



国際農林水産業研究センター (JIRCAS)  
ウズベキスタン共和国 フェルメル評議会 (FC)

塩害軽減のための浅層暗渠排水

# 技術マニュアル



## 貢献者

### カウンターパート機関

ウズベキスタン国フェルメル評議会

### 検討委員会

北村 義信：鳥取大学

野部 公一：専修大学

江口定夫：農業・食品産業技術総合研究機構

安 萍：鳥取大学

### 技術マニュアル著者

奥田 幸夫，国際農林水産業研究センター（JIRCAS）

大森 圭祐，国際農林水産業研究センター（JIRCAS）

大西 純也，国際農林水産業研究センター（JIRCAS）

2017年2月 印刷

2017年9月 改訂

本書にかかる全ての権利は国際農林水産業研究センター（JIRCAS）が所有する。本書に記載された資料の複製及び配布は、国際農林水産業研究センター（JIRCAS）及びフェルメル評議会（FC）によって推奨されるものである。本内容の複製及び転写は、国際農林水産業研究センター（JIRCAS）、フェルメル評議会（FC）による書面による事前許可のある場合のみ許される。本書に記載されている発見、提案、提言は、本書の著者によるものであり、国際農林水産業研究センター（JIRCAS）及び著者と協働した他の組織の見解を必ずしも反映したものではない。

## はじめに

中央アジア地域の農業生産は、20世紀半ばからの大規模灌漑開発を通じて飛躍的に増大し、政府機関はその農地改良に多くのエネルギーと資源を注ぎ込み、乾燥・半乾燥地での営農を可能なものにしてきた。しかしながら、不適切な水管理と不十分な排水機能によって塩害が生じており、中央アジア地域の中でもウズベキスタン国では多くの地域で農業生産に深刻な被害をもたらしている。

塩害対策として、点滴灌漑、スプリンクラーなどの節水技術やリーチング、フラッシング、レーザー均平化、排水路の浚渫、暗渠排水といったものがあるが、ほとんどの対策には初期費用が必要となり、普及への大きな障壁となっている。このため、綿花栽培後の冬に実施する低コストのリーチングのみが、フェルメル（農業経営者）によって取組める唯一の対策となっている。しかし、今日では、長年の農業機械による踏圧等で形成された硬盤層が圃場の排水性を低下させており、リーチングによる効果が十分に得られておらず、圃場の排水不良に対処する必要性が生じている。

国際農林水産業研究センター（JIRCAS）は、2008年から2012年にかけて「農地塩害対策調査」を実施し、高い地下水位条件下における圃場レベルでの塩害軽減対策に焦点をあてた調査を実施した。その成果として塩害対策ガイドラインをとりまとめ、セミナーを通じて広く公表するとともに塩害被害が大きい州の関係者へ配布した。

新たに、2013年からは、ウズベキスタン国フェルメル評議会との共同研究覚書の下、リーチング効果の改善を目的とした「浅層暗渠技術」、周辺圃場からの影響を遮断できる「排水ブロック」に焦点をあてた調査を開始した。

この技術マニュアルは政府関係者から農家まで幅広く活用してもらうことを目的に、2013年から2017年までの農林水産省補助事業における活動の成果をとりまとめたものである。

本技術マニュアルは、日本国農林水産省、日本大使館、国際協力機構（JICA）、関係研究機関、そして、ウズベキスタン国シルダリア州の3つの水消費者組合、「ヤンガバット」、「アフメドフ」、「ボブール」より、多大な協力を得て作成したものである。ここに、謝意を表す。

2017年2月1日

JIRCAS

プログラムディレクター

飛田 哲

## 謝 辞

技術マニュアルは、日本国の農林水産省から補助金により、ウズベキスタン国フェルメル評議会の協力・支援を得て実施した調査において作成したものである。ここに関係機関及び関係者の方々に対して深く謝意を表す。加えて、シルダリア州政府、行政区の職員の方々、流域灌漑システム管理局、水文・土地改良事務所、灌漑・水問題研究所、グリスタン大学、土地資源・測地・地図・地籍国家委員会、タシケント灌漑土地改良大学（TIIM）、日本大使館、国際協力機構（JICA）及び農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門等の多くの方々の支援を頂いた。また、農場経営者（フェルメル）の Toshboev Hamid Holmuminovich 氏、Ikramov Abdurashid Lapasovich 氏、Mallaev Yangiboy 氏からは実証圃場として農地を利用させて頂き、3つの水消費者組合のメンバーの方々からも多くの協力を頂いた。ここでは、感謝すべき組織、機関、関係者の一部分のみを挙げているが、全ての方々に感謝の意を表したい。

最後に、本調査のウズベキスタン国での実施にあたり協力頂いた現地スタッフ全員に対し感謝の意を表す。

# 目次

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 貢献者                       | i   |
| はじめに                      | ii  |
| 謝辞                        | iii |
| 目次                        | iv  |
| 略語                        | v   |
| 用語解説                      | vi  |
| 序章                        | vii |
| 第1章 塩害                    |     |
| 1.1 塩害とは何か                | 1   |
| 1.2 塩害の発生機構               | 2   |
| 1.3 塩害の分類                 | 3   |
| 第2章 塩害予防と除塩対策             |     |
| 2.1 予防対策                  | 9   |
| 2.2 除塩対策                  | 16  |
| 第3章 塩類集積土壌のモニタリングと原因の特定   |     |
| 3.1 モニタリングの目的とその方法        | 20  |
| 3.2 塩類集積の原因特定に必要な調査項目     | 22  |
| 3.3 現地試験圃場における塩類集積原因      | 29  |
| 第4章 浅層暗渠排水による灌漑農地の塩類集積対策  |     |
| 4.1 本マニュアルにおける浅層暗渠排水の位置づけ | 32  |
| 4.2 浅層暗渠排水の構造             | 34  |
| 4.3 浅層暗渠排水の設計施工           | 37  |
| 4.4 乾燥地での適用事例             | 46  |
| 4.5 浅層暗渠排水の効果             | 50  |
| 第5章 まとめと提言                |     |
| 5.1 本暗渠とカットドレーンの組合せ方法     | 55  |
| 5.2 カットドレーンの適用上の留意点       | 56  |
| 5.3 浅層暗渠排水の施工経費           | 57  |
| 5.4 浅層暗渠排水技術の効果           | 58  |
| 5.5 下流側への環境影響             | 58  |
| 目次と著者リスト                  | 59  |
| 協力者                       | 60  |
| 付属資料                      | 61  |

## 略 語

|        |                                                                                |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|
| AFI    | Alternate Furrow Irrigation<br>交互畝間灌漑                                          |
| FC     | Farmers' Council of Uzbekistan<br>フェルメル評議会                                     |
| FAO    | Food and Agriculture Organization of the United Nations<br>国際連合食糧農業機関          |
| HGME   | Hydro-geological Melioration Expedition<br>水文・土地改良事務所                          |
| JICA   | Japan International Cooperation Agency<br>国際協力機構                               |
| JIRCAS | Japan International Research Center for Agricultural Sciences<br>国際農林水産業研究センター |
| JRA    | Joint Research Agreement<br>共同研究同意書                                            |
| RIIWP  | Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems<br>灌漑・水問題研究所    |
| TDS    | Total Dissolved Solids<br>総溶解固形物                                               |
| TIIM   | Tashkent Institute of Irrigation and Melioration<br>タシケント灌漑土地改良大学              |
| WCA    | Water Consumers' Association<br>水消費者組合                                         |

## 用語解説

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
| 地下水位   | 圃場面と地下水面との距離                                         |
| 根群域    | 植物根が土壤水分を吸収するために伸長する土層                               |
| 浸透損失   | 根群域以下に浸透した使用しない水                                     |
| 本暗渠    | 暗渠排水システムの中で浸透水や地下水を吸水・送水する恒久的な暗渠を有する部分               |
| 集水渠    | 吸水渠内の排水を排水路に送る管水路                                    |
| 排水口    | 暗渠排水で集めた水を排水路に排水する施設                                 |
| 疎水材    | 有孔管の上部に設置し、圃場内で集められた水の浸透を促進する透水性の材料                  |
| 選択流    | 土壤内に形成された水みちを通過する不均一な水の流れ                            |
| 水閘     | 暗渠排水システムの末端部分で排水を調節する施設                              |
| 浅層暗渠排水 | 本マニュアルでは、地表面下 1 m 程度に管等を埋設し、浸透水や浅い位置にある地下水の排除を促進する施設 |
| 吸水渠    | 本暗渠と同義。疎水材部と吸水・送水管部からなり、浸透水を有孔管に吸水し、下流側に送水する施設       |
| 補助暗渠   | 表層の排水の迅速化を図り、本暗渠まで排水の水みち機能を補助する暗渠                    |
| 含水比    | 土壤の乾燥重量に対する水分重量の比率                                   |

# 序 章

## I. 背景

中央アジアではソ連時代の 1960 年代から、アムダリア・シルダリア川流域のステップもしくは砂漠地域で大規模な灌漑開発が行われた。この大規模灌漑開発では十分な灌漑設備を用いずに、それらの地域での営農を可能なものにしたが、灌漑用水に含まれる塩分が圃場に流入し、また、過剰な灌漑や不十分な排水機能によって地下水位の上昇が生じた。いくつかの州では、この種の灌漑農業が 50 年以上も継続しており、その結果、塩害被害が拡大しており、持続的な農業への深刻な課題となっている。さらに、中央アジアの平原は、元来、塩分が土壤に含まれているため、これらの二次的塩類集積が進行する危険性が高い (Shirokova et al. 2006)<sup>1)</sup>。

節水灌漑や排水改良といった塩害軽減対策はあるものの、現状、フェルメルが営農活動として取組める対策はリーチングのみである。しかしながら、長年の農業機械による踏圧によって形成された硬盤層によって、圃場の排水性が低下しており、リーチング効果が限定的なものとなっている。

## II. JIRCAS 調査の目的

2008 年から 2012 年にかけて、JIRCAS はウズベキスタン国シルダリア州にて、二次的塩類集積の軽減を目的とした調査を実施した。この調査では個々のフェルメルが取組める対策に焦点をあてたものである。その成果として、「高地下水条件下における圃場での塩害軽減対策ガイドライン 2013」を取りまとめた。ガイドラインはウズベキスタン国の塩害被害が大きい地域に配布するとともに、以下に示す JIRCAS の WEB サイトにて公開した。

([http://www.jircas.affrc.go.jp/english/manual/salinization/Rus\\_index.html](http://www.jircas.affrc.go.jp/english/manual/salinization/Rus_index.html))

2013 年より、新たにリーチング効果の改善を目的に、低コストの排水技術の導入によって圃場の透水性を改善することに焦点を当てた調査を開始した。政府関係者、水消費者組合 (以下、WCA)、フェルメルなどへの導入・普及を図る上で、技術が低コストであることは極めて重要である。

この調査における 1 番目の目的は、圃場の透水性を改善する低コストの技術を見つけ出すことである。暗渠排水は効果的な技術のひとつであるが、通常の方法では、排水パイプの購入・埋設のためコストが高くなる。そのため、JIRCAS は特殊なトラクタアタッチメントを用いた低コストの浅層暗渠技術の導入を試みることにした。また、圃場の一部分での対策では、隣接する圃場の水利用による影響を受けるため、周辺圃場からの影響を遮断できる排水路 (深さ 3m 程度) で囲まれた区域 (排水ブロック) での効果も検証することとした。

2 番目の目的は、浅層暗渠等、本調査で得られた知見を技術マニュアルによって広く公表することである。



本マニュアルのターゲットと調査地域は以下のとおり。

- 対象地域：  
乾燥・半乾燥地における灌漑農地及び排水ブロック
- 対象者：  
政府関係者、水消費者組合、フェルメル
- 調査地域：  
ウズベキスタン国シルダリア州  
ミルザバット地区：アフメドフ WCA、  
ヤンガバット WCA  
オコルティン地区：ボブール WCA



図 1. 調査位置図

この技術マニュアルは 2013 年から 2017 年までの農林水産省補助事業における活動の成果をとりまとめたものであるが、本技術マニュアルをより有益なものとするため、2018 年も JIRCAS の調査・研究を継続し、その結果を追記する予定である。

### III. 技術マニュアルの使い方

この技術マニュアルの主な目的は、塩類集積リスクの高い状態の圃場条件下において、日本で開発された浅層暗渠排水技術の一つである穿孔暗渠機（カットドレーン）の現地実証試験から得られた知見を、政府関係者、WCA、フェルメルに提供することである。同時に、二次的塩類集積に対する知識を深めるために、発生機構、一般的な対策、モニタリング方法についても記載している。

第 1 章では、塩害の影響とメカニズムについての説明しており、第 2 章では、一般的な対応策について予防と除塩に区別して記載している。その後、JIRCAS の研究に基づき、塩類化の原因、効果、モニタリングについて記載し（第 3 章）、浅層暗渠技術の有効性及び施工手順について記載している（第 4 章）。第 5 章では、浅層暗渠技術に関するまとめといくつかの提言を記載している。

## 参考文献

- 1) Y.I. Shirokova and A.N. Morozov (2006): “Salinity of irrigated land of Uzbekistan: causes and present stage.” Springer, *Sabkha Ecosystems Volume II: West and Central Asia*, 249-259.

# 第1章 塩害

## 1.1 塩害とは何か

「塩害」とは、根群域に塩が集積し、植物が十分な水分を吸収できずに収量が減少することである。塩害が土地に影響を及ぼしたとき、警告のサインが現れる。例えば、細いもしくは枯れた木、作物収量の減少、耐塩性の雑草による占拠といったものがある。塩害は作物の生産性を減少させ持続的な農業を不可能なものにし、また、我々の河川や小川にも影響を及ぼし、酷い場合には、人間や動物が飲めなくなるほど塩分が強くなる。



図 1.1.1 塩害状況

このような影響は、塩水の源から下流へと拡大していくため、塩害は最も深刻な土壤劣化問題のひとつとなっている。適切な対策を施さなければ塩害は悪化し、深刻な場合には耕作放棄しなければならなくなる。塩害は、圃場に集積した塩類によって引き起こされるため、塩類集積の抑制及び集積した塩類の除去が有効な対策となる。

塩類集積は「一次的」「二次的」の二つのタイプに分けられる。一次的塩類集積は塩湖、塩田、塩性湿地、干潟など自然に生じるものであり、二次的塩類集積は土地開発や農業といった人間活動によって引き起こされるものである。この技術マニュアルでは、乾燥・半乾燥地の灌漑農業と強く関係する二次的塩類集積について取り扱う。

中央アジアは灌漑農業に起因した塩類集積が深刻であるが、中でもウズベキスタン国では、依然として、政府注文による綿花・小麦栽培が継続しており、そこでは、広大な農地で適用効率の低い地表法による栽培が行われている。その結果、灌漑農地の約51%が塩類による影響を受けている（表 1.1.1）。

表 1.1.1 中央アジアの塩害面積

| Country      | Irrigated area (ha) | Area affected by salinization |      |
|--------------|---------------------|-------------------------------|------|
|              |                     | (ha)                          | (%)  |
| Uzbekistan   | 4,198,000           | 2,141,000                     | 51   |
| Kyrgyzstan   | 1,021,400           | 49,503                        | 5    |
| Tajikistan   | 742,051             | 23,235                        | 3    |
| Kazakhstan   | 2,065,900           | 404,300                       | 20   |
| Turkmenistan | 1,990,800           | 1,353,744                     | 68   |
| Central Asia | 10,018,151          | 3,971,782                     | 39.6 |

Source: Irrigation in Central Asia in figures (FAO, 2013, FAO Water report 39, p68)

## 1.2 塩類集積の発生機構

灌漑農業に伴う塩類集積には大きくふたつの原因がある。ひとつは、灌漑用水からの塩分流入、もうひとつは過剰な灌漑や不十分な排水機能による地下水位の上昇である。

灌漑は水の自然なバランスを変化させる。多量の灌漑用水は植物では完全には消費できず、余剰な水は何処かに流去しなければならない。灌漑効率は最大で約70%程度であり、通常は60%よりも低い。これは、少なくとも30%、通常は40%の灌漑用水が植物に消費されていないことになる。

消費されなかった水の大部分は地下に蓄えられ、地域帯水層の水文状況を大きく変化させている。多くの帯水層では、これらの水を吸収することや移動させることができないため、地下水位が地表面付近にまで上昇し、「ウォーターロギング」や「毛管上昇」が生じている。

毛管上昇による根群域へ水移動が生じる高い地下水位状態にある土壌の大部分は、もし、塩分を含んでいれば根群域への継続的な塩分供給源となる。高い地下水位状態による塩類集積の度合いは、灌漑管理、地下水位、土壌の種類、気候に依存している。

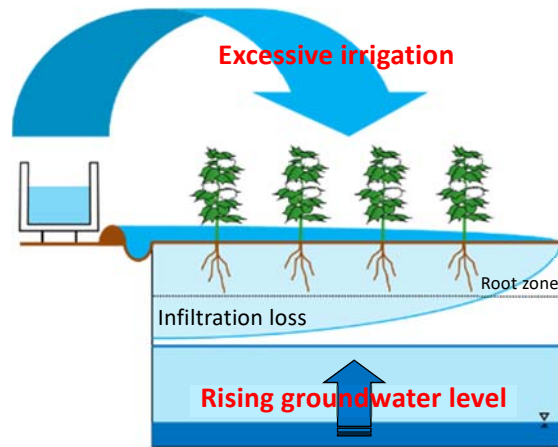


図 1.2.1 塩類集積の要因

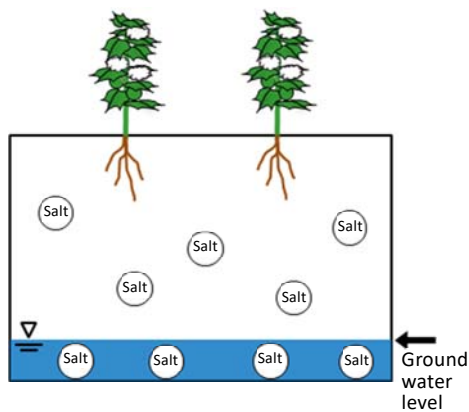
### 1) ウォーターロギング

ウォーターロギングは、圃場の冠水、地下水位の上昇等を要因に土壌が飽和することで被害を受けるものである。営農するには地下水位が高すぎる状態がウォーターロギングとみなされ、収量低下、トラクタの走行不能、そして、圧密が生じる。ウォーターロギングは、以下の問題を引き起こす。

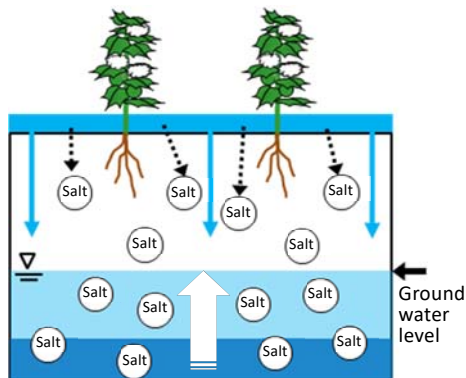
- 植物が必要とする根群域の酸素量を低下させる。
- 塩分を含んだ地下水の毛管上昇に伴う塩類集積を促進させる。
- リーチング効果を低下させる。

### 2) 毛管上昇

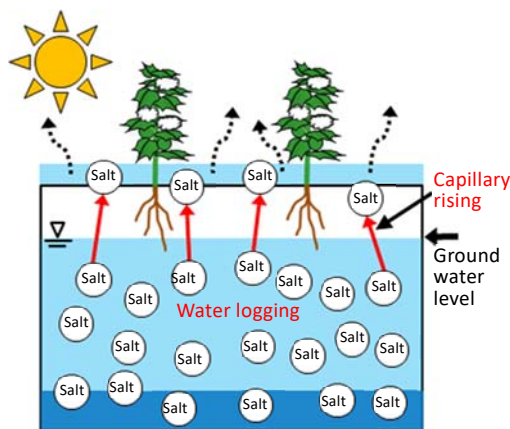
毛管上昇は、圧力がなくとも土壌水分が上方移動することであり、土壌の物理性によって、その動きは異なる。地下水位が地表面に接近したとき、塩分を含んだ土壌水分が毛管上昇によって地下水から土壌表面に移動し、塩分のみを根群域に残して蒸発することで塩類集積が生じる（図 1.2.2）。



中央アジアでは、土壌、灌漑用水、地下水が比較的高い塩分を含んでいる。



過剰な灌漑や不十分な排水機能によって、地下水位が上昇し、塩分を含んだ灌漑用水の流入は、地下水と上部土層の塩分濃度を上昇させる。



地下水位がさらに上昇し、上部の土壌が飽和すると毛管上昇が生じる。塩分を含んだ土壌水が地下水から圃場表面に移動し、塩分だけを残して蒸発する。

図 1.2.2 塩分集積過程

### 1.3 塩害の分類

塩害対策を行う前に、塩害の程度を把握するべきである。代表的な指標は電気伝導度 (EC) と総溶解固形物 (TDS) であり、広く用いられている。

#### 1) 電気伝導度 (Electric conductivity)

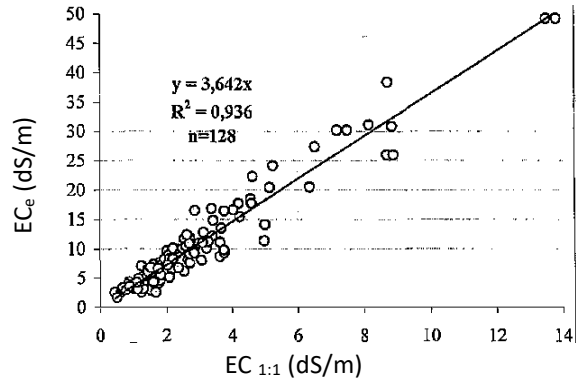
EC は水溶液中の電流の強さを測定するものであり、塩分の高い溶液は多くの電流を通し、高い EC を示す。単位は  $\text{dS/m}$  (deci-Siemens/meter)、 $\mu\text{S/cm}$  (micro-Siemens/centimeter)等が用いられる。

表 1.3.1 ECの種類

| Type              | 測定目的                          |
|-------------------|-------------------------------|
| ECw               | 水溶液の電気伝導度                     |
| ECsw              | 土壌溶液の電気伝導度                    |
| ECe               | 土壌の飽和抽出液の電気伝導度                |
| EC <sub>1:1</sub> | 風乾土壌と水を重量費 1:1 で混合した水溶液の電気伝導度 |
| EC <sub>1:5</sub> | 風乾土壌と水を重量費 1:5 で混合した水溶液の電気伝導度 |

EC<sub>1:1</sub> から EC<sub>e</sub> への換算

EC<sub>1:1</sub> はウズベキスタン国で広く採用されているが、土壌塩分は通常 EC<sub>e</sub> で評価される。灌漑・水問題研究所 (Institute of Irrigation and water Problem、以下 RIIWP) は、シルダリア、ジザク、ホラズム、スルハンダリア、カラカルパクスタンの多くの土壌試料を分析し、EC<sub>1:1</sub> から EC<sub>e</sub> への換算式を導いた。その分析によれば、標準的な換算式は、 $EC_e = 3.64 \times EC_{1:1}$  である。(図 1.3.1)。



Source: Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems in Uzbekistan

図 1.3.1 EC<sub>1:1</sub> から EC<sub>e</sub> への換算式

最も塩分濃度の実態を反映した指標は、土壌水の電気伝導度を示す EC<sub>sw</sub> であるが、土壌水を抽出するために特別な機具 (多孔質吸引カップ) が必要となる。そのため、試料の乾燥と注水のみで迅速に計測でき、採取した試料を後ほど実験室にて計測することもできる EC<sub>1:1</sub> と EC<sub>1:5</sub> が土壌塩分の比較において広く使用されている。

2) 総溶解固形物 (Total dissolved solids)

TDS は、水中に溶解されている物質の濃度を表す。体積当たりの重量を測定し、一般に g/L (grams/liter)、mg/L (milligrams/liter)、ppm (parts per million) といった単位で計測される。

物質には炭酸塩、重炭酸塩、塩化物、硫酸塩、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、有機イオン、その他のイオンなどがあり、通常、水中に解けている無機質類はイオン状態で存在している。イオンは電気が流れる電解物質であり、水溶液を流れる電流の強さから溶解されている物質の総量を測定することもできる。

3) 塩水の分類

世界には様々な状態の水があるが、EC<sub>w</sub> を指標としたとき、海水は 50.00 dS/m であり、飲料水としての制限は、人間で 0.83 dS/m、牛は 10.00 dS/m である (表 1.3.2)。

表 1.3.2 水の塩分程度

| Source/Use                                       | EC <sub>w</sub> (dS/m) |
|--------------------------------------------------|------------------------|
| Distilled water                                  | 0.00                   |
| Desirable potable limit for humans               | 0.83                   |
| Absolute potable limit for humans                | 2.50                   |
| Limit for mixing herbicide sprays                | 4.69                   |
| Limit for poultry                                | 5.80                   |
| Limit for pigs                                   | 6.60                   |
| Limit for dairy cattle                           | 10.00                  |
| Limit for horses                                 | 11.60                  |
| Limit for beef cattle                            | 16.60                  |
| Limit for adult sheep on dry feed                | 23.00                  |
| Highest reading for underground water in Forbes* | 24.00                  |
| Seawater                                         | 50.00                  |
| The Dead Sea                                     | 555.00                 |

Source: Taylor 1993 \* Nicholson & Wooldridge 2003

EC による水の塩分分類を表 1.3.3 に示す。

表 1.3.3 水の塩分程度

| Salinity level   | EC <sub>w</sub> (dS/m) |
|------------------|------------------------|
| Non-saline water | < 0.7                  |
| Saline water     | 0.7-42.0               |
| Slightly saline  | 0.7-3.0                |
| Medium saline    | 3.0-6.0                |
| Highly saline    | > 6.0                  |
| Very saline      | > 14.0                 |
| Brine            | > 42.0                 |

Source: HANDBOOK ON PRESSURIZED IRRIGATION TECHNIQUES (FAO, 2007)

#### 4) 塩の影響を受けた土壌の分類

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) に区別される (表 1.3.4)。塩性土壌は多量の可溶性塩類の集積によって特徴づけられ、一般的に塩類集積土壌として知られている。ソーダ質土壌は塩類の組成、すなわち、土壌交換基に吸着されたナトリウムの組成 (交換性ナトリウム率、ESP) で特徴づけられ、塩性土壌とソーダ質土壌両方の性質を有する塩性ソーダ質土壌も存在する。乾燥地の土壌はカルシウム、マグネシウム、ナトリウムなどの塩化物、炭酸塩、硫酸塩に富み、土壌ペーストを調整後に得られる飽和抽出溶液の pH (pHe) は 7~8 の弱アルカリ性を呈する。重炭酸ナトリウムや炭酸ナトリウムなどのナトリウム炭酸塩が多くを占めると、土壌 pHe は 8.5 を超えることもある。塩性土壌では、塩分濃度の高い土壌水が植物の水分吸収を妨げて生育を阻害する。また、ソーダ質土壌は ESP が 15%以上を占める土壌であり、土壌構造の崩壊に伴う土壌物理性の悪化などを引き起こし、さらに、高い pH による養分吸収阻害や粘土の分散など、複合的に土壌環境を悪化させ、作物の生育が著しく阻害される。

このように、塩類土壌は作物に対する影響とともにその成因、防止、改良方法も大きく異なるため、農地の塩類集積の状態と原因を明らかにすることが、適切な土壌管理のための前提条件として重要である。塩性土壌に対してはリーチングの実施、ソー



ダ質土壌に対してはカルシウム資材散布による透水性改良など、塩類土壌の種類によって塩類化防止への対処方法が異なるため、あらかじめ、塩類土壌を分類する必要がある。

表 1.3.4 塩類土壌の分類

| 土壌の名称    | pHe    | ECe (dS/m) | SAR   | ESP (%) |
|----------|--------|------------|-------|---------|
| 塩性土壌     | 8.5 未満 | 4.0 以上     | 13 未満 | 15 未満   |
| ソーダ質土壌   | 8.5 以上 | 4.0 未満     | 13 以上 | 15 以上   |
| 塩性ソーダ質土壌 | 8.5 未満 | 4.0 以上     | 13 以上 | 15 以上   |

pHe：土の飽和抽出溶液の pH 値

ECe：土の飽和抽出溶液の EC 値

SAR：Sodium Adsorption Ratio(ナトリウム吸着比)、単位が meq/L あるいは mmol/L の場合は左側の式を、mmol/L の場合は右側の式を使う。

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (\text{meq/L, mmol/L}), \quad \text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}} \quad (\text{mmol/L})$$

ESP：Exchangeable Sodium Percentage、交換性ナトリウム率(%)

$$\text{ESP} = \frac{\text{exNa}}{\text{CEC}} \times 100$$

ここで、exNa：交換性ナトリウム、CEC：陽イオン交換容量。

ESP 値は、USSL (1954) の Handbook No.60 他で実験的に得られた以下の計算式から算出してもよい。

$$\text{ESP} = 100 \times \frac{(-0.0126 + 0.01475 \times \text{SAR})}{\{1 + (-0.0126 + 0.01475 \times \text{SAR})\}}$$

表 1.3.4 を pHe と ECe だけで土壌塩類化の状態を整理すると図 1.3.2 のようになる。

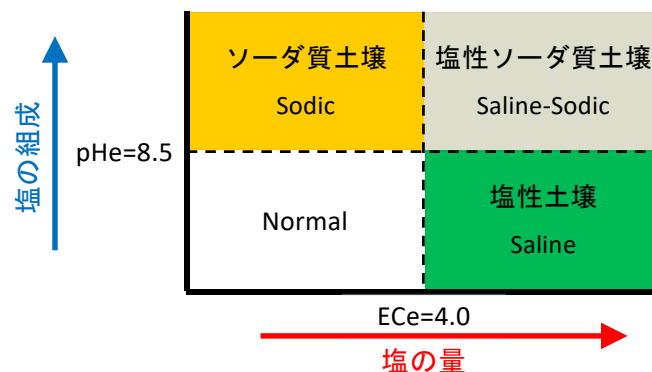


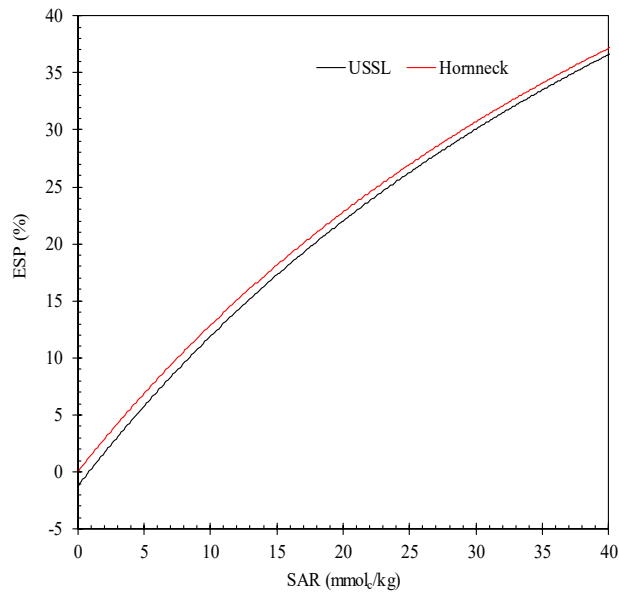
図 1.3.2 pHe と ECe で区分した土壌塩類化区分

### SAR から ESP を算出する注意点

以下に示す Hornneck ら (2007) の計算式は、USSL による計算式の項を落として簡略化したものである。

$$ESP = \frac{1.475 \times SAR}{\{1 + (0.0147 \times SAR)\}}$$

2つの計算結果を比較した場合、差はほとんどないが USSL の計算式は実験的に得られた結果から ESP と SAR の関係を導いたという点で評価されている。



| SAR  | ESP      |          |
|------|----------|----------|
|      | USSL     | Hornneck |
| 0.1  | -1.12502 | 0.147283 |
| 0.2  | -0.9744  | 0.294135 |
| 0.3  | -0.82424 | 0.440557 |
| 0.4  | -0.67452 | 0.586551 |
| 0.5  | -0.52524 | 0.732119 |
| 0.6  | -0.37641 | 0.877263 |
| 0.7  | -0.22802 | 1.021984 |
| 0.8  | -0.08006 | 1.166284 |
| 0.83 | -0.03576 | 1.209493 |
| 0.84 | -0.021   | 1.223887 |
| 0.85 | -0.00625 | 1.238278 |
| 0.86 | 0.008499 | 1.252664 |
| 0.87 | 0.023245 | 1.267046 |
| 0.9  | 0.067454 | 1.310166 |
| 1.0  | 0.214539 | 1.453632 |

土壌 EC による土壌塩分の程度を表 1.3.5 に示す。

表 1.3.5 土壌 EC による土壌塩分の程度

| Soil Salinity level | EC <sub>e</sub> (dS/m) | EC <sub>1:1</sub> (dS/m) | EC <sub>1:5</sub> (dS/m) |            | Effect on Crop Plants                               |
|---------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|-----------------------------------------------------|
|                     |                        |                          | Loam                     | Heavy Clay |                                                     |
| Non Saline          | < 2                    | < 0.6                    | < 0.2                    | < 0.2      | Salinity effects are negligible                     |
| Slightly Saline     | 2 - 4                  | 0.61 - 1.15              | 0.2 - 0.3                | 0.2 - 0.4  | Yields of sensitive crops may be restricted         |
| Moderately Saline   | 4 - 8                  | 1.16 - 2.30              | 0.4 - 0.7                | 0.5 - 0.9  | Yields of many crops are restricted                 |
| Highly Saline       | 8 - 16                 | 2.31 - 4.70              | 0.8 - 1.5                | 1.0 - 1.8  | Only tolerant crops yield satisfactorily            |
| Extremely Saline    | > 16                   | > 4.70                   | > 1.5                    | > 1.8      | Only a few very tolerant crops yield satisfactorily |

**Source:**

- (a) Based on USDA 1954 categories: Used by CSIRO Canberra and others in Australia.
- (b) Units used in Western Australia
- (c) Groundwater from within potential rooting distance of plant (bores). Suitability for "tree" growth.
- (d) From D Bennett and R George, DAWA Bunbury.
- (e) "Irrigation" water used in pot trials. [http://www.agric.wa.gov.au/content/lwe/salin/smeas/salinity\\_units.htm](http://www.agric.wa.gov.au/content/lwe/salin/smeas/salinity_units.htm)
- (f) Salt-Affected Soils and their Management (FAO, 1998)



## 5) 作物耐性

土壌の塩分は、作物の生長を阻害して収量を低下させるが、その程度は塩分濃度に依存する。土壌水が塩分を含むことによって浸透圧が生じ、根群域にある植物の利用可能な水分量を減少させる。

作物の塩分耐性を表 1.3.6 に示す。表中のパーセンテージは、塩分に対する減収量を示している。

表 1.3.6 作物の塩分耐性

| Crop                                                | 0%  |     | 10%  |     | 25%  |     | 50%  |      | MAX<br>ECe |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|------|------------|
|                                                     | ECe | ECw | ECe  | ECw | ECe  | ECw | ECe  | ECw  |            |
| Barley <sup>4)</sup> ( <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 <sup>5)</sup> ( <i>Beta vulgaris</i> )   | 7.0 | 4.7 | 8.7  | 5.8 | 11.0 | 7.5 | 15.0 | 10.0 | 24.0       |
| Wheat <sup>4),5)</sup> ( <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 <sup>5)</sup> ( <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        |

- 1) ECe is the electrical conductivity of the saturation extract of the soil reported in mmhos/cm at 25 °C.
- 2) ECw is the electrical conductivity of the irrigation water in mmhos/cm at 25 °C. This assumes about a 15–20% leaching fraction and an average salinity of soil water taken up by crops about 3 times that of the irrigation water applied ( $EC_{sw} = 3 \times EC_w$ ) and about 2 times that of the soil saturation extract ( $EC_{sw} = 2 \times EC_e$ ). From the above,  $EC_e = 3/2 \times EC_w$ . New crop tolerance tables for ECw can be prepared for conditions that differ greatly from those assumed in the guidelines. The following are estimated relationships between ECe and ECw for various leaching fractions: LF = 10 ( $EC_e = 2 EC_w$ ), LF = 30% ( $EC_e = 1:1 EC_w$ ), and LF = 40% ( $EC_e = 9 EC_w$ ).
- 3) Maximum ECe means the maximum electrical conductivity of the soil saturation extract that can develop because of the listed crop withdrawing soil water to meet its evapotranspiration demands. At this salinity, crop growth ceases (100% yield decrement) because of the osmotic effect and reduction in crop water availability to 0.
- 4) Barley and wheat are less tolerant during the germination and seedling stages. ECe should not exceed 4 or 5 mmhos/m.
- 5) Sensitive during germination. ECe should not exceed 3 mmhos/cm for garden beets and sugar beets.
- 6) Tolerance data may not apply to new semi-dwarf varieties of wheat.
- 7) An average for Bermuda grass varieties. Suwannee and Coastal are about 20% more tolerant; Common and Greenfield are about 20% less tolerant.
- 8) Average for Boer, ~Yilman, Sand, and ~Weeping varieties. Lehman appears about 50% more tolerant.
- 9) Brood-leaf birdsfoot trefoil appears to be less tolerant than narrow-leaf.

Source: Reported by Maas and Hoffman (1977) and Maas (1984). Bernstein (1964) and University of California Committee of Consultants (1974).

## 第 2 章 塩害予防と除塩対策

### 2.1 予防対策

灌漑農業に伴う塩類集積、いわゆる、二次的塩類集積は、主にふたつの要因がある。ひとつは灌漑用水からの塩分流入、もうひとつは毛管上昇を促進する高い地下水位である。したがって、塩類集積の予防には、灌漑用水からの塩分流入の抑制と地下水位を低く維持する必要がある。

ここでは、一般的な塩害予防対策を紹介する。

#### 1) 灌 漑

灌漑は全てを効率的に行えるものではなく、灌漑用水は水路や圃場にて失われており、圃場での浸透は地下水位を上昇させている。高い地下水位状態は塩分を根群域に戻す恐れがあるため、灌漑用水の損失と地下水位は厳密に管理する必要がある。

中央アジアでは、ソ連からの独立後 20 年が経過した現在においても、依然として、灌漑効率の低い畝間灌漑が広く用いられている。そこでは、広範囲における不十分な灌漑管理によって、過剰に灌漑する傾向があり、その結果、土壌塩分が上昇しているため、節水灌漑の導入が有効と考えられる。しかし、点滴灌漑、スプリンクラー灌漑は、灌漑効率が高い技術としてよく知られているが、フェルメルでは賄えない初期投資が必要となる。

このような現地の実情を踏まえ、ここでは、畝間灌漑をベースとした節水技術を紹介する。

#### ● 交互畝間灌漑法 (Alternate furrow irrigation : AFI)

交互畝間灌漑法 (以下、AFI 法) は、畝間を交互に灌水するものであり (図 2.1.1; FAO, 1988) <sup>1)</sup>、ひとつの畝間からふたつの畝に水を供給する。AFI 法の利点は、灌漑しない畝間があることと灌漑用水が側面に流れることによって灌漑用水量と浸透損失を削減できることである。Alan R. Mitchell et al (1993) <sup>2)</sup> らは、通常法と比べ、50%もの灌漑用水量の削減を報告している。

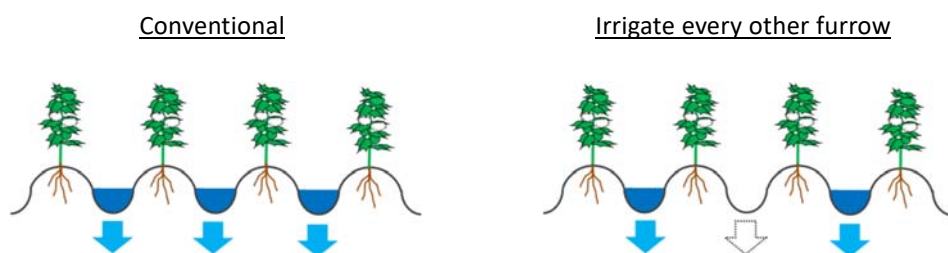


図 2.1.1 AFI 法の概念

### AFI 法による通水試験

シルダリア州のフェルメル圃場において、AFI 法による節水効果を検証する試験を実施した。試験では、通常の畝間灌漑（慣行法）と AFI 法によって畝長 50 m、幅 3.1 m の試験区（155 m<sup>2</sup>）を灌漑し、灌漑用水量とワタ収量を測定した。その結果、AFI 法によって畝間への供給水量が約 48%削減され、統計的な差は認められなかったがワタ収量が約 11%増加した。



図 2.1.2 AFI 法

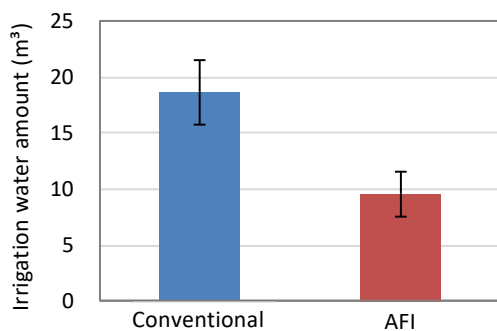


図 2.1.3 灌漑用水量

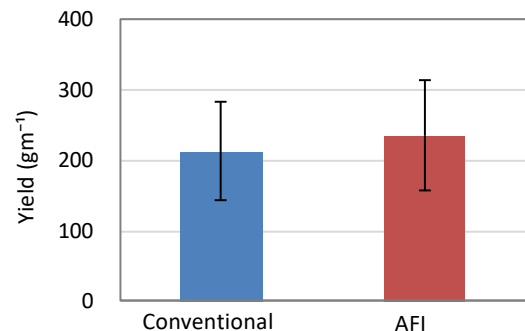


図 2.1.4 ワタ収量

### ● サージフロー灌漑

サージフロー灌漑は、継続的ではなく断続的に灌漑を行うものである。サージフロー法の利点は、周期的な灌水によって透水性を減少させることで浸透損失を削減することである。1 回目の灌水によって透水性が抑制されることで、2 回目の灌水では 1 回目の灌水よりも水足前進速度が早くなる。圃場では、畝長に応じて複数回に分けて灌水を行う。透水性の低下は、「土の移動と再配列による結束」「空隙への空気の閉じ込め」「水の再配分」「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。(Alan R. Mitchell et al. 1994)<sup>3)</sup>

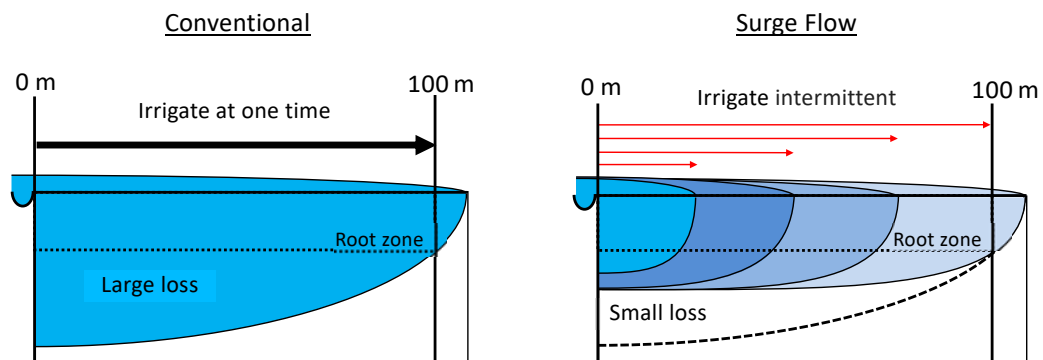


図 2.1.5 サージフロー灌漑の概念

### 簡易サージフロー法

フェルメルが採用しやすい手法とするため、サージフロー灌漑法（以下、「SF法」）を簡素化した簡易サージフロー法（以下、「簡易SF法」）を考案した。通常のSF法は、給水管やバルブを用いて4回程度に分けて間断的に給水するが、簡易SF法は、通常の畝間灌漑（慣行法）を2回に分けて行うだけのものである。

シルダリア州のフェルメル圃場で実施した慣行法と簡易SF法による畝間長100 m（勾配：1/800）への通水試験では、簡易SF法による第2回給水時の水足前進速度が増加したことによって畝間末端に到達するまでの合計時間が簡易SF法で6,026秒（約100分）となり、慣行法の6,768秒（約113分）から742秒（約13分）短縮された。この結果、畝間への供給水量が約11%削減された。

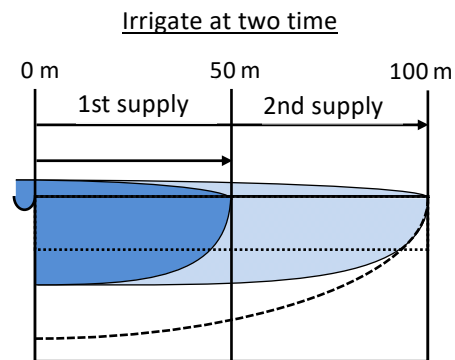


図 2.1.6 簡易サージフロー法



図 2.1.7 第1回給水（遅い）



図 2.1.8 第2回給水（早い）

### ● カットバック灌漑

勾配のある圃場において、畝間末端からの灌漑用水の流亡は水の浪費となり、問題である。これは、条件の良い圃場であっても灌水量の30%にも及ぶことから、流亡水を取り除くための浅い排水路が圃場の端に必要となる。もし、排水路が無ければ、ウォーターロギングによって植物が被害を受ける恐れがある。カットバック灌漑は、灌漑用水が畝間末端に到達した時点で、灌水量を減少させることで過剰な流亡を防止する手法である（FAO 1988）<sup>1)</sup>。

## 2) 排水

灌漑もしくは降雨は圃場を湿潤させる。この水は土壌中へ浸透し、空隙に蓄えられる。すべての空隙が水で満たされたとき、土壌は飽和状態となり、さらに灌漑されたとしても、土壌は水を吸収することができない。その結果、圃場面に水溜りが生じる。

もし、表層土壌の飽和状態が長く続けば、植物の生育状態に影響を及ぼす。植物の根は水分と同様に空気も必要としており、多くの植物は、長期間に渡る土壌の飽和状態に耐えられない（水稻を除く；FAO1985）<sup>4)</sup>。加えて、湿潤状態の圃場では、農業機械の使用が困難になる。また、必要以上な多くの水は、水路の漏水や溜水を引き起こす要因となる。他方で、飽和状態にある表層土壌から深い土層への水分降下は、地下水を涵養するため、地下水位が上昇する。強い降雨または過剰な灌漑の継続によって、地下水位が飽和状態にある根群域付近の土層にまで上昇してしまうと毛管上昇やウォーターロギングが生じる。したがって、表層、根群域からの余剰水の除去が必要である。

乾燥・半乾燥地における塩害は、地下水位を適正な水位（一般的には、少なくとも1.5から2m）に制御できない不十分な排水路によって生じている。もし、排水路が十分なものであれば、塩害は灌漑用水の水質と灌漑管理のみと関係することになる。したがって、効果的な塩害対策には、地下水を制御、安定化し、塩類集積を軽減する適正な排水路の整備が重要である。

### ● 排水溝（地表排水）

表面排水は、圃場面の余剰水を取り除くために、圃場面に浅い溝を掘るものである。浅い溝で受けた排水は、大きくて深い基幹排水路に排出される。余剰水の表面排水路への流出を促すためには、圃場の均し（均平化）による人工的な傾斜が必要になる。

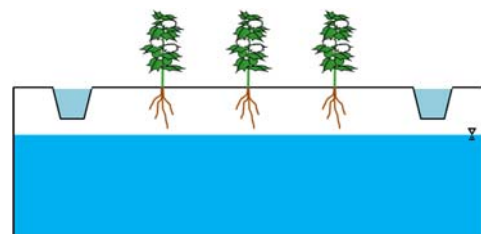


図 2.1.9 表面排水

### ● 地下排水

表面下排水の主な目的は、根群域の余剰水を排出することと地下水位を低く保つことであり、深い開排水路と排水管を埋設するものがある。

#### ▶ 深い明渠排水

根群域の余剰水は、深く掘削して造成した開排水路に流去する。(図 2.1.4)。深い開排水路の不利な点は、圃場内の広い区域を使用し、造成にかかる機械

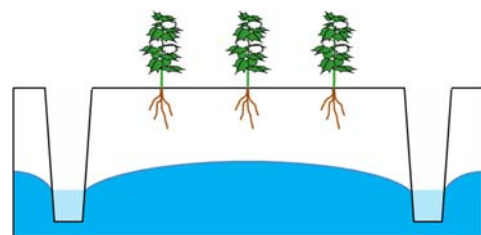


図 2.1.10 深い明渠排水路



経費が必要となる。加えて、圃場に進入するための多くの橋やカルバートが必要となり、また、頻繁な維持管理作業（除草、補修等）が必要となる。

▶ 暗渠排水

多くの吸水孔を備えた管を圃場内に埋設することで、余剰水を管内に吸水し、排水路に排出する（図 2.1.5）。排水管は、粘土、コンクリート、もしくはプラスチックで作られている。

通常、排水管は特殊な機械によって溝内に設置される。粘土、コンクリート製の管は長さ 30 cm、直径 50-100 mm であり、柔軟なプラスチック製であれば 200 m 程度まで長いものがある。

開排水路とは対照的に、管を埋設する手法では、耕作面積を減少させず、また、頻繁な維持管理も必要ない。しかしながら、資材費、建設機械、熟練した技術者などの経費が必要となり、施工コストが高い。

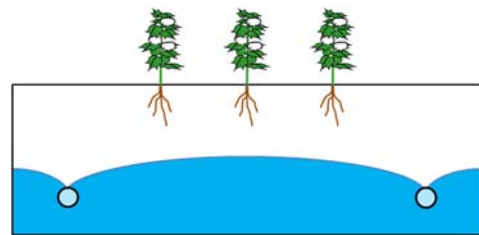


図 2.1.11 暗渠排水

● 垂直排水

垂直排水は、透水性の高い土層まで深井戸を掘り、そこから深層地下水をポンプで排水することにより、地下水位の低下を図る技術である。

**ウズベキスタンでの垂直排水**

ウズベキスタンでは、1960年代から垂直排水の建設が始まり、1990年代半ばに施設数がピークになった。その後、施設の更新と維持管理が効率的に行われず、施設数及び稼働時間が減少した。しかしながら、現在もなお、地下水位の低下を目的とした垂直排水が使用されている（Okuda, 2015）<sup>5)</sup>。



図 2.1.12 垂直排水施設

● 生物的排水

地下水位の制御を目的に、吸水力の強い木を利用する技術であり、低地、水路沿い、圃場内へ植栽し、余剰な水を排除する。また、植栽による防風効果も期待できる。

### 3) 均平化

圃場の不陸は元来からある起伏と毎年の営農活動によって生じており、発芽が不均一になるなど、栽培に悪影響を及ぼしている。このため、定期的な営農活動として均平化を実施すべきである。

通常の均平化において、必要な平坦さを得るには、圃場の起伏状況に応じて、トラクタオペレーターが頻繁にグレーダーの調整を行わなければならない。この方法は、トラクタオペレーターや農家の経験に依存した作業となる。



図 2.1.13 レーザー均平化

レーザーレベリングでは、グレーダーの調整がレーザー機器によって自動的に行われるため、経験のあるオペレーターなしでも、設計との差が±5cm 以内での施工が可能となる。

レーザーレベリングシステムは以下の要素から構成されている：

▶ レーザートランスミッター：

水平面を示すためにレーザービームを照射する。水平面を示す円の直径は機材に応じて、数メートルから数キロメートルまで幅広く対応している。

▶ レーザーレシーバー：

トランスミッターからの電波を受信し、電気信号に変換してコントロールボックスに送信する。

▶ コントロールボックス：

レーザーレシーバーから受信した信号を変換する。パネルは正しい水平面を見つけるために位置（上もしくは下）を示す。

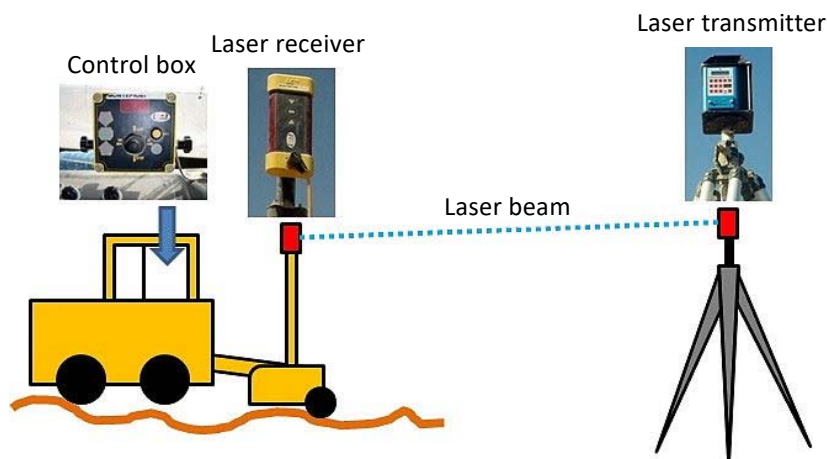


図 2.1.14 レーザーレベリングの仕組み

#### 4) 毛管上昇の抑制・遮断 (Inoue, 2012) <sup>6)</sup>

乾燥・半乾燥地において、高い地下水位に起因する塩類集積は、強力な蒸発に伴う塩分を含んだ水の毛管上昇によるところが大きい。このため、毛管上昇の抑制、もしくは遮断する対策が効果的である。

- マルチング

土壌表面をワラ、枯葉、礫、砂、ビニールシート等、様々な資材で被覆することで、蒸発量を軽減する手法。土壌水分を保持する効果の他、土壌浸食や肥料流亡の防止、雑草防除、地温保持といった効果が期待できる。

- 深耕

深く耕起し、乾燥層を地表面に形成させることで毛管上昇を遮断する手法。

- キャピラリーバリア

作土層と地下水面との間に礫などによる層を作ることによって、毛管上昇を遮断する手法。



## 2.2 除塩対策

ここでは、予防技術とは対照的に、集積した塩分を直接取り除く技術を紹介する。

### 1) 水資源が豊富な場合

#### ● フラッシング

ポンプ圧送等による多量の流水で、表面土壌の塩分を水平方向に下流端まで洗い流し、圃場外に除去する手法。本手法では、除去した塩分が隣接圃場に侵入しないよう、用排水分離を確実に行うことが重要である。

#### ● リーチング

リーチングとは、圃場に溜水し、溜水した水が浸透することによって、根群域の塩分を取り除くものである。農家にとって実用的であることから広く普及している。十分な浸透効果を得るには、地下水位を制御する排水が十分に機能している必要があるため、硬（耕）盤破碎や暗渠排水を実施することがリーチング効果の増大に有効である。また、圃場内で均一な効果を得るには均平化が有効である。



図 2.2.1 リーチング

### ウズベキスタンでのリーチング指針

ウズベキスタン国シルダリア州では、フェルメルに対して、以下のリーチングガイドラインが示されている。

#### ● リーチング用水量

Table 2.2.1 リーチング用水量

| Salinity classification                 | Water amount (m <sup>3</sup> /ha) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Weak salinity (EC <sub>c</sub> : 2-4)   | 2,500                             |
| Middle salinity (EC <sub>c</sub> : 4-8) | 3,000                             |
| Strong (EC <sub>c</sub> : >8)           | 3,000 (First time)                |
|                                         | 1,000 (Second time)               |

Source: Hydro-geological Melioration Expedition in Syrdarya Region

#### ● リーチング計画

綿花栽培圃場において最適なリーチング時期は 11 月から 12 月である。しかしながら、州の天候によっては、1 月 30 日までに実施できればよい。収穫時期である秋は、灌漑が行われないため地下水位が最も低くなり、リーチン

グには好条件である。しかし、灌漑用水が十分でないためこの時期にリーチングを実施するのは難しい。

● リーチングに向けた圃場準備

- 作付け後、深さ 35-40cm までの耕起を行う。
- 耕起後、圃場を均す。
- 排水機能の改善を図る。
- 観測井により地下水位を確認する。
- 以下に表に示す圃場表面の形状に基づき、圃場を分割する。

Table 2.2.2 圃場勾配と小区画規模

| Slope (%) | Size (ha)         |
|-----------|-------------------|
| <0.2      | 0.25 ha (50m*50m) |
| 0.2~0.4   | 0.16 ha (50m*33m) |
| 0.4~0.6   | 0.12 ha (50m*25m) |
| 0.6~1.0   | 0.08 ha (50m*17m) |

Source: Hydro-geological Melioration Expedition in Syrdarya Region

リーチングは、圃場状況に応じて塩分が高い区域から低い区域の順に実施し、排水路や井戸の反対側から開始する。水路からの給水は低地から高地にかけて行い、給水がスムーズとなるように、水路から圃場への距離は 100-150m 程度になるようできるだけ短くする。リーチングは昼も夜も中断せずに実施するが、夜間は暗いため、事前に 0.5-1 ha 程度の平坦な小区画を準備してリーチングし、夜間の水使用量を減らす。

小区画に沿った水路の流量は 30 L/s 以下にならないように努め、圃場面の湛水深が 25cm になった時点で給水を停止する。

● 土壌改良剤の散布

ソーダ質土壌 (Sodic soil) の改良は、土壌の陽イオン交換部位に高い割合で吸着されているナトリウムイオンを取り除いて、洗脱することによって行われる。しかし、ナトリウムイオンは水による洗浄では土壌からの除去が難しく、また、粘質なソーダ質土壌では透水性が悪化しているため、下方浸透が期待できない状態になっている。このため、まず、土壌改良剤の散布によって土壌に吸着したナトリウムイオンを離脱させ、その後、離脱したナトリウムイオンをリーチング等によって圃場外へ除去する必要がある。土壌改良剤として、石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) といった水溶性のカルシウム資材が使用されている。

## 2) 水資源が乏しい場合

- スクレーピング

圃場内で生じている塩クラストや塩分濃度が高い部位の土壌を機械で削り取り、圃場外に除去する手法。

- 硬（耕）盤破碎

長期間の営農活動に伴うトラクタ走行によって深さ 20-50cm に硬（耕）盤層が形成され、ウズベキスタン国シルダリア州アフメドフ水利組合の圃場では、乾燥密度が  $1.6 - 1.8 \text{ g/cm}^3$  となっている。この硬（耕）盤層はリーチング効果を減少させ、作物根の伸長を阻害していることから、定期的に専用のアタッチメント（図 2.2.2）による硬（耕）盤破碎の実施が望ましい。



図 2.2.2 サブソイラー

- ファイトレメディエーション（植物による環境修復）

ファイトレメディエーションとは、耐塩・耐アルカリ性または好塩性植物を塩類が集積した地域に植栽し、塩分を吸収させて塩類集積の軽減を図る手法である。本手法では、植物根が作土層を貫通することによる浸透性の改善、植物の根が到達する深い部位までの改良といった効果が期待できる。

## 参考文献

- 1) Food and Agriculture Organization of the United Nations (1988): "Training manual No. 5, Irrigation water management: irrigation methods", <http://www.fao.org/docrep/s8684e/s8684e04.htm#chapter%203.%20furrow%20irrigation>, Accessed 24th June 2016.
- 2) A.R. Mitchell, J.E. Light, and T. Page (1993): "Alternate and alternating furrow irrigation of peppermint to minimize nitrate leaching." Central Oregon Agriculture Research Center Annual Report 1990-1991, AES OSU, Special Report 922, 29-36.
- 3) A.R. Mitchell and K. Stevenson (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, 79-87.
- 4) Food and Agriculture Organization of the United Nations (1985): "Training Manual No. 1, Irrigation water management: Introduction to irrigation." <http://www.fao.org/docrep/R4082E/r4082e07.htm> Accessed 30th June 2016.
- 5) Y. Okuda, J. Onishi, K. Omori, T. Oya, A. Fukuo, R. Kurvantaev, Y. Shirokova, and V. Nasonov (2015): "Current status and problems of the drainage system in Uzbekistan." *Journal of Arid Land Studies* 25(3), 81-84.
- 6) M. Inoue (2012): "Salinization Status and Salt Removal Techniques (in Japanese)." *The Japanese Geotechnical Society*, 60(1), 12-15.

## 第3章 塩類集積土壌のモニタリングと原因の特定

### 3.1 モニタリングの目的とその方法

乾燥・半乾燥地で観察される塩類集積の程度や、根群域の塩分濃度を軽減するリーチング法の効果を把握するために、モニタリングによって塩分濃度を評価することが重要である。ここでは、対象領域の大きさが異なる三つの場合（土壌断面、圃場、広域）の塩類集積の程度を把握する方法を JIRCAS が行った調査事例を交えて紹介する

#### 1) 灌漑農地の土壌断面内の塩分状態の把握

灌漑用水の塩分濃度と地下水の塩分濃度ならびに地下水位の高低状況が根群域内の土壌塩分濃度の変化に影響する。灌漑農地の土壌水分と塩分状態をモニタリングすることでリーチングを考慮した適切な灌漑の時期、灌漑用水量、灌漑間隔を判断することができる。その結果、根群域の塩分状態を正常に維持した持続的農業が可能となる。

灌漑用水の塩分濃度を評価するために、TDS と EC が採用される。また、土壌のソダ質化を判断するためのナトリウム吸着比 (Sodium Adsorption Ratio : SAR) 算出に、ナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )、マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ ) のイオン濃度を測定する必要がある。これらのイオン濃度は、土壌を採取して実験室で化学分析をする必要がある。これに対して、農地の現場で、土壌水分と塩分濃度をモニタリングする場合には、化学成分の詳細分析は困難であるが、総量を EC から判断することが可能である。

土壌採取により土壌の塩分濃度を測定する以外、土壌水分量、EC、地温を同時にモニタリングできる携帯型の測定センサーが市販されている。アメリカのデカゴン (Decagon) 社製の ECH<sub>2</sub>O プロブモデル 5TE (図 3.1.1 左側)、イギリスのデルタ T (Delta-T) 社製の WET2 (図 3.1.1 右側) などがある。これらのセンサーは塩分濃度が高くなると、土壌水分量を過大評価することになるため、土壌固有の校正を行う必要がある。



図 3.1.1 土壌水分、塩分濃度センサー（左側：5TE、右側：WET2）

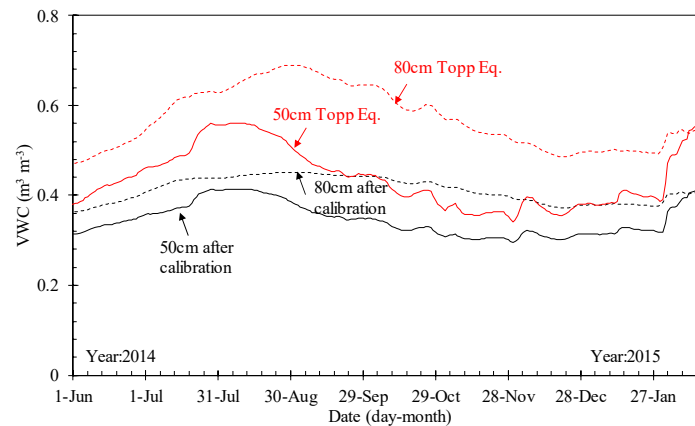
## 5TE センサーによる土壌水分の過大評価について

アフレドフ圃場に設置した深さ 50, 80 cm における 5TE センサーの体積含水率 (VWC) 推移とセンサー校正後の VWC 推移を下図に示す。現地土壌の飽和 VWC は  $0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  程度であるが、土壌塩分濃度の影響により、センサー校正前の VWC は最大で  $0.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  を示し、土壌水分を過大評価していることがわかる。この原因は、例えば Decagon 社の場合、鉍物質土壌の校正式は、誘電率から VWC の変換によく知られている Topp 式 (Topp ら、1980) をそのまま使用しているからである。

$$\text{VWC} = 4.3 \times 10^{-6} \times \epsilon_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} \times \epsilon_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \times \epsilon_a - 5.3 \times 10^{-2}$$

$\epsilon_a$  : 誘電率

センサーの校正方法については既往研究、または各製造会社が作成している校正方法を参考にするとよい。



## 2) 圃場における塩類集積の把握

圃場における土壌塩分濃度の空間分布は、ほとんどの場合不均一であり均一な分布というのはまず見られない。その不均一性は、圃場の水管理、土壌の物理性（透水性など）、地下水塩分濃度などの差違によって左右される。塩類集積が発生した圃場において適切な灌漑排水管理を実現するためには、不均一性の発生メカニズム解明の前段階として、その空間的な分布を把握する必要がある。そのためには土壌塩分濃度の多点観測が不可欠である。

従来までのサンプリング土壌を用いた土壌塩分濃度の測定は最も正確で信頼性が高い。しかし、多点観測を行う場合、多量の土壌サンプルの採取によって輸送、試料の調整、試験という一連のプロセスにかかる時間、コスト、労力が非常に大きくなる。これらの点を解決しうる方法の一つとして、機器と土壌が非接触の状態での土壌塩分濃度の測定を可能とする電磁誘電法 (Electromagnetic Induction Method : EIM) がある。EIM を用いた測定機器にはカナダジオニクス (Geonics) 社製の EM38 (図 3.1.2) などがある。また、土壌挿入式の EC 測定器は、圃場に直接プローブを挿入することで土壌中 EC の測定が可能であり、アメリカ Spectrum Technologies 社製の 2265FSTP は、深さ 60 cm までの任意の深さの EC の値を得ることができる (図 3.1.3)。

EM38 あるいは 2265FS で得られた EC 値は土壌のみかけの電気伝導度  $EC_a$  (Apparent electrical conductivity) とされ、その値は土壌中の液相、気相、固相の 3 相における物理的な電気の伝導経路を考慮したものであり、土壌水分量や土粒子表面の電気伝導度に影響を受ける。そのため、各測定器のキャリブレーションを行い  $EC_e$  などに変換する校正式を求める必要がある。





図 3.1.2 電磁誘電法による EC 測定器 (EM38)

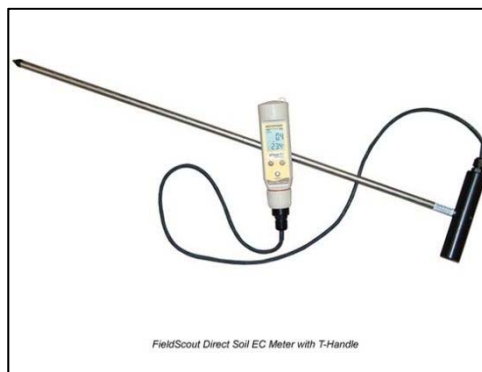


図 3.1.3 土壌挿入式 EC 測定器 (2265FSTP)

### 3) 広域な範囲における塩類集積の把握

現在最も広域でさまざまな地球環境をモニタリングできる方法は、衛星リモートセンシングである。例えば、ランドサット衛星に搭載された TM (Thematic Mapper) センサーは解像度 30 m で 185×185 km の観測幅を持つ。現状の一般的な衛星データからでは、直接塩分および塩分濃度を推定するのは難しいが、解析に用いる衛星データの観測時期と適切なグランドトゥールズによって、リモートセンシングデータを用いて塩類集積の定性的な評価をすることは十分可能である。

一方、HGME では、150 ha に 1 箇所割合で観測井を設置しており、地下水位、地下水塩分濃度のモニタリングを、50 ha に 1 箇所割合で土壌塩分濃度のモニタリングを定期的に行っており、一部の地区でこれらの結果を GIS 化して地図を作成している (図 3.1.4)。この地図により広域なスケールでの塩類集積状況を把握することができる。

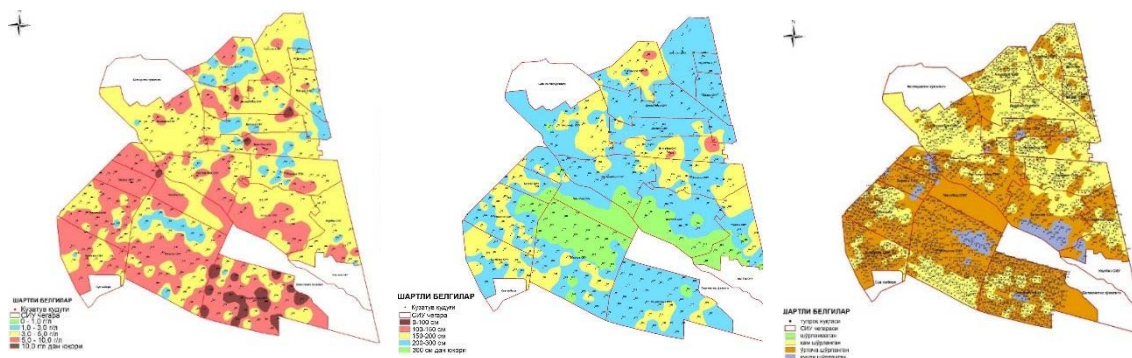


図 3.1.4 HGME が作成したミルザバット地区の GIS マップ

(左から地下水塩分濃度、地下水位、土壌塩分濃度、いずれも 2013 年 4 月の状況)

### 3.2 塩類集積の原因特定に必要な調査項目

上述したモニタリングによる土壌塩分濃度の測定結果を得た後、これらを整理して土壌塩分濃度の鉛直分布や水平分布の傾向を理解することができる。これらの結果は測定時の一時的な状態を表しているだけで、塩類集積原因の特定に至るには情報量が不足している。そのため、数ある塩類集積の原因の中からその地域に生じている土壌

塩類化の原因を特定するためには、一定期間のモニタリングを継続して行うこと、地域特有の気象、灌漑用水と地下水の水質、土壌などの基本情報を理解しておくことが重要である。ここでは、塩類集積の原因を特定するために理解しておく内容とそれらの概説、また個々の内容について事例を交えて紹介する。

## 1) 塩類土壌の分類

塩類土壌の分類については、第1章に記述しているので、それを参照すること。以下の囲みは、シルダリア州ミルザバット地区内の調査対象圃場における塩類土壌の分類結果を示したものである。

### シルダリア州ミルザバット地区内の調査対象圃場における塩類土壌の分類結果

アフメドフおよびヤンガバットの圃場から深さ 5~80 cm までの土壌を採取し、分析を行った結果、これらの圃場の塩類土壌は塩性土壌に分類された。土壌採取時期はアフメドフ 2014 年 5 月、2015 年 5 月である。

| WCA    | ECe (dS/m) | pHe     | SAR<br>(mmol <sub>c</sub> /L) | ESP (%) |
|--------|------------|---------|-------------------------------|---------|
| アフメドフ  | 2.1~10.6   | 8.0~8.3 | 0.3~3.1                       | 0.4~4.4 |
| ヤンガバット | 5.3~25.8   | 7.5~8.5 | 1.0~4.9                       | 1.4~6.7 |

## 2) 土壌断面調査

土壌断面調査は、土壌の肥沃性や集積塩類量などの生産力阻害要因を知り、土地利用方式や土壌管理対策などを明らかにすることを目的としている。同時に、土壌断面を詳しく観察することによって、土壌生成過程や土壌特性の把握が可能である。調査は視覚・聴覚・臭覚・味覚・触覚といった五感を十分に発揮して、土壌断面に刻印された土壌の生い立ちの歴史を観察と記録をすることが大切である。

乾燥地における土壌断面では、断面内に種々の形態的特徴を有する沈殿物を観察することができる。土壌中に見られる可溶性塩類の主体はナトリウム、マグネシウム、カルシウムの塩化物、硫酸塩および炭酸塩である。これらの塩類はその種類によって水に対する溶解性が異なる。

### 可溶性塩類の溶解度

塩化カルシウム(74.5) > 塩化マグネシウム(54.6) > 塩化ナトリウム(36.0) > 硫酸マグネシウム(35.1) > 炭酸ナトリウム(21.5) > 硫酸ナトリウム(19.5) > 硫酸カルシウム(0.255) > 炭酸カルシウム( $6.17 \times 10^{-4}$ )

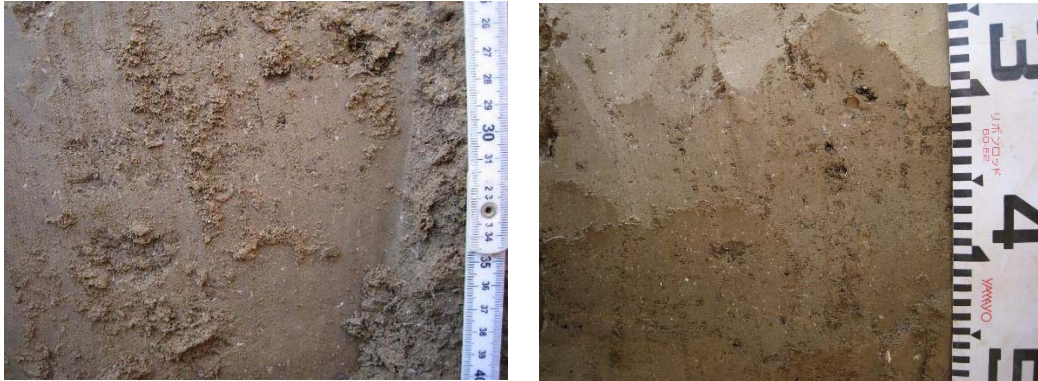
数値は 20℃において水 100 g に化合物の溶解度を g で表したもの。(出典：理科年表)

通常、水に溶けやすい塩ほど土層のより深い部位に集積している。溶解度の小さい炭酸カルシウムは表層土近くに固結した状態で存在する。炭酸カルシウムは通常、白色の粉体状の沈積または不定形で白色の塊状物となっており、希塩酸を滴下すると発泡するので簡単にその集積部位を確認できる。



### シルダリア州ミルザバット地区内の調査対象圃場における土壌断面調査結果

アフメドフおよびヤンガバットの圃場で土壌断面調査を行ったところ、地表面から深さ 30~40 cm にかけて炭酸カルシウムと見られる斑紋が観察された。

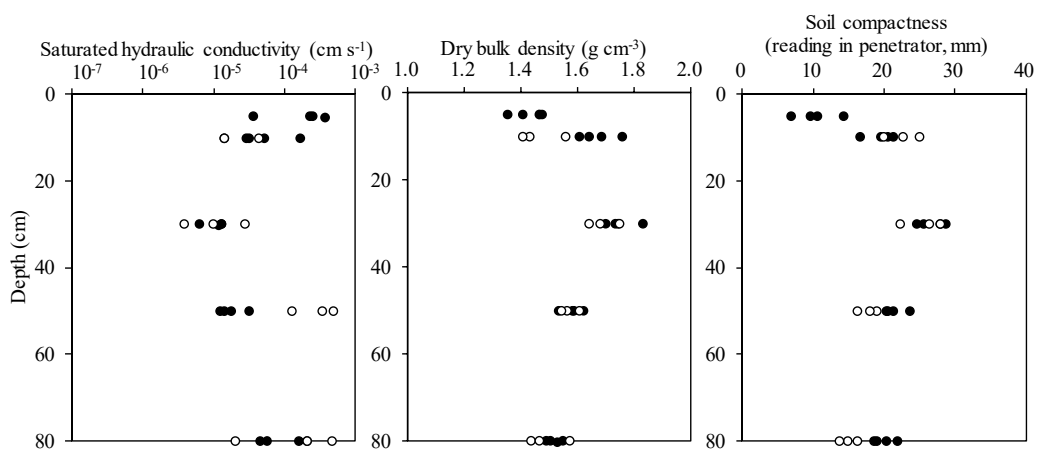


土壌断面調査の際に土壌硬度を測定することが望ましい。土壌硬度の測定値は、植物根の伸長の難易や透水性・通気性の程度、農業機械の走行性に影響を及ぼす地耐力（土壌の支持力）の判定などの参考となる。土壌硬度の測定には、山中式土壌硬度計や貫入式土壌硬度計がある。

また、土壌断面調査後、土壌試料を採取すると、室内分析によって土壌の理化学的性質を調べることが可能である。一般分析用の試料はポリエチレン袋に採取する。透水性など物理性の測定には 100 mL の金属製円筒に試料を採取する。一般分析用の試料は風乾後、粉碎し、ふるいを通過させた後、分析に供する。

### シルダリア州ミルザバット地区内の調査対象圃場における土壌物理性

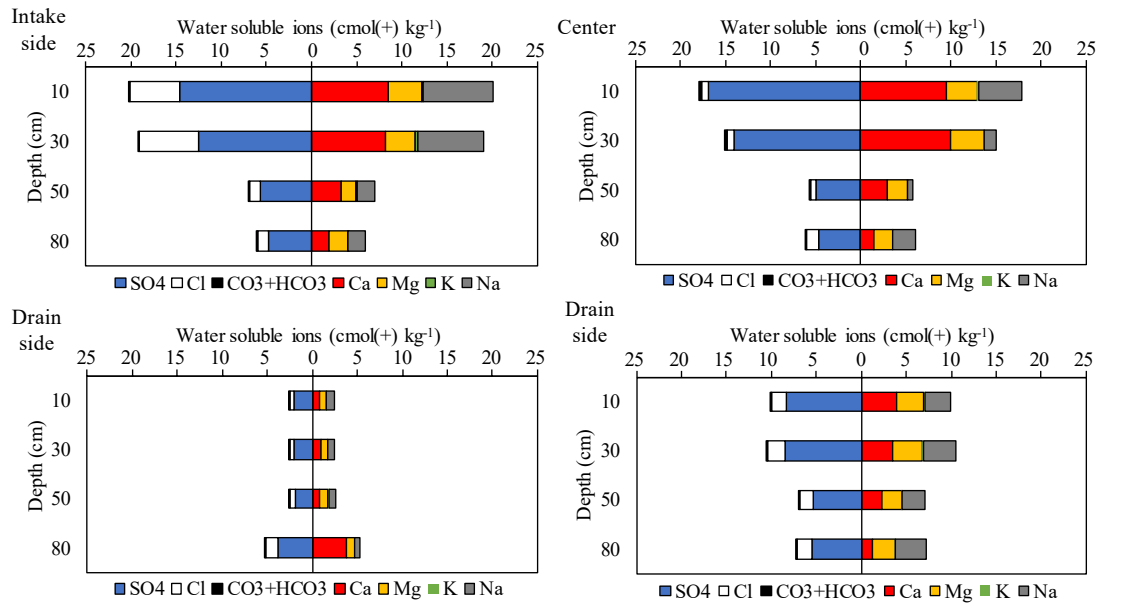
アフメドフおよびヤンガバットの圃場の深さ 80 cm までの飽和透水係数（変水位法）、乾燥密度、土壌硬度を測定した結果、30 cm 深の値が他層に比べて特異な値を示した。これは大型トラクタの踏圧により、作土層直下に硬い盤層が形成されていることを表している。土壌採取時期はアフメドフ 2014 年 5 月、2015 年 5 月である。



白色マーカーはアフメドフを、黒色マーカーはヤンガバットを示している。

### シルダリア州ミルザバット地区内の調査対象圃場における土壌化学性

アフメドフ圃場内の4地点において、深さ80 cmまでの水溶性イオン濃度(土水比1:5)を分析した結果、圃場内の塩分濃度分布は一様でなく、水口側から圃場中央部にかけて表層から深さ30 cm深までに塩類が集積していることがわかる。イオン種はCaとSO<sub>4</sub>の割合が高い。土壌採取時期は2014年5月下旬である。



### 3) 灌漑用水、地下水の水質

一般に、乾燥・半乾燥地では河川、地下水の塩分濃度やSARが高いこと多く、良質の水源を得ることは困難である。こうした水源を用いて灌漑することは、作物の塩害あるいは土壌劣化をもたらすことになる。灌漑用水の質はEC値とSAR値から判断される。これを整理したものがUSSL(1954)の「灌漑用水の水質ダイアグラム」(図3.2.1)、FAO(1985)の「灌漑用水の水質判定ガイドライン」(表3.2.1)である。

図3.3横軸のC<sub>1</sub>~C<sub>4</sub>はEC値による塩性を、縦軸のS<sub>1</sub>~S<sub>4</sub>はSAR値によるソーダ質度を表している。灌漑用水は16クラスにグループ化されるが、それぞれの危険性については、Appendix ●、あるいは、「Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils」のp.79~81を参照されたい。

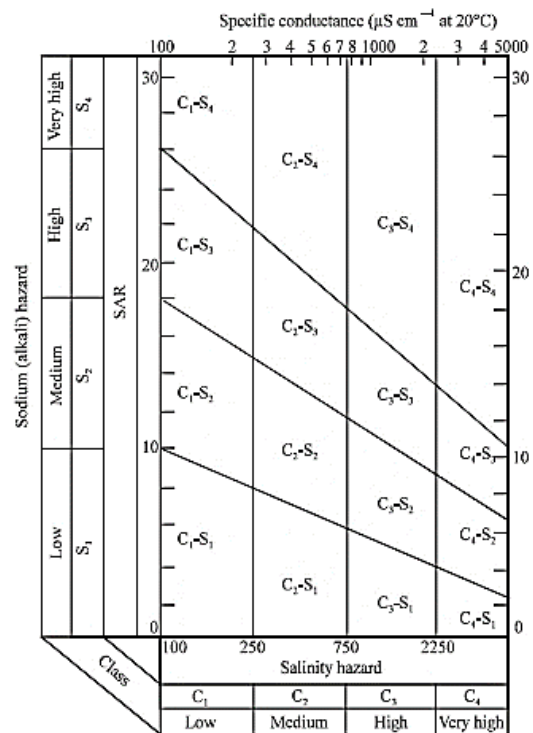


図 3.2.1 灌漑用水の水質ダイアグラム (USSL, 1954)

表 3.2.1 灌漑用水の水質判定ガイドライン

| Potential Irrigation Problem                                                                         | Units                         | Degree of Restriction on Use |                    |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------|--------|
|                                                                                                      |                               | None                         | Slight to Moderate | Severe |
| Salinity (affects crop water availability)                                                           |                               |                              |                    |        |
| ECw or                                                                                               | dS/m                          | < 3.0                        | 0.7- 3.0           | > 3.0  |
| TDS                                                                                                  | mg/L                          | < 450                        | 450 – 2000         | > 2000 |
| Infiltration (affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using ECW and SAR together) |                               |                              |                    |        |
| SAR                                                                                                  | = 0 – 3 and EC <sub>w</sub> = | > 0.7                        | 0.7- 0.2           | < 0.2  |
|                                                                                                      | = 3 – 6                       | > 1.2                        | 1.2- 0.3           | < 0.3  |
|                                                                                                      | = 6 – 12                      | > 1.9                        | 1.9- 0.5           | < 0.5  |
|                                                                                                      | = 12 – 20                     | > 2.9                        | 2.9- 1.3           | < 1.3  |
|                                                                                                      | = 20 – 40                     | > 5.0                        | 5.0- 2.9           | < 2.9  |
| Specific Ion Toxicity (affects sensitive crops)                                                      |                               |                              |                    |        |
| Sodium (Na)                                                                                          |                               |                              |                    |        |
| Surface irrigation                                                                                   | SAR                           | < 3                          | 3 – 9              | > 9    |
| Sprinkler irrigation                                                                                 | me/L                          | < 3                          | > 3                |        |
| Chloride (Cl)                                                                                        |                               |                              |                    |        |
| Surface irrigation                                                                                   | me/L                          | < 4                          | 4 - 10             | > 10   |
| Sprinkler irrigation                                                                                 | me/L                          | < 3                          | > 3                |        |
| Boron (B)                                                                                            | mg/L                          | < 0.7                        | 0.7 – 3.0          | > 3.0  |
| Miscellaneous Effects (affects susceptible crops)                                                    |                               |                              |                    |        |
| Nitrogen (NO <sub>3</sub> -N)                                                                        | mg/L                          | < 5                          | 5 – 30             | > 30   |
| Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> )                                                                      | me/L                          | < 1.5                        | 1.5 – 8.5          | > 8.5  |
| pH                                                                                                   |                               | Normal Range 6.5 – 8.4       |                    |        |

**シルダリア州ミルザバット地区の灌漑用水、排水路の水、地下水の評価結果**

ミルザバット地区の主要な灌漑水路（13 箇所）、排水路（19 箇所）、HGME 観測井（27 箇所）からそれぞれ水を採取し化学分析を行った。採水時期は 2013 年 6 月である。灌漑用水を USSL のダイアグラムで評価すると、C<sub>3</sub>-S<sub>1</sub> に分類され、塩性土壌になる危険性が高いと判断された。一方、観測井から採取した地下水の化学性は Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の占める割合が多く、場所によっては地下水上昇によりナトリウム塩を含むソーダ質土壌化への危険性が示唆される。

|                  | EC <sub>w</sub><br>(dS/m) | pH        | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SAR        |
|------------------|---------------------------|-----------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|
|                  | (mmol/L)                  |           |                  |                  |                 |                 |                               |                               |            |
| Irrigation water | 1.4 - 1.6                 | 8.1 - 8.5 | 5.7 - 7.9        | 4.8 - 6.8        | 3.8 - 5.5       | 2.1 - 3.1       | 10.6 - 14.8                   | 1.5 - 2.5                     | 1.6 - 2.1  |
| Drainage water   | 1.4 - 22                  | 7.6 - 8.8 | 8.1 - 30.5       | 5.5 - 76.3       | 4.2 - 207.9     | 2.5 - 168.3     | 13.6 - 161.7                  | 0.2 - 4.6                     | 1.6 - 28.4 |
| Ground water     | 1.7 - 63                  | 7.3 - 9.5 | 0.1 - 41.3       | 3.4 - 214.7      | 4.6 - 861.2     | 2.6 - 877.9     | 2.8 - 665.2                   | 0.7 - 45.3                    | 1.2 - 80.0 |

4) 地下水位の変動

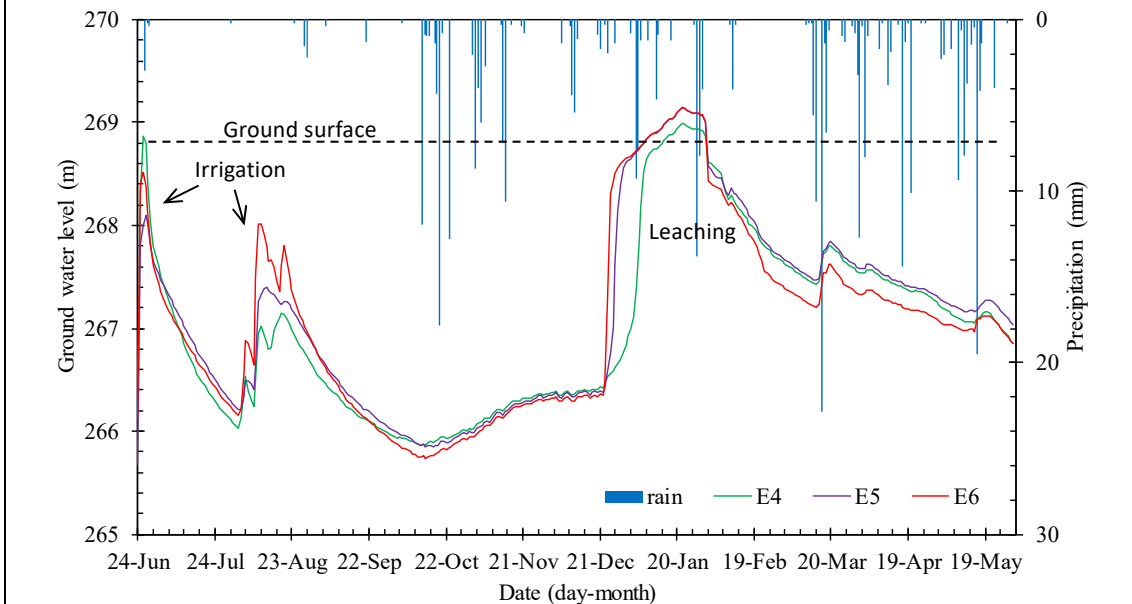
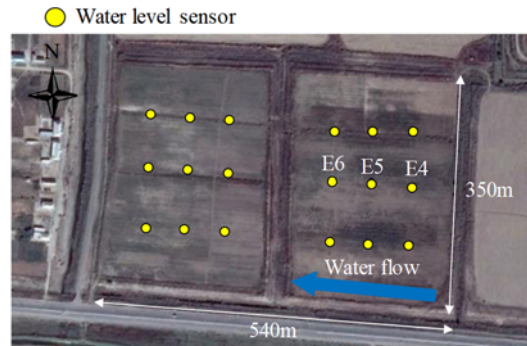
塩害は、地下水系に浸入する水の量が地下水系から排出される量よりも多い時に起こる。この地下水の入出のバランスの崩れにより、地下水面は上昇する。地下水面の上昇に従って、地下水は下層土の可溶性塩分を溶かし、毛管上昇により塩分濃度の高い水が根群域に到達してしまう。

地下水の流向が明確でない場合や季節変動がある場合には、地下水位を定期的に把

握し、灌漑やリーチングによる水供給イベントによって、地表面からどの深さまで上昇するのか理解しておく必要がある。

### ヤンガバット試験圃場の地下水位変化

試験圃場内の観測井に自記水位計 (U20-001-04, HOBO) を設置して地下水位観測を行った。観測期間は 2015 年 6 月～2016 年 5 月である。その結果、地下水位は灌漑とリーチングによって上昇した。灌漑時の地下水位上昇は一時的だが、リーチング時の地下水位は約 1 ヶ月程度地表面近くに停滞している。

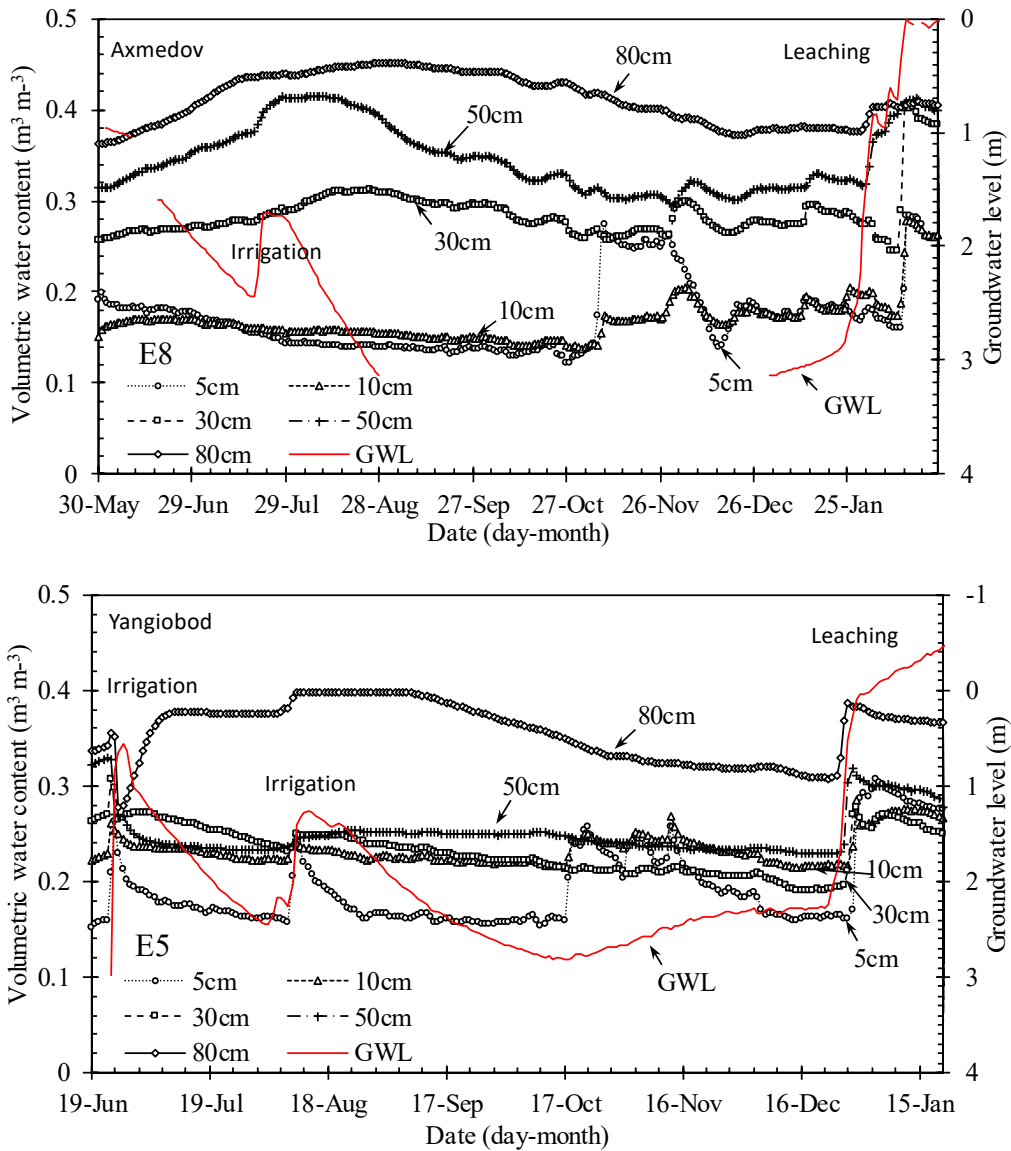


### 5) 土壌水分、土壌塩分の変動

地表に集積した塩類は、灌漑やリーチングが行われた場合、水の浸潤 (infiltration) により、水に溶出して、地中に向かって移動する。一方、塩類を含む地下水がある場合、地表面からの水の蒸発に伴う土中水の上昇移動により、塩類が地表に運ばれ集積する。この時の塩類の上昇移動は、水の移流 (convective transport) によるものが主役になる。水溶性塩類の移動は土中水の移動によって生じることから、土壌水分や土壌塩分の変動を観測することは塩類集積現象の理解に役立つ。

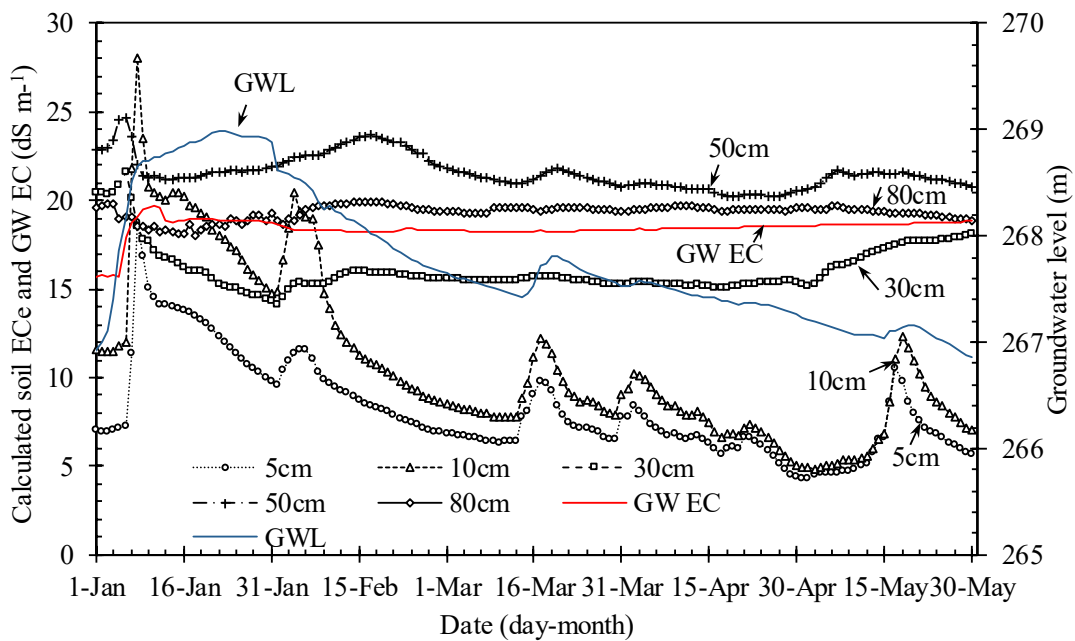
アフメドフおよびヤングバット試験圃場における土壌水分量変化

試験圃場内に 5TE センサー (Decagon) を設置して土壌水分量の観測を行った。観測期間はアフメドフ 2014 年 5 月～2015 年 2 月、ヤングバット 2015 年 1 月～2016 年 1 月である。圃場中央部における深さ 80 cm の土壌水分は、アフメドフおよびヤングバットとも地下水位が地表面から約 3 m 低下する 9 月から 10 月中旬の期間においても飽和体積含水率付近にあり、土壌水分は停滞し排水不良の傾向であった。



### ヤンガバット試験圃場におけるリーチング後の土壌塩分変化

試験圃場内に 5TE センサー (Decagon) を設置して土壌 EC の観測を行った。観測期間は 2016 年 1 月～2016 年 5 月である。2016 年 1 月 7 日にリーチングが行われ、地下水位は上昇し地表面は湛水された状態になっている。リーチングによって 5 cm、10 cm 深の土壌 EC は時間の経過に伴い低下するが、30 cm より深い層位の土壌 EC は地下水位が低下してもリーチング前の塩分濃度とほぼ同じで推移する。また、下層の土壌 EC 値は地下水 EC とほぼ同じである。



### 3.3 現地試験圃場における塩類集積原因

上述の調査および分析結果を踏まえ、現地試験圃場の塩類集積原因の特定を試みた。以下は、項目毎に調査および分析結果の要約である。

| 調査項目        | 調査・分析結果                                                                                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 塩類土壌の分類     | Ca、Mg 塩を含む塩性土壌に分類される。                                                                                                     |
| 土壌断面の特徴     | 深さ 30～40 cm に炭酸カルシウムの斑紋がある。この層位には硬盤層が形成されており、透水性が低い。<br>土壌内に含まれる塩の組成は、陽イオンは Mg<Na<Ca の順に高く、陰イオンは SO <sub>4</sub> が卓越している。 |
| 灌漑用水、地下水の特徴 | 塩性土壌になる危険性が高い灌漑用水が使用されている。地下水は Na、Cl、SO <sub>4</sub> イオンが卓越しており、ソーダ質土壌への危険性が示唆される。                                        |
| 地下水変動       | 冬季に行われるリーチングによってリーチング用水は約 1 ヶ月地表面近くに滞在している。                                                                               |
| 土壌水分・塩分の変動  | 下層土は恒常的に飽和に近い土壌水分を維持している。表層土の塩分濃度はリーチングにより洗脱され低下するが、下層土の塩分濃度は高い状態で推移する。                                                   |



土壌分析の結果から、Na 塩よりも Ca や Mg 塩による塩害とみなすことができた。また、灌漑用水および地下水のイオン組成と土壌内の水溶性イオン組成を踏まえると、土壌中に含まれる塩の由来は灌漑用水と地下水の両者と考えられる。

現地では、土壌中の塩類を下方へ押し下げる目的で冬季にリーチングが行われているが、硬盤層が不透水層としてリーチング用水の浸透に影響を与え、除塩効果を妨げている可能性がある。硬盤層上方では、リーチング用水や灌漑用水の供給によって硬盤部位で停滞水が一時的に生じる。硬盤層は 30 cm で浅いため停滞水からの毛管水が表層土にまで連結し、地表面での激しい蒸発散による吸引力で毛管水の上昇が起こるとともに、水溶性塩の表層土への移動集積が生じる。このうち最も溶解度の大きい Na 塩が表層に集積する。一方、硬盤層下方では、リーチング用水や灌漑用水の供給によって地下水位が 1 m 未満まで上昇する。その際、地下水に含まれる塩類は、気温上昇に伴い土壌水分とともに上方へ移動する。しかし、透水性の低い硬盤層の影響で蒸発が抑制されるため、溶解度の低い硫酸 Ca 塩 (20℃で 0.208 g/100g H<sub>2</sub>O) は硬盤層に残留し集積する。硫酸 Ca 塩の集積は硬盤層の透水性をより低下させると予想される。

図 3.3.1 は、上述の塩類集積メカニズムを踏まえ、その対策方法を示したものである。硬盤層を破砕することで作土層の塩類を効率的に溶脱除去し、排水路へ排出する対策が有効と考えられた。

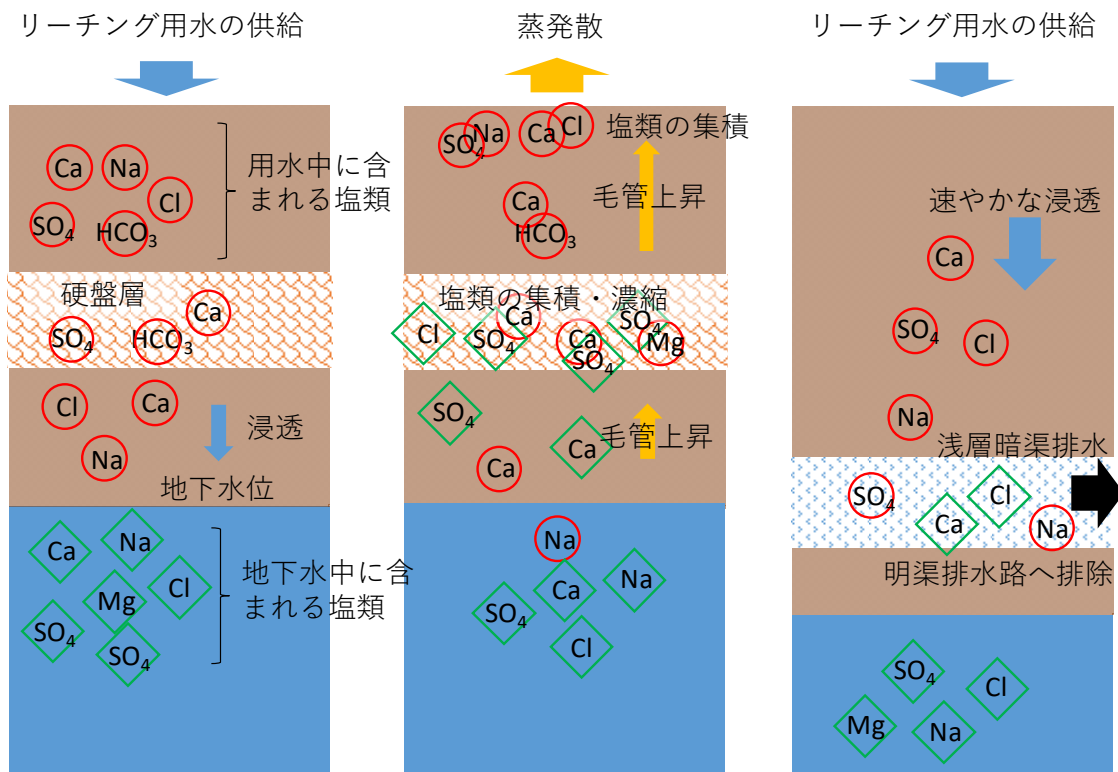


図 3.3.1 現地試験圃場の塩類集積メカニズムと対策による期待される改善効果

そこで、硬盤層がリーチング用水の浸透と除塩に及ぼす影響を把握するため、塩類集積圃場から硬盤層形成時と破碎時のそれぞれにカラム内に不攪乱土壌を採取し、室内で 300 mm 湛水した場合の TDS 溶脱量を測定した。その結果、硬盤層を破碎するとリーチング用水は速やかに下方浸透し除塩されるが、その効果は TDS 溶脱量で 35.4 % である。一方、硬盤層が形成していてもリーチング用水は浸透に 72 日間要してしまうが、硬盤層を破碎した場合とほぼ同じ浸透量になる。しかし、実際の圃場ではリーチング用水の浸透期間は長期間要さないこと、作土層下の塩類は溶脱されにくいことを踏まえると、リーチング用水は硬盤層より浅い層位までを除塩し水平方向へ流出、あるいは部分的に透水性の良い場所を選択して浸透していると考えられた。



## 第4章 浅層暗渠排水による灌漑農地の塩類集積対策

### 4.1 本マニュアルにおける浅層暗渠排水の位置づけ

#### 1) 目的

塩類集積対策において、排水システムは地下水位を下げることにより、リーチング時に塩類の下方浸透を促進させること、作物栽培期に作土層に塩類集積を発生させないことが期待されている。この地下水位を下げるために排水路（コレクター）、垂直排水、深さ 2.5～3.0 m 前後の深い暗渠排水が建設・運用されている。これらの対策が機能を果たしている圃場では、リーチング後、塩分を含んだ浸透水が排水路に流出し、地下水の毛管上昇が抑制され土壌表層への塩類集積が軽減される。しかし、以下のような理由により塩類集積の軽減ができなくなっている圃場がある。

- 排水路内の法崩れや土砂の堆積、雑草の繁茂等による排水路水位の上昇
- 垂直排水の稼働率の低下による地下水位の上昇
- 暗渠排水の流出率の低下に伴う地下水位の上昇
- 過剰な灌漑やリーチングなどの水の投入に伴う地下水位の上昇
- 硬盤層などによる土壌の透水性の低下に伴う除塩効果の低下

本マニュアルで取り上げる浅層暗渠排水は、塩類集積リスクが高い状態の圃場条件下において、浅層地下水\*に焦点を絞り、土壌の比較的浅い層（地表面下 60～90cm）の排水性を改善し、リーチング後の浸透水に含まれる塩類を確実に排水路へ除去することを目的とする。

\*浅層地下水とは、不圧地下水、つまり地表下浅い所にあり、自由に変化することのできる地下水面を持ち、圧力がかかっていない地下水のことを意味する。

#### 2) 浅層暗渠排水の特徴

浅層暗渠排水は、深さ 2.5～3.0 m 前後に設置される暗渠排水と比較して、排水路内の水位が上昇した場合においても、浸透水を確実に圃場外へ排水させることができる。

浅層暗渠排水には、本暗渠として有孔管（最小径 50 mm）が使用されることが多いが、排水機能を確保するには設置密度が高くなり、単位長さ当たりでは小規模な土工であっても、単位面積当たりでは工事費が増加する。

本マニュアルでは、この工事費の増高を解消するため、有孔管の設置密度を低く抑えることを可能とする通水性の高い補助暗渠を活用する暗渠排水技術を扱う。

補助暗渠として代表的なものには、弾丸暗渠（地表面下 40 cm 付近に径 6～10 cm 程度で穿孔）、疎水材埋設暗渠（掘削後モミガラなどを埋設）、心土破碎がある。本暗渠との組み合わせでは施工が容易な弾丸暗渠が多く用いられているが、水みちの耐久性が劣る。近年、弾丸暗渠よりも構造的に安定した空洞を形成できる穿孔暗渠機が開発されている（以下、機械本体を穿孔機、穿孔機で施工された暗渠をカットドレーンと

いう)。本マニュアルではこのカットドレーンを補助暗渠として活用する。カットドレーンは、有孔管と同程度の通水機能を期待でき、有孔管の機能を部分的に代替すると考えることもできるが、ここでは本暗渠に接続する補助暗渠として扱う。

深い暗渠排水、従来型の浅層暗渠排水、カットドレーンを活用した暗渠排水について、それぞれの設計の考え方を図 4.1.1 に示す。

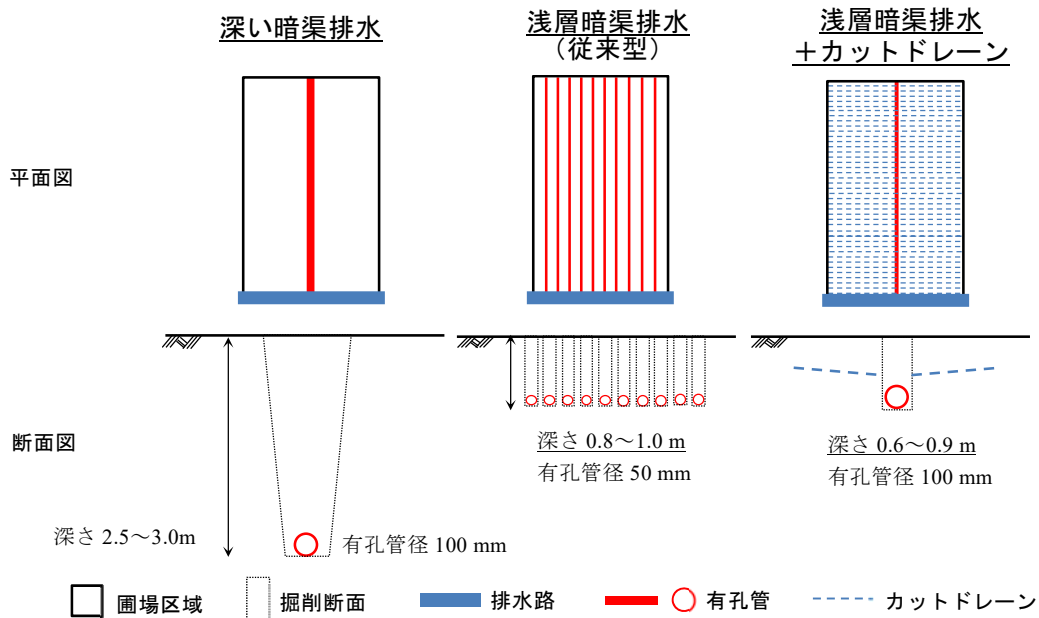


図 4.1.1 暗渠排水の設計内容の違い

カットドレーンは日本で開発された低コスト化を可能とする浅層暗渠排水技術である (図 4.1.2)。カットドレーンは、農家がトラクタに装着し牽引するだけで迅速・簡単に施工でき、無資材で本暗渠と同じ通水性を有した暗渠を形成することができ、排水性が良好な農地を造成することができる (Kitagawa, et al. 2010)<sup>1)</sup>、(Okuda, et al. 2015)<sup>2)</sup>。カットドレーンが日本で開発された背景、日本での施工方法は、それぞれ Appendix 1、2 を参照のこと。



図 4.1.2 機械本体とカットドレーン

## 4.2 浅層暗渠排水の構造

### 1) 浅層暗渠排水の組織

浅層暗渠排水の基本組織は、本暗渠（吸水渠：吸水管および疎水材）、集水渠（無孔管）、補助暗渠、排水口、水閘、立ち上り管で構成される（図4.2.1）。圃場の地形・排水条件を検討し、排水が迅速に行われ、維持管理が容易となるように、各構成内容の必要性を検討する。補助暗渠は圃場全体に配置され、吸水渠に接続される。補助暗渠で受けたリーチング後の浸透水は吸水渠に流れ込み、集水渠を経て、排水路に排出する。

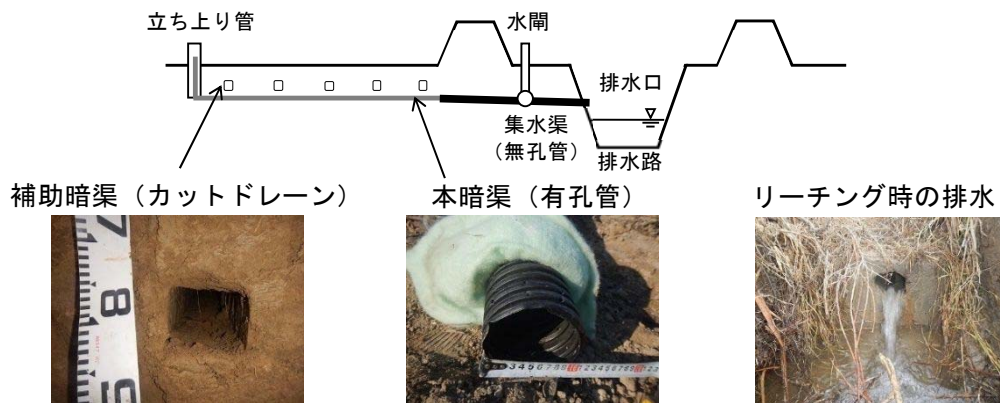


図 4.2.1 浅層暗渠排水の構造

### 2) 計画暗渠排水量

浅層暗渠排水計画に際し、リーチング時の計画暗渠排水量を決定する必要がある。計画暗渠排水量は暗渠排水に依存すべき過剰水を計画排水時間で排除するのに必要な暗渠排水量と定義される（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。リーチング水は、湛水後、表層の土壤内に残存するもの、周辺排水路に流出するもの、地下水面に到達するもの、暗渠排水を通じて流出するもの、蒸発するものに区別される。本マニュアルの計画暗渠排水量は、浅層暗渠排水を通じて流出する1日当たりの水量を示し、カットドレーンの施工間隔、有孔管や集水管の径を決定する際の基準となる。

計画暗渠排水量は、畑の場合、10～50 mm/d が標準的な値とされているが、類似地の資料等を参考に計画地区の特徴、経済性等を考慮して決定する。

### 3) 浅層暗渠排水の構造物

#### a. 本暗渠（吸水渠）

本暗渠は、地下水やリーチング後の圃場内の浸透水を集水渠または排水路へ導く施設であり、孔が開けられた吸水管、被覆材、疎水材で構成される。吸水管は、集められた地下水や浸透水を管内部に吸収し、圃場外へ排出する役割を有している。被覆材は吸水管を直接覆う透水性の材料で吸水管への流入水に対してフィルター的作用を果たす。また、

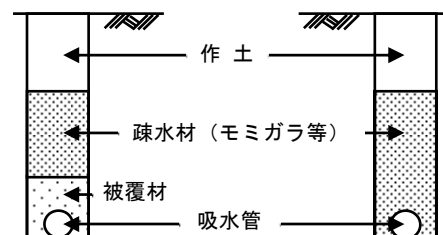


図 4.2.2 本暗渠の断面図

吸水部分を大きくして吸水性の持続を図るものである。疎水材は被覆材の上部にあって、圃場から流入してきた水を集めて吸水管へ導く役割と一つの大きな水みちとして浸透水の流れを確保する役目がある。被覆材と疎水材は、しばしば同一の材料が用いられ、区別せず総称して疎水材という（図 4.2.2）（The Agricultural Upland Development Association 1989）<sup>4)</sup>。

本暗渠は、土性や土壌の透水性などを考慮して、吸水管または疎水材のみが単独で施工される場合もある（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。吸水管を入れない場合は、竹、そだ、砕石などの材料により通水性を確保する。

#### b. 集水渠

吸水渠の下流端と接続し、補助暗渠および吸水渠から集められた浸透水を排水路に排出させる管である。集水渠は圃場表層からの水を直接受けるものではないので有孔管とする必要はない。

#### c. 補助暗渠

補助暗渠はリーチング水や降雨などによる表層水の浸透水を吸水渠まで運ぶ水みち機能を持たせるために設置する。補助暗渠は集められた浸透水を本暗渠に導くため本暗渠の疎水材と接続させる。

カットドレーンの延長は、地形勾配、本暗渠の深さに制約を受け、施工深度の調整範囲から平坦地で概ね 200 m までと考えられている（Kitagawa et al. 2010）<sup>1)</sup>。穿孔部の延長が長くなれば、本暗渠 1 本当たりの集水面積が拡大できる。ただし、カットドレーンは選択流が発生し、空洞部が崩落することがある。施工時には選択流を抑制する対策を行って建設するのが望ましい（4.3 3）および 4.4 参照）。

#### d. 排水口および水閘

排水口は、排水路内に設置される暗渠システム下流端の出口である。リーチング時に排水量を調節する必要がある場合は、水閘を設ける。排水口および水閘は、排水路の浚渫作業時、建設機械などにより破損されないようオペレーターが設置位置を認識できるようにしておく。水閘は以下のように豎管式水閘と水栓式水閘に分けられる（図 4.2.3）（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。

##### ● 豎管式水閘

吸水管又は集水管に地表面から垂直に下した管内の開閉装置により暗渠の開閉を行い、排水量を調節する。水閘は家畜等により破損されないようにコンクリート管などで保護する。

##### ● 水栓式水閘

吸水管又は集水管の排水路内の

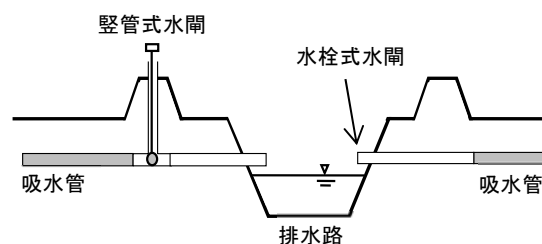


図 4.2.3 水閘

出口（排水口）に蓋を設置し、その開閉操作によって排水量を調節する。

e. 本暗渠の立ち上がり管

吸水渠は施工後には地表面から見えなくなる。吸水管の上流部にコンクリート製のマンホールを設置し、吸水渠と接続しておく。位置の特定ができ、管の堆砂など排水機能が損なわれた場合、管内の清掃管理ができる（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。

#### 4) 排水方式

暗渠排水の排水方式は、吸水渠を直接排水路に接続する直接排水方式と複数の吸水渠をまとめて排水路に接続する集水渠排水方式の2つに分けられる（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。

a. 直接排水方式

吸水渠の末端排水口を直接、排水路に接続し、排水する方式である（図 4.2.4）。堤高のある規模の大きな支線排水路等に接続する場合、掘削・埋戻しの土工量が多くなる。このため排水口の数が多き場合は、小規模な圃場内排水路を建設し、そこに排水口を接続し、この圃場内排水路を圃場外の排水路に合流させる。圃場内排水路の建設に当たっては、営農に支障を及ぼさない位置を検討する。

カットドレンについては、直接排水方式とすることも可能であるが、多量の流出がある場合、排水口付近が洗掘崩落するリスクがある。また、崩落が少ない重粘土等の土壌条件であっても、排水口付近は土壌が乾燥して亀裂が発達し、空洞が崩落しやすくなる。やむを得ずカットドレンを直接排水方式とする場合には、排水口に合成樹脂管を2 m程度挿入するなど、土塊の崩落による閉塞の防止対策を行う（Kitagawa et al. 2010）<sup>1)</sup>。

b. 集水渠排水方式

複数の吸水渠を集水渠に接続し、集水渠末端で排水路へ排水する方式である（図 4.2.5）。排水口が少なく、管理が容易である。新たに圃場内に排水路を建設する必要がなく、営農作業の面では有利である。

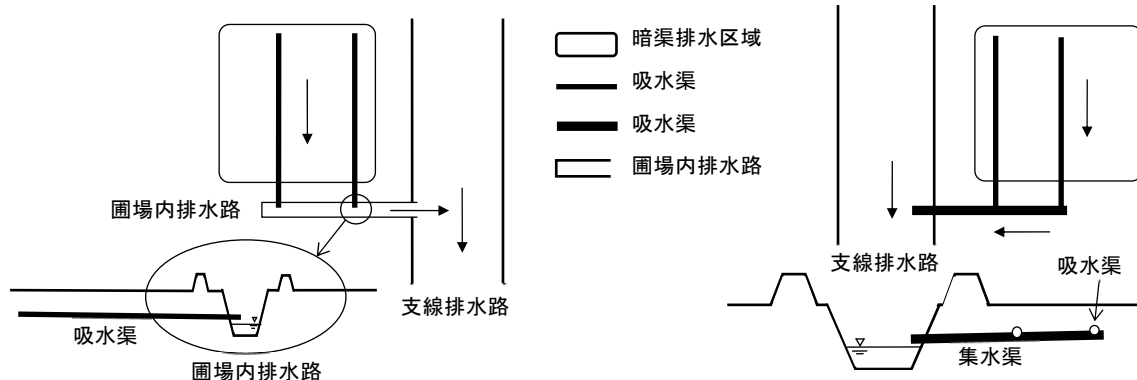


図 4.2.4 直接排水方式

図 4.2.5 集水渠排水方式

## 5) 本暗渠と補助暗渠の配置

本暗渠と補助暗渠の配置は、主に圃場の勾配状態を考慮して決定する。本暗渠と補助暗渠の交差タイプには以下のような直交型、ヘリンボン型がある（図 4.2.6）（S.K. Gupta 2013）<sup>5)</sup>。

### a. 直交型

直交型は、本暗渠に対して補助暗渠が直角に接続するタイプである。均平化された圃場、起伏がなく一様な勾配を有した圃場で採用する。カットドレーンは地表面より一定の深さで施工されるため、水の流れが本暗渠に向かうように勾配に沿って配置する。

### b. ヘリンボン型

ヘリンボン型は、圃場の勾配状況に合わせて、本暗渠に対して斜めに接続するタイプである。直交型では補助暗渠の施工深さが逆勾配になってしまうような場合に採用する。

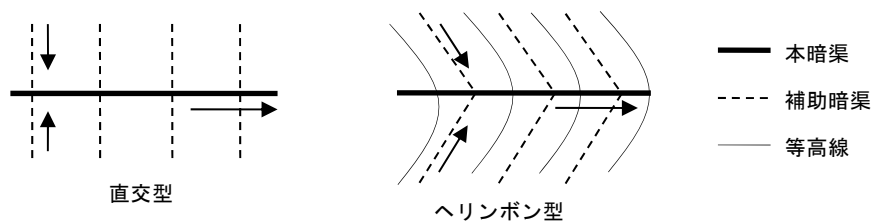


図 4.2.6 暗渠排水組織網図

## 4.3 浅層暗渠排水の設計施工

浅層暗渠排水の導入に当たっては、浸透水を適切に排水する機能を果たすように、圃場の状況調査および測量を行い、排水網の配置を計画設計する。浅層暗渠排水は、開水路と違い、管が埋設されているため、水の流れに支障が生じた場合、その位置が分かりにくくなる。工事の実施に際しては、設計どおりの勾配となるよう掘削溝の標高管理を徹底し、管の接合・破損に留意する。また、吸水渠の埋設深さが浅い箇所では穿孔機により管を切断することのないよう切断刃の施工深さ管理が必要である。

以下に浅層暗渠排水の構成要素別に設計施工上の留意点を示す。

### 1) 本暗渠（吸水渠）

#### a. 材料

吸水渠は、浸透、流入した水を確実に流下させるため、使用する有孔管は必要な断面、強度、耐久性、吸水機能を有し、施工性が良く経済的なものを選定しなければならない（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。有孔管は内部に土砂が入り込むのを防止するため不織布やネットなどを巻いたものを使用する。

#### b. 管の設置深さ

管の深さは、カットドレーン（深さ 0.6～0.9 m 程度）との接続を考慮し、地表面下 0.8～1.0 m とする。管の敷設は、上流から下流に向かい勾配をもたせ、不陸や中だるみが生じないように施工する。管が接続される排水口の高さは、原則として排水路の水面下に潜らない位置とする。排水路の水位は冬季のリーチング時に上昇することから、過去の水位の痕跡を確認し、排水口の高さを決定する。

#### c. 管の勾配と径

排水口を排水路断面内の深い位置にした場合、管の水路勾配を大きくし、流下能力を増大させ、管径の設計値を小さくできることがメリットとなる。デメリットは、下流側の掘削量が増大すること、上流側の管設置高が浅くカットドレーンとの接続が厳しくなること、穿孔機による管の切断リスクが挙げられる。一方、緩勾配にした場合、管の水路勾配による流下能力が計画暗渠排水量より小さくなることもある。管の流下能力が過度に小さく、満流状態が長く続く場合は、管径を大きくする必要がある。管径は工事費に大きく影響する。よって、満流状態が想定される期間、管の圧力勾配、経済性を総合的に検討して、最適な管径を決定する。

管の流下能力は、リーチング時の計画暗渠排水量、リーチングの実施面積、管の敷設勾配および管内の粗度係数からマンニング式によって算定する。

#### 計算事例

流速  $v$  (m/s) は以下のマンニング式で計算される。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

ここで、 $n$  : 管の粗度係数、 $R$  (m) : 径深（流水の断面積/潤辺）、 $I$  : 勾配を示す。吸水管をコルゲート管（径 100 mm、粗度係数  $n=0.016$ ）、勾配  $I=1/800$  として計画すると、80%水深の場合、断面積=0.0067 m<sup>2</sup>、潤辺=0.22 m より

$$v = (1/0.016) \times (0.0067/0.22)^{2/3} \times (1/800)^{1/2} = 0.22 \text{ m/s}$$

よって、流下能力は  $Q = 0.0067 \times 0.22 = 0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$  (1.5 L/s) と算定される。

計画暗渠排水量を 12 mm/d、集水面積を 1.0 ha と仮定すると、暗渠の排水量  $q$  は  $120 \text{ m}^3/\text{d}=1.38 \text{ L/s}$  と計算される。

$Q > q$  であり、計画暗渠排水量は管径の 80%水深で流下する。

## 2) 本暗渠設置までの工程

本暗渠の施工の作業工程を図 4.3.1 に示す。

#### a. 渠線の設定

浅層暗渠排水網の設計内容に沿って、排水口、集水渠、吸水渠の位置を確定する。吸水管・集水管の敷設前に、渠線上に少なくとも 20 m 間隔で測点を設置し、埋設深を管理する。



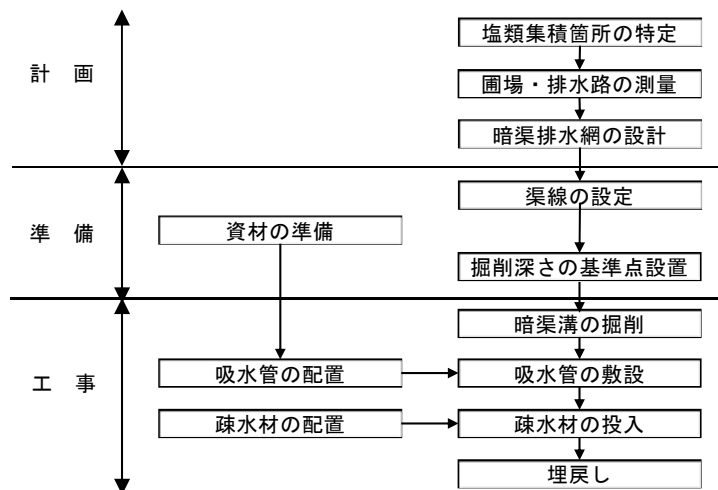


図 4.3.1 本暗渠の建設フロー

#### b. 溝の掘削

掘削は、人力による場合、機械による場合、両者を組み合わせる場合に分けられる。掘削量は、掘削の幅、深さ、延長に比例する。掘削費用や疎水材の投入量を考慮すると、掘削の幅はできる限り狭くする。

掘削の延長が長い場合は、機械施工が人力施工よりも有利である。掘削機械はバケットを装着した掘削機、または溝掘り専用機（トレンチャー）等が用いられる。掘削機械のバケット幅はできるだけ小さいものを準備する。

施工時に溝の底に水が入り込むと、施工性が著しく低下する。水が溝の内部に流入しないように地下水面が掘削底よりも低くなる時期、降雨や降雪の少ない時期に施工する。降雨等により水が入り込む可能性も考慮し、水処理が可能なように下流から上流に向かって掘削するのが望ましい。

溝の掘削は、逆勾配や極端な凹凸部が生じないように施工時に掘削深さを管理する必要がある。特に、バケット掘削の場合は、凹凸が生じやすいので、あらかじめ各測量点で計画掘削深を準備し、掘削直後に深さを確認し、掘削深を管理する。機械掘削後、人力により計画掘削深となるよう床均しを行う。この人力作業は、少なくとも掘削幅 40 cm 程度が必要となる。床均し作業時には、溝の側面に計画掘削深の基準となる水系を張るなどして、施工管理を行う。水系は軽くて丈夫なものとし、中央部にたるみが生じないように少なくとも 10 m 以内に 1 カ所以上で固定する。

#### c. 管の敷設

溝の掘削深を確認後、管を敷設する。敷設時、溝底への土砂の崩落により管が土砂に乗り上げた状態とならないように留意する。管の接合部はズレや漏水が発生しないように緊密に接続する。

#### d. 疎水材の投入

疎水材の材料として、モミガラ、碎石（砂利）、木材チップなどが使われる（MAFF 2000）<sup>3)</sup>。疎水材は、補助暗渠が直接接続できる厚さまで投入する。沈下を考慮し、疎水材の投入量を多くして、踏み固めを行う。掘削溝の壁面の崩落などで掘削断面が大きくなると、投入量に影響するので、管敷設後、速やかに投入する。

#### e. 埋戻し

疎水材の投入後、残された溝部を掘削土で埋戻す。埋め戻す土砂で管を破損することのないように、管上部は人力で丁寧に行う。また、埋戻し後の沈下を考慮し、表層の盛土は高めにする。

### 3) 集水渠

集水渠の敷設は、吸水渠と同様に掘削時に底高の管理を行い、勾配を確保する。吸水渠と集水渠の接続部分は、分岐管を用いるのが望ましい。接続部は、抜けや漏水が生じないような堅密な構造とする。吸水渠が集水渠を挟んで両側にある場合は、接続部分に流水が集中しないように合流点をずらした配置とする（JIID 1993）<sup>6)</sup>。末端の排水口は、家畜や掘削機械の作業などにより破損することが多いため、コンクリートや鉄製の部材で保護するのが望ましい。

### 4) 補助暗渠（カットドレーン）

#### a. カットドレーンの施工

カットドレーンは、地表面下 60～90 cm の深さに空洞部（10cm×10cm）を形成する。起伏が多い圃場では空洞部の勾配を一定に管理することができないため、均平化した圃場での施工が望ましい。あらかじめ圃場の標高を把握し、起伏の影響をできるだけ避け、空洞部が吸水渠に向かう勾配となるように施工しなければならない。圃場では慣行の灌漑用の畝間勾配を有した状態で施工されており、カットドレーンも畝間と同一の方向で施工することにより空洞部の勾配を確保することができる。なお、カットドレーンでは、流速が大きくなると、空洞内部が浸食されるリスクが生じる。このため急勾配での施工は避けなければならない。施工勾配は、1/500～1/1000 程度が望ましい。

カットドレーンの施工間隔は、計画暗渠排水量、現場透水係数、作土層の厚さによって算出する。計画暗渠排水量  $D$  : 10～50 mm/d、現場透水係数  $K_s$  :  $10^{-4}$ ～ $10^{-5}$  cm/s、作

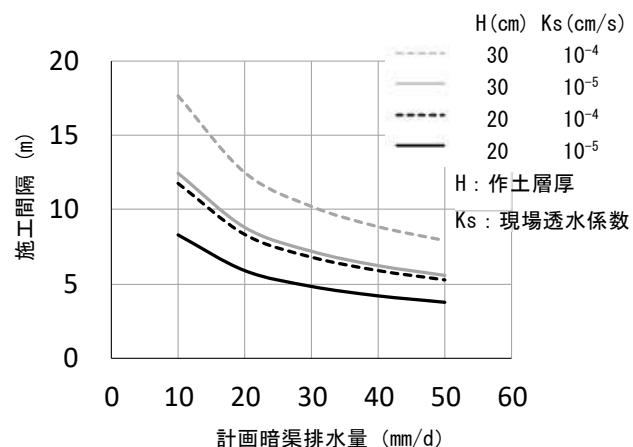


図 4.3.2 カットドレーンの施工間隔

土層の厚さ H : 20~30 cm の範囲を想定すると、施工間隔は 4~18 m 程度の範囲になる (図 4.3.2)。

カットドレーン空洞部の流下能力は勾配によって違ってくる。参考に、水深 30%、50%、70%の時の勾配 (1/500~1/1000) と流量の関係を図 4.3.3 に示す。

カットドレーンの施工のタイミングは、吸水渠の施工時の掘削機械の踏圧による影響を避けるため吸水渠の施工後が望ましいが、切断刃により吸水管を破損することのないように穿孔深さに留意する必要がある。

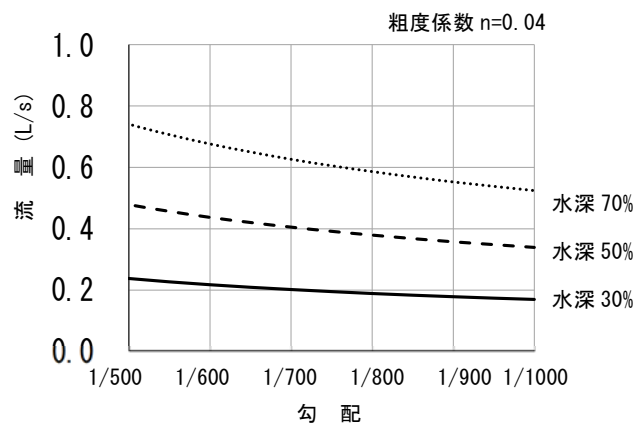


図 4.3.3 カットドレーンの勾配と流量

#### カットドレーンの施工間隔と排水量の計算事例

暗渠間隔は以下の式で計算される (MAFF 2000)<sup>3)</sup>。

$$S=2H \sqrt{\frac{k}{D} \times 86.4} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、S : 吸水渠の間隔 (m)、H : 作土層の厚さ (cm)、k : 吸水渠間隔決定のための透水係数 (cm/s)、D : 計画暗渠排水量 (mm/d)、定数 86.4 は単位換算係数である。

透水係数 (k) は、測定した作土層の現場透水係数 (ks) を補正し求める。

$$k=\alpha \cdot ks \quad \text{式 (2)}$$

ここで、 $\alpha$  は現場透水係数に対する補正係数で現場透水係数のオーダーごとの概数値が表 4.3.1 のように与えられている。

表 4.3.1 補正係数 ( $\alpha$ ) の概数値

| ks のオーダー       | $\alpha$ の概数値 |
|----------------|---------------|
| $10^{-3}$ cm/s | 50            |
| $10^{-4}$      | 100           |
| $10^{-5}$      | 500           |
| $10^{-6}$      | 1,000         |

今、計画暗渠排水量 D : 12 mm/d、作土層厚 H : 20 cm、現場透水係数 ks のオーダーを  $10^{-5}$  cm/s とした場合、吸水渠間隔決定のための透水係数 k :  $5 \times 10^{-3}$  cm/s、暗渠間隔  $S=2 \times 20 \times (5 \times 10^{-3} / 12 \times 86.4)^{1/2} = 8$  m が導かれる。

カットドレーンの施工延長 100 m、間隔 : 8 m、勾配 1/1000、30%水深 (3cm)、粗度係数 n=0.04 とした場合、マニング式より流速  $v=0.06$  m/s となり、流量  $Q=0.17$  L/s と計算される。

計画暗渠排水量 12 mm/d の場合、排水面積 A=施工延長 100 m×間隔 8 m=800 m<sup>2</sup> であり、

排水量は  $q=0.012 \times 800 / 86400 = 0.00011$  m<sup>3</sup>/s (0.11 L/s) と計算される。

Q>q となり、カットドレーンの空洞部は計画暗渠排水量を水深 3cm で流下させる能力を有している。

#### b. カットドレーンの構造および穿孔方法

カットドレーンの特徴は、独創的な穿孔方法にある。カットドレーンは、まず、農地に 2 本の刃（前刃①と後刃②）を挿入して長方形の土塊を 10 cm 持ち上げ、溝の直下に隙間を作る。次に、隙間の横からサイドカッター③で 10 cm 角の土塊を隙間内に寄せ、溝の下の横側に暗渠となる四角形の通水空洞④を形成する（図 4.3.4、5）。カットドレーンは、機械ユニットである穿孔機をトラクタに装着し、走行させることでこれまでより深い位置に通水空洞を形成するものである。農家にとっては、営農技術として対応できる簡単な技術である。

カットドレーンの穿孔方法は、地表からの挿入穿孔と排水路内からの穿孔の二つがある（図 4.3.6）。前者では、カットドレーンの穿孔を上流側、下流側の両方向から開始できる。吸水渠に接続する補助暗渠はこの穿孔方法となる。後者は排水路側からのみの穿孔となり、カットドレーンを直接排水方式とする場合に利用される（Okuda et al. 2015）<sup>2)</sup>。

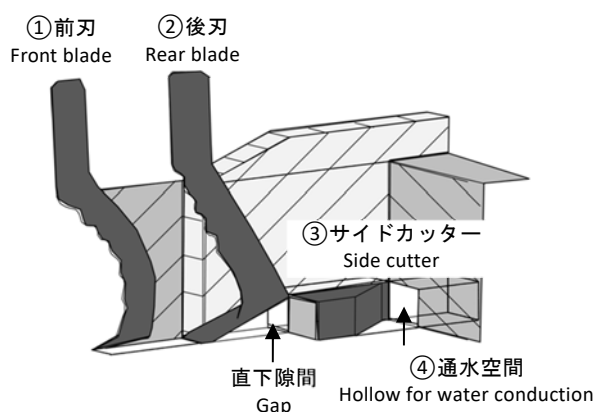


図 4.3.4 カットドレーンの施工方法（切断刃の役割）

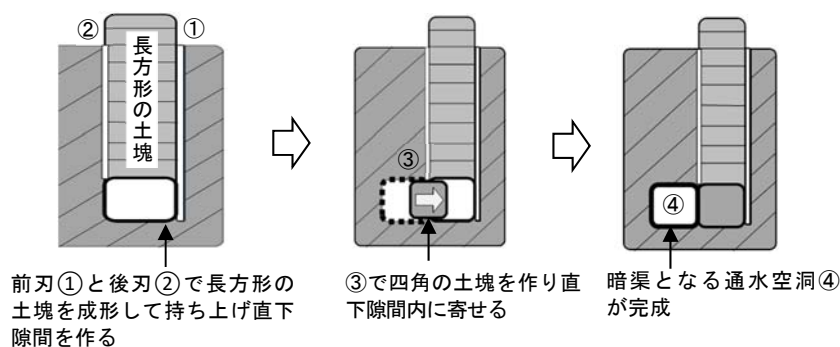
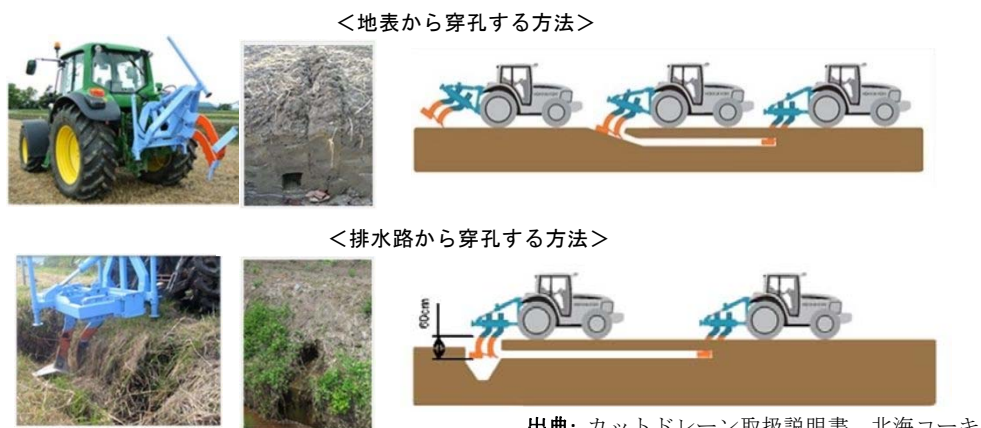


図 4.3.5 カットドレーンの施工までの土塊の動き



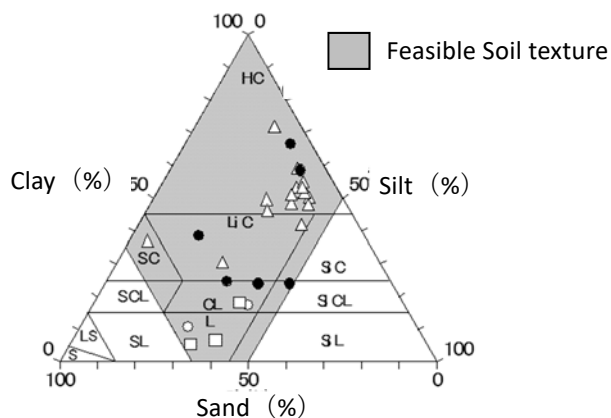
出典: カットドレーン取扱説明書、北海コーキ

図 4.3.6 カットドレーンの穿孔方法

c. カットドレーン活用上の留意点

● 適用土性

カットドレーンは管を用いないため、施工時の空洞の成形性や空洞内の流水による土壌の崩落などを考慮しなければならない。日本におけるカットドレーンの適用性は、粘土や泥炭土などの土壌で高い（図 4.3.7）。一方、砂やシルト分の多い S、LS、SC、SCL、SL、SiC、SiCL、SiL（国際法による土性区分）の土壌では使用できず、L（同）では耐用期間が短く数年ごとの再施工が必要とされている（Kitagawa et al. 2010）<sup>1)</sup>。



● : Low-lying land soil   ○ : Low-lying soil with less durability   □ : Feasible volcanic soil   △ : Feasible plateau land soil

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

図 4.3.7 カットドレーンに適する土性

● 施工深さ

穿孔機の切断刃の上部には、切断刃の位置を固定するための孔が開けられている（図 4.3.8）。孔は全部で 4 カ所ある。最下方の孔は、浅い穿孔にも使用できるが、通常は穿孔機を移動する際に切断刃が地面に接しないように高く持ち上げた状態で固定するためのものである（図 4.3.9）。残りの 3 つの孔で土中に入る切断刃の長さを 60 cm ~ 120 cm 程度に調節する。切断刃全体の挿入部分が深くなると、牽引抵抗が大きくな

り、切断刃に変形が生じる可能性がある。このため通常は、上より3番目の孔を利用するのが望ましい(図4.3.10)。3番目の孔に固定した場合であっても地表面下60~90cm程度に空洞形成が可能である。

● 穿孔機の浮き上がり

カットドレーンの施工は適度な土壌水分条件下において、牽引が可能となる(図4.3.11)。しかし、乾季においては、表層付近の土壌水分がきわめて少なく、塑性を有していない。そのため、切断刃を土壌に接触させても土壌が変形せず、切断刃を土壌中に挿入できなくなることがある(図4.3.12)。この場合、上昇抑制板付きサイドカッターの利用とベースフレーム部に100~120kg程度荷重を加えるなど、穿孔機の浮き上がり防止対策を行う必要がある(図4.2.13~14)。



図 4.3.8 穿孔機の切断刃



図 4.3.9 移動時の据え付け状態



図 4.3.10 施工時の据え付け状態



図 4.3.11 適度な水分状態での牽引



図 4.3.12 穿孔機の浮き上がり





上昇抑制板部分



フレームの矢印部分に荷重

図 4.3.13 上昇抑制板付きサイドカッター 図 4.3.14 荷重が必要な施工

#### ● トラクタ車輪の空転

切断刃を土中に挿入できても、土壌が固く締まっている場合、トラクタが穿孔機を牽引できず、車輪が空転する場合があります。また、車輪が走行する土壌表面が湿っている場合も空転する場合があります。地表面下に土壌水分が維持され、かつ土壌表面が乾燥し始める3月から4月が施工に適した時期の一つである。また、乾季であっても灌水により土壌水分を保持した状態にすれば、地表面が乾いた段階で施工可能である。

#### ● カットドレーンによる選択流の発生

カットドレーンは切断刃で形成された縦方向の空隙に選択流が発生することがある。リーチング水や灌漑用水による選択流が多量に空洞部に流れ込むと、自重による落盤や洗掘による崩落が生じ、カットドレーンの通水機能の低下に繋がる。選択流の発生抑制対策としては、カットドレーンの施工前に土壌水分を増加させておき、施工時に土粒子を流動化させ空隙を閉塞させる手法がある。土壌水分の増加は、畝間灌漑による。畝間灌漑は施工ライン上のみとし、トラクタの車輪が走行する隣接の畝間には水が入り込まないようにする。カットドレーンの施工量が多い場合は、数日前から灌水を開始しておく。ただし、灌水量を多くした場合、越流や漏水が発生するリスクが大きくなる。灌水時には畝の高さと畝間の深さを十分確保しておく。また、灌水後、穿孔機を牽引する際、畝間の中央部分、すなわち土壌水分量が多い部分を切断刃が通過するように留意する。

なお、本手法においても選択流を完全に抑制することは期待できない。また、対策後に乾燥状態が続くと、閉塞した部分に亀裂が生じる可能性もある。乾季に本手法を実施した場合は、リーチング前まで過剰な灌漑を避けること、灌漑時に選択流が見られた場合はその発生個所の閉塞作業を行い、リーチングまで空洞部の崩落を極力抑える必要がある。



#### 4.4 乾燥地での適用事例

以下にウ国シルダリア州での浅層暗渠排水の適用試験の事例を紹介する。

##### 1) 浅層暗渠排水の配置

試験圃場の土壌を調査した結果、圃場中央部に塩類集積が多く見られた。このため浅層暗渠排水を圃場中央部に導入する計画とした。計画面積は4.0 ha (200 m×200 m) とし、本暗渠2本(有孔管+モミガラ、No.1 および No.2) + 補助暗渠40本(カットドレーン)を施工することとした(図4.4.1)。

本暗渠は圃場北側にある圃場内排水路に接続させ、排水口は圃場西側にある支線排水路に設置する配置とした。圃場周辺の測量結果から、本暗渠の計画深さより圃場内排水路の底高が浅くなっている部分があり、排水路を深く掘削する方法、または集水渠排水方式を検討した。その結果、前者では法面崩落などにより土砂が堆積しやすく、本暗渠からの流出が阻害される恐れが想定されたことから、集水渠排水方式を採用し、集水渠を支線排水路に接続した。

本暗渠の勾配は、圃場内排水路に向かって1/800とした。吸水渠の底高は本暗渠の渠線上で最も圃場標高の低い地点において、深さ1.0 mを確保するようにした(図4.4.2)。吸水渠の深さおよび勾配から本暗渠と集水渠の接続点の底高は圃場面から約1.3 mの深さとなった。排水口付近の支線排水路の過去のリーチング時期の水位を確認し、最終的に排水口の設置高は圃場面から約1.5 mの深さとした。

本暗渠(No.1とNo.2)の延長は各200 m、No.1とNo.2の間隔は100 m、排水面積はそれぞれ2 ha (200 m×100 m)である。カットドレーンはこれら2本の本暗渠と直交するように東西方向に施工した。この方向は灌漑期の畝間と同じ方向であり、本暗渠に向かって流下する勾配が形成できる。

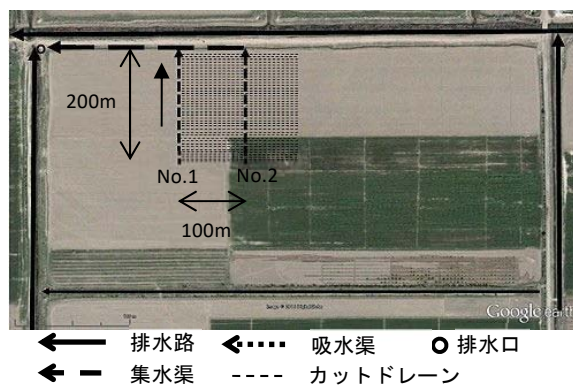


図 4.4.1 浅層暗渠排水の設計事例

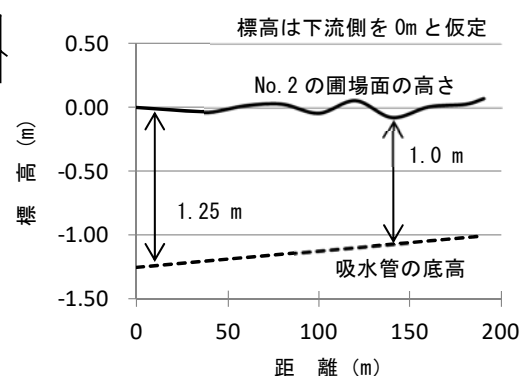


図 4.4.2 圃場面と暗渠管勾配の関係

## 2) 浅層暗渠排水と深い暗渠排水の設計事例

深い暗渠排水と浅層暗渠排水と比較すると図 4.4.3 のようになる。調査地域周辺で実施されている深い暗渠排水事業の施工事例（図 4.4.4）を参考に土工量を比較算定した結果を表 4.4.1 に示す。現地で施工されている深い暗渠排水は掘削深が大きく、大規模な工事となる。一方、補助暗渠にカットドレーンを活用した浅層暗渠排水（図 4.4.5）の土工量は 20 分の 1 となる。浅層暗渠排水には疎水材の投入、カットドレーンの工事が追加されるが、これを考慮しても工事費は 30%程度に抑えることができるものと見込まれた。

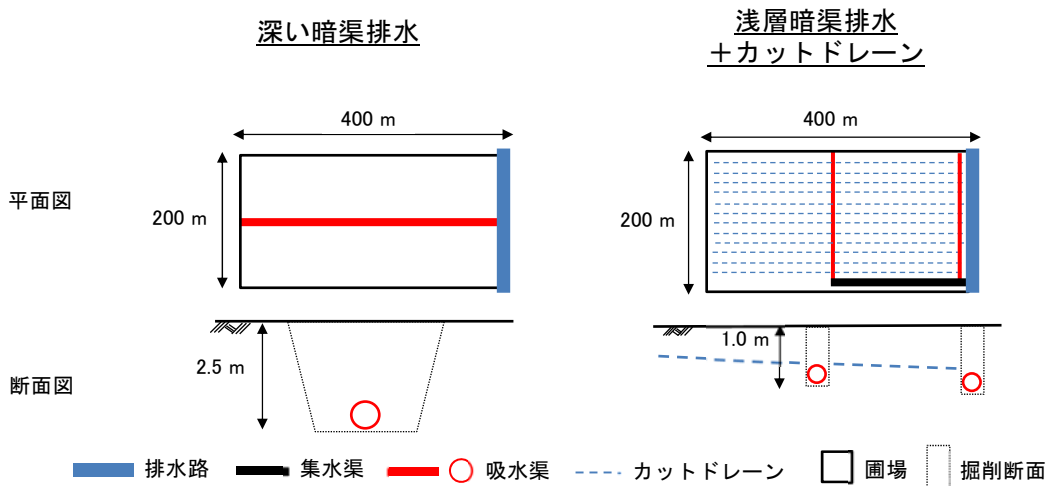


図 4.4.3 深い暗渠排水と浅層暗渠の施工比較図

表 4.4.1 深い暗渠排水と浅層暗渠排水の施工比較例

| 種類     | 圃場規模 200 m×400 m、圃場勾配 1/1000 |       |       |          |                                             |
|--------|------------------------------|-------|-------|----------|---------------------------------------------|
|        |                              | 深さ    | 設置間隔  | 延長       | 作業内容                                        |
| 深い暗渠排水 | 吸水渠                          | 2.5 m | 200 m | 400 m×1  | 管 1 m 当たり 8 m <sup>3</sup>                  |
| 浅層暗渠排水 | 吸水渠                          | 1.0 m | 200 m | 200 m×2  | 管 1 m 当たり 0.4 m <sup>3</sup><br>疎水材・カットドレーン |
|        | 集水渠                          | 1.2 m | -     | 200 m    |                                             |
|        | 補助暗渠                         | 0.7 m | 5 m   | 400 m×40 |                                             |

注) 深い暗渠排水の数値は推定値



深い暗渠排水の掘削断面



敷設される吸水管

図 4.4.4 深さ 2.5 m の暗渠排水の施工



浅層暗渠排水の吸水管



疎水材（モミガラ）の投入



補助暗渠（カットドレーン）の施工



カットドレーンの空洞部

図 4.4.5 浅層暗渠排水の施工

### 3) カットドレーンの施工に適した土壌水分

カットドレーンの施工は、土壌に塑性がないと、切断刃が土壌を粉碎し、穿孔機が浮き上がってくる。このため試験圃場で施工に適した土壌水分状態を探ったところ、表層 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm において、それぞれ 10%、15%、18%が施工可能な含水比の下限値となっていた（図 4.4.6）。

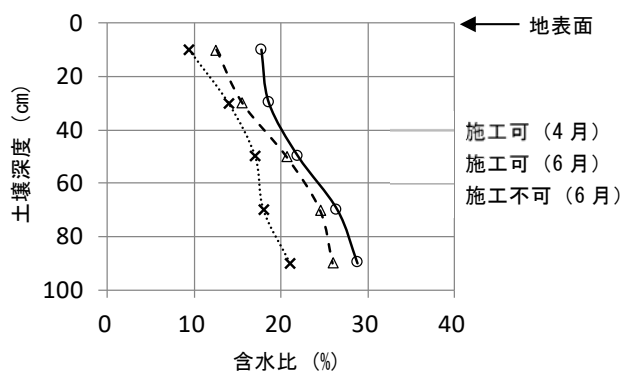


図 4.4.6 カットドレーン施工時の土壌水分

### 4) カットドレーンによる選択流の発生抑制対策

カットドレーンの施工部の選択流の発生抑制対策となる畝間灌水手法試験を実施した（図 4.4.7）。畝間に灌水した当日の施工や灌水後 2 日を経た施工区間では、無灌水区間と比較して、選択流が抑えられる効果が見られた（図 4.4.8）。選択流が発生しても、水量が少なかった場合、空洞部の崩落が見られなかった。選択流の発生率を少なくし、空洞部への流入量を減らすことにより、崩落の抑制が期待できるものと考えられた。

灌水当日にカットドレーンを施工した試験では、畝間全体の水深換算で 3 cm 相当の水量（90 cm×3 cm×畝間延長）を畝間に投入し、表層下 40 cm まで土壌水分量を増加させることができた。灌水日からカットドレーン施工日まで 2 日間の時間を空けた

試験においては、水深換算で 10 cm 相当の水量を投入したが、40 cm より深い層では土壤水分はほとんど変化しなかった（図 4.4.9）。また、上記試験において、灌水畝間から漏水が発生し、両脇の畝間に流れ込んだ区間があり、トラクタの車輪の空転が見られた。



畝間への灌水



灌水直後のカットドレーン施工

図 4.4.7 選択流の発生抑制手法の施工

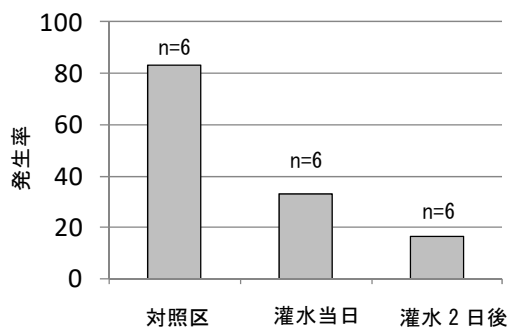


図 4.4.8 灌水条件別の選択流の発生

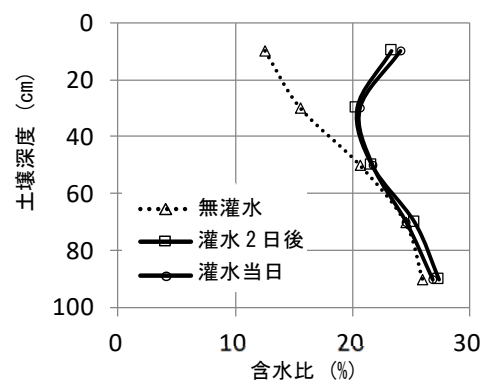


図 4.4.9 選択流対策施工時の土壤水分

### 5) 管を敷設する穿孔引き込み暗渠作業への活用

穿孔機は、小口径の管敷設にも活用できる。カットドレーンの空洞部は 10 cm×10 cm の大きさがあり、小口径の管であればサイドカッターに管を接続し、空洞形成と同時に管を引き込み敷設することができる。試験圃場では、管径 50 mm、延長 100 m の塩ビ管を支障なく敷設できた（図 4.4.10）。なお、管を牽引する際は、深さ 1.0 m 程度の土壤断面を準備し、挿入時の土壁の崩落防止のため引き込み管よりサイズの大きいガイド管を土壤断面内に 1.0 m 程度奥まで挿入固定して牽引する。



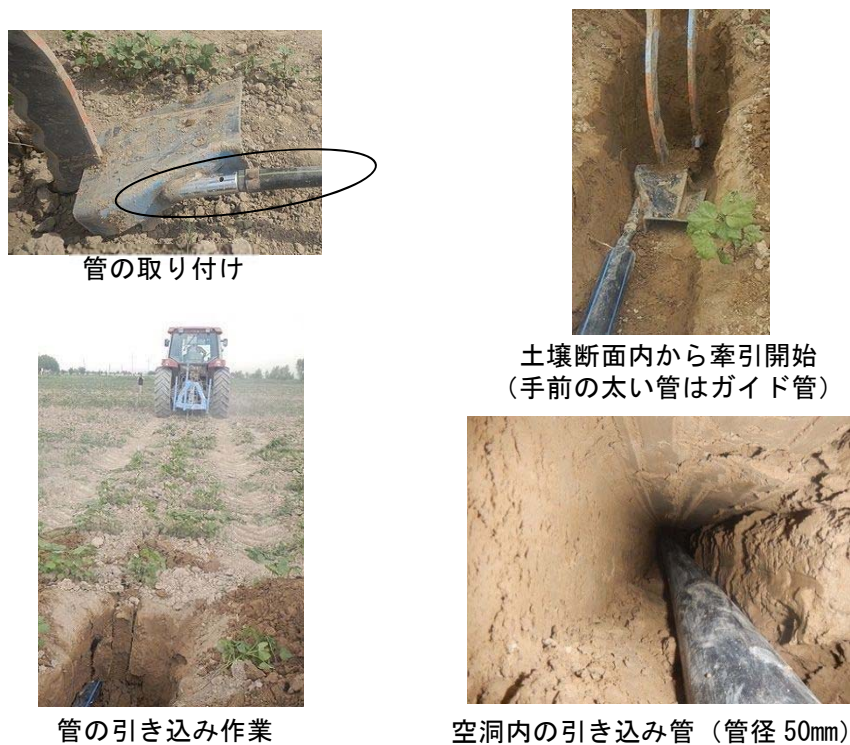


図 4. 4. 10 穿孔機による暗渠管の敷設例

#### 4.5 浅層暗渠排水の効果

浅層暗渠排水を導入した圃場では、次の効果が期待できる。

- リーチング後、高い塩分濃度の浸透水が圃場外に流出する
- リーチング後、地下水位が早く降下する
- リーチング後の土壌の塩分濃度の低下が大きい
- 作物収量が増加する

上記の各効果について、試験圃場では以下の結果が示された。

##### 1) リーチング水の排水

浅層暗渠導入圃場脇の支線排水路の水位は、リーチング時期、ピーク時の数日を除いて、排水口より低い位置にあり、排水口から塩分濃度の高い浸透水が圃場外に排出されていた。

2回のリーチングにおける排水口の観測結果から、観測期間内(47日間)の流出量および流出した水に含まれる塩分(全溶解固形分 TDS)が推定された。1回目および2回目のリーチングでそれぞれ 1.5t/ha、14.3 t/ha (0~60 cm の層の TDS 量の約 3%、25%に相当)の TDS が圃場外へ排出された(表 4.5.1 および図 4.5.1)。

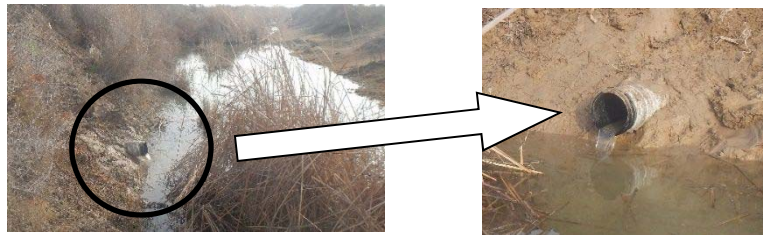
表 4.5.1 排水口からの流出状況

|                          |                       | 投入量     | 排出量   |                   |
|--------------------------|-----------------------|---------|-------|-------------------|
| 排水量 (m <sup>3</sup> /ha) | 1 <sup>st</sup> year* | 3,080** | 350   | 投入量の 11%が圃場外に流出   |
|                          | 2 <sup>nd</sup> year* | 3,880** | 1,590 | 投入量の 41%が圃場外に流出   |
| 排水塩分 TDS (t/ha)          | 1 <sup>st</sup> year* | 2.3***  | 3.8   | 1.5 t/ha が圃場外に流出  |
|                          | 2 <sup>nd</sup> year* | 3.3***  | 17.6  | 14.3 t/ha が圃場外に流出 |

\* リーチング実施期間 1<sup>st</sup> year: 2015/12/25～2016/1/12、2<sup>nd</sup> year 2016/12/25～2017/1/11  
 \*\* リーチング水量 1<sup>st</sup> year: 2,500 m<sup>3</sup>/ha、降雨 580 m<sup>3</sup>/ha、2<sup>nd</sup> year:3,220 m<sup>3</sup>/ha、降雨 660 m<sup>3</sup>/ha  
 \*\*\* リーチング水および降雨に含まれる TDS



リーチング後の圃場



排水路内の排水口

図 4.5.1 リーチング圃場と末端排水口

## 2) 地下水位の降下促進への影響

浅層暗渠排水を導入した圃場では、リーチング水の投入後、導入しない圃場よりも地下水位がより深い状態で変動する傾向が見られた。

リーチング後の地下水位の変動状況を、吸水渠から離れた地点 (40 m、A 点)、カットドレーン施工付近 (2.5 m、B 点)、吸水渠付近 (3.6 m、C 点) の 3 カ所で比較した。3 カ所のリーチングは 1 月 3 日から 5 日にかけて実施された。リーチング後の 10 日間の地下水位の平均を見ると、A 点では表層から -20 cm、B 点では -89 cm、C 点では -68 cm となっており、B 点、C 点の地下水位は、A 点より 50～70 cm も低く変動していた (図 4.5.2)。

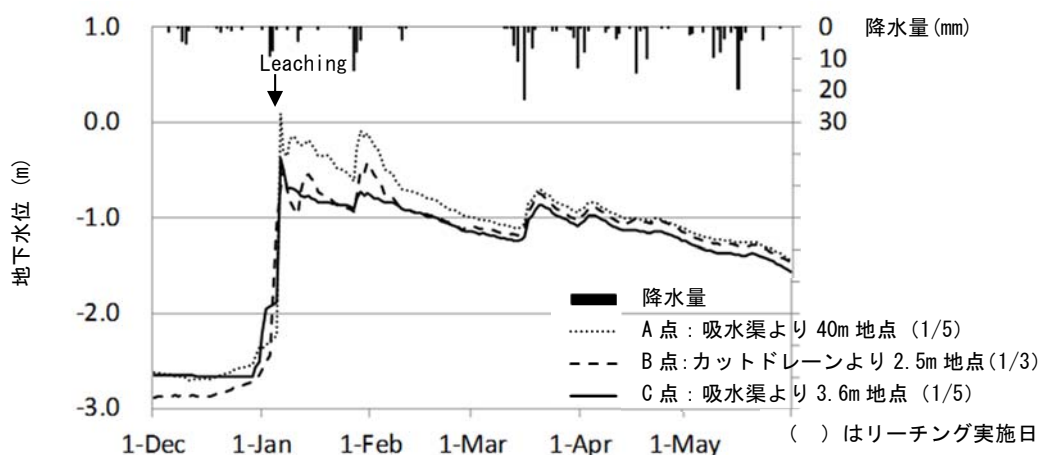


図 4.5.2 リーチング後の地下水位の変動

### 3) 土壌塩分濃度の低下

浅層暗渠排水導入圃場のリーチングは、未施工の圃場と比較し、表層に除塩効果が現れていた。一方、下層の除塩効果は見られなかった。

主要な根群域である表層(0~20 cm)およびカットドレーンの施工深以下の下層(60~80 cm)の2層について、リーチング直前(12月)、直後(1月)、播種前(2月)の土壌塩分濃度(ECe)の変化を図4.5.3に示す。

表層では浅層暗渠排水の導入圃場(深耕を含む)が未施工の圃場よりも常に低くなっていた。リーチングの効果がもっとも明確に現れた12月と1月を比較すると、浅層暗渠排水導入圃場と未施工の圃場の土壌ECeの減少率(12月を100%とする)はそれぞれ37%、26%であった。

一方、カットドレーンの施工深さよりも深い層(60~80 cm)では、逆に、未施工の圃場が減少していた。浅層暗渠排水導入圃場ではリーチングによる浸透水が圃場外に流出し、下層への浸透量が減少したことが要因の一つと考えられる。

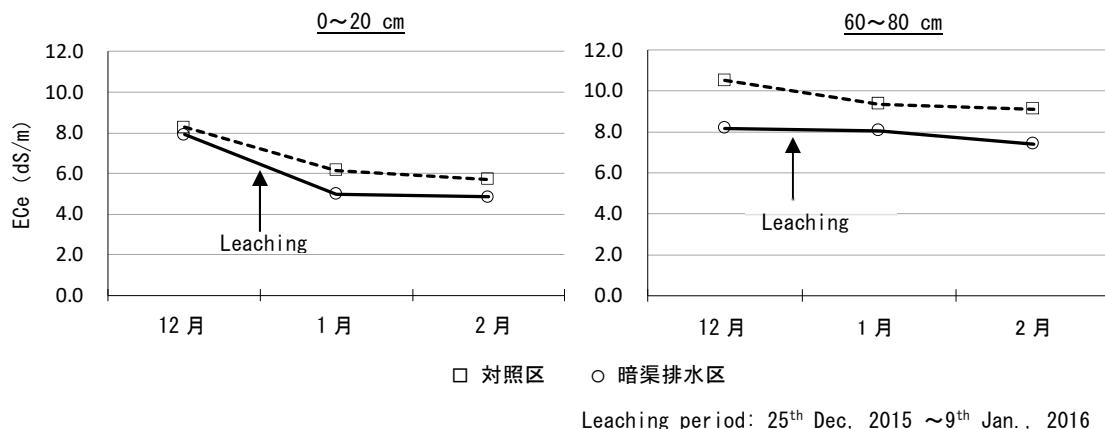


図 4.5.3 リーチング前後の土壌塩分濃度の変化



#### 4) 作物収量の増加

浅層暗渠排水の導入圃場でのワタ収量は未施工の圃場に対して収量の増加が見られた。

土壌の塩類集積が作物収量に及ぼす影響については、他の文献でも多くのデータが示されており、土壌の ECe が増加すると作物収量は減少することが示されている。ここでは、シルダリア州内の 3 つの試験圃場 (Farm A、Farm B、Farm Y、図 4.5.4) を対象に土壌の ECe とワタ収量の関係を観測した結果を示す。

3 圃場全体では、ワタ収量は平均 2.1 t/ha (最小値 0.3 t/ha、最大値 4.5 t/ha)、収穫時の土壌塩分 ECe (0~100cm) が平均 9.4 dS/m (最小値 2.9 dS/m、最大値 18.3 dS/m) が得られた(図 4.5.5)。バラツキはあるものの、土壌 ECe が“1”上がるごとに約 5% (0.2 t/ha) 減収する負の相関が見られた。減収の要因を塩分濃度だけとすることはできないものの、ECe とワタ収量との相関は見られない場合もあり、収量の差は ECe 以外の要素が大きく影響しているものと推察された。

Farm-Y および Farm-A で浅層暗渠排水を導入した圃場での土壌 ECe と収量を見ると、浅層暗渠排水により、ワタの収量が 20%程度増加する結果が得られた。

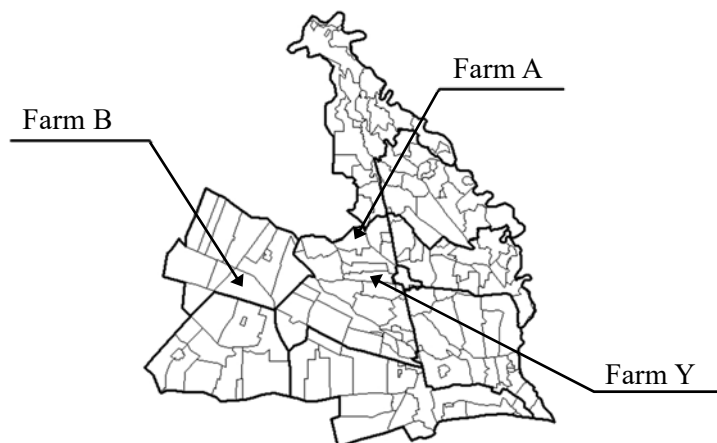


図 4.5.4 シルダリア州内の試験圃場位置

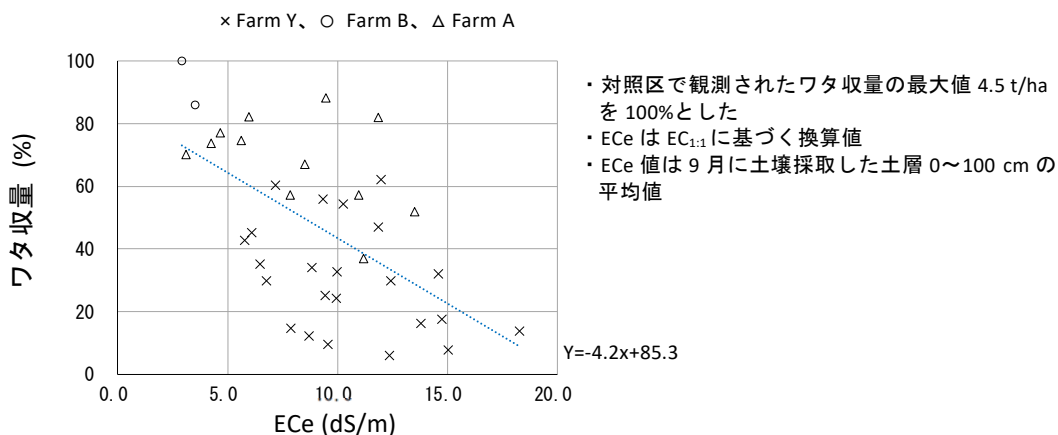


図 4.5.5 土壌塩分濃度とワタ収量 (2016-2017)

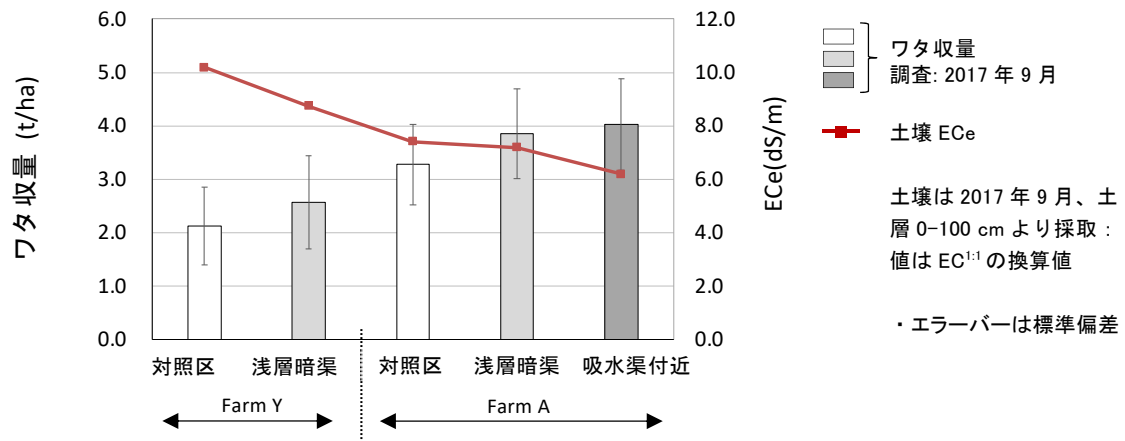


図 4.5.6 暗渠排水導入圃場のワタ収量

## 参考文献

- 1) Kitagawa Iwao, Takeuchi Harunobe, Kotani Haruo and Chiba Yoshihiko (2010) , Efficacy and Applicability of the Cutting Drain Method in Excavating Underdrains, Trans. of JSIDRE, No.267, pp11~16 (in Japanese)
- 2) Okuda Yukio, Goto Koki, Kitagawa Iwao (2015) , A Trial of Desalinization by Using Mole-Drain in Republic of Uzbekistan, Journal of JSIDRE, 83 (7) , pp7~10 (in Japanese)
- 3) Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) of Japan (2000) , Planning and Design Criteria for Land Improvement Project, Planning “Sub-surface Drainage”, 184 (in Japanese)
- 4) The Agricultural Upland Development Association (1989) , Sub-surface Drainage Q&A Precedent、468 (in Japanese)
- 5) S.K. Gupta, Manual Subsurface Drainage for Waterlogged Saline Soil (2013) , CSSRI, 353
- 6) The Japanese Institute of Irrigation and Drainage (JIID) (1993), Engineering Manual for Drainage, Drainage

## 第5章 まとめと提言

既存の排水システムが十分に機能し、かつ、冬期のリーチング水の投入が管理されている条件下、地下水位や排水路水位が適切に維持される。水位が十分に低い場合、リーチング効果が発揮され、塩類集積が軽減される。しかし、現状ではこれら地下水位や排水路水位の目標値と現状に差が見られる。その差をいかに少なくするかが重要な検討事項であり、塩害対策の実施機関や研究機関は大きな役割が期待されている。今後、各機関の目標達成に向けた努力によって、圃場条件は部分的に改善されていくものの、問題が解決されない圃場が残されるのも現実である。

本マニュアルでは、上記の目標の達成が困難となっている圃場、地下水位や排水路水位の改善が見られず、塩類集積リスクの高い状態の圃場において、浅層暗渠排水によって塩類集積の軽減を図ることを提案している。通常、浅層暗渠は、本暗渠の設置密度が高くなり、建設コストが増嵩するが、ここでは、日本で開発されたカットドレーンの活用によって低コスト化を図っている。

導入した浅層暗渠排水技術（本暗渠とカットドレーンの組合せ）によって、浅層地下水に含まれる塩分が排除され、塩害予防と除塩対策に貢献できたか否か検証を行った。現地実証試験から得られた知見を以下にまとめた。特に、乾燥地、さらに土壌中に含まれる塩分を排除する目的でカットドレーンを使用するのは初めての試みであり、試行錯誤を重ねながら実証を行っている。

### 5.1 本暗渠とカットドレーンの組合せ方法

適正な土壤水分状態でカットドレーンを施工しても、穿孔機の切断刃によって鉛直縦方向に空隙が生じ、灌漑用水が空隙部を通過する選択流となって穿孔部に多量の水を流入させる。その結果、穿孔部に崩落が生じ、穿孔内に土壌が堆積してしまい排水機能の低下を招いてしまう。カットドレーン単独では浅層補助暗渠としての機能を有することは難しく、本暗渠と組合せて使用することが望ましい。

組合せ方法は、第4章4.4に記載した通り、本暗渠とカットドレーンを直交させて使用することが経済的になる。魚の骨に例えると、背骨の中心が本暗渠、それに接続するのがカットドレーンである。この場合、本暗渠は畝方向と垂直に、カットドレーンは畝方向と平行に施工することが望ましい。通常、均平化された圃場、起伏がなく一様な勾配を有した圃場では、作物は地形勾配と平行に播種され、畝立てされることが多い。灌漑用水は畝に沿って高い方から低い方へ流れるため、カットドレーンは畝方向と平行に施工することで、水の流れが本暗渠に向かうことができる。

## 5.2 カットドレーンの適用上の留意点

乾燥地においてカットドレーンを使用する場合、日本の実施例と比べると、いくつかの制約要因があり、施工する際の留意点を以下に挙げる。また、カットドレーンの穿孔の形状を維持するためには、選択流の発生を抑制する対策を行い、灌漑用水を少なく供給することが必要になる。

### ● 施工時期

土壌水分が低く、硬化している状況では、トラクタ牽引の際に穿孔機の切断刃が浮き上がり、土壌への挿入深度が浅くなる。試験結果によると、カットドレーンの施工に適した土壌水分は含水比で10～18%である。カットドレーンの施工は、雨季が終了し、土壌表面が乾燥し始める3月から4月、遅くともワタ播種前に行うことが望ましい。

### ● 施工深

穿孔機の切断刃の長さは60～120 cm程度に調節することができるが、切断刃全体の挿入部分が深くなると牽引抵抗が大きくなり、曲りが発生する可能性がある。実際に、120 cmで穿孔を行ったところ、前刃上部に変形（曲がり）が生じた。そのため、施工深は、地表面下60～90 cm程度に空洞形成ができるよう調整する。

### ● 施工延長と設置間隔

乾燥地に限らず、起伏が多い圃場では施工深さを一定に管理することができないため、均平化された圃場での施工が望ましい。カットドレーンの施工延長は地形勾配、本暗渠の深さに制約を受けることから、概ね200 mまでが適正である。カットドレーンの設置間隔は、日本の場合2.5～5 mを標準とされているが、計画暗渠排水量、現場の透水係数および作土層の厚さから計算すると4～18 m程度の範囲となる。

### ● 穿孔の耐用年数

カットドレーン取扱説明書（(株)北海コーキ）によると、土性がL（壤土、粘土含有量25.0～37.4%）の土壌では穿孔の耐用年数が2～3年後まで維持できないため数年毎の再施工を行う必要があるとされる。シルダリア州では冬季にリーチングが行われることから、多量の用水が穿孔内を通過することになり、耐用年数はさらに短くなることが想定される。カットドレーンは本暗渠と組み合わせて使用することが望ましいことから、本暗渠からの排出量が少なくなった場合は再施工を行うことが望ましい。

### ● 穿孔部の崩落原因について

現地実証圃場におけるカットドレーンの穿孔崩落は、鉛直縦方向にできた土層内の空隙部を灌漑用水が通過したことが原因であるが、空隙部が確認できない場合においても穿孔が崩落している事例もあった。なぜ縦方向に空隙が生じるのか、空隙がなくても穿孔が崩落してしまうのか、カットドレーンは使用可能な土壌条件が定められていることから、土

性と粘土鉱物に着目して要因を考えてみたい。

日本におけるカットドレーンの適性土壌は、粘土や泥炭土であり、砂やシルト分の多い土壌では使用できないと報告されている。実証試験圃場の粒径組成は、粘土約 15%、シルト約 25%、砂約 60%となり、国際（土壌学会）法に基づく土性は、L（壤土）、CL（埴壤土）に区分される。図 4.3.7 によると、実証試験圃場の粒径組成はカットドレーンの使用可能な範囲内に入っているが、境界付近に位置している。一方、カットドレーン取扱説明書（(株) 北海コーキ、Appendix 2）によると、砂 50%以上または粘土画分が 24.9%未満（農学会法の土性が S、SL）だと使用不適合とされ、実証試験圃場でのカットドレーンの使用は不適合となる。現地では、粘土分の多い圃場（11～25%）でカットドレーンの使用が試みられたが、灌漑用水の流入によって穿孔は崩落した。崩落した穿孔部の形状は、土性に関係なく角が取れて丸くなっているもの、埋設しているものが多い傾向にある。

一方、実証試験圃場のあるシルダリア州の地質は第三紀の泥岩とされ、その特徴はスレーキング・膨潤性が高い。膨潤性のある粘土鉱物は、カオリンググループであるハロイサイト、スメクタイトグループであるモンモリロナイト、バイデライト、ノントロナイト、そしてバーミキュライトである。また、灌漑用水の供給後、乾燥すると地表面にひび割れが生じる特徴があることから、粘土鉱物はスメクタイトグループであるモンモリロナイト、バイデライトと推測される。

カットドレーン施工直後に一度閉じた鉛直方向の溝に空隙が生じる現象は、乾燥過程における粘土鉱物の収縮による影響が大きいと考えられる。一方、鉛直方向の溝に空隙が生じなくても穿孔が崩落してしまう現象は、土性あるいはスレーキングの影響と考えられるが確認はできていない。

### 5.3 浅層暗渠排水の施工経費

第 4 章 4.4.2 において、本暗渠とカットドレーンを組み合わせた設計事例の場合、施工経費は 2,970,000 UZS/ha (1,050 USD/ha) になる。以下にその内訳を示す。経費は圃場の形状、均平状態、排水路との接続条件などにより増減する。

| 項目                           | 1,000 UZS/ha |
|------------------------------|--------------|
| 土工費（掘削・埋め戻し）                 | 390          |
| 材料費 吸水渠（有孔管 φ100 mm、運搬費を含む）  | 1,250        |
| 集水渠（無孔管 φ100 ～150 mm、運搬費を含む） | 630          |
| 疎水材（モミガラ、運搬配置を含む）            | 250          |
| カットドレーン施工費（トラクタ運転経費、燃料等）*    | 200          |
| カットドレーン穿孔機損料**               | 80           |
| その他（人力施工、作業補助員）              | 170          |
| 合計                           | 2,970***     |

\*現場実績をベースに算出（2015 年 11 月～12 月施工）

\*\*耐用年数 7 年、年間利用面積 50 ha と仮定した減価償却費

\*\*\*2015 年 12 月現在の換算レート 2,825UZS/USD

#### 5.4 浅層暗渠排水技術の効果

浅層暗渠排水技術の効果に関しては、結果の信頼性及び再現性を確保できていないため、今後更新する必要がある。以下は、実証試験の開始から1年経過後の調査成果をまとめたものである。

- 排出される塩分量

現地実証試験の結果によると、本暗渠とカットドレーンの組合せである浅層暗渠排水技術による除塩効果は、リーチング後に圃場から溶脱された TDS 量で 3~25%であった。現地実証試験の結果は、技術導入区と対照としての技術未導入区との比較は行っていないことから、除塩されたか否かの効果は確認できていない。また、室内において浸透実験を行った結果（第3章 3.3 参照）の溶脱 TDS 量 35.4%と比較すると、大きな乖離がある。現地では施工面積 4 ha に対して排水口は 1 箇所しかなく、リーチング用水は 1 箇所の排水口に全て集水されておらず、排水口以外の場所からも排水路へ浸出していることが考えられる。圃場内に含まれている塩分濃度の大小によって溶脱される塩分量は異なるため、一概に現地の結果を室内実験結果と比較することはできない。

- 土壌内の塩分濃度の低下

現地実証試験の結果によると、浅層暗渠排水技術を導入した圃場でのリーチング後の土壌塩分濃度は、技術未導入区の圃場と比較して表層の除塩効果が現れていた。しかし、下層への除塩効果は見られなかった。浅層暗渠排水技術の導入圃場では、リーチングによる浸透水が圃場外に流出し、下層への浸透量が減少したことが要因の一つと考えられる。

- ワタ収量

現地実証試験の結果によると、浅層暗渠排水の導入圃場でのワタ収量は未施工の圃場に対して収量の増加が見られた。浅層暗渠排水により、ワタの収量が 20%程度増加する結果が得られた。

#### 5.5 下流側への環境影響

除塩対策を行った圃場では、排出された塩分が下流側の河川あるいは圃場へ蓄積される可能性がある。例えば、アラル海へ排出された場合、アラル海の環境汚染に繋がることになる。排出先がシルダリア川であれば下流側河川の塩分濃度が高くなるため、そのような地域では塩害がより深刻化する危険性がある。JIRCAS が実施した地域では、圃場外に排出された塩分はシルダリア川には排出されずアイダクル湖であるため問題は低いと考えられるが、実際に調査は行われていない。

## 目次と著者リスト

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| 序章                        | 大西 純也          |
| 第1章 塩害                    | 大西 純也          |
| 1.1 塩害とは何か                |                |
| 1.2 塩害の発生機構               |                |
| 1.3 塩害の分類                 |                |
| 第2章 塩害予防と除塩対策             | 大西 純也          |
| 2.1 予防対策                  |                |
| 2.2 除塩対策                  |                |
| 第3章 塩類集積土壌のモニタリングと原因の特定   | 大森 圭祐          |
| 3.1 モニタリングの目的とその方法        |                |
| 3.2 塩類集積の原因特定に必要な調査項目     |                |
| 3.3 現地試験圃場における塩類集積原因      |                |
| 第4章 浅層暗渠排水による灌漑農地の塩類集積対策  | 奥田 幸夫          |
| 4.1 本マニュアルにおける浅層暗渠排水の位置づけ |                |
| 4.2 浅層暗渠排水の構造             |                |
| 4.3 浅層暗渠排水の設計施工           |                |
| 4.4 乾燥地での適用事例             |                |
| 4.5 浅層暗渠排水の効果             |                |
| 第5章 まとめと提言                | 大森 圭祐<br>奥田 幸夫 |
| 5.1 本暗渠とカットドレーンの組合せ方法     |                |
| 5.2 カットドレーンの適用上の留意点       |                |
| 5.3 浅層暗渠排水の施工経費           |                |
| 5.4 浅層暗渠排水技術の効果           |                |
| 5.5 下流側への環境影響             |                |



## 協力者

著者は、このガイドラインの改善に有用な協力と洞察力のあるコメントを頂いた以下の者に感謝の意を表する。

| Name            | Organization                                                              |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| S. Turdiev      | FC, Uzbekistan                                                            |
| Z. Allamurodov  | FC, Uzbekistan                                                            |
| S. Jo'raqulov   | FC (Syrdarya), Uzbekistan                                                 |
| Y. I. Shirokova | Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problem, Uzbekistan |
| G. K. Palushova | Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problem, Uzbekistan |
| R. Kurvontoev   | Gulistan State University, Uzbekistan                                     |
| I. Kitagawa     | National Agriculture and Food Research Organization, Japan                |

## 付属資料 1

### 1. カットドレーンの開発の背景と経緯

日本では、現在、大豆や小麦、野菜など畑作物の生産強化が求められる中、局地的な長雨や集中豪雨などが増加傾向にあり、農地の排水性を良好に保つ必要がある。農地の排水性を良好にするには、地下1.m程度に排水管やモミガラなどを埋める「暗渠」などの排水施設の整備が有効であり、公共事業などによりその整備が進められているが、整備できる面積には限界がある。また、これら暗渠も年数が経過すると老朽化による性能低下によって排水が悪化することが現場の大きな課題となっている。

農家自身が農地の排水性を良好にする方法には、「弾丸暗渠」や「心土破碎」が一般的に使用されている。無資材で成形された空洞や亀裂を通して排水するため耐久性に劣る点と施工深さが浅く、暗渠のように圃場外へ排水を排除することができない点が課題であった。そのため、生産現場からは、簡単かつ安価で、資材を使用した暗渠と同様の効果のある排水改良技術が求められていた。

以上から、農研機構農村工学研究部門と（株）北海コーキが、独創的な穿孔方法を用いて、深さ70 cmまでの位置に耐久性のある通水空洞を無資材で、かつ、農家自らがトラクタで迅速・簡単に施工できる穿孔暗渠機「カットドレーン」を開発・実用化し、市販普及を進めている。

### 2. 排水機能と農業生産への効果

カットドレーンは、暗渠と同様に排水路に排水できる。施工後のカットドレーンの排水量は、暗渠と同程度のピーク排水量5 mm/hを確保でき、暗渠としての機能を十分に有している。そのため、カットドレーンを施工した圃場では降水量の多い時期でも圃場に表面滞水の発生が回避され、生育初期の麦の出芽・分けつ・春の起生を良好な状態に保つことができる。また、湿害に弱い大豆の苗立ちと生育を確保するなど、畑作物の生育を良好に保つことができる（写真1）。カットドレーンの施工に適した土壌においては、畑作物に対して5~40%の範囲で収量の向上・維持の効果を見込むことができる。



カットドレーン施工区



未施工区

写真1 カットドレーンの排水性と作物への効果

Source : Kigatawa Iwao (2016) , Mole-drilling Machine "Cut Drain" for Easy and Speedy Constructing Sub-surface Drainage without Material, Farming and Horticulture

## 穿孔暗渠機

# カットドレーン

— KCDS-01 (1 連タイプ) —

## 取扱説明書

### 適応推奨トラクタ

- ・ クローラタイプ 60PS～
- ・ タイヤ(四輪駆動) 70PS～

「ものづくり」で農業を支える

**Hokkai KOKI**

株式会社 北海コーキ

〒099-1587 北海道北見市豊地 22-4

TEL 0157-36-6806 FAX 0157-36-6809

## はじめに

カットドレーンをお買いあげいただきありがとうございます。

- カットドレーンをこの取扱説明書に書かれている目的以外に使用しないでください。
- この取扱説明書には、組立や操作、整備に必要な事項が書かれています。正しく効果的な製品の取扱ができるよう、よく読んで理解してください。
- ご不明な点は担当にご照会ください。

## 目 次

|               |       |      |
|---------------|-------|------|
| ① 安全に作業をするために | ..... | 2    |
| ② 各部名称・取付方法   | ..... | 3    |
| ③ 保守管理        | ..... | 4    |
| ④ 作業時の注意・作業方法 | ..... | 5    |
| ⑤ 施工の実例       | ..... | 6～8  |
| ⑥ パーツリスト      | ..... | 9～10 |

- 本書に記載されている仕様や解説あるいは説明のために例をあげ、図示されている内容は、改良のため予告なしに変更することがあります。

## (1) 安全に作業するために



### 危険・警告

- 作業前には、作業機の取扱説明書をよく読み、十分に理解して下さい。理解しないまま作業すると死亡もしくは重大な障害を生じるおそれがあります。
- 取扱説明書は、常に機械に近接した場所に保管して下さい。自分だけの判断で作業・整備すると思わぬ事故をおこすことがあります。
- 作業機を暗渠以外の目的に使用しないで下さい。
- 作業機を改造しないで下さい。
- 作業機を第三者に貸すときは、取扱要領、機能、作業のポイントを取扱説明書に従って説明して下さい。また、必ず取扱説明書も渡して下さい。

### 作業の前に

- 次の状態の時は操作及び作業をしないで下さい。
  - 病気、疲労、薬を飲んでいる時
  - 飲酒しているとき
  - その他の理由で体調がすぐれない時
- 作業に適した服装をして下さい。はち巻き、首巻き、腰タオルは機械に巻き込まれたりすることがあります。
- 作業点検をして下さい。事故、故障を未然に防ぐことができます。わからないときはむやみに分解せず、当社又は、最寄りのサービス店に修理を依頼して下さい。

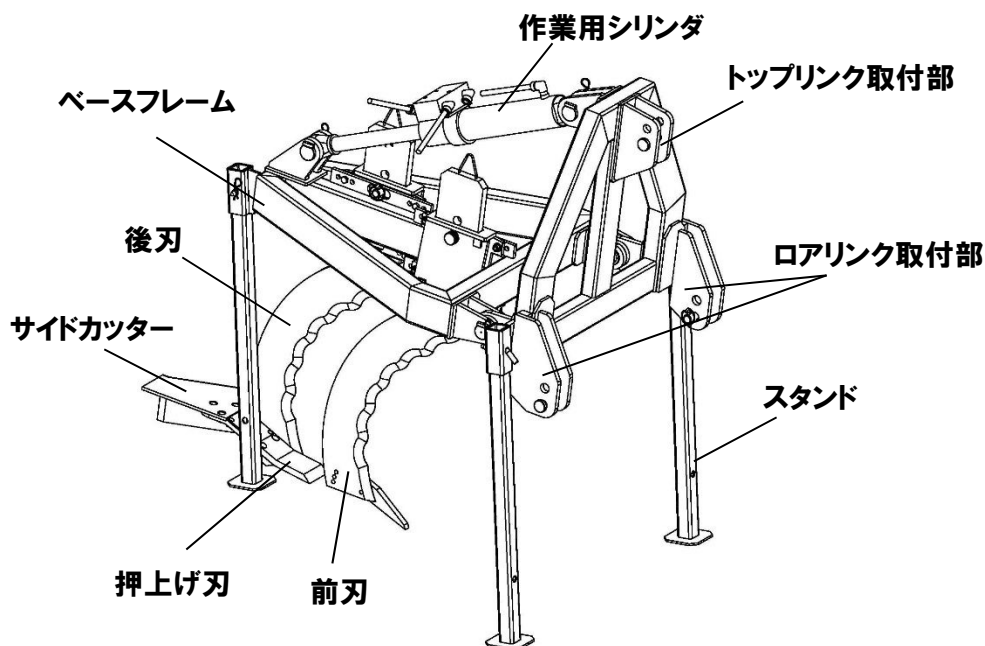
### 作業中は(運転中)

- トラクタの操作方法、運転要領は、トラクタの取扱説明書に従って下さい。
- 作業機を移動及び脱着するときは、トラクタと作業機の間の人に人がいると挟まれて重大な事故になることがあります。
- 本体上部に人が乗ったり、物を載せたりしないで下さい。
- 作業機の下にもぐったり、足を入れたりしないで下さい。
- 子供には十分注意し、本機には近づいたりしないで下さい。

### 作業終了後は

- 作業機を清掃、整備、点検する時は、可動部が止まっている事を確かめてから行って下さい。
- 不良箇所等があれば修理をして下さい。  
そのまま放置すると次の作業に時にトラブルを起こしたり思わぬ事故をおこしたりすることがあります。

## (2) 各部の名称及び取付方法



### ⚠ 危険・警告

- カットドレーンの装着は平らで固い場所を選び、いつでも危険をさけられる態勢でおこなって下さい。
- トラクタのまわりやカットドレーンとの間に人が入らないようにして下さい。
- カットドレーンの下にもぐったり、足を入れたりしないで下さい。
- ロアリnkシャフトロックの際に、手を挟むおそれがあるので十分に注意して下さい。守らないと死亡や傷害事故につながります。

### ◆ 取付け順序

1. 本機ロアリnk部に接続する。
2. トップリnkを接続する。
3. 作業用シリンダホースを接続する。
4. 全体を上げスタンドを上げて固定もしくは取外する。
5. 作業用シリンダの動きを確認する。

### (3) 保守管理

#### 危険・警告

- 点検・整備をするときは、交通の邪魔にならず安全なところを選んでください。機械が動いたり、倒れたりしない平らな固い場所で、トラクタの前輪には車止めをして下さい。
- 点検・整備をするときは、トラクタの駐車ブレーキをかけ、TPO 変速レバーを「中立」の位置にし、エンジンを停止してからおこなって下さい。守らないと死亡や事故につながります。

#### ◆ボルト・ナットのゆるみ、ホースの点検

- 各部のボルト・ナット、特に刃取り付けボルトのゆるみを点検してください。
- 油圧シリンダのホースに傷や割れがない事を確認してください。



#### (4) 作業時の注意・作業方法

##### 危険・警告

- 作業中はトラクタとカットドレーンの周りに人を近づけないで下さい。
- ★ 作業中に刃を入れたままの旋回走行はしない。

##### ◆ 上手な作業のしかた

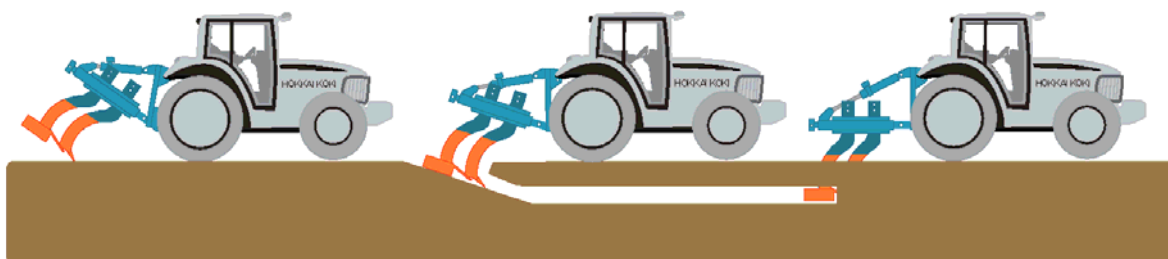
- トラクタの推奨施工速度は 2～4km/h。
- 穿孔の間隔は 2.5～5m を標準とする。  
(状況により自由に設定できる)
- ★ 作業時はカットドレーンのベースフレームは地面に対して平行になるようにトップリンクで調整してください。

##### ◆ 適用条件

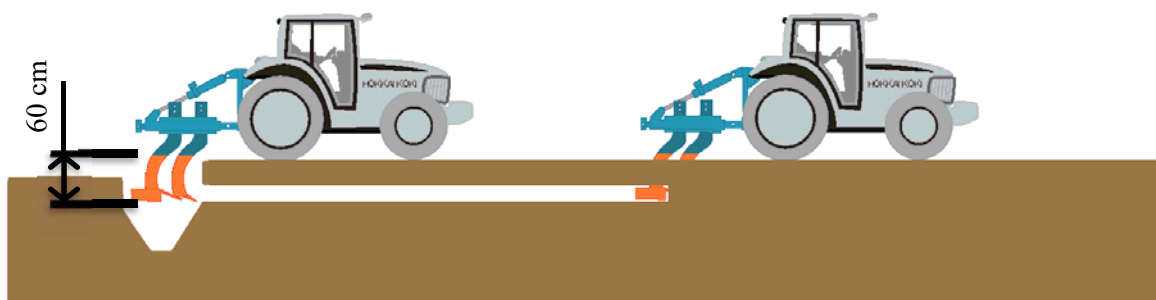
- 砂 50%以上又は土性(農学会法)S・SL では使用不適合で、L の土壌では耐用期間が短くて 2～3 年後まで維持できないので数年ごとの再施工などの対応が必要になります。
- 砂礫層あるいは 5cm を超える石礫に富む場合、直径 5cm を超える埋木がある場合は、施工できない場合があります。
- 主に転換畑、畑、草地で使用します。
- 水田は湛水する必要があるため、既設の暗渠に接続する補助暗渠として使用します。
- 水田での施工方向は既設の暗渠との連結を考慮して、斜め方向あるいは短辺方向とします。

## 施工の実例

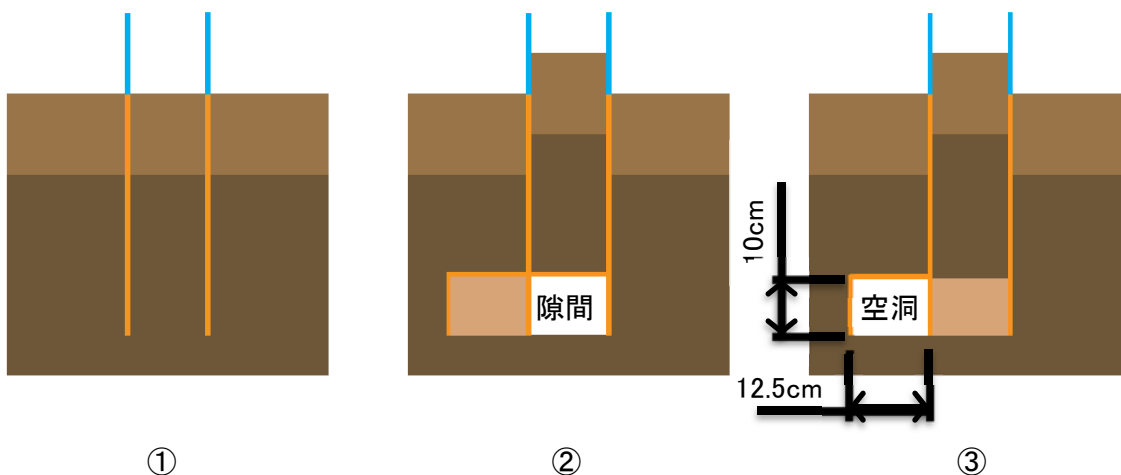
- (1) 土壌からカッタドレーンを入れる方法
1. シリンダを縮める
  2. シリンダを伸ばしながら土壌に入れる



- (2) 側溝からカッタドレーンを入れる方法
1. 側溝にカッタドレーンを入れそのまま作業する。  
(オレンジ部まで 60cm)



【カッタドレーンの概要】 空洞: 10×12.5cm



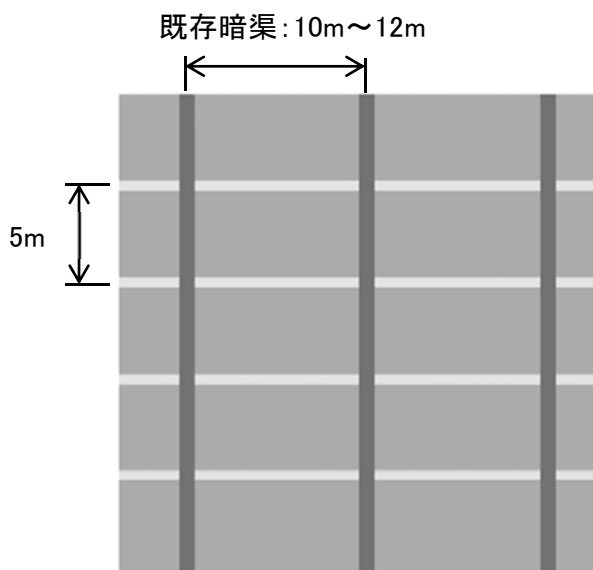
## ◆既存暗渠の有無による施工方法

### (1) 既存暗渠のある場合

- 例1または例2のように施工するのが望ましい。
- 暗渠管が浅く埋設されている部分は浅く施行する。あるいは暗渠と同じ方向に施行し、暗渠の深さが深い下流の部分で暗渠と平行に施行したカットドレーンに対して、少し深めに直角に交わるようにつなぐこともできます。

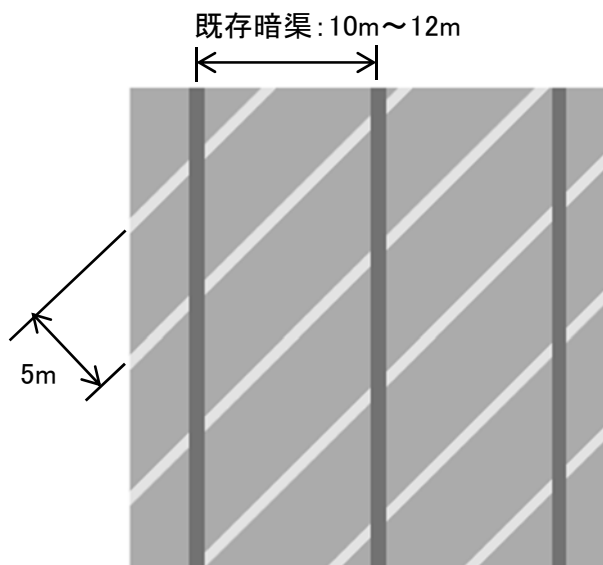
#### 例1: 既存の暗渠に交差して入れる

既存の暗渠に交差させる場合は5m 間隔が望ましい



#### 例2: 既存の暗渠に45度で交差して入れる

既存の暗渠に45度で交差させる場合は5m 間隔が望ましい

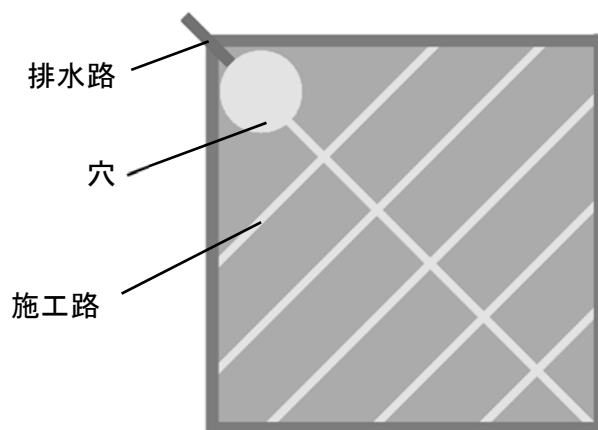


## (2) 既存暗渠のない場合

- 例 3 のように排水路がコンクリートなどで排水口が作れない場合は、排水路の継ぎ目付近に大きな穴を掘り、その穴からカットドレーンを施行して排水口を作ってください。排水路にはコンクリートの継ぎ目の隙間から排水するように少し穴を開けてください。
- 例 4 のように、排水路の法面から施行して排水口を作ってください。

### 例 3: 排水路がコンクリートなどで排水口が作れない場合

排水路の継ぎ目付近に大きな穴を掘り、その穴からカットドレーンを施工し排水口を作る。



### 例 4: 排水出口の改善

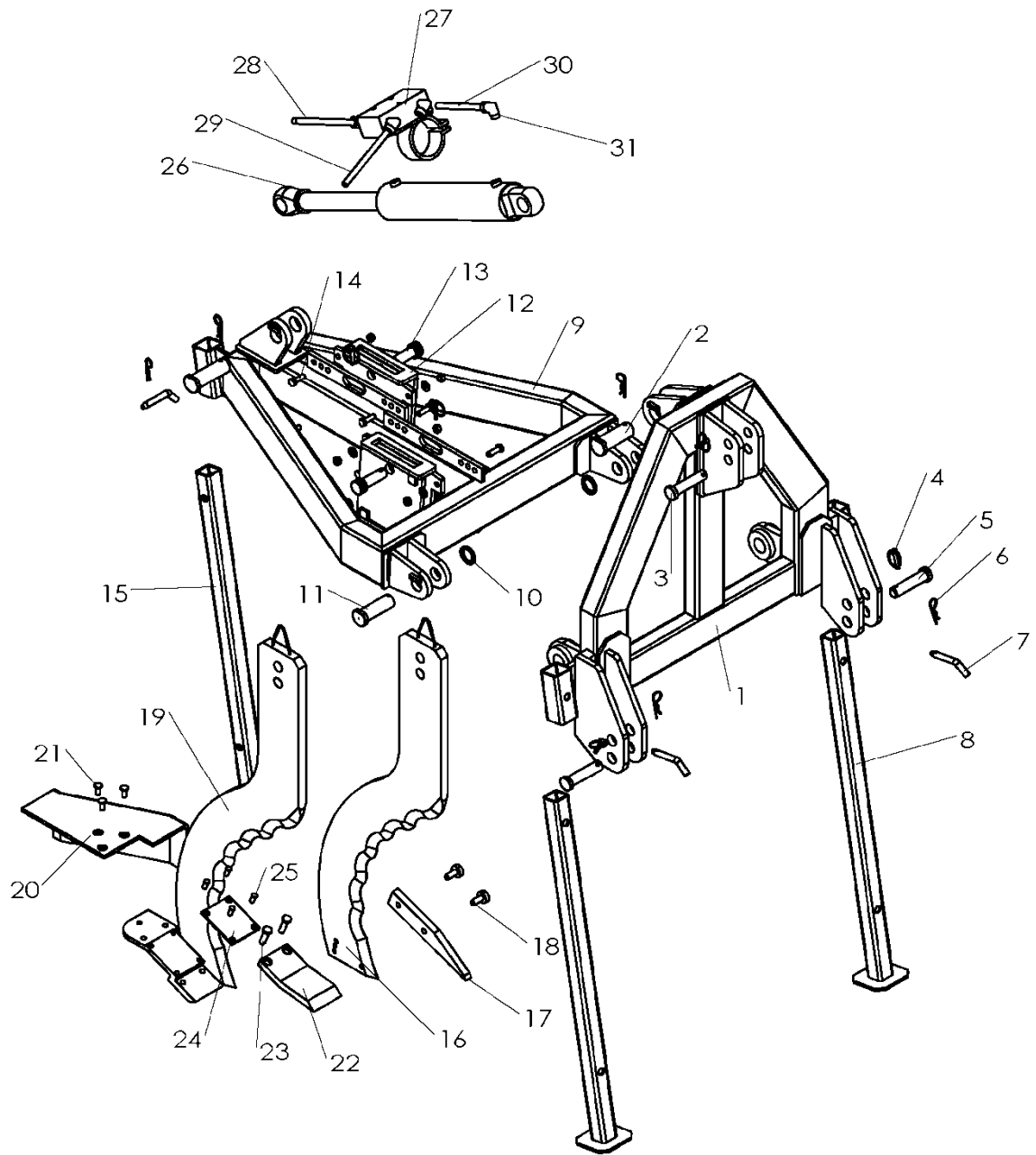
排水口は最も崩れやすいため、排水口を長期保護するためには、暗渠用樹脂管(直径50～75mmの穴あき)などのパイプを2m程度差し込むと良い。



#### その他の特徴

- ・長雨時の表面滞水の排除など、緊急的に対応が必要なときにも利用できます。
- ・各地区の土壌条件の違う農地圃場に合わせた施行ができます。

## (5) パーツリスト



| 番号 | 部品番号      | 部品名称          | 個数 | 単価 | 摘要          |
|----|-----------|---------------|----|----|-------------|
| 1  | KD-1-0001 | フロントフレーム      | 1  |    |             |
| 2  | KD-1-0002 | シリンダーピン       | 2  |    |             |
| 3  | KD-1-0003 | トップリンクピン      | 1  |    |             |
| 4  | KD-1-0004 | リーチピン         | 5  |    |             |
| 5  | KD-1-0005 | ロアリンクピン       | 2  |    |             |
| 6  | KD-1-0006 | フックピン         | 5  |    |             |
| 7  | KD-1-0007 | スタンドロックピン     | 3  |    |             |
| 8  | KD-1-0008 | フロントスタンド      | 2  |    |             |
| 9  | KD-1-0009 | ベースフレーム       | 1  |    |             |
| 10 | KD-1-0010 | リング           | 2  |    |             |
| 11 | KD-1-0011 | フレーム取付ピン      | 2  |    |             |
| 12 | KD-1-0012 | 刃ホルダ          | 2  |    |             |
| 13 | KD-1-0013 | 刃取付ピン         | 2  |    |             |
| 14 | KD-1-0014 | M12 六角ボルト     | 8  |    | ワッシャ、ナット    |
| 15 | KD-1-0015 | ベーススタンド       | 1  |    |             |
| 16 | KD-1-0016 | 前刃            | 1  |    |             |
| 17 | KD-1-0017 | 先端刃           | 1  |    |             |
| 18 | KD-1-0018 | M16 サラキャップボルト | 2  |    |             |
| 19 | KD-1-0019 | 後刃            | 1  |    |             |
| 20 | KD-1-0020 | サイドカッター       | 1  |    |             |
| 21 | KD-1-0021 | M12 サラキャップボルト | 3  |    | ワッシャ、ナット    |
| 22 | KD-1-0022 | 押上刃           | 1  |    |             |
| 23 | KD-1-0023 | M16 ネカクボルト    | 2  |    | ワッシャ、ナット    |
| 24 | KD-1-0024 | 押上プレート        | 1  |    |             |
| 25 | KD-1-0025 | M8 スリックボルト    | 4  |    | ワッシャ、ナット    |
| 26 | KD-1-0026 | 油圧シリンダ        | 1  |    |             |
| 27 | KD-1-0027 | チェックバルブ       | 1  |    |             |
| 28 | KD-1-0028 | 油圧ホースA        | 1  |    | 3/8、500mm   |
| 29 | KD-1-0029 | 油圧ホースB        | 1  |    | 3/8、1,950mm |
| 30 | KD-1-0030 | 油圧ホースC        | 1  |    | 3/8、2,050mm |
| 31 | KD-1-0031 | カプラー          | 2  |    | 3/8         |
| 32 | KD-1-0032 | 専用塗料スプレー      | 1  |    | ブルー         |
|    |           |               |    |    |             |
|    |           |               |    |    |             |



Japan International Research Center for Agricultural Sciences

<https://www.jircas.go.jp/>

1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8686 Japan

Tel: +81-29-838-6688, Fax: +81-29-838-6693



Farmers' Council

1A, Ravnaq Street, Tashkent, Uzbekistan

Tel: +99871 267 4094, Fax: +99871 268 1845