019
- 3-2 Amer, M. H., and Attafy, T. M. (2017): Effect of Surge Flow on some Irrigation Indices of Furrow Irrigation System, Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, Mansoura Univ, Vol. 8 (12), pp. 703 – 708
DOI: <https://doi.org/10.21608/jssae.2017.38223>
- 3-3 Henry, G. C., and Krutz, L. J. (2017): Surge Irrigation Information, Division of Agriculture, Research and Extension, University of Arkansas System

- 3-4 Mitchell, A.R., and Karen, S. (1994): Surge flow and alternating furrow irrigation of peppermint to conserve water. Central Oregon Agricultural Research Center Annual Report 1993, AES OSU, Special Report 930, pp. 79-87
- 3-5 Horst, M. G., Shamutalov, S. S., Goncalves, J. M., and Pereira, L.S. (2005): Surge flow irrigation for water saving. Irrigation management for combating desertification in the Aral Sea basin, pp. 225-246
- 3-6 Horst, M. G., Shamutalov, S. S., Goncalves, J. M., and Pereira, L. S. (2007): Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton, Agricultural water management, 87, pp. 115-127, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.014>
- 3-7 Guy, F. (2013): Grower's Guide to Surge Flow Irrigation, Texas A&M Agrilife Extension Service
- 3-8 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—ウズベキスタン共和国での適用事例—, 沙漠研究, 27-3, pp. 91-101, DOI: http://dx.doi.org/10.14976/jals.27.3_91
- 3-9 池浦弘, 山本太平, 井上光弘, 魏江生 (1998): 毛鳥素砂地の砂質圃場における小区画ボーダー灌漑法の適用効率, 農業土木学会論文集, No. 197, pp. 109-116
- 3-10 Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1994): Water quality for agriculture, 2.4.2 Salinity Control by Leaching, Irrigation and drainage paper No. 29, FAO, Rome, <<http://www.fao.org/3/T0234e/T0234E03.htm>>, Accessed 06th Dec, 2019
- 3-11 池浦 弘, 山中 勇, 奥田幸夫, 大西純也 (2011): 圃場の均平化による畝間灌漑の節水効果, 平成 23 年度農業農村工学会大会講演要旨集, pp. 486-487

第 4 章

- 4-1 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, 28-S, pp. 155-158, DOI: https://doi.org/10.14976/jals.28.S_155
- 4-2 Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., Heibloem, M. (1985): Irrigation methods Chapter 3. Furrow Irrigation, FAO Irrigation Water Management Training Manual No. 5, <<http://www.fao.org/3/S8684E/s8684e04.htm>>, Accessed 09th Dec, 2019
- 4-3 Yvan, E. G., Dean, E. E., and Roger, W. E. (1993): Alternate-furrow irrigation for soybean production, Agricultural Water Management, 24, pp. 133-145
- 4-4 Yonts, C. D., Eisenhauer, D. E., and Varner, D. L. (2007): Managing Furrow Irrigation Systems, NebGuide, University of Nebraska—Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources
- 4-5 John, F. S., Reeves, H. E., and Garton, J. E (1982): Irrigation water conservation by using wide-spaced furrows, Agricultural Water Management, 5, pp. 309-317
- 4-6 Khan, K. H., Rana, M. A., and Arshad, M (1999): Alternate furrow irrigation for enhancing water use efficiency in cotton, Pakistan Journal of Agricultural Sciences, Vol. 36 (3-4), pp. 175-177
- 4-7 Devkota, M., Guptac, R. K., Martius, C., Lamersb, J.P.A., Devkota, K. P., Sayref, K. D., and

Vlek, P. L. G. (2015): Soil salinity management on raised beds with different furrow irrigation modes in salt-affected lands, *Agricultural Water Management*, 152, pp. 243-250, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.013>

第 6 章

- 6-1 安部征雄, 仲谷知世, 桑嶋健也, 横田誠司 (2000): 蒸発力を利用した新たな集積塩類除去法 (Dehydration 法) と地表灌漑方式による Leaching 法との比較研究, *沙漠研究*, 10-2, pp. 147-156
- 6-2 桑嶋健也 (2001): Dehydration 法による塩類除去の効率性に関する研究, 筑波大学博士論文, pp. 19-39

第 7 章

- 7-1 農林水産省農林水産技術会議 (2015): 農林水産研究基本計画, pp. 1, 9, 47
- 7-2 Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2019): AQUASTAT Country Fact Sheet India, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/cf/readPdf.html?f=IND-CF_eng.pdf>, Accessed 11th Dec, 2019
- 7-3 World Bank: World Development Indicators Database <<http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=SI.POV.2DAY&country=IND#>>, Accessed 11th Dec, 2019
- 7-4 Central Intelligence Agency: The world fact book, South Asia, India <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/in.html#Econ>> Accessed 11th Dec, 2019
- 7-5 北村義信 (1997): インドの水資源利用・灌漑農業の特性と食糧需給の動向, *農業土木学会誌* 65 (4), pp. 403-409
- 7-6 Indian Council of Agricultural Research: ICAR at a glance, <<http://www.icar.org.in/files/At-A-Glance-Sept-2012-s.pdf>>, Accessed 11th Dec, 2019
- 7-7 Sandhu, A. S., Butter, N. S., and Bhatti, D. S. (2005): Directorate of Extension Education, Panjab Agricultural University, Ludhiana, pp. 1-18
- 7-8 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 (2016): 東北農業研究センターたより, No.49, pp. 2

摘要

日本語摘要

世界人口が増加の一途を辿るなか、生産性の高い灌漑農業は世界の食料安全保障に大きく貢献しており、今後も重要な役割を担うものと考えられる。しかし、安定かつ高い農業生産のために灌漑が必須である乾燥・半乾燥地域では、不適切な水管理を要因とした塩類集積による土壌劣化が進行しており、農業生産に悪影響を及ぼしている。特に、灌漑・排水設備や水管理が不十分な開発途上地域での被害が大きく、その対策が急務となっている。二次的塩類集積の主な要因は、灌漑水からの塩分流入と過剰灌漑や排水不良に伴う地下水位の上昇である。したがって、塩類集積の軽減には節水と排水改良が有効である。スプリンクラ灌漑および点滴灌漑による節水や排水路の造成および暗渠の埋設による排水改良は有効な対策であるが、綿密な設計や初期投資、そして、導入後の維持管理費が必要となるため、開発途上地域の農家による導入が困難である。そこで、本研究では、開発途上地域の農家が営農活動の一環として持続的に取り組める対策であることを念頭に、新たな資金や大幅な労力の増加を伴わない、畝間灌漑を改良することによる低コストの「節水」および「除塩」をウズベキスタンのフェルメル圃場にて検討した。

畝間への間断的な給水によって節水効果を得るサージフロー（Surge Flow）灌漑法（SF法）の利点を活かしつつ極めて簡素化した「簡易 SF 法」を考案した。簡易 SF 法は通常の畝間灌漑を 1 日間隔で 2 回に分けるものであり、その節水効果を圃場試験にて検証した。その結果、畝間への流入量が標準的な 0.45 L s^{-1} と 1.70 L s^{-1} である場合、事前通水（SF-1）によって、畝間の浸透性低下と平滑化が生じ、畝間 100 m への通水で 11 - 19%，畝間 50 m への通水で 22 % の節水効果を得ることができた。一方、畝間への流入量が 5.00 L s^{-1} と多量であるとき、乾燥状態の畝間であっても、短時間で畝末端に到達することから、簡易 SF 法による節水効果が得られなかった。しかし、流入量が 5.00 L s^{-1} であっても、事前通水（SF-1）による畝間の浸透性の低下は生じているものと考えられ、灌漑時間中の浸透水量の推定では、浸透水量が慣行法（Control）と比べ 21 % 削減された。

畝間ひとつおきに通水する隔畝間灌漑法（SFI）による節水効果と綿花収量への影響を、圃場試験にて検証した。また、通水する畝間を入れ替えずに固定する固定式隔畝間灌漑法（FSFI）が畝内の土壌塩分に及ぼす影響も検証した。その結果、先行研究と同様に SFI により、綿花収量の大幅な減少を伴わずに 43 - 53 % の節水効果を得た。また、FSFI によって

畝内の土壌塩分は、畝側面の表層に移動することを確認した。

さらなる節水を図るため、簡易 SF 法と SFI とを組み合わせることによる相乗効果を検証した。その結果、SFI で 51 %、簡易 SF 法で 17 %、SFI と簡易 SF 法で 57 %の節水効果を得られた。しかし、大きな節水効果のある SFI は、必要用水量を供給できない可能性が高く、減収リスクがある。浸透水量の推定では、Control よりも SFI で浸透水量が大きくなったが、SFI と簡易 SF 法の組み合わせでは、事前通水による畝間浸透の抑制が有効に作用しており、3.6 %の削減効果を得られた。

以上から、簡易 SF 法および SFI は灌漑・排水施設や水管理体制が不十分な開発途上地域においても、現状の畝間灌漑に安価で容易に適用できるため、節水への取り組みの第一歩として有効な手法になり得ると考えられる。また、圃場の均平化との併用により、さらなる節水も期待できる。なお、簡易 SF 法は畝間の不陸による影響を強く受けるため、簡易 SF 法による十分な節水効果を得るには、均一な畝間の造成や水足前進速度を最適化する流入量の調整が必要である。簡易 SF 法と SFI の普及に向けた課題は、「給水の開始・停止」、「畝間の開閉」といった新たな作業が生じることである。

FSFI によって畝側面の表層に移動した塩分を、乾燥地域の大きな蒸発散位を利用して塩分を除去する「Dehydration 法」で取り除くことができれば、効率的な除塩技術となり得る。このことから、Dehydration 法による除塩性能を室内試験にて評価し、圃場試験にて「Dehydration 法と FSFI」による除塩効果を検証した。その結果、Dehydration 法の除塩性能は、黒色の木綿布 (D-b) で 22 % (20 - 25 %)、白いユニチカ製のспанレース不織布 (D-w) で 17 % (15 - 20 %) となり、高い除塩性能を示した。また、捕集布は、乾燥後にマルチ効果を示した。一方、黒色の木綿布を用いた圃場試験では、Dehydration 法と FSFI による 3 反復の試験を行ったが、捕集布の塩分は第 2 回灌漑後の 1 反復のみ上昇した。このとき、除塩率は 6.4%であり、室内試験の 22 %よりもかなり低い結果となった。その要因として、捕集布と土壌との密着性が確保できていなかったことなどが考えられる。

本研究で得られた成果を最大化し、社会実装の実現に向けた取り組みを検討するため、生産現場に近い研究開発および普及体制を構築しているインドのパンジャブ農業大学 (PAU) の組織体制を分析した。PAU では、複数回に渡る生産現場からのフィードバック、速やかな情報共有、そして、的確に課題を抽出する仕組みが構築されていた。ウズベキスタンにおいても、フェルメルに密接な組織とタシケントの研究機関が連携し、継続的な対話と交流が維持できる体制が構築できれば、社会実装の実現に大きく寄与すると思われる。

英語摘要

As the world population continues to grow, highly productive irrigated agriculture has greatly contributed to ensuring food security around the world and will continue to play an important role in the future. However, in arid / semi-arid areas where irrigation is essential for stable and high agricultural production, soil degradation due to salt accumulation caused by inadequate water management has progressed, resulting in adverse effects on agricultural production. In particular there is great damage in developing areas where irrigation / drainage facilities and water management are inadequate, and countermeasures are urgently needed. Secondary salt accumulation is caused by salinity input from irrigation water and groundwater table rise due to excessive irrigation and poor drainage. Therefore, water-saving and drainage improvement are effective to mitigating salt accumulation. Water-saving by sprinkler and drip irrigation, drainage improvement by construction of drainage channel and sub-surface drainage is an effective as a measure, but it requires careful design, initial investment, and maintenance costs after introduction. thus, introducing these methods by farmers in developing regions is difficult. Therefore, in this study, considering that the measure should be continuously work on as part of their farming activities, low-cost water-saving and salt-removal technique was validated in the Fermer's field in Uzbekistan, just improving furrow irrigation without new funds or significant increase in labor.

Taking advantage of the surge flow irrigation (SF) for water-saving by intermittent water supply to the furrow, I developed a simplified SF that just divided normal furrow irrigation into two times with one day interval. The water-saving effect was evaluated by field tests. As a result, when the inflow to the furrow was standard 0.45 L s^{-1} and 1.70 L s^{-1} , pre-water flow (SF-1) reduced the infiltration of the furrow and make smooth of surface. The water saving effect of 11 -19 % was obtained by irrigating 100 m furrow and that of 22 % was obtained by irrigating 50 m furrow. On the other hand, when the inflow to the furrow was as large as 5.00 L s^{-1} , the water saving by the simple SF did not appear because it reached the end of the furrow in a short time even in a dry condition. However, even if the inflow is 5.00 L s^{-1} , it is considered that the infiltration of the furrow was reduced due to pre-water flow (SF-1) during irrigation time. The estimation of infiltration water was decreased by 21 % compared with control.

The water-use and cotton yield by SFI irrigating every other furrow was also evaluated through field tests. In addition, the effect of FSFI in which is fixed wetting furrow instead of alternating on the soil salinity was also verified. Result showed that the water saving of 43 - 53 % by the application of SFI without significant decrease in cotton yield as in accordance with previous study. The application of FSFI confirmed that soil salinity in the ridge moved to the surface layer of side.

The synergistic effect of the combination of Simplified SF and SFI was also validated through

field test. As a result, the water was saved 51 % with SFI, 17 % with the simplified SF, and 57 % with combination of Simplified SF and SFI respectively. However, SFI can provide a significant water-saving effect, required water (RW) may not be irrigated. In the estimation of infiltration water, the infiltration water was larger in SFI than in the control. However, the combination of SFI and Simplified SF was effective in suppressing infiltration by pre-water flow, the infiltration water was 3.6 % less compared to control.

From the both, the Simplified SF and SFI can be easily applied to the current furrow irrigation even in developing regions where irrigation/drainage facilities and water management systems are insufficient and will be effective methods for water conservation. In addition, further water saving can be expected by combining with land leveling. Since the simplified SF is affected by unevenness of the furrows, in order to enhance water-saving by the simplified SF, it is necessary to prepare a uniform furrow and adjust the inflow to optimize the water advance speed. New tasks such as the start and stop of water supply, the open and close of furrows are challenges for the extension of the simplified SF and SFI.

Efficient salt removal technology can be achieved by removing the salt that has accumulated to the surface layer on the ridge side by FSFI using the Dehydration method that catches salt using large evapotranspiration in arid regions. From this, the salt removal performance by the dehydration method was evaluated through laboratory test, and the salt removal effect by the Dehydration method and SFI was verified through field test. Result showed that the salt removal ratio by the Dehydration method was 22 % (20 - 25 %) for black cotton cloth (D-b), and 17 % (15 - 20 %) for white nonwoven fabric (D-w). In addition, the collection cloth showed mulching effect after drying. On the other hand, in the field test using black cotton cloth, the Dehydration method and FSFI was repeated three times, the salinity of the collected cloth increased only one time after the second irrigation. The salt removal ratio was only 6.4 %, which was much lower than the 22 % in laboratory tests. It might be thought that the reason is adhesion between the collection cloth and the soil could not be ensured.

In order to refer for wide extension of the results obtained by this study, we analyzed the organizational structure of Punjab Agricultural University (PAU) in India, which has established a research and development and extension system close to the production site. At PAU, a mechanism was built to provide feedback from the production site several times, to quickly share information, and to accurately identify issues. In Uzbekistan, if a governmental organization close to Farmers and a research institute in Tashkent can cooperate and establish a system that can maintain continuous dialogue and exchange, it will greatly contribute to the realization of wide extension of research result.

学位論文の基礎となる学会誌公表論文

1. 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
大西純也・池浦 弘・山中 勇・北村義信・藤巻晴行 (2017)
沙漠研究 27 (3): 91-101
(DOI: http://dx.doi.org/10.14976/jals.27.3_91)
【第2章】【第3章】
2. 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
大西純也・奥田幸夫 (2018)
水土の知 86 (12): 31-34
【第7章】
3. Salt pushing effect to the side of the ridge by fixed skip furrow irrigation
ーcase study in the Republic of Uzbekistanー
Onishi, J., Okuda, Y., Paluashova, G. K., Shirokova, Y. I., Kitamura, Y. and Fujimaki, H. (2018)
Journal of Arid Land Studies 28 (S): 155-158
(DOI: https://doi.org/10.14976/jals.28.S_155)
【第4章】
4. Suitable inflow rate and furrow length for simplified surge flow irrigation
Onishi, J., Ikeura, H., Paluashova, G. K., Shirokova, Y. I., Kitamura, Y. and Fujimaki, H. (2019)
Paddy and Water Environment 17: 185-193
(DOI: <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00710-9>)
【第3章】