

2013年度 共同研究報告書

**環境に配慮した高品質米生産のための
陶管暗渠を用いた土壌水管理システムの開発**

2014年7月

新潟大学農学部

粟生田 忠雄

目 次

要 旨

第 1 章 はじめに	1
1-1 本研究の背景と目的	
1-2 調査地概要	
第 2 章 圃場条件と現地観測	2
2-1 試験圃場の土壌条件	
2-2 暗渠の設置条件	
(1)暗渠の材質と大きさ	
(2)暗渠の埋設条件	
(3)補助暗渠の埋設条件	
(4)暗渠排水口	
2-3 現地観測	
(1)土壌水分	
(2)地下水位	
(3)土壌硬度	
2-4 結果と考察	
(1)土の密度試験	
(2)土の粒度試験	
(3)土壌水分測定	
(4)地下水位変動	
(5)地下水位と土壌水分の関係	
(6)土壌硬度	
第 3 章 地下灌漑試験	23
3-1 地下灌漑概要	
(1)地下灌漑の定義	
(2)地下灌漑の条件	
(3)転換畑における作物栽培のための地下水位管理	
3-2 春の地下灌漑試験	
(1)土壌水分	
(2)用水路側立ち上がり管水位	
(3)排水口水位	
(4)フラッシング効果の検証	
3-3 春の地下灌漑試験の結果と考察	
(1)土壌水分	

(2)用水路側立ち上がり管水位	
(3)排水口水位	
(4)フラッシング効果の検証	
3-4 秋の地下灌漑試験	
(1)土壌水分	
(2)用水路側立ち上がり管水位	
(3)排水口水位	
(4)流量	
3-5 秋の地下灌漑試験の結果と考察	
(1)土壌水分	
(2)用水路側立ち上がり管水位	
(3)排水口水位	
(4)流量	
3-6 地下灌漑試験の結果と考察	
(1)土壌水分	
(2)用水路側立ち上がり管水位	
(3)排水口水位	
第4章 表計算土壌水動態モデルの応用(英文)	49
4-1 Spreadsheet Soil Moisture Dynamics	
(1) Introduction	
(2) Materials and methods	
2.1 Soil layers and soil water management system	
2.2 Observation of groundwater level and soil moisture content	
2.3 Numerical simulation model	
2.3.1 Governing equations	
2.3.2 Boundary conditions	
(3) Results and Discussions	
3.1 Change of groundwater level (Observation)	
3.2 Observed vertical profile of soil moisture	
3.2 Simulated two dimensional stream lines	
(4) Conclusion	
第5章 総合考察と今後の課題	59
謝辞	
引用・参考文献	
補論	63

要 旨

1. 本研究の背景と目的

低平地水田にとって暗渠による余剰水排除は不可欠である。ただし暗渠排水は、設置深度、設置密度、勾配、管内洗浄を含むメンテナンス法など未解明な点が残されており、それら諸問題の解決が必要とされている。

本研究では、新潟県阿賀野市の重粘土の排水不良水田を調査対象とし、地下灌漑可能な陶管暗渠と多機能排水柵による土壌水管理システムの機能を考察した。供試圃場では土壌水分変動、地下水位、暗渠排水量などを定量的に測定し、特に地下灌漑効果を検証した。

2. 材料と方法

2-1. 供試圃場

供試圃場は、1)地下灌漑を可能とする水口と水尻を連結した暗渠の水田(連結暗渠区)、2)水口と水尻が繋がっていない暗渠の水田(従来暗渠区)、3)暗渠のない水田(対照区)、4)地下灌漑を可能とする水尻と用水路側とが暗渠でストレートにつながる暗渠の水田(ストレート暗渠区)の4枚の水田である。地下灌漑はストレート暗渠区(図1)のみで行った。1)~3)の水田は隣接しており、3)と4)の間に調査対象としない1枚の水田がある。土質、用水は共通で、土性はグライ土である。なお、試験圃場の暗渠は上端部が用水路側畦畔まで延長し立ち上げてある。この暗渠上端の立ち上がり管の栓を外し、給水口にできる。また、籾殻を充填した補助暗渠が4m間隔で本暗渠と交差するように敷設されている(2013年10月2日施工)。さらに、このストレート暗渠区の暗渠末端は地表排水と暗渠排水を兼ねた多機能排水柵を設置した。この多機能排水柵は暗渠排水口の立ち上がり管で地下灌漑時に地下水位を制御できる。

2-2. 地下灌漑方法

地下灌漑とは、既設の暗渠排水施設を利用し、地下水位の上昇により作土層への給水、または

地下水面上の毛管作用による心土層内の水位上昇である(農林水産省構造改善局, 2000)。地下灌漑は用水路からの落差のみで供給した。また、多機能排水柵内の立ち上がり管を外すことで排水を行った。

2-3. 現地観測

4月(春)と10月(秋)に地下灌漑試験を行った。いずれの試験でも土壌水分、用水路側立ち上がり管水位、排水口水位を測定し、さらに春にはフラッシング効果の検証、秋には流量測定を行った。秋の試験は補助暗渠施工後に行い、春、秋いずれの試験も作土層は耕起していない状態であった。

2-3-1. 用水路側立ち上がり管水位

畦畔に延長した3つの立ち上がり管の水位をメジャーで測定し、地表面からの相対深さを求めた。測定間隔は変動の大きな排水開始で短くし、徐々に広げた。

2-3-2. 排水の流量

排水水量をバケツが満水になるまでの時間として測定した。

2-3-3. 暗渠管内のフラッシング

暗渠管内に堆積する土砂などを除去するフラッシングの効果を検証するため、春の試験の際に排水を採取した。研究室でpH、浮遊物質質量(SS)、電気伝導度(EC)を測定し、排水の性質の変化を調査した。

3. 結果と考察

3-1. 用水路側立ち上がり管水位の変動

用水路側立ち上がり管水位の変動を図2に示した。秋下では、排水開始から3時間20分で深さ70.7cmまで水位が低下し、春下では排水開始から28時間で71.7cmまで低下した。上については、春は15分から1時間までの間に1.5cm、15分から3時間までの間に10cm水位が低下した。秋は15分から1時間までの間に2.4cm、15分から1時間30分までの間に9.4cm水位低下し

た。排水開始1時間から3時間10分の間に秋上は57.6cm以上, 秋中は58cm, 秋下は63.2cm変化した。一方, 春上は排水開始1時間から3時間の間に8.5cm, 春中は5cm, 春下は13.5cm変化した。以上から, 補助暗渠による地表水の迅速な移動により地下水位低下が早かった。補助暗渠による排水機能が高かったためと考える。

3-2. 排水の流量

排水流量の経時変化を図3に示した。最大値は25分後の約9500 cm³/sであった。排水開始30分~1時間の間の流量が多かった(水しぶき, バケツ振動による測定誤差を含む)。ストレート暗渠区は用水路側に3つの立ち上がり管がありそれぞれが大気と連続しているため, より大気が管内に導入され排水を促したと考える。

3-3. 暗渠管内のフラッシング

pH, SS, ECの測定を行った結果, SSで顕著にフラッシング効果を確認できた(図4)。排水開始15秒後は約900mg/lで, 45秒後には約650 mg/l, 10分後には約20 mg/lと, 排水開始15秒後のおよそ45分の1に減少した。排水開始直後900 mg/lを超えていたSSが4時間後には約40 mg/lまで減少した。このことから, 暗渠管内が洗浄されたと考える。

4. まとめ

補助暗渠により地表水が移動しやすくなり, 迅速に排水が行われたと考える。山地からの伏流水や上部水田からの畦畔浸透を含む粘質土壌水田であっても, 本暗渠と補助暗渠の連結により十分な灌漑・排水機能を確認することができた。また流量調査および排水の性質の検証から, 暗渠管内のフラッシングの効果が検証できた。

謝辞

JA ささかみの田中政喜氏には試験水田の提供, および聞き取り調査にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

農林水産省構造改善局(2000)『土地改良事業計画設計基準・計画「暗渠排水」基準書・技術書』, 農業土木学会, p.127

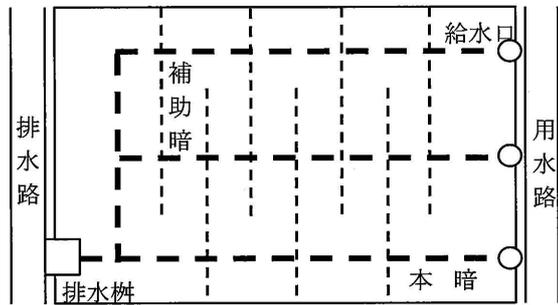


図1 試験圃場平面

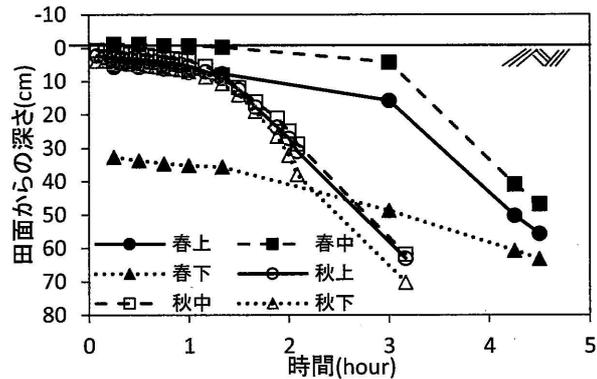


図2 用水路側立ち上がり管水位の経時変化
排水開始を0時間とし, 春は4.5時間後まで, 秋は3.3時間

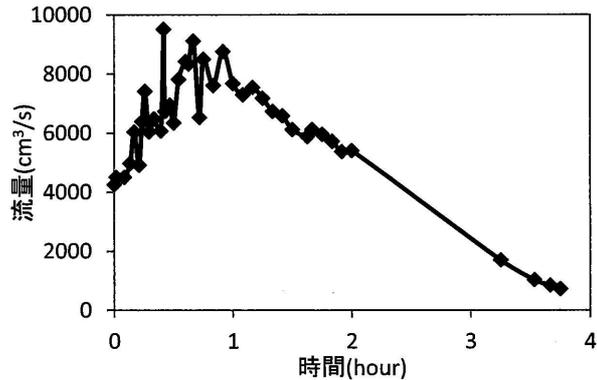


図3 流量の経時変

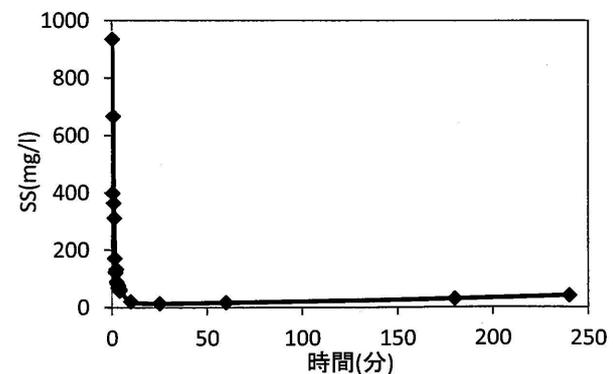


図4 SSの経時変化

第1章 はじめに

1-1 本研究の背景と目的

排水不良水田は、地下水位や土壌水分の管理が困難である。このため、水稻の生産性や農業機械の走行に問題を有することが少なくない。したがって暗渠による余剰水排除は喫緊の課題である。ただし暗渠排水は、設置深度、設置密度、勾配、管内洗浄を含むメンテナンス法など未解明な点が残されている。

そこで本研究では、新潟県阿賀野市の重粘土の排水不良水田において、新しい暗渠システムを用いた土壌水管理システムについて実証試験を行う。なお、陶管暗渠を用いた土壌水管理システムとは、イ)陶管の本暗渠、ロ)本暗渠上流端の立ち上がり管、ハ)本暗渠下流端の多機能排水柵、およびニ)モミガラを充填した補助暗渠、からなる。暗渠上流端の立ち上がり管は、暗渠の埋設位置の特定、地下灌漑の際の給水口、地下排水の際の給気口としての役割を持つ。多機能排水柵はコンクリート製の単純な柵であり、地表排水、地下排水、地下水位調整、および田んぼダム機能を有する(詳細は後述)。供試圃場として排水不良水田を選択したのは、土壌浸水性の低い排水不良水田における土壌水管理についての知見が、排水性の良好な水田には容易に拡張可能と考えたためである。具体的に本研究の供試圃場は、

- 1) 地下灌漑を可能とする水口と水尻を連結した暗渠 (連結暗渠区)、
- 2) 水口と水尻が繋がっていない暗渠 (従来暗渠区)、
- 3) 無暗渠排水 (対照区)、そして
- 4) 地下灌漑を可能とする水尻と用水路側とが暗渠でストレートにつながっている暗渠 (ストレート暗渠区)

の4枚の水田である。本研究はこれまでの成果を踏まえ、特にストレート暗渠区に着目する。また4枚の供試圃場において、土壌水分変動、地下水位、暗渠排水量などを定量的に測定し地下灌漑可能な陶管暗渠を用いた土壌水管理システムの機能を考究する。

1-2 調査地概要

供試圃場がある阿賀野市は、穀倉地帯である。阿賀野市は、新潟平野のほぼ中央に位置し、南側に阿賀野川が流れ、東側に標高1000m級の五頭連峰を背に形成された扇状地に6500ha余りの水田が広がっている。

供試圃場は新潟県阿賀野市山寺にある。この地区は粘質土が多く、昔から焼き物、瓦産業が盛んな場所である。また五頭山系の伏流水があり、特に供試圃場付近は昔馬谷地と呼ばれ、排水性が低く、土壌水分の制御に苦勞を伴っていた。

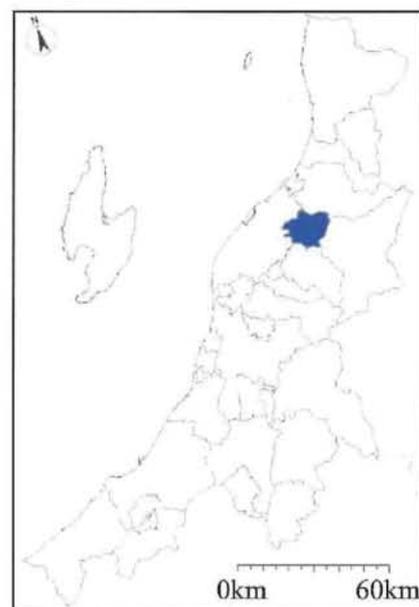


図1-1 新潟県阿賀野市(色塗り部)

第2章 圃場条件と現地観測

2-1 試験圃場の土壌条件

試験圃場は長辺 80m, 短辺 26.5m の 20a 区画の水田である。試験圃場の土壌分類は、中粗粒強グライ土(14B)である(農業環境技術研究所, 2009)。土壌分類解説には、「グライ層(還元層)が表層下 30cm 以内から現れ、地表から 35cm~60cm にある層の土性が砂質~壤質(SiL, L, SL, LS, S)なグライ土である。沖積堆積物からなり、河成沖積平野や旧河床などの地下水位が高く、排水不良なところに分布している。保肥力は小中位で、自然肥沃度は中程度である。還元性が高く根系障害を引き起こしやすい。暗渠排水などの土地改良により、グライ層の出現位置が低下し、中粗粒グライ土もしくは中粗粒灰色低地土に変化している場合もある」と記されている。なお、土壌の各種分析値は表 2-1 の通りである。

表 2-1 土壌分析値一覧(農業環境研究所, 2008)

項目	作土層	緻密度	仮比重	固相率	液相率	気相率	保水性	保水性	有効
	(cm)	(mm)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	pF1.5	pF2.7	水分
							(%)	(%)	(%)
平均値	14.7	7.7	1.03	41.1	47.5	11.5	48.3	37.1	13.0
有効数	98	90	81	79	79	79	74	53	53

pH	pH	EC	全窒素	全炭素	CEC	交換性	交換性	交換性
(H ₂ O)	(KCl)	(mS/cm)	(%)	(%)	(me/100g)	CaO	MgO	K ₂ O
5.8	4.8	0.1	0.2	2.0	12.6	173.9	32.7	20.2
110	87	103	108	108	109	109	109	109

2-2 暗渠の設置条件

従来、暗渠の上端は栓をして地中に埋設することが一般的であった。本供試圃場の連結暗渠区とストレート暗渠区における暗渠上端は、用水路側畦畔まで延長し立ち上がり管を設けた(図 2-1)。この立ち上がり管は塩ビ製で、普段は栓を閉じている。地下灌漑時には、栓を外し給水口、排水時には吸気口としての役割を果たす。このように、陶管暗渠の上端を畦畔で立ち上げることで、暗渠敷設位置を把握でき、地下灌漑を可能とする。この陶管暗渠の敷設方法が、地下灌漑を可能とする土壌水管理システムの特徴の 1 つである。

(1) 暗渠の材質と大きさ

試験圃場に埋設される暗渠は陶管である。陶管は、①対応できる土性の範囲が広い、②給水能力が大きい、③水酸化鉄などが付着しにくい、という特徴を持っている。なお、陶管内は内径 75mm, 長さ 450mm である。陶管の表面には幅 4mm, 深さ 1.5mm の溝があり、管内埋戻し

材や土壌との接触面積を増すように工夫されている(小田製陶実用新案登録第 3168683 号)。

(2) 暗渠の埋設条件

暗渠本管は、勾配 1/500 で埋設され、最も浅い上流部で 66cm、最も深い排水柵入り口で 80cm である。暗渠の施工は 2012 年 4 月 10 日であった。暗渠設置の平面図は図 2-2 に示した。

(3) 補助暗渠の施工条件

本試験圃場(連結暗渠区, ストレート暗渠区)には, 補助暗渠を施工した。補助暗渠施工日は連結暗渠区が 2011 年 10 月 16 日, ストレート暗渠区が 2013 年 10 月 2 日であった。靱殻を充填することで耐久性を維持向上させた。補助暗渠の施工深さは 40cm, 施工間隔は 4m で計 19 本施工した(図 2-2)。

(4) 暗渠の排水口(多機能排水柵)

試験圃場には土壌水管理システムの特徴である多機能排水柵を設置した(図 2-1)。この排水柵の特徴は, 田面排水, 暗渠排水, および地下水位の調整を可能とすることである。効果としては①多機能排水柵の設置により設備が集約され, 工事コストが削減できる, ②水位調整機能を使うことにより, 圃場の汎用化が対応可能, ③地下水位が目で見えて確認できるので, 水位管理が簡便, ④すでに圃場整備したところでも, 多機能排水柵を設置することで地下灌漑が可能となり, 汎用化が可能, ⑤適度な重量があるので, 畦畔内での安定性がある, ⑥間断灌水時に水位を調整することによる節水効果である。また, これまで多くの圃場で用いられてきた塩ビ製の水閘は, 経年劣化で開閉し難くなるという問題を有していた。一方, この多機能排水柵は立ち上がり管の抜き差しで暗渠開閉を可能とし, 水稻生育期間は立ち上がり管内の水位で地下水位を目視可能とする。

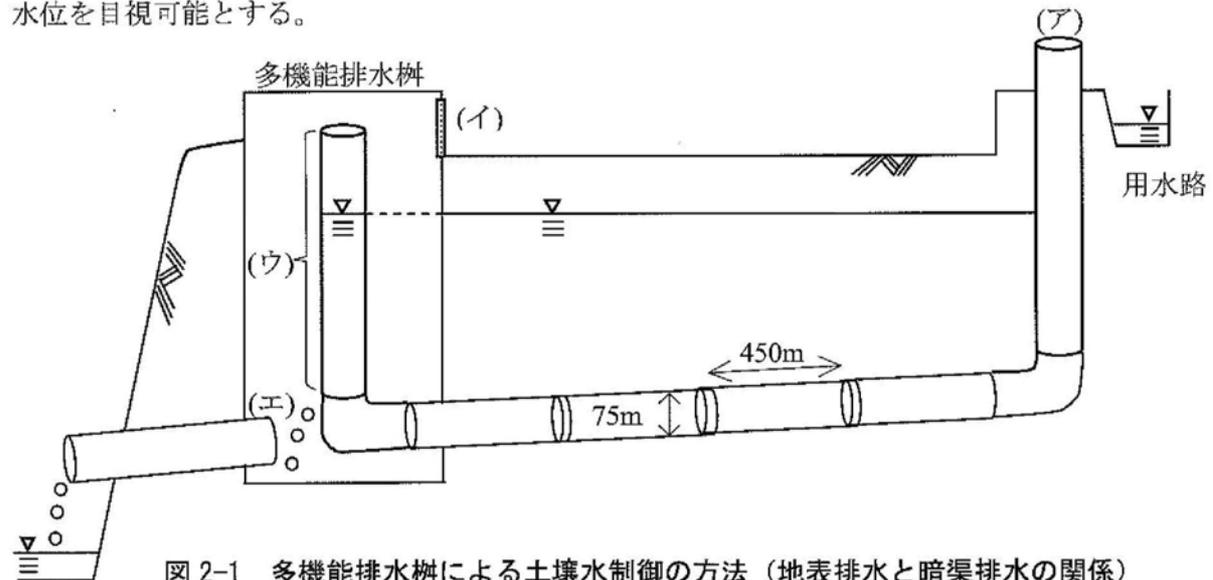


図 2-1 多機能排水柵による土壌水制御の方法(地表排水と暗渠排水の関係)

排水路

- (ア) : 暗渠上流端の立ち上がり管(地下灌漑の給水口, 排水時の大気連続)
- (イ) : 地表水の制御板(地表排水時に開ける)
- (ウ) : 地下水位制御用の立ち上がり管(落水時には取り除く)
- (エ) : 暗渠排水口(落水時に放流)

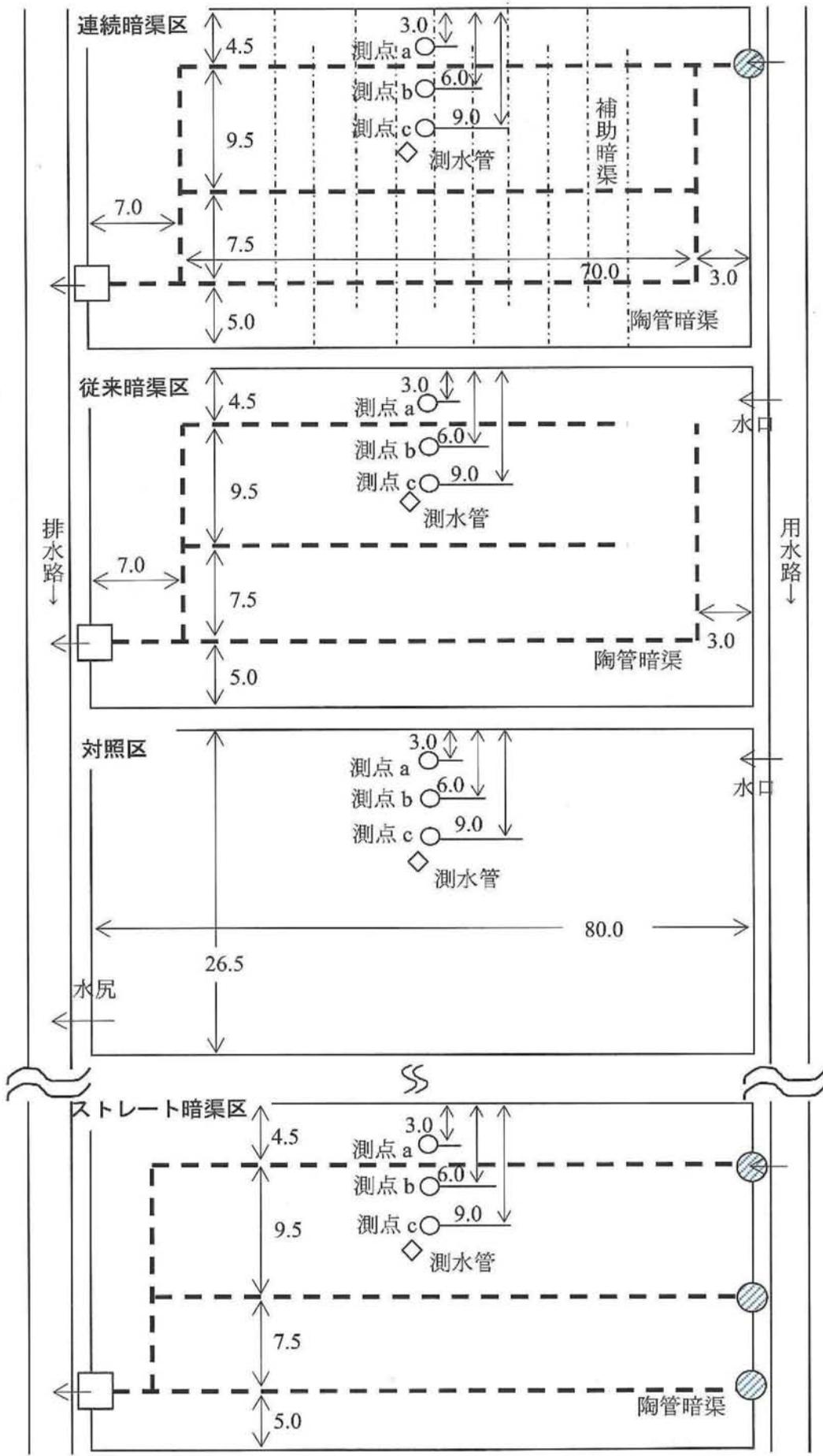


図 2-2 試験圃場平面図(単位 : m)

連結暗渠区：給水から排水まで連続した新暗渠システム(排水口は W 排水樹, 本暗渠勾配 1/500)

従来暗渠区：従来の暗渠システム (排水口は W 排水樹, 本暗渠勾配 1/500)

対照区： 無暗渠

ストレート暗渠区：水尻と用水路側とが暗渠でストレートにつながるシステム (排水口は多機能排水樹, 本暗渠勾配 1/500)

- △ : 土壌硬度測定地点
- : 土壌水分測定地点
- ◇ : 地下水位測定測水管
- ⊙ : 暗渠立ち上り管 (地下灌漑の給水口, 排水時の大気連続)

2-3 現地観測

(1) 土壌水分

1) 土壌水分測定装置

土壌水分の測定には、深さの異なる 6 点において土壌の鉛直水分分布を同時に測れるプロファイル土壌水分計(Delta-T 社, PR1)を用いた。PR1 は、電氣的に土壌水分を測定する装置である。以下に PR1 の特徴を示す。PR1 は一対のステンレスリングの電子センサーの付いた、25mm 径のロッドで構成される。PR1 に入力すると、100MHz の信号を出し、この信号が一対のステンレスリングにかかり、電磁場が創られて土壌周囲 100mm に広がる。リングの周りの土壌水分でその誘電特性が決まる。その誘電特性により、100MHz 信号の一部が戻されて、反射された信号が印加した信号と合成され、定在波を創る。その定在波の電圧が土壌水分量として測定される。このようにプロファイル土壌水分計は 10, 20, 30, 40, 60, および 100cm 深さの合計 6 点における土壌水分を同時測定できる。

2) 土壌水分測定方法

供試圃場に予めガラス繊維製のアクセスチューブ(長さ 1154mm, 内径 26mm)を埋設した。アクセスチューブは湛水の侵入を防ぐため、地表面から 28~35cm 立ち上げた。このアクセスチューブに PR1 を挿入し、土壌水分の鉛直分布を測定した。土壌水分の水分変化による膨潤、収縮による地表面の変動はあるが、アクセスチューブの埋設深は約 85cm であった。このため試験圃場における土壌水分測定深度は約 10cm, 30cm, 70cm とした。この土壌水分センサーは自動計測には適していないので、週一回現地に行き手動計測した。

4 枚の供試区における土壌水分の測定の空間的配置は、比較検討できるようにそれぞれ統一した(図 2-2)。上流側に測点を多く配置したのは、上側の圃場からの畦畔浸透による余剰水分が多く抑制が必要なためである。下流側は下の圃場への横浸透のため、余剰水分は少なく乾きやすかった。試験圃場の測点の数は 12 である。連結暗渠区に 3 点、従来暗渠区に 3 点、無暗渠区に 3 点、およびストレート暗渠区に 3 点である。各測点の配置は、それぞれ測点 a : 上流側長辺畦畔から 3m, 測点 b : 上流側長辺畦畔から 6m, および測点 c : 上流側長辺畦畔から 9m とした。

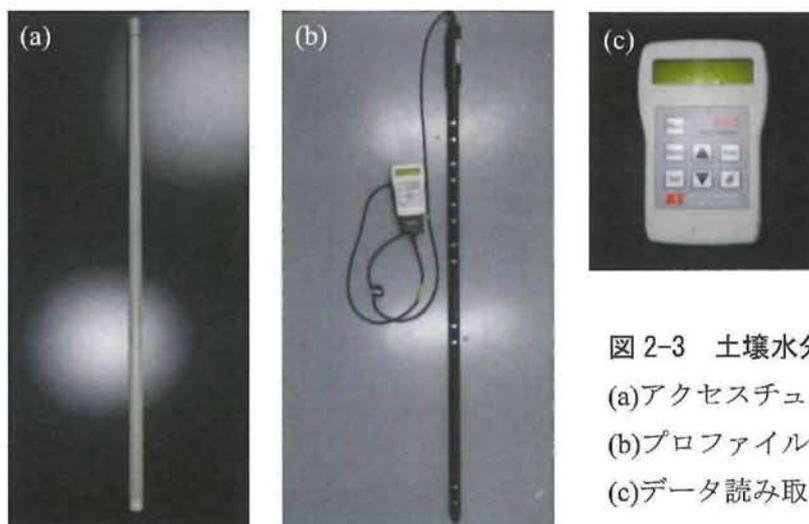


図 2-3 土壌水分センサー一式

(a)アクセスチューブ

(b)プロファイルプローブ(Delta-T 社, PR1)

(c)データ読み取り器(Delta-T 社, HH2)

3) 土壤水分センサーの較正

本研究で用いた土壤水分センサー(PR1)は、畑状態の粗粒土で用いることを前提に開発されたものであるため、水田の水分測定には目盛設定を必要とする。そこで、較正試験を行い電圧(mV)と体積含水率 θ (%)との関係を求めた。体積含水率は土壤水分の体積 V_w と土の全体積 V との比を百分率で示したものである。

体積含水率 θ は、

$$\theta = w \cdot \rho_d$$

で表せる。ここに、 w : 含水比(%), $w = m_w/m_s \times 100$, ρ_d : 乾燥密度(g/cm^3), $\rho_d = m_s/V(\text{g}/\text{cm}^3)$, m_s : 固体重量(g), m_w : 水の重量(g), V : 体積(cm^3) である。

4) 較正試験手順(湿潤過程)

PR1 で電圧を測定し、含水比測定のため表面から深さ 2~3cm の深さの土を 3 点採取した。電圧の測定は 60cm, 100cm のセンサーが地中になるようにした。またそれぞれ 120° ずつ回転させ、各センサーで 3 回ずつ測定した。その後、脱塩水を 500ml 加え、試料中に水分が一定になるまで(4~6 日)放置した。供試体の水分が飽和状態(400mV 程度)になるまで電圧、含水比を測定し、脱塩水を 500ml ずつ段階的に加えた。

較正試験は、昨年と同様の装置を用いた。較正試験装置は内径 28cm, 高さ 27.5cm のバケツの底面に穴を開け、アクセスチューブをセットし、耐水性ボンドで充填して作製した。

測定した結果、乾燥密度 ρ_d は $0.825(\text{g}/\text{cm}^3)$ であった。また測定した含水比から体積含水率の値を求めた。この結果から較正曲線を作成した(図 2-5)。しかし現地で乾燥密度を測定した結果、 $0.676(\text{g}/\text{cm}^3)$ となった。較正試験は現地と異なる乾燥密度で行ったため、土壤が膨潤し難い状態となった。このため今年度の較正試験は参考とした。



図 2-4 較正試験(湿潤過程)の様子
脱塩水 4000ml 投入

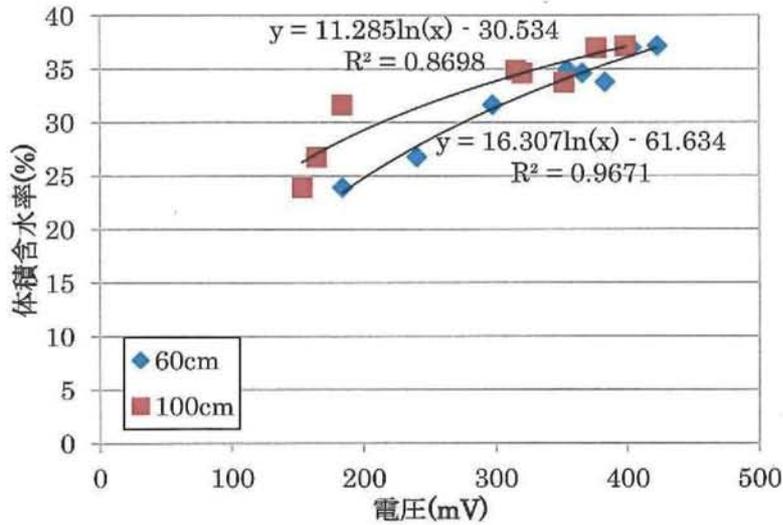


図 2-5 土壌水分計 (PR1) の較正曲線 (湿潤過程)

5) 較正試験 (乾燥過程)

湿潤過程での較正試験終了後、湿潤過程と同様の土壌、および較正試験装置を用いて乾燥過程の較正試験を行った。バケツ内の土壌に布を差し込み、毛細管現象によりバケツ内部の乾燥を進めた。蒸発する土壌水分量の減少は、バケツ全体の湿潤重量を電子天秤で量った。バケツの質量と PR1 の測定は 3~10 日に 1 回行った。乾燥が進み電圧が小さくなったら測定をやめ、バケツから土壌を取り出し、体積含水率、乾燥密度を求めた。最終体積含水率から減少したバケツの質量を足し合わせることで各測定時の含水比を求めた。湿潤重量は 2 台の電子天秤で測定した。

較正曲線を図 2-6 に示した。測定は乾燥過程であったため、ヒステリシスにより湿潤過程と傾きの異なる較正曲線となった。湿潤重量測定の際、バケツを置く位置によって測定値にばらつきが大きかった。そのため乾燥過程の較正結果も採用せず、昨年の較正試験データをもとに分析を進めた。

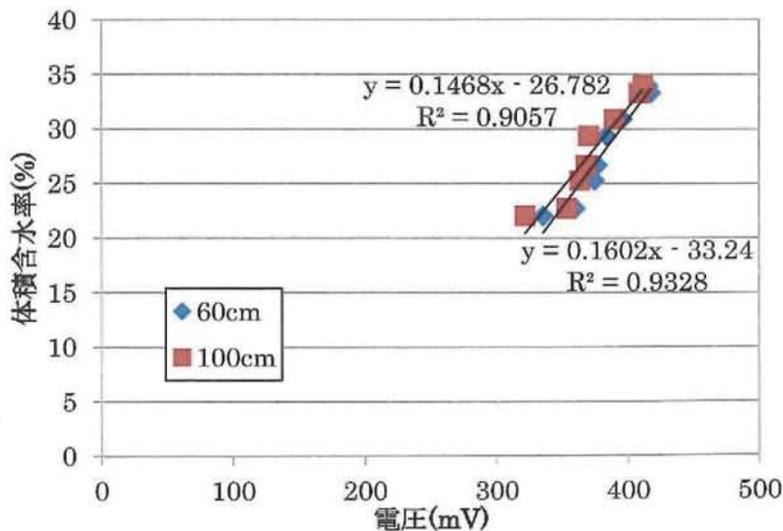


図 2-6 土壌水分計 (PR1) の較正曲線 (乾燥過程)

(2) 地下水位

地下水位は、長辺畦畔から 9m 地点に測水管を設置し、測定した(4 枚の圃場における土壌水分の測点 c に隣接している)(平面図は図 2-2)。測水管の鉛直断面図を図 2-7 に示した。この測水管は塩ビ製の円管(長さ 150cm, 内径 8.3cm)で地表面下 100cm になるように埋設した。測水管の先端部には、内径 1.0cm の孔を深さ 90cm から 60cm まで、10cm 間隔で 4 方向に計 16 か所穿ち、地下水と連続させた。この測水管にデータロガー付水位計(光進電気, DL/N70 型)を自由水面下に沈設し、地下水位を自動計測した。計測期間は 7 月 26 日 13 時から 9 月 10 日 11 時までで、計測間隔は 30 分とした。また、確認のため土壌水分と同日に地下水位をメジャー(Tajima 社, L16-35)で手動計測した。

自動計測のデータは地下から水面までの高さを計測したため、地表面からの高さに換算する必要があった。そこで、手動計測した地下水位をもとに較正曲線を作成し、自動計測と手動計測の関係を明らかにした。水深の手動計測値(m)を横軸に、自動計測値(m)を縦軸にとった。

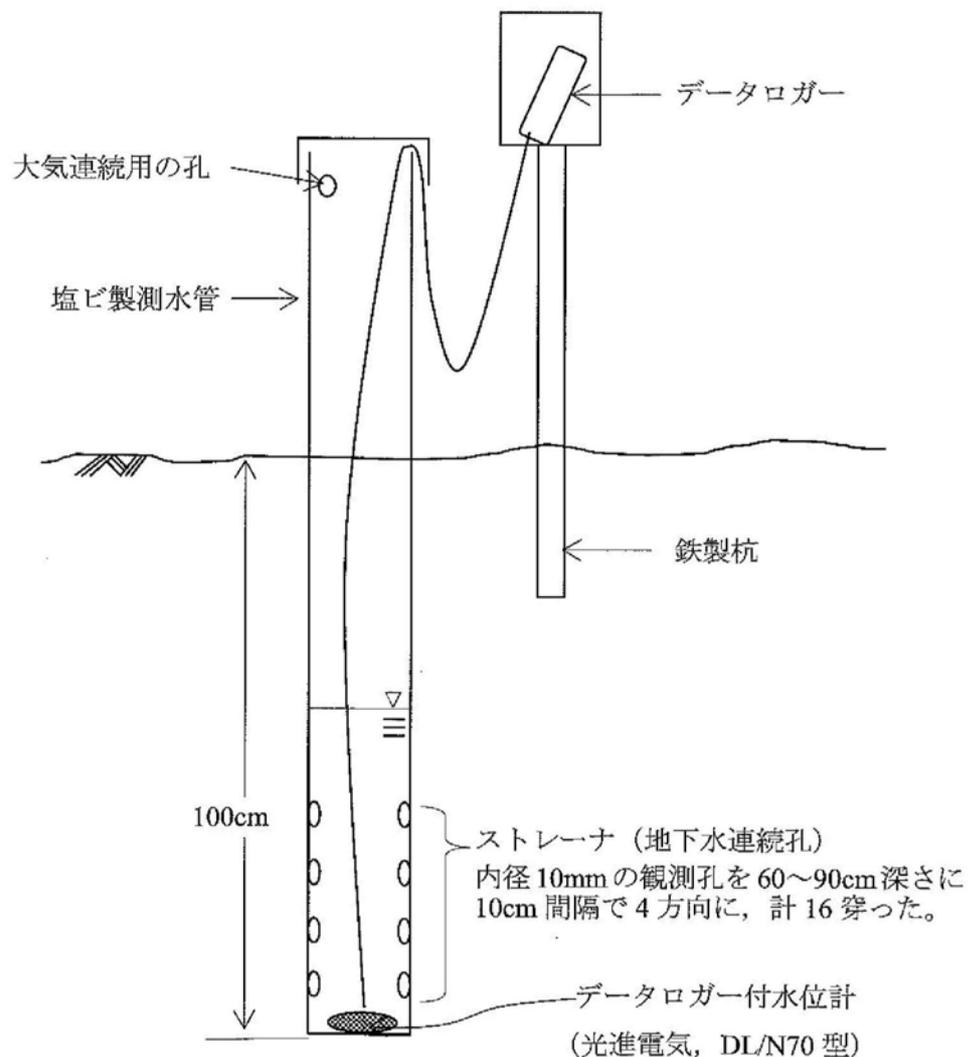


図 2-7 測水管の設置断面図

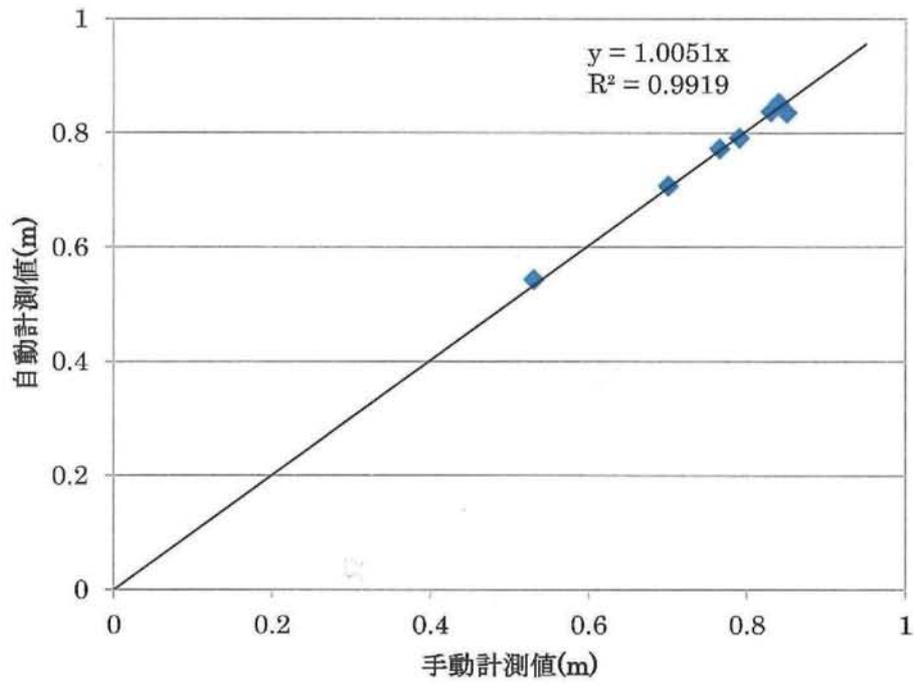


図 2-8 連結暗渠区 水位計の較正曲線

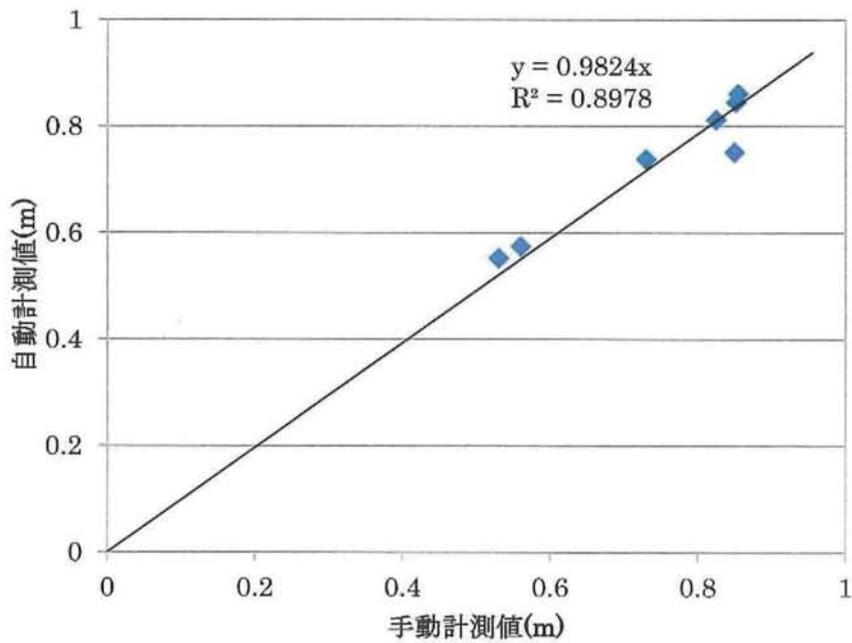


図 2-9 従来暗渠区 水位計の較正曲線

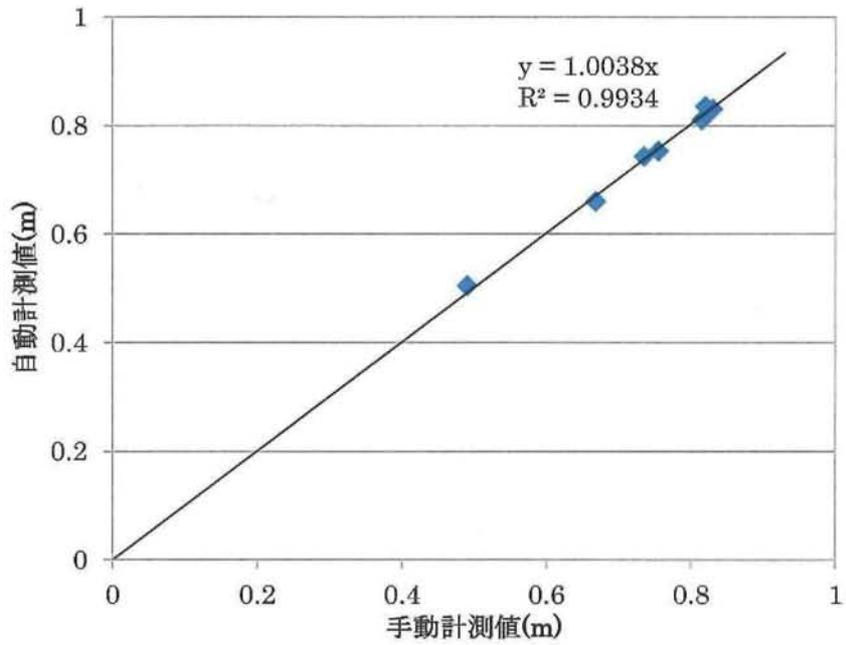


図 2-10 対照区 水位計の較正曲線

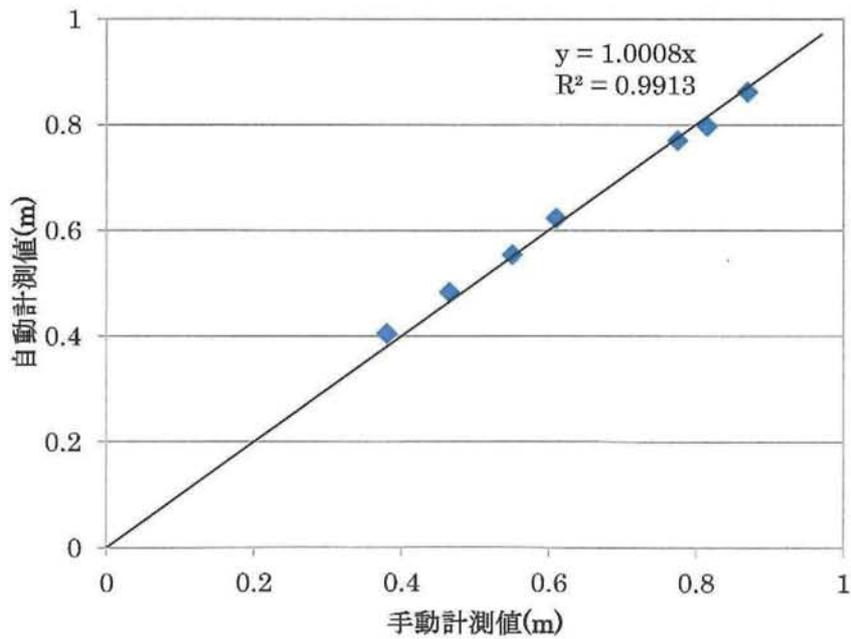


図 2-11 ストレート暗渠区 水位計の較正曲線

(3) 土壌硬度

地下灌漑を可能とする暗渠排水システムは、余剰な土壌水を排除し、水田の表層土を硬化させる。ここでは、昨年と同様の方法で、稲刈り時の農業機械の走行性(トラフィカビリティー)を土壌硬度(コーン指数)で判断した。土壌硬度の測定器は貫入式土壌硬度計(大起理化, DIK-5521), コーン最大の断面積は 6.0cm^2 , 先端角 30° (図 2-12) を用いた。土壌硬度, または地耐力は, 地表面から深さ 0cm, 5cm, 10cm, および 15cm の 4 点の値を平均し, コーン指数(単位 ; MPa) として評価した。

測点は稲刈り時にコンバインの巡回する部分(長辺畦畔, 下流側短辺畦畔からそれぞれ 5m の位置)とした。この測点は, 上流側長辺畦畔の巡回部であり畦畔浸透のため, 常に土壌水分が高い。この乾燥し難い点で土壌硬度が高ければ, 圃場全体のトラフィカビリティーは十分である。測定は稲刈り前に 1 回(9月10日), 稲刈り後に 1 回(9月13日)行った。



図 2-12 貫入式土壌硬度計(大起理化 DIK-5521)

表 2-2 貫入式土壌硬度計 (DIK-5521) 諸元

測定可能	147~2451kPa (コーン断面積 2.0cm^2)
土壌硬度範囲	49~814kPa (コーン断面積 6.0cm^2) ←本試験で採用
最大深度	90cm
コーン先端角	30 度
スプリング	490N/50mm (=50Kg/50mm)
記録方式	ドラム自動回転記録式
外形寸法	W250×D110×H1250mm
本体重量	約 3kg

2-4 結果と考察

(1) 土の密度試験 (JIS A 1202)

土の密度は、時間変化はほとんど無い。今年、特にストレート暗渠区に着目するため、土壌の基本的性質を試験した。土壌の密度試験は、他の土質試験（粒度試験など）の整理にも用いられ、土の状態を表す基本的な物理量の一つである。土を構成する成分には無機質のケイ酸塩鉱物や石灰質および有機質などがある。たいていの土粒子は無機質の鉱物で構成されている。一般的に無機質の鉱物の密度が $2.5\sim 2.8\text{g/cm}^3$ である。しかし、有機質分で構成される泥炭などの土粒子の密度は $1.4\sim 2.3\text{g/cm}^3$ になる。土の密度からそれを構成する個体部分が鉱物か有機質かをある程度推定することが可能である。密度試験の詳細は補論に記した。

密度試験の結果、試験圃場の土粒子密度は深さ 0~5cm で 2.60g/cm^3 、深さ 10cm で 2.61g/cm^3 、深さ 25cm で 2.73g/cm^3 、深さ 75cm で 2.73g/cm^3 であった。浅い層で密度が小さいのは、肥料成分（有機物）が土粒子に吸着しているためと考える。

(2) 土の粒度試験 (JIS A 1204)

土壌を構成する土粒子径の分布状態を粒度という。この粒度は、土壌の保水性、透水性などを把握するうえで重要である。一般に粒度は横軸に粒径を、縦軸にその粒径より小さい粒子の質量百分率を示した粒径加積曲線で表される。

試験圃場の土の粒度分析について述べる。11月14日にオーガーによってサンプルを採取した。採取した深度は 0~5cm、10cm、25cm、75cm の4つである。これらのサンプルを沈降分析法によって粒度を求めた。

国際土壌学会の粒径区分に従って、砂（粗砂： $2.0\sim 0.2\text{mm}$ 、細砂： $0.2\sim 0.02\text{mm}$ ）、シルト（粒径 $0.02\sim 0.002\text{mm}$ ）、粘土（粒径 0.002mm 以下）と分類した。粒径加積曲線から砂、シルト、粘土の割合を求め、三角座標で土質を特定した。その結果を表 2-4 に示す。土壌情報閲覧システム（農業環境技術研究所、2009）では、試験圃場における土壌分類は砂質-壤質（SiL, L, SL, S）なグライ土である。本実験の結果、深さ 25cm、75cm では閲覧システムに比べ、シルトの割合がより小さく、粘土の割合が大きかった。本実験で得られた粒度の方が土壌情報閲覧システムのものよりも細かくなった。閲覧システムの土壌分類は、深さ方向にどれだけサンプリングしたか不明であること、全国の土壌を網羅的に示すリストであることから、あくまで目安として考える。いずれにせよ供試ほ場は、透水性の低い排水不良水田である。

表 2-3 砂、シルト、粘土の含有率と土性分類

深さ(cm)	0~5	10	25	75
含有率 (%)				
砂	15.4	12.6	11.5	13.8
シルト	49.7	55.8	33.9	28.8

粘土	30.1	27.9	53.3	56.4
合計	95.2	96.3	98.7	99
土性分類	SiC:シルト質埴土	SiC:シルト質埴土	HC:重埴土	HC:重埴土

(3) 土壌水分測定

各供試圃場の測点を以下のように命名した (図 2-2)。

測点 a : 上流側長辺畦畔から 3m (本暗渠(A)から上流側 1.5m)

測点 b : 上流側長辺畦畔から 6m (本暗渠(A)から下流側 1.5m)

測点 c : 上流側長辺畦畔から 9m (本暗渠(A)と本暗渠(B)のほぼ中間)

(ア) 連結暗渠区 (図 2-13)

土壌水分の鉛直分布は、全ての測点で変化がほとんどなかった。作土、耕盤、心土のいずれにおいても測定期間中ほぼ変化なく飽和状態だった。土壌水分は変動がなくほぼ一様であったため、土壌水分と暗渠本管との距離に関係性が見られなかった。

(イ) 従来暗渠区 (図 2-14)

土壌水分の変動は、全ての測点でほとんどなかった。従来暗渠区のすべての測点および深さにおいて、測点 b の心土層は土壌水分がやや低いまま変化がなかった。

(ウ) 対照区 (図 2-15)

土壌水分はどの測点においても作土が最も大きく、耕盤、心土の順であった。心土の土壌水分が小さく、測点 b、測点 c では多少の変動も見られた。対照区においては暗渠がなくても稲作が行われていることもあり、耕盤から心土にかけて排水性が良いといえる。粒度の大きい土壌から成っているか、水の抜けやすい水みちがあると考え。他の 3 枚の供試圃場と一連の水田であることから土壌成分はほぼ同じと考えられるため、水みちの存在の可能性が高いと考える。

(エ) ストレート暗渠区 (図 2-16)

他の 3 枚の供試圃場に比べ、心土の土壌水分の変化が見られた。特に測点 b、測点 c の変動が大きかった。暗渠により土壌水分の変動が行われやすかったと考える。

測定期間を通して、どの測点のどの深さにおいても土壌水分の大きな変動は見られず、ほぼ飽和状態であった。測定の前日や当日に降雨があったことが多く、その影響を受けたと考える。しかし 8 月 7 日から 9 日まで降雨がなかったが、8 月 9 日の土壌水分はどの測点においても低いというわけではなかった。土壌水分が低下するには降雨のない一定程度の期間が必要だと考える。

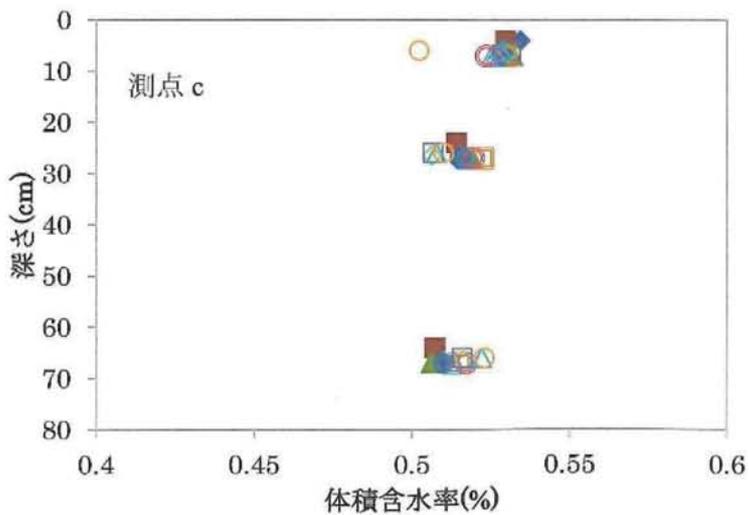
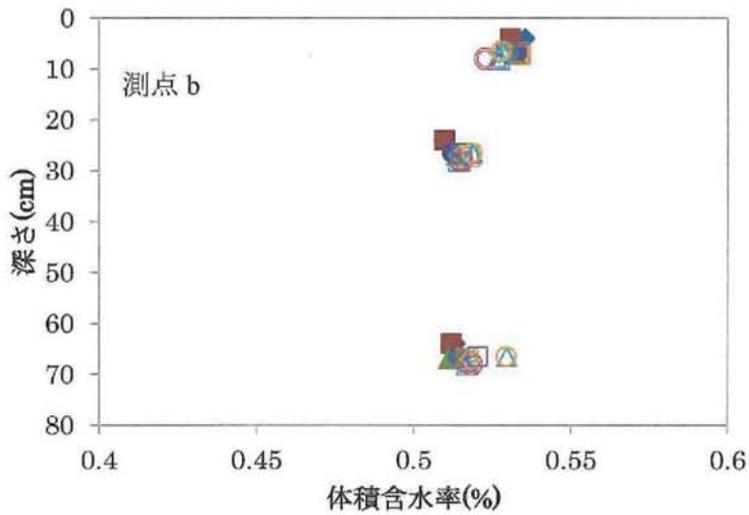
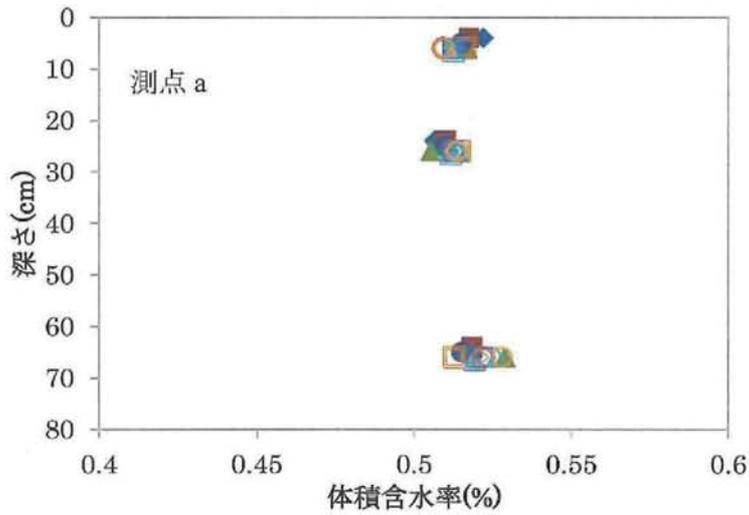


図 2-13 連結暗渠区の
土壌水分の鉛直分布

上から、測点 a, 測点 b, 測点 c

- ◆ 6月28日
- 7月4日
- ▲ 7月11日
- 7月18日
- ◇ 7月23日
- 7月26日
- △ 7月31日
- 8月9日
- ◇ 8月24日
- 8月30日
- △ 9月6日
- 9月10日

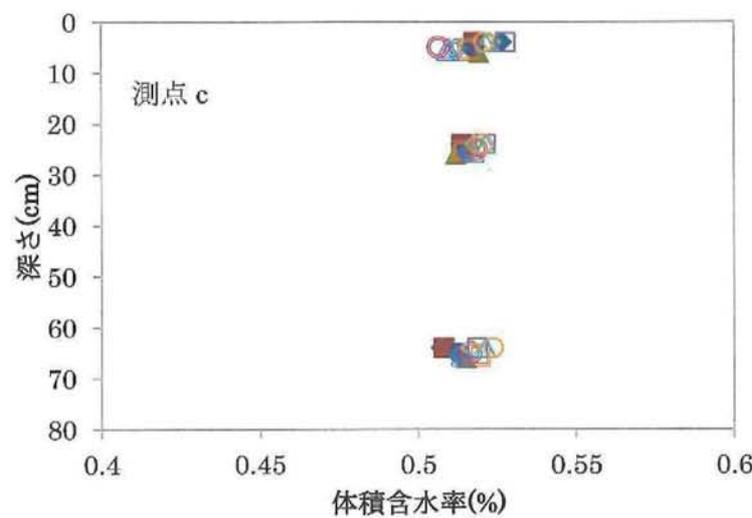
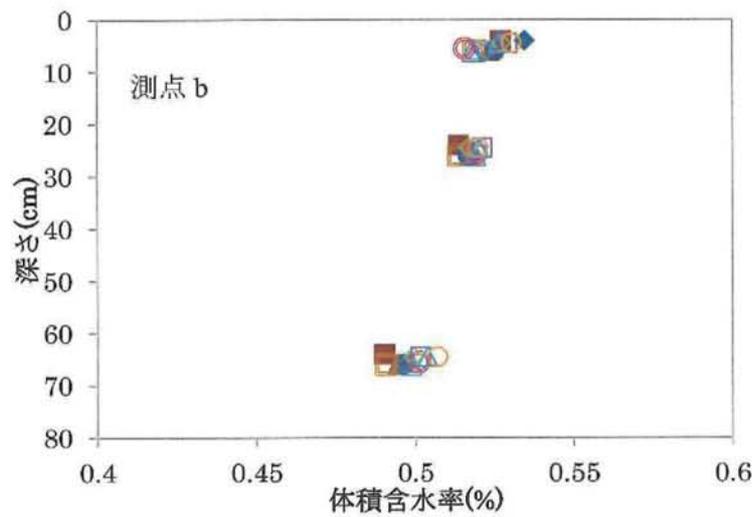
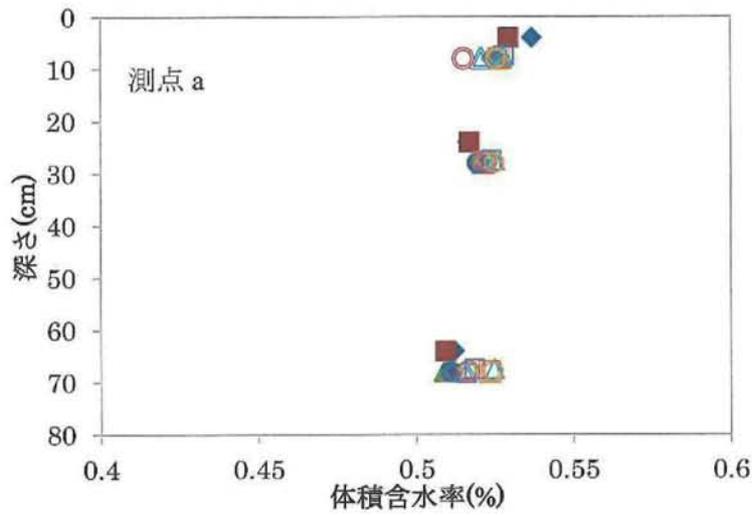


図 2-14 従来暗渠区の
土壌水分の鉛直分布

上から, 測点 a, 測点 b, 測点 c

- ◆ 6月28日
- 7月4日
- ▲ 7月11日
- 7月18日
- ◇ 7月23日
- 7月26日
- △ 7月31日
- 8月9日
- ◇ 8月24日
- 8月30日
- △ 9月6日
- 9月10日

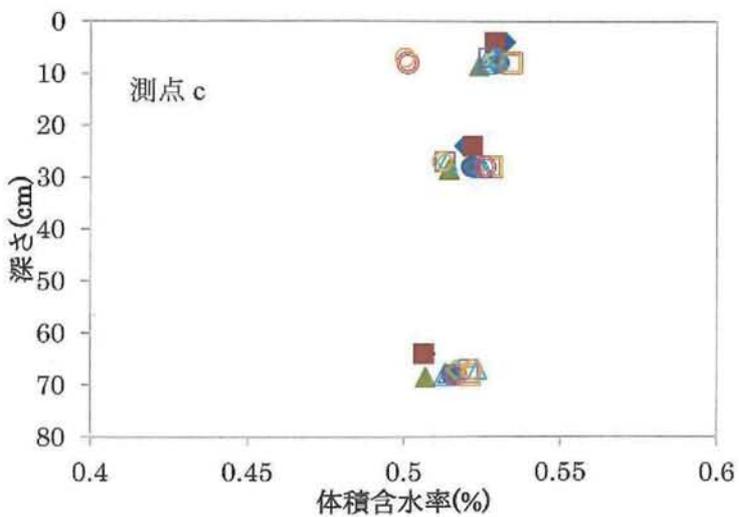
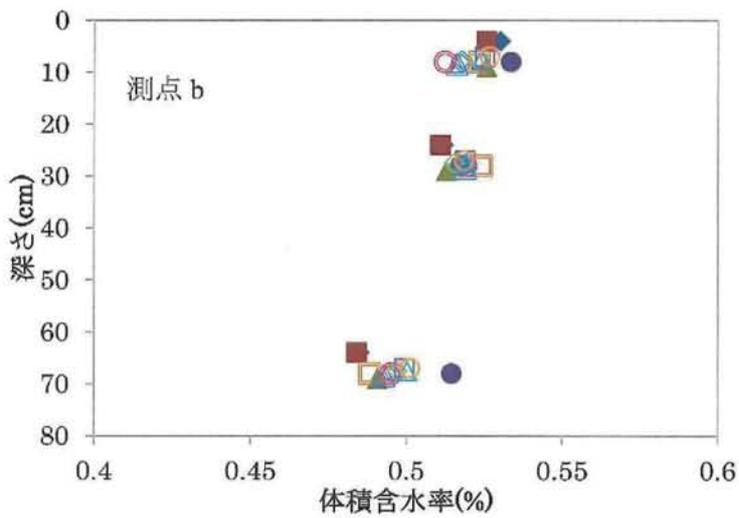
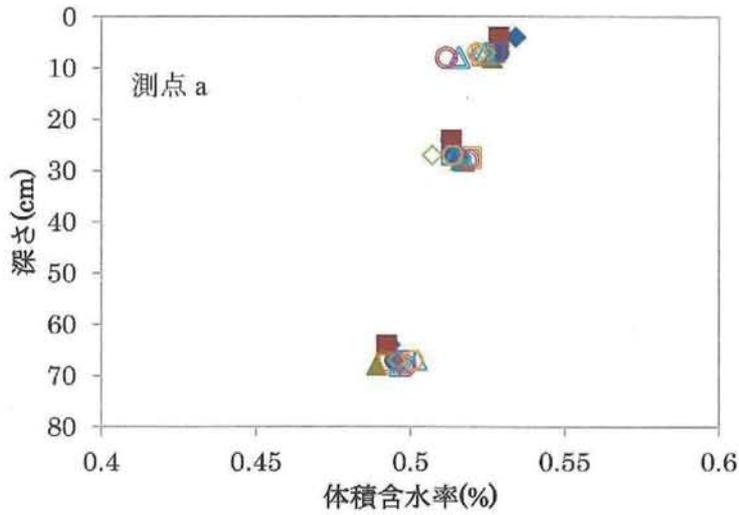


図 2-15 対照区の土壌水分の鉛直分布
上から, 測点 a, 測点 b, 測点 c

- ◆ 6月28日
- 7月4日
- ▲ 7月11日
- 7月18日
- ◇ 7月23日
- 7月26日
- △ 7月31日
- 8月9日
- ◇ 8月24日
- 8月30日
- △ 9月6日
- 9月10日

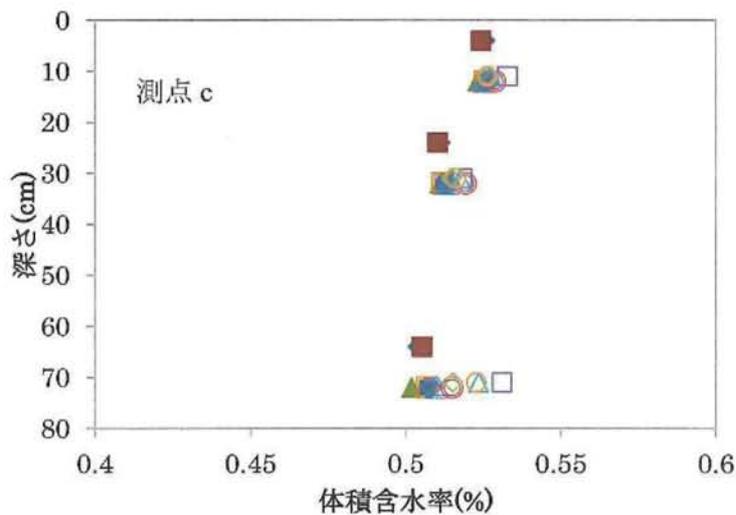
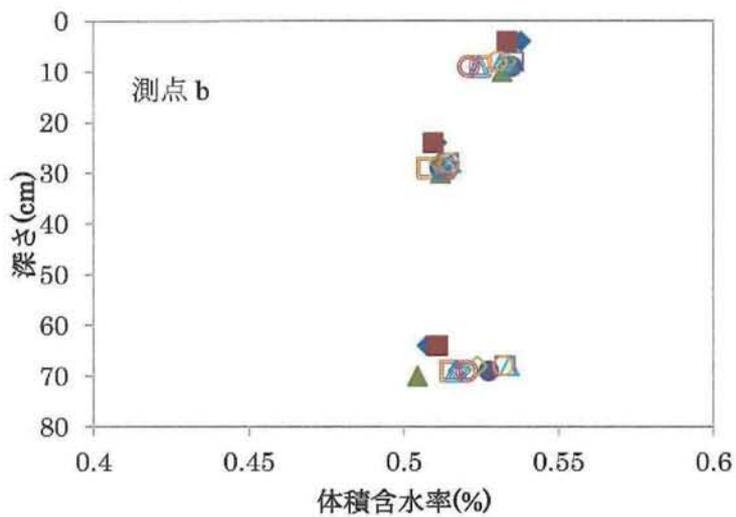
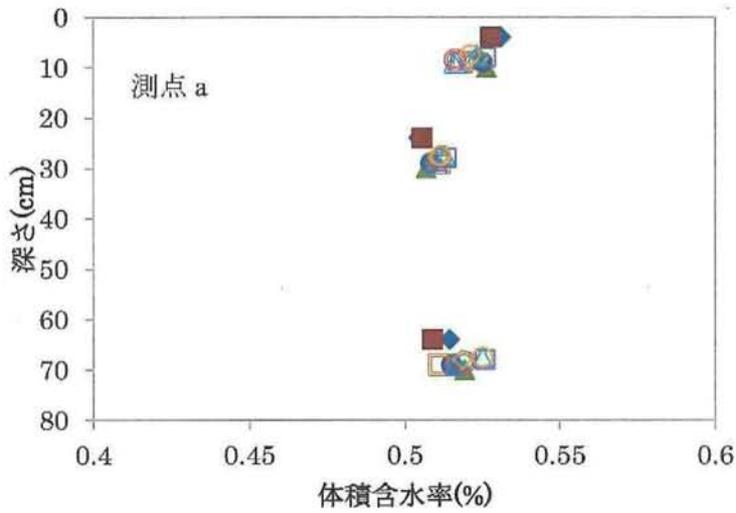


図 2-16 ストレート暗渠区の
土壌水分の鉛直分布

上から、測点 a, 測点 b, 測点 c

- ◆ 6月28日
- 7月4日
- ▲ 7月11日
- 7月18日
- ◇ 7月23日
- 7月26日
- △ 7月31日
- 8月9日
- ◇ 8月24日
- 8月30日
- △ 9月6日
- 9月10日

(4) 地下水位変動

水稻作付中の中干し後から稲刈り直前までの試験圃場における地下水位変動を図 2-17 に示した。中干し期間中(6月22日~29日)には測定することができず、中干しによる地下水位の低下

は分からなかった。稲刈り当日(9月13日), 地下水位は地表面を基準としてそれぞれ連結暗渠区 25cm, 従来暗渠区 37cm, 対照区 53cm, ストレート暗渠区 45cm 深さであった。前日(12日)の降雨 6mm を考慮すると, 連結暗渠区以外の3圃場は設計基準(農林水産省, 2000)の作物生育にとって望ましい土地利用区分別地下水位(計画地下水位)であった。連結暗渠区に関してはこの基準を満たさなかったが, 稲刈り作業が滞りなく行われていた。前日の降雨による地下水位の上昇は地耐力を著しく低下させることはなかった。

表 2-4 土地利用区分別地下水位および低下日数

土地利用形態	降雨後 2~3 日の地下水位	常時地下水位 (降雨後 7 日以内)
水田(落水後)	地表面下 30~40cm	地表面下 40~50cm
水田の畑利用	地表面下 40~50cm	地表面下 30~60cm

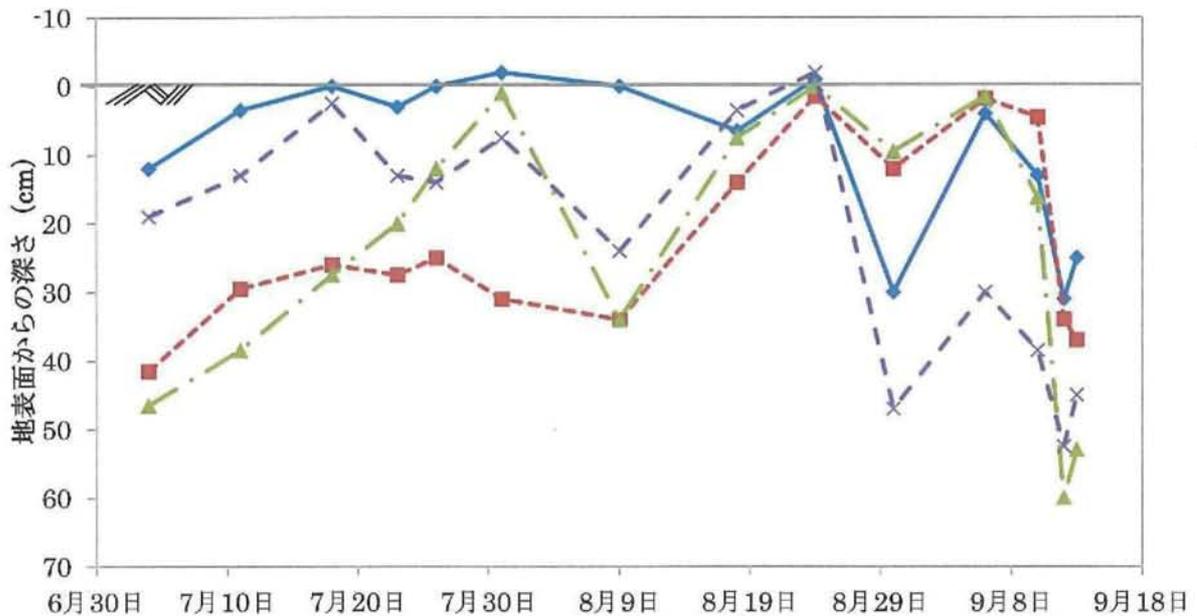


図 2-17 各圃場における地下水位の変動

測定は 7 月 4 日から 9 月 13 日

— 連結暗渠区 - - - 従来暗渠区 ····· 対照区 - · - · ストレート暗渠区

図 2-18 に連結暗渠区, 従来暗渠区, 対照区, およびストレート暗渠区の地下水位変動の連続観測値と降雨の関係を示した。降雨のデータは調査地から南西に約 1km の位置にある観測所, 大室の雨量を用いた。

8月16日の給水前後で水位変動の形が異なった。17日以降は3日に1回ほどのペースで急激な水位上昇、水位低下が繰り返された。降雨直後に水位が上昇することが多かった。変動幅は連結暗渠区が約25cm、従来暗渠区は約10cm、対照区は約50cm、ストレート暗渠区は約20cmであった。対照区は排水性が高いことが確認された。暗渠埋設圃場の8月17日以降の最低水位が、連結暗渠区は地表面下46.6cm、従来暗渠区は地表面下31.9cm、ストレート暗渠区は地表面下65.3cmであった。このことから、ストレート暗渠区は最も地下水位を低く保つことができた。

暗渠の埋設された3枚の供試水田(連結暗渠区、従来暗渠区、ストレート暗渠区)における8月6日の降雨後の地下水位変化量を表2-5に示した。降雨以降最も地下水位が高かった時点での水位、降雨から1日後、3日後、7日後の水位を示した。降雨後7日までの水位差は連結暗渠区が32.7cm、従来暗渠区が17.7cm、ストレート暗渠区が42.2cmであった。1日後、3日後においてもストレート暗渠区の低下量が一番大きかった。これらのことから、ストレート暗渠区は地下水位を制御しやすいと考える。

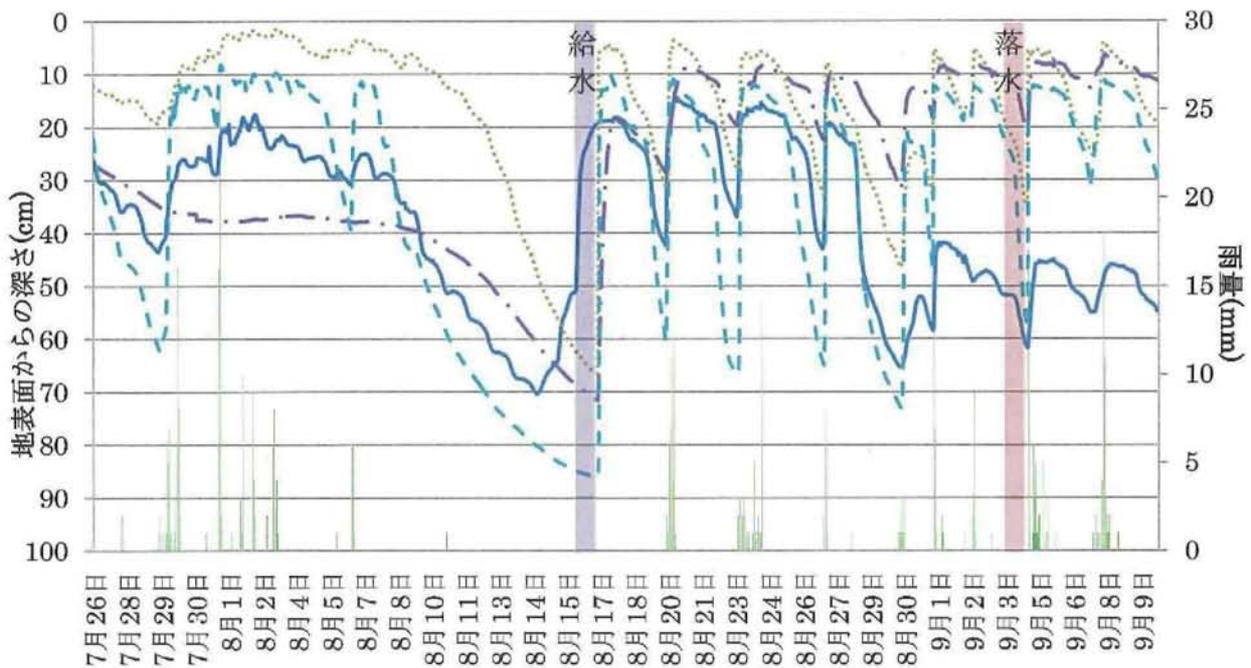


図2-18 各圃場における地下水位変動と降雨量

測定は7月26日13:00から9月10日11:00

..... 連結暗渠区 - - - 従来暗渠区 - . - 対照区 ——— ストレート暗渠区 ■■■ 雨量

表 2-5 降雨以降の水位変化量(単位: cm)

	連結暗渠区	最高水位からの水位差	従来暗渠区	最高水位からの水位差	ストレート暗渠区	最高水位からの水位差
降雨直後の最高水位	3.7		37.9		25.1	
降雨1日後	5.5	1.8	38.2	0.3	29.8	4.7
降雨3日後	8.6	4.9	40.3	2.4	43.6	18.5
降雨7日後	36.4	32.7	55.6	17.7	67.3	42.2

地下水位はそれぞれ地表面からの深さ

ストレート暗渠区での8月6日の降雨以降の水位低下の変動が、他の3圃場は曲線的に変化したのに対しぎざぎざと段階的であった。これまでの研究(粟生田, 2013)で、連結暗渠区における地下水位と潮汐変動との関係が示唆されていることから、連結暗渠区およびストレート暗渠区におけるそれらの関係を図2-19に示した。赤い丸は地下水位と潮位の山と谷を一部抜き出して示したものである。例えば8月7日の17時にストレート暗渠区と連結暗渠区の地下水位が谷となっているのに対し、7日14時に潮位は山となった。山と山、谷と谷とが毎回重なっているわけではないため、地下水位と潮位との関連性は低いと考えられる。

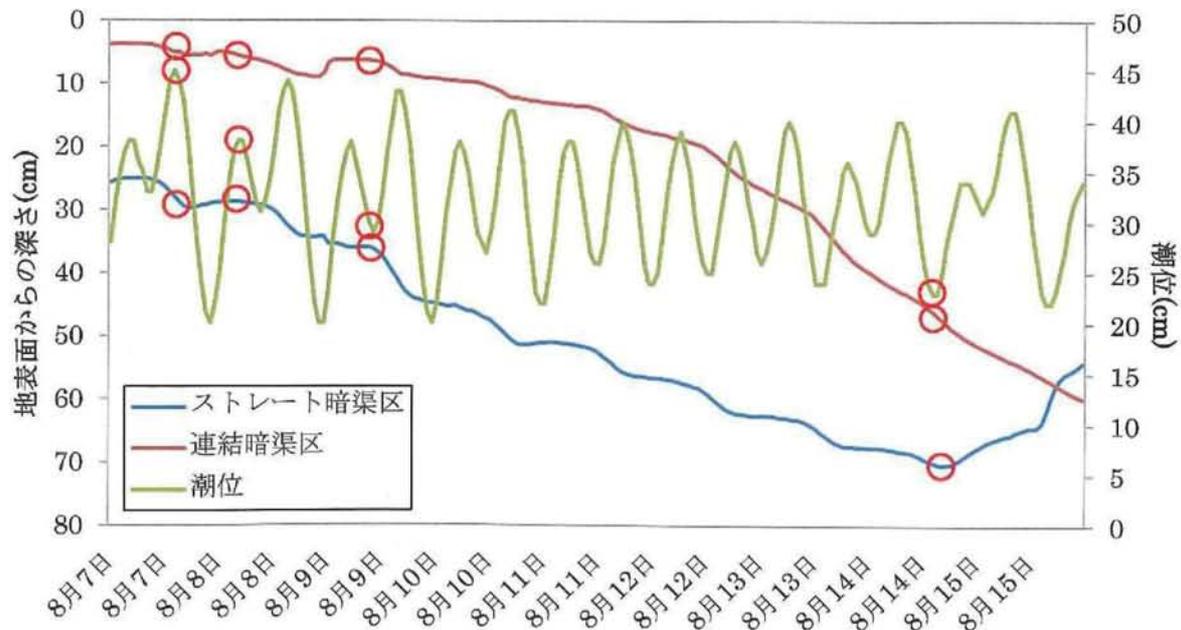


図 2-19 連結暗渠区、ストレート暗渠区における地下水位変動と潮位の関係

期間は8月7日0:00から8月15日23:00

潮汐と地下水位との関係は低いことが明らかになったため、気温の変動による水の膨張、収縮との関係を調べた。気温は新津のデータを用いた。

潮位との関係を調べた期間の一部(8月7日~11日)の気温と地下水位をまとめたものを表2-6に示した。ストレート暗渠区の地下水位が谷となるのは16時~18時であり、連結暗渠区は16時~17時の日もあれば22時の日もあった。ストレート暗渠区は山が2回現れることが多く、連結暗渠区は時間に一貫性はなかった。地下水位の山と谷がはっきりわかれていないこともあり気温と地下水位との相関も低いと考える。

表 2-6 地下水位の山・谷と気温の関係

	連結暗渠区 (谷)	連結暗渠区 (山)	ストレート 暗渠区(谷)	ストレート 暗渠区(山)	最高気温	最低気温
7日	17時	9時	17時	3時, 11時	31.8℃(16時)	22.6℃(3時)
8日	22時	0時	18時	1時, 11時	31.6℃(13時)	22.6℃(4時)
9日	16時	3時	17時	9時	32.6℃(13時)	24.3℃(6時)
10日	16時	12時	17時	4時, 11時	32.8℃(13時)	25.7℃(1時)
11日	17時	12時	16時	1時, 11時	31.4℃(13時)	26.3℃(4時)

(5) 地下水位と土壌水分の関係

地下水位と作土層(地表面から深さ約10cm)の土壌水分変動について相互関係を分析した。なお、測定間隔は、前者が1時間、後者は約1週間である。

(ア) 連結暗渠区(図2-20)

地下水位は降雨と地表灌漑に伴い変動したが、土壌水分は変化が少なかった。上流側畦畔から3mの測点aでは測点b, cに比べ毎回土壌水分の値が低かった。上の圃場からの畦畔浸透による水分上昇を抑制していたと考えられる。9月10日に測点c(地下水位を測定した測水管から約1mの距離)の土壌水分が低下したが、地下水位との関係は見られなかった。

(イ) 従来暗渠区(図2-21)

7月26日~7月31日, 8月24日は地下水位と土壌水分のそれぞれの変動傾向は相関性が高かった。8月16日の給水の前後で地下水位, 土壌水分は異なる変動した。給水前は地下水位, 土壌水分ともに小さく, 給水後は地下水位も土壌水分も高くなった。

(ウ) 対照区(図2-22)

7月26日, 8月9日, 8月24日, 9月6日に, 地下水位と土壌水分の相関が見られた。測点cは土壌水分の変動が大きかった。上の圃場からの畦畔浸透の影響を受けにくいため, 地下水位や降雨と関連性が高かったと考える。測点a, bの土壌水分は従来暗渠区の変動とほとんど同じであった。測点cの土壌水分は振れ幅が大きかった。4枚の供試圃場の中で対照区の地下水位の変動幅が最大であった。心土は粘質土であるが, 粗粒土の含有率が高く透水性の高い水の抜け道が存在するために土壌水分と地下水位の変動が大きかったと考える。

(エ) ストレート暗渠区(図2-23)

測点cはあまり相関が見られなかった。測点a, bでは7月26日~8月9日, 8月24日に相関が高かった。8月30日以降地下水位は低いまま推移したが, 土壌水分は高かった。

土壌水分が測定期間を通じ, 高い値で変動が小さく, 地下水位との相関は低かった。測点

cは地下水位測定地点と1m程度しか離れておらず近い位置にあるが、測点a、測点bと比べ地下水位との相関が高いということにはなかった。耕盤(グライ土壤)による浸透抑制のため、地表面近傍の土壌水分と地下水位の関係は低かったと考える。

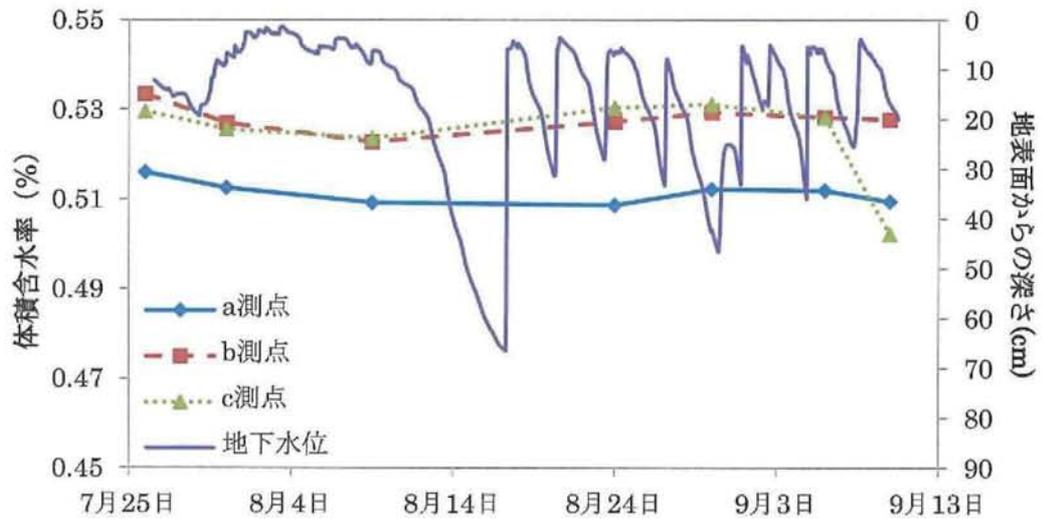


図 2-20 連結暗渠区における土壌水分と地下水位変動

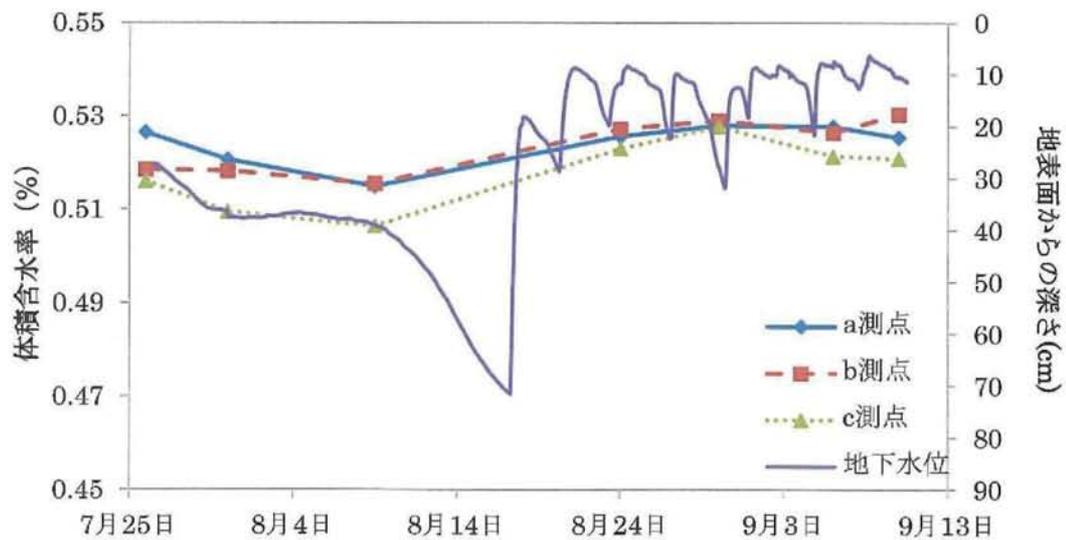


図 2-21 従来暗渠区における土壌水分と地下水位変動

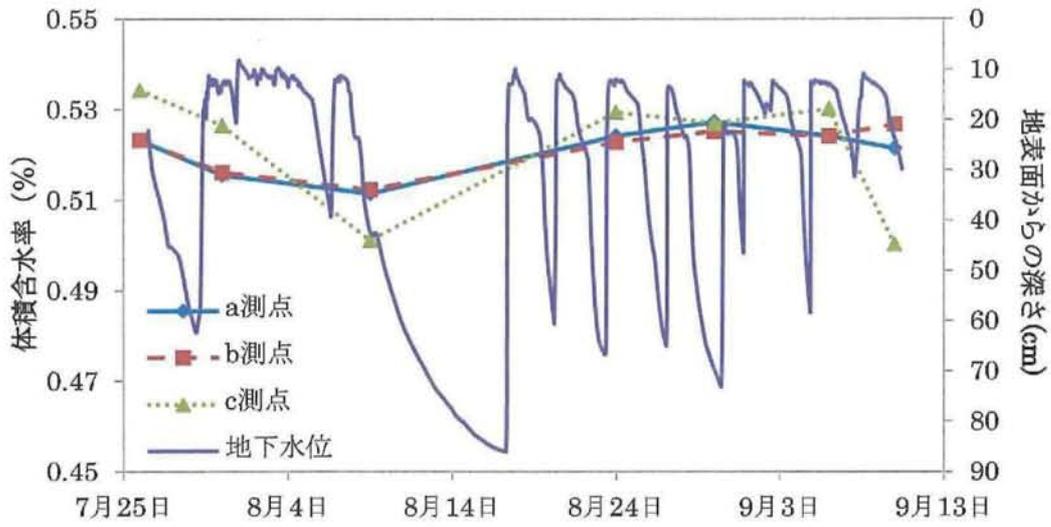


図 2-22 対照区における土壌水分と地下水位変動

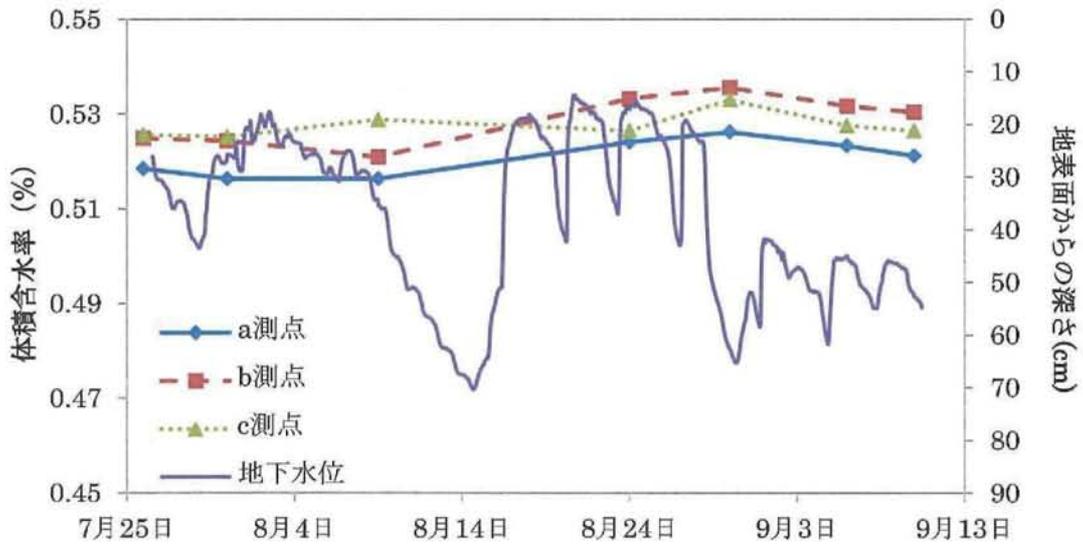


図 2-23 ストレート暗渠区における土壌水分と地下水位変動

(6) 土壌硬度

4枚の試験圃場における土壌硬度の変化を表 2-7 に示した。

表 2-7 各圃場のコーン指数の変化

日付	連結暗渠区 コーン指数(MPa)	従来暗渠区 コーン指数(MPa)	対照区 コーン指数(MPa)	ストレート暗渠区 コーン指数(MPa)
9月10日	0.17	0.19	0.38	0.12
9月13日	0.14	0.10	0.36	0.14

農林水産省構造改善局(2000)は、地表面下 15cm までの間を 5cm ごとに測定したコーン指数(落水後または降雨後 7 日以降の測定値(N/mm^2 ; $1N/mm^2=1MPa$))の 4 点の平均値について、

}	0.25 以下	暗渠排水が必要
	0.25~0.39	必要な場合がある
	0.39 以上	必要でない

と整理した。9月4日に落水が行われた。9月8日、12日に降雨があり、土壌の硬度が低い状態で試験を行った。コーン指数が低かったが、コンバインの稲刈り作業では走行性には支障がなかった。このことからいずれの供試ほ場も暗渠の排水性は十分であったと考える。

また、対照区は常にコーン指数が高い状態にあった。もともと対照区は、他の3圃場に比べ排水が良好であり、暗渠を埋設する必要がなかったことが裏付けられた。

第3章 地下灌漑

3-1 地下灌漑概要

(1) 地下灌漑の定義

地下灌漑とは、既設の暗渠排水施設を利用して、地下水位の上昇により作土層への給水、または地下水面上の毛管作用による心土層内の水位上昇である（農林水産省構造改善局，2000）。

本試験圃場における地下灌漑方法を示す（図3-1）。暗渠上端の立ち上がり管の栓を外し、給水口とする。用水路にサクシオンホース（内径50mm，断面積 $1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ）を沈め満水にする。満水状態のサクシ



ョンホースを給水口に挿入し自然圧で給水する。なお、図3-1 サクシオンホースを使用した給水多機能排水樹の立ち上がり管で暗渠内に正水圧を生じさせた。この正水圧により、暗渠の繋ぎ目から漏水し、土壌内部の亀裂、靱殻などを通じて給水を拡散させた。

(2) 地下灌漑の条件

地下灌漑は、敷設した暗渠管から作土層に水を供給することが求められる。つまり、暗渠管から土中に浸入した水が暗渠管よりも上方にある土層に効率よく移動することである。したがって、土壌の条件として、管より下の土層は上方の土層に比較して、相対的に透水係数が2桁程度小さいことが望ましい。また、作土層の構造(特に粗間隙や亀裂)がよく発達しており、水の移動が容易な土壌である必要がある。さらに、地下灌漑の給水効率を上げ、灌漑むらを少なくするため弾丸暗渠などの補助暗渠を配置して、暗渠本管との連結を良好とすることも重要（農林水産省構造改善局，2000）とされている。

(3) 転換畑における作物栽培のための地下水位管理

一般に、ほとんどの畑作物は、地下水位を地表面下50cm~60cmにすれば、栽培可能である。ただし、大豆等の転作作物に適する地下水位は地表面下およそ30cm~70cmとされる。新潟県内においては転換畑で栽培される大豆は、地表面下30cmにするとほぼ正常に生育する（農林水産省構造改善局，2000）。

3-2 春の地下灌漑試験

春の地下灌漑試験は2013年4月18日、19日に行った。給水時間は4月18日の11:30から19日の10:00までであった。4月19日の10:00から排水を開始した。試験圃場はストレート暗渠区で、補助暗渠が埋設しておらず、耕起していない状態であった。

(1) 土壌水分

土壌水分はDelta-T社のPR1とHH2を用いて、地表面下約5cm(作土)、約25cm(耕盤)、約65cm(心土)の3深度で測定した(図3-2)。調査地点は本暗渠からの用水浸出状況を測るため、3か所に設置した。3深度を3か所で測定することにより、灌漑水の水平・鉛直移動が判読できる。測点の空間配置は図3-4の通りである。上流側の本暗渠(A)から0.5mの測点を測点i、1.0mの測点を測点ii、2.0mの測点を測点iiiとした。土壌水分の鉛直分布測定は、地下灌漑開始前、開始から30分後、1時間後、2.25時間後、2.75時間後、3時間後、



22.5時間後、排水開始から1時間後、3時間後、4時間後、28時間後に行った。

図3-2 土壌水分測定箇所の様子

(2) 用水路側立ち上がり管水位

用水路側立ち上がり管水位は4月19日、排水過程で測定を行った。本暗渠(A)と繋がる立ち上がり管を(上)、本暗渠(B)と繋がる立ち上がり管を(中)、本暗渠(C)と繋がる立ち上がり管を(下)とした。各立ち上がり管からメジャーで測定した。測定は排水開始前、開始から15分後、30分後、45分後、1時間後、1.33時間後、3時間後、4.25時間後、4.5時間後、28時間後に行った。

(3) 排水口水位

排水口水位は土壌水分の測定と同様に4月18日、19日に測定した。多機能排水柵の上端(地表面より28cm高い)からメジャーで測定した。測定は給水開始15分後から65分後まで5分間隔、以降は1.33時間後、3時間後、3.17時間後、22.5時間後、排水開始から0.33時間後、1.17時間後、3時間後、4時間後に行った。

(4) フラッシング効果の検証

陶管暗渠を用いた土壌水管理システムの特徴の1つに、フラッシング(管内洗浄)が容易となることが挙げられる。暗渠管内に堆積する土砂などを除去することで暗渠の長寿命化や安定的な水分制御が可能となる。その効果を検証するため排水を採取しpH、懸濁物質(SS)、電気伝導度(EC)を測定することで水の性質の変化などを調査した。採水は4月19日に排水開始から4分15秒まで15秒間隔、以降は10分後、25分後、1時間後、3時間後、4時間後、および給水前と排水前に行った。多機能排水柵内の立ち上がり管内に溜まっていた水を給水前と排水前に採水し、それらを給水前、排水前とした。

1) 排水の pH

pH は排水口から流出した排水を採取し、研究室に持ち帰った後 pH メーター (IQ Scientific 社, IQ160) で測定した。測定は 4 月 22 日に行った。

2) 懸濁物質 (SS)

SS は排水口から流出した排水を採取し、研究室に持ち帰った後求めた。採取した排水をガラス繊維ろ紙 (Whatman, GF/C 1822-047) に浸み込ませ、アスピレーター (SHIBATA 社, WJ20) を用いて吸引ろ過し、乾燥させた。乾燥後のろ紙の質量から初めのろ紙の質量を引き、SS の量を算出した。測定は 4 月 25 日に行った。SS の測定方法の詳細は補論に記した。



図 3-3 SS 測定の様子

3) 電気伝導度 (EC)

EC は pH と同様に、排水口から流出した排水を採取し、研究室に持ち帰った後 EC 計 (カスラム社, IWC-5) で測定した。測定は 4 月 22 日に行った。

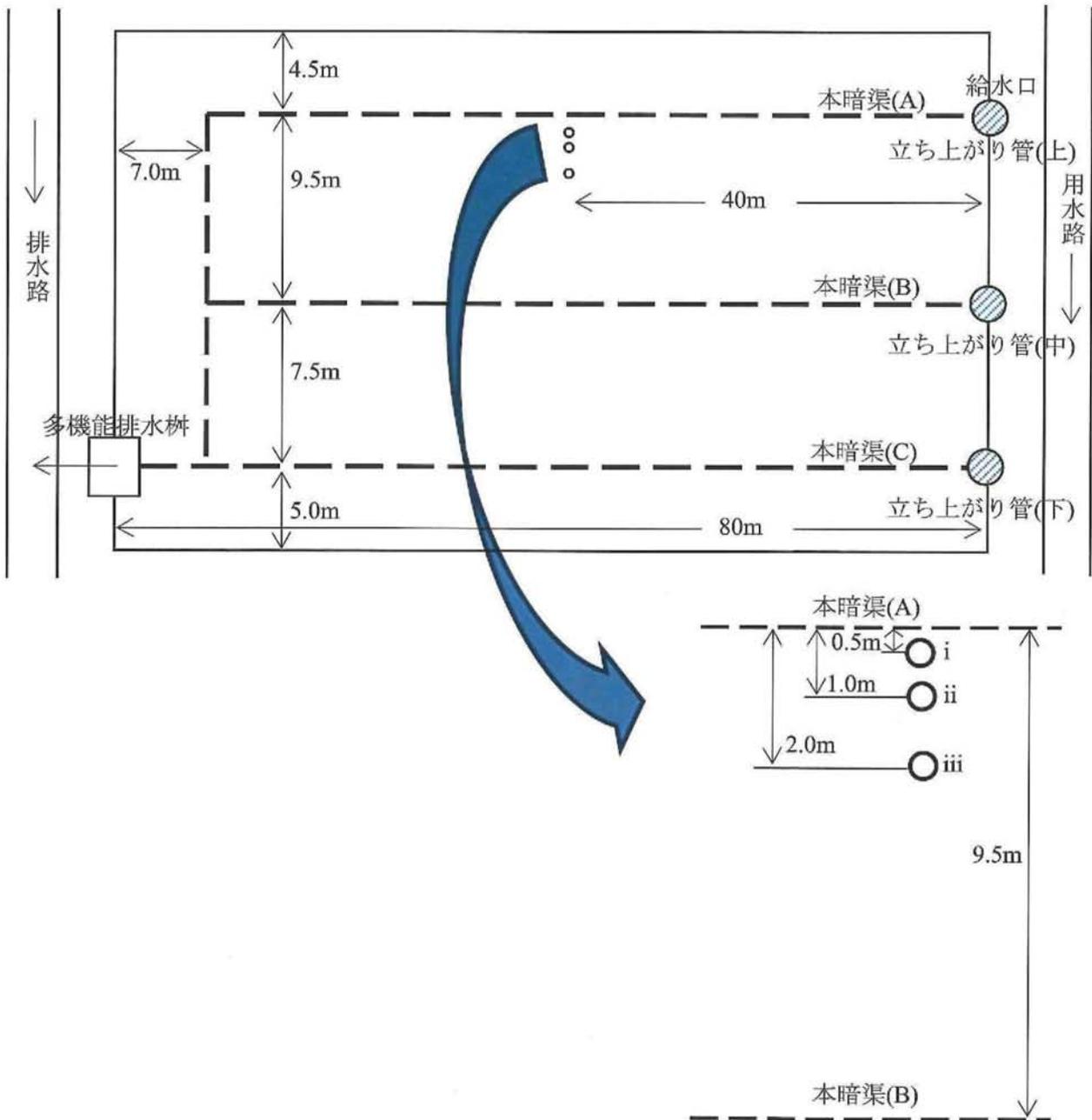


図 3-4 春の地下灌漑試験圃場の平面図 (単位 : m)

土壌水分センサーは本暗渠からの用水浸出状況を知るため、3 か所に設置した。

- 測点 i : 上流側の本暗渠(A)から 0.5m の位置
- 測点 ii : 上流側の本暗渠(A)から 1.0m の位置
- 測点 iii : 上流側の本暗渠(A)から 2.0m の位置
- 測定深度 : 地表面から深さ約 5cm (作土), 25cm (耕盤), 約 65cm (心土) である。

3-3 春の地下灌漑試験の結果と考察

(1) 土壌水分

(ア) 測点 i (図 3-5)

耕盤，心土では測定期間中ほぼ変動がなく飽和状態であった。作土では，給水前，開始 30 分後，1 時間後，2 時間 15 分後はやや乾燥状態であったが，2 時間 45 分後には飽和状態となった。

(イ) 測点 ii (図 3-6)

作土，耕盤，心土のいずれも測定期間中ほぼ変動がなく飽和状態であった。排水 1 時間後の心土で土壌水分がやや低い値となったがその後再び上昇した。

(ウ) 測点 iii (図 3-7)

測点 ii 同様，いずれの層においても測定期間中ほぼ変動がなく飽和状態であった。測点 i，測点 ii は体積含水率の大きい順に心土，作土，耕盤だったのに対し，測点 iii では心土，耕盤，作土の順であった。

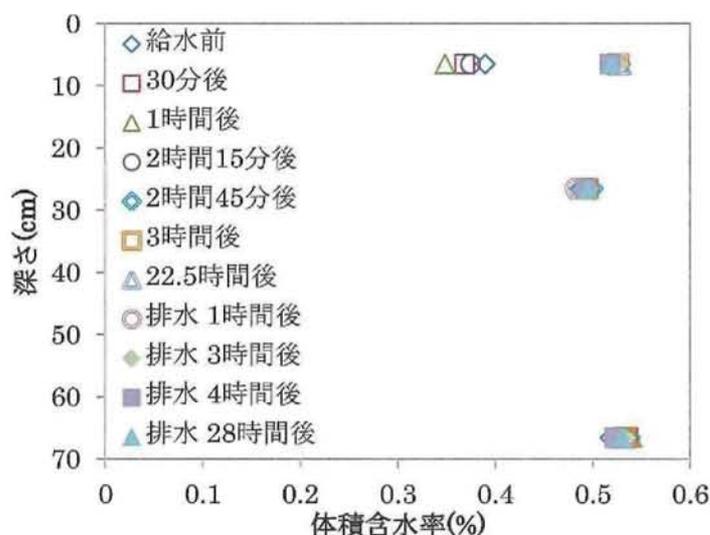


図 3-5 測点 i における土壌水分の鉛直分布

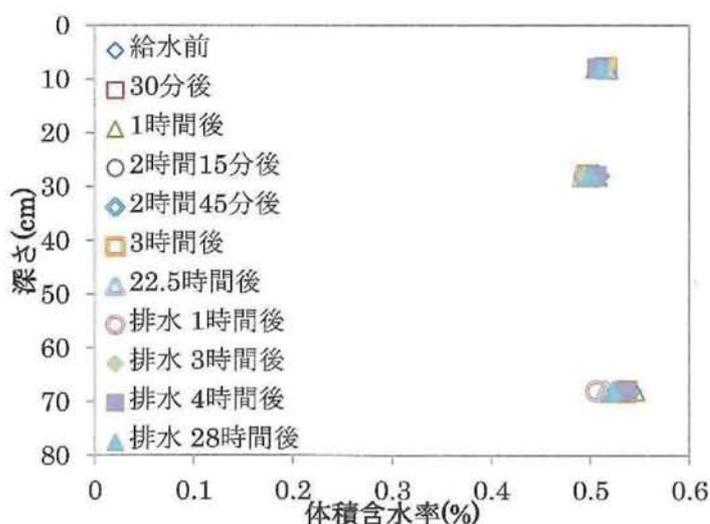


図 3-6 測点 ii における土壌水分の鉛直分布

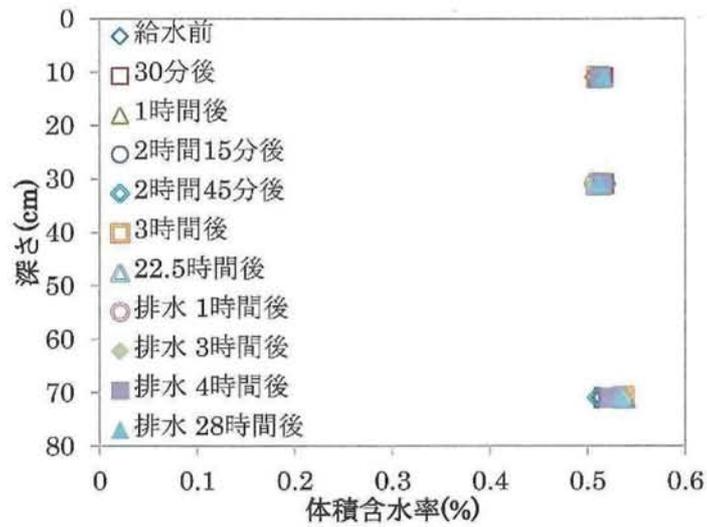


図 3-7 測点 iii における土壌水分の鉛直分布

地表面の様子

土壌水分測定地点の地表面の湿潤状態を図 3-8、図 3-9、図 3-10 および図 3-11 に示した。図 3-11 から土壌水分測定地点付近の地表面の湛水はが見られるが、乾いている点も確認できた。



図 3-8 給水開始前の田面状態
測点は、左から測点 i, ii および iii



図 3-9 給水開始から 2.75 時間後の田面状態



図 3-10 給水開始から 22.5 時間後の田面状態 図 3-11 排水開始から 28 時間後の田面状態

(2) 用水路側立ち上がり管水位

地下灌漑・排水試験中の用水路側立ち上がり管水位の変動を図 3-12 に示した。排水開始 15 分から 80 分の間に、(上)は 2cm, (中)は 1cm, (下)は 3cm 水位低下した。3 時間後までには(上)は 10cm, (中)は 5.5cm, (下)は 16cm 水位低下した。3 時間後から 4.5 時間後までの間に(上)は 40cm, (中)は 42.5cm, (下)は 14.5cm 変化した。これらのことから、排水後約 3 時間は本暗渠(C)で主に排水が行われ、その後本暗渠(A), (B)の排水が行われやすくなったと考えられる。排水開始 15 分後の水位にばらつきがあるのは、15 分の間に急激に水位が低下した、もしくは立ち上がり管下まで満水にはなっていないことが考えられる。

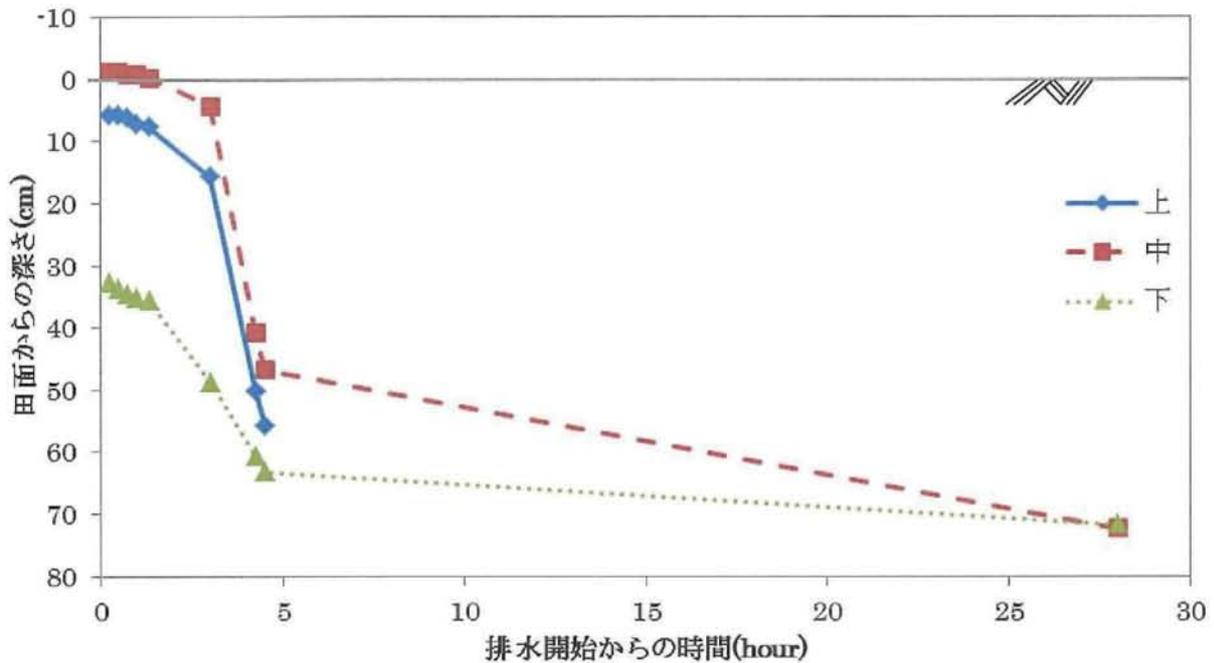


図 3-12 用水路側立ち上がり管水位の経時変化

4 月 19 日の 10:00 を排水開始(0 時間)とし、測定開始は 10:15, 翌日(4 月 20 日)14:00 まで 28 時間の変動

※28 時間後の立ち上がり管(上)の水位は目視で確認できなかったため欠測

(3) 排水口水位

多機能排水樹の排水口水位の変動を図 3-13 に示した。給水開始 15 分から 1.33 時間までの 1 時間 5 分間で急激に水位上昇した。地表面下 59cm から 5cm へと、54cm の上昇量であった。このことから、給水された水はまず最も移動しやすい陶管暗渠管内を満たし、その後暗渠管の隙間から水が浸み出し、土壤中を移動したと考えられる。

一方排水開始前は地表面上 7cm であった水位が 20 分後には 3cm となった。しかし排水開始 70 分で地表面上 4cm へと水位が上昇した。排水開始 3 時間で地表面下 21cm、4 時間で 44cm まで低下した。排水開始前から 4 時間後まで、低下量は 51cm であった。立ち上がり管(上)、(中)、(下)、それぞれ大気と連続しているため流速が高まり、勢いよく水が流れたが、その分排水口に集まる水の量も多く、水位低下には時間がかかったと考えられる。

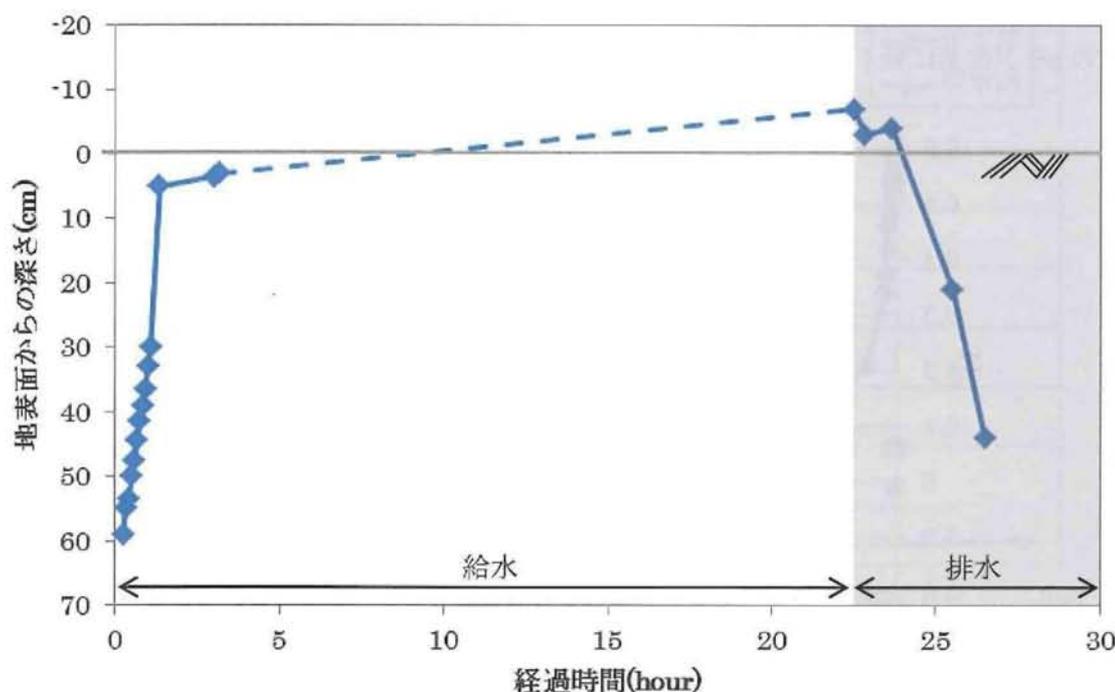


図 3-13 排水口水位の経時変化

4月18日の11:30を給水開始(0時間)とし、測定開始は11:45、翌日(4月19日)14:00まで26.5時間の変動

※実線は計測値、点線は内挿値

(4) フラッシング効果の検証

1) 排水の pH

暗渠排水の pH の経時変化を図 3-14 に示した。pH は給水前が 6.06, 排水前が 5.99 であった。排水開始 15 秒後は 6.54, 30 秒後は 6.6 で、25 分後に 6.12 となった。1 時間後には 5.97 となり、給水前に排水口から採取した水よりも pH が低くなった。4 時間後には 5.85 と排水前よりも低い値となった。

時間が経つにつれ pH の値が小さくなった。比較対象として、新潟の平野部の農業用水の pH に着目した。新通の水田の排水と用水, 新川, 西川, 原水, 処理水の pH と比較した(図 3-15)。新通の用水と排水では排水の方が pH が大きかった。新川は用水, 西川は用水と排水の反復利用の河川である。用水よりも排水の方が pH が大きい傾向が見られた。よって、汚れている排水よりも清浄な用水の方が pH が低くなると考えられる。したがって排水試験により得られた排水の pH が次第に低下していったのは、水がきれいになっていったためだと考える。

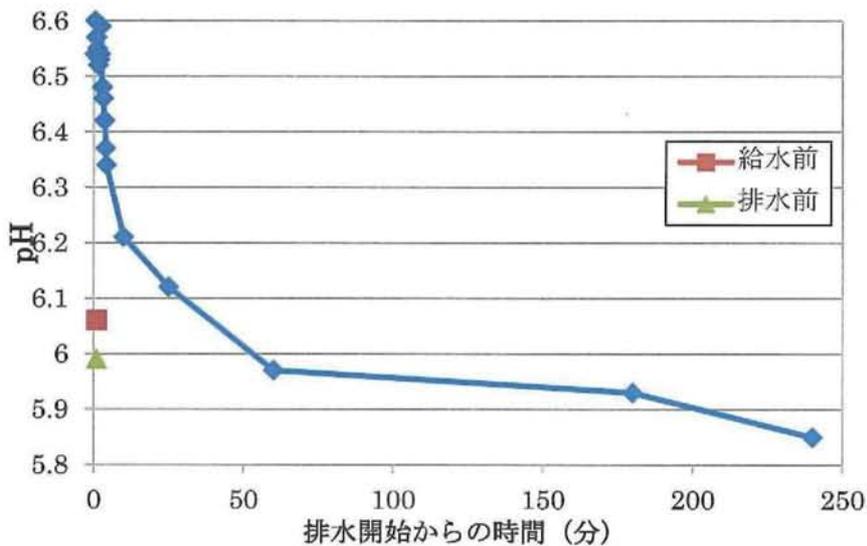


図 3-14 pH の経時変化

4月18日の11:30を給水開始(0分)とし、4時間後までの変動

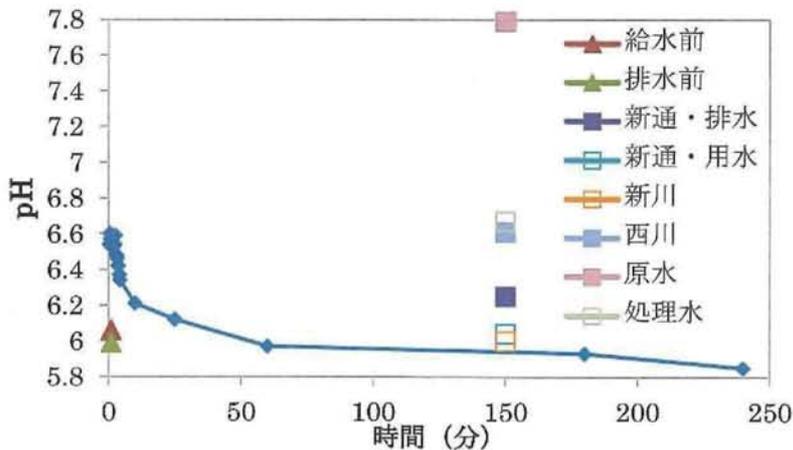


図 3-15 pH の経時変化と河川の pH の比較

2) 懸濁物質(SS)

SSの経時変化を図3-16に示した。排水開始15秒後は934.6mg/lで、45秒後には665.4mg/l、90秒後には170.9mg/lとなった。10分後には20mg/lと、排水開始15秒後のおよそ50分の1に減少した。排水開始25分後が最小の12.73mg/lで、その後増加した。これは、排水途中の3時間後や4時間後に排水樹内の水位調整用の立ち上がり管を一度セットし、排水を再開してから採水したため、SSが多くなったものと考えられる。

排水開始直後900mg/lを超えていたSSが4時間後には40mg/lまで減少したことから、フラッシング効果は得られたと考える。

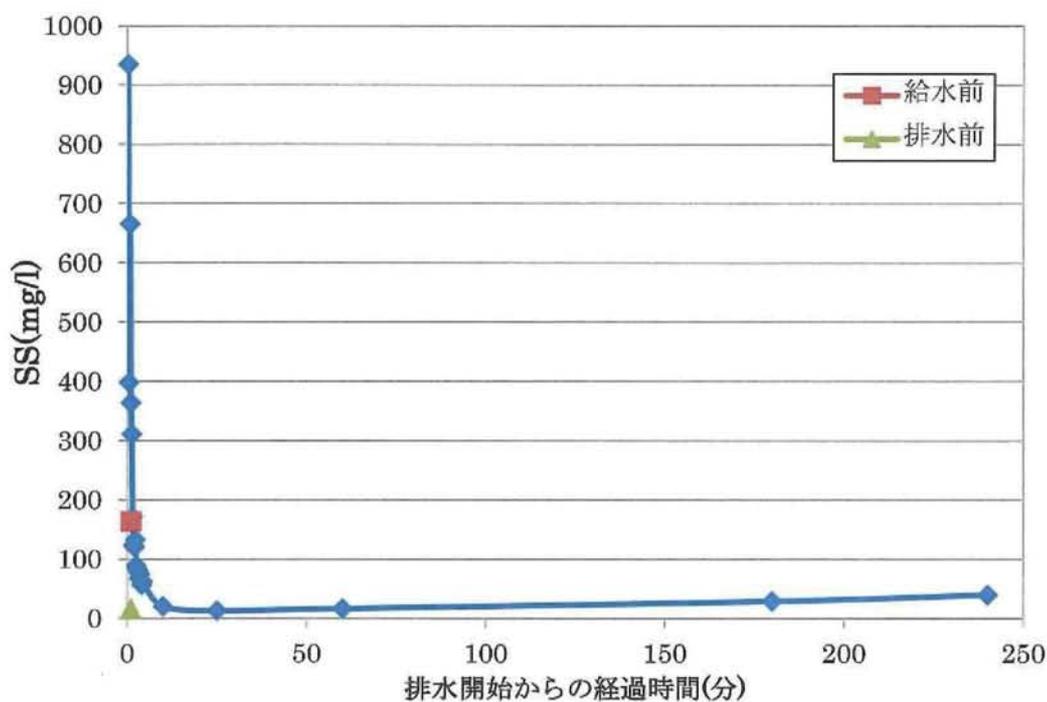


図3-16 SSの経時変化

3) 電気伝導度(EC)

ECの経時変化を図3-17に示した。排水開始15秒後は0.048mS/cm、1分後は0.044mS/cm、2.75分後は0.042mS/cmであった。4時間後には0.051mS/cmとなった。3時間後や4時間後に多機能排水樹内の立ち上がり管を立ち上げ、フラッシングを行った後に採水したため、ECはSS同様大きい値となったと考える。

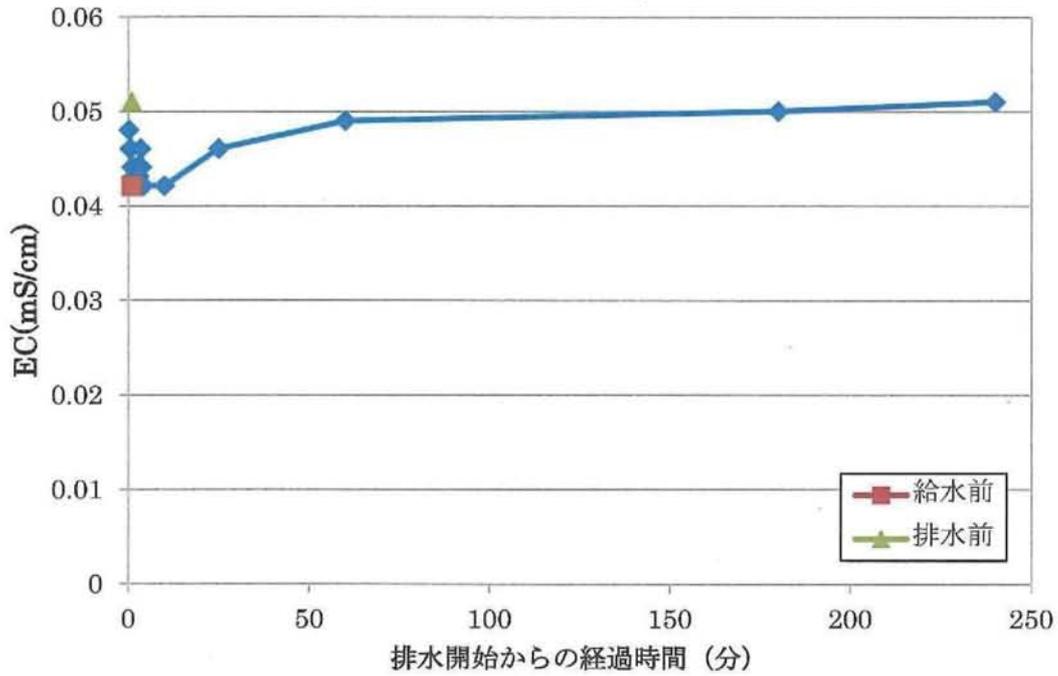


図 3-17 EC の経時変化

図 3-18 と図 3-19 に排水開始直後と排水開始 30 分後の排水の色の違いを示した。これら排水の色、および pH, SS, EC の測定値から、陶管暗渠と多機能排水柵による土壤水管理システムは、暗渠管内の泥土を洗浄するフラッシング効果があったと判断した。



図 3-18 排水開始直後の排水



図 3-19 排水開始から 30 分後の排水

3-4 秋の地下灌漑試験

秋の地下灌漑試験は2013年10月5日、6日に行った。給水時間は10月5日の14:30から6日の11:00までであった。10月6日の11:00から排水を開始した。試験圃場はストレート暗渠区で、補助暗渠を埋設しており、耕起していない状態であった。

(1) 土壌水分

土壌水分はDelta-T社のPR1とHH2を用いて、地表面下約5cm(作土)、約25cm(耕盤)、約65cm(心土)の3深度で測定した。調査地点は本暗渠および補助暗渠からの用水浸出状況を測るため、4か所に設置した。測点の空間配置は図3-20の通りである。上流側の本暗渠(A)から2.0m、補助暗渠から0.5mの測点を測点①、本暗渠(A)から2.0m、2本の補助暗渠からそれぞれ等距離2.0mの測点を測点②、本暗渠(A)と本暗渠(B)からそれぞれ等距離4.8m、2本の補助暗渠からそれぞれ等距離2.0mの測点を測点③、本暗渠(A)と本暗渠と(B)からそれぞれ等距離4.8m、補助暗渠から0.5mの測点を測点④とした。土壌水分の鉛直分布測定は、地下灌漑開始前、開始から1時間後、20時間後、排水開始から3時間20分後、4時間後、24時間後に行った。

(2) 用水路側立ち上がり管水位

用水路側立ち上がり管水位は10月5日、6日に測定を行った。春同様、本暗渠(A)と繋がる立ち上がり管を(上)、本暗渠(B)と繋がる立ち上がり管を(中)、本暗渠(C)と繋がる立ち上がり管を(下)とした。各立ち上がり管からメジャーで測定した。測定は地下灌漑開始前、開始から1時間45分後まで15分間隔、20時間後、排水開始から1時間後まで5分間隔、1時間40分後まで10分間隔、1時間53分後、2時間後、2時間5分後、3時間10分後、3時間20分後に行った。

(3) 排水口水位

排水口水位は10月5日に測定した。多機能排水樹の上端(地表面より28cm高い)からメジャーで測定した。測定は給水開始前、および給水開始1時間後まで15分間隔で行った。

(4) 流量

流量は10月6日に測定した。排水樹から流出した排水をバケツで取水し、バケツが満水になるまでの時間をストップウォッチで測定した。バケツによる流量観測は、大きな流量を現地観測できるセンサーがないためである。測定は排水開始直後、1分後、5分後、8分後、10分後から40分後まで1分30秒間隔、43分後、45分後から2時間後まで5分間隔、3時間15分後、3時間32分後、3時間40分後、3時間45分後に行った。

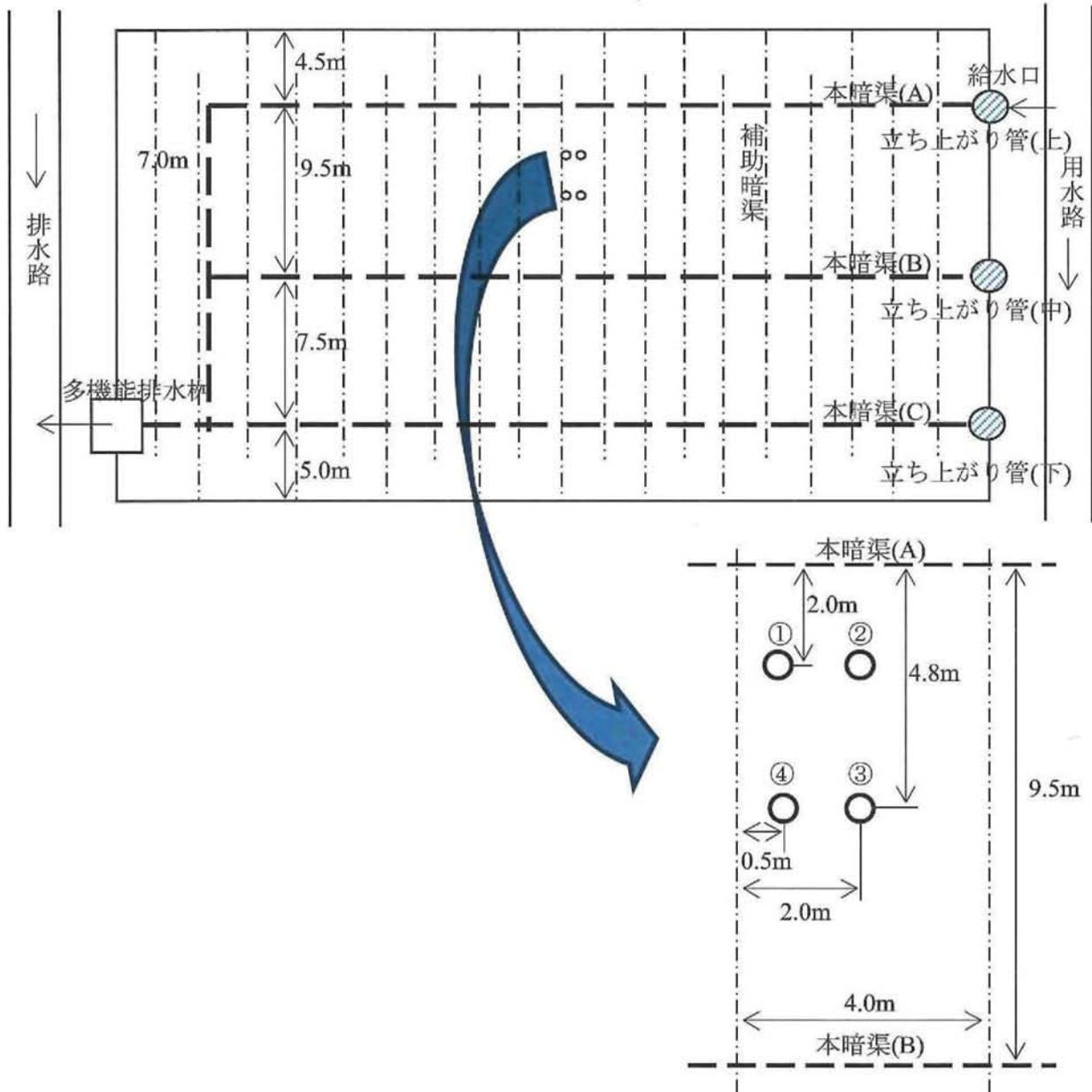


図 3-20 秋の地下灌漑試験圃場の平面図 (単位 : m)

- 測点① : 上流側長辺畦畔から 6.5m, 本暗渠(A)から 2.0m, 補助暗渠から 0.5m の位置
 測点② : 上流側長辺畦畔から 6.5m, 本暗渠(A)から 2.0m, 2本の補助暗渠から等距離 2.0m の位置
 測点③ : 上流側長辺畦畔から 9.3m, 本暗渠(A)と本暗渠(B)から等距離 4.8m, 2本の補助暗渠から 0.5m の位置
 測点④ : 上流側長辺畦畔から 9.3m, 本暗渠(A)と本暗渠(B)から等距離 4.8m, 補助暗渠から 0.5m の位置
 測定深度 : 地表面から深さ約 5cm (作土), 約 25cm (耕盤), 約 65cm (心土) である。
 補助暗渠は, 2013 年 10 月 2 日に施工 (適用 : 籾殻充填, 深さ 0.4m, 間隔 4m, 本数 19 本)。勾配なし, 短辺畦畔に平行。トラクターのアタッチメントの構造上, 片側 3m ほど短い。

3-5 秋の地下灌漑試験の結果と考察

(1) 土壌水分

(ア) 測点①(図 3-21)

作土, 耕盤, 心土いずれにおいてもほとんど水分変動が見られなかった。飽和状態であった。

(イ) 測点②(図 3-22)

耕盤, 心土ではほとんど水分変動が見られなかった。耕盤は測定期間を通じて土壌水分がやや低かった。作土は給水前後で多少の変動が見られた。

(ウ) 測点③(図 3-23)

作土は, 変動は少ないが給水前, 1 時間後と順に土壌水分が大きくなった。耕盤, 心土ではほとんど変動しなかった。

(エ) 測点④(図 3-24)

作土, 耕盤, 心土いずれにおいてもほとんど変化しなかった。測点①と同じような変動を示した。

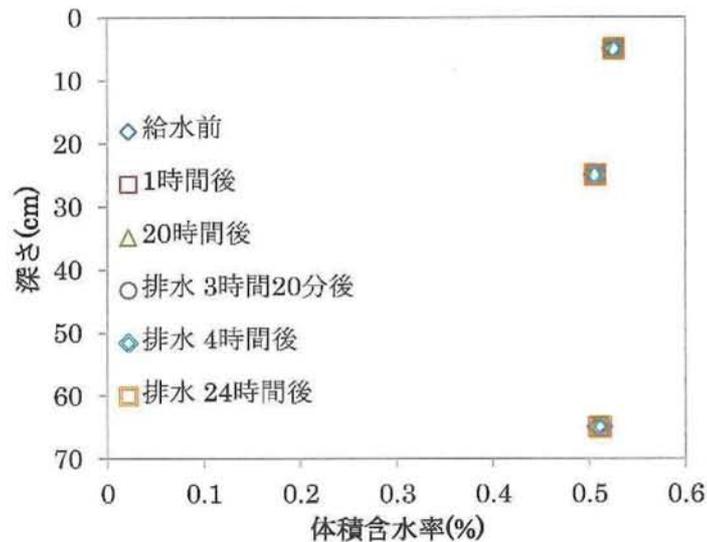


図 3-21 測点①における土壌水分の鉛直分布

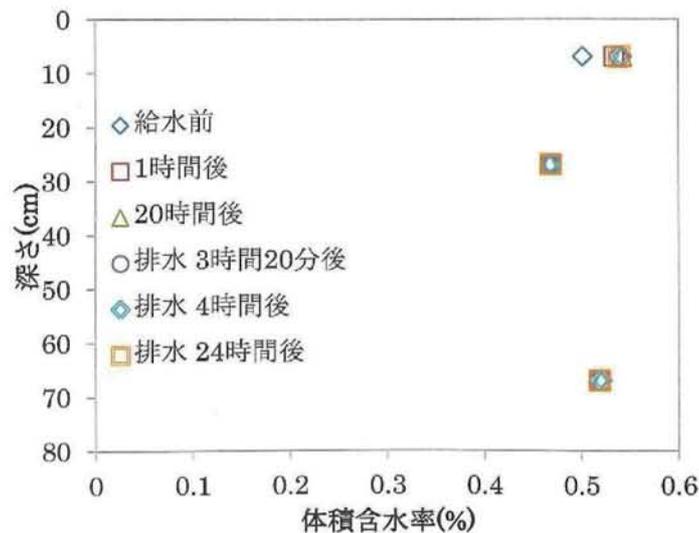


図 3-22 測点②における土壌水分の鉛直分布

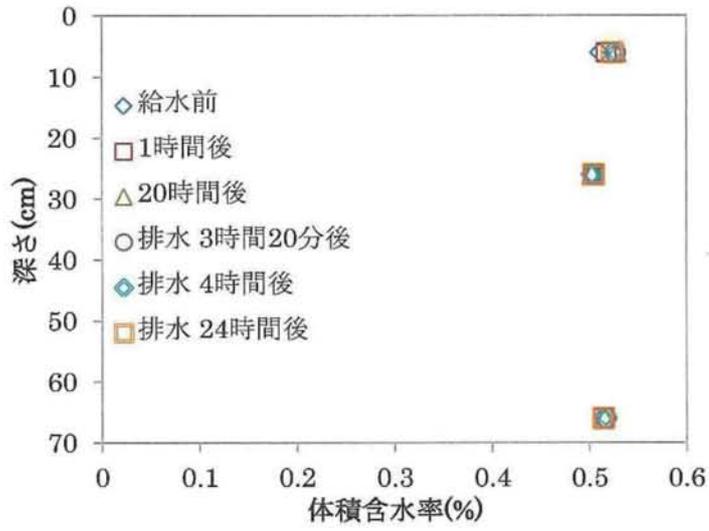


図 3-23 測点③における土壌水分の鉛直分布

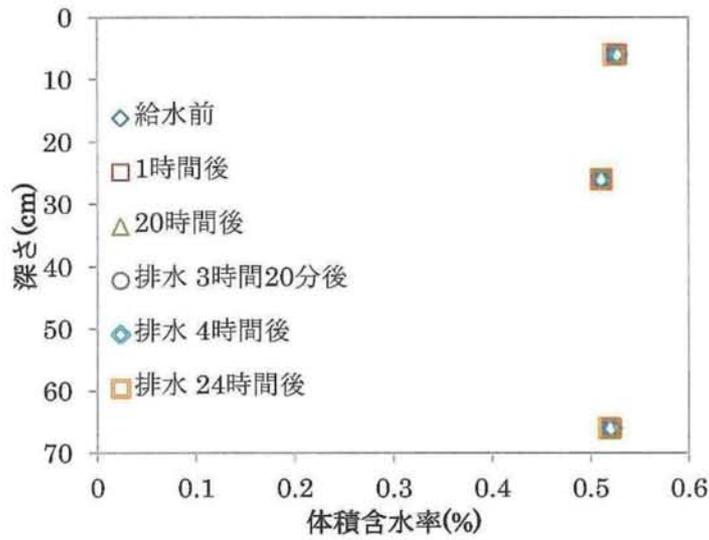


図 3-24 測点④における土壌水分の鉛直分布

(2) 用水路側立ち上がり管水位

用水路側立ち上がり管水位の変動を図 3-25 に示した。給水開始後 15 分で、(中)は水位が変化しなかったが、(下)は 3.5cm 水位上昇した。給水開始から 1 時間で、(中)は 17.3cm、(下)は 25.2cm、20 時間後までに(中)は 63.3cm、(下)は 70.6cm 水位上昇した。排水開始 1 時間で(上)は 3.7cm、(中)は 4.8cm、(下)は 5.7cm、2 時間後には(上)は 25.3cm、(中)は 25.8cm、(下)は 30.9cm 水位低下した。3 時間 20 分後の水位は(中)が田面から深さ 62.3cm、(下)が 70.7cm であった。給水開始前の水位が(上)は 62.3cm、(下)は 71.9cm であった。以上から、3 時間 20 分で排水はほぼ完了したと考えられる。

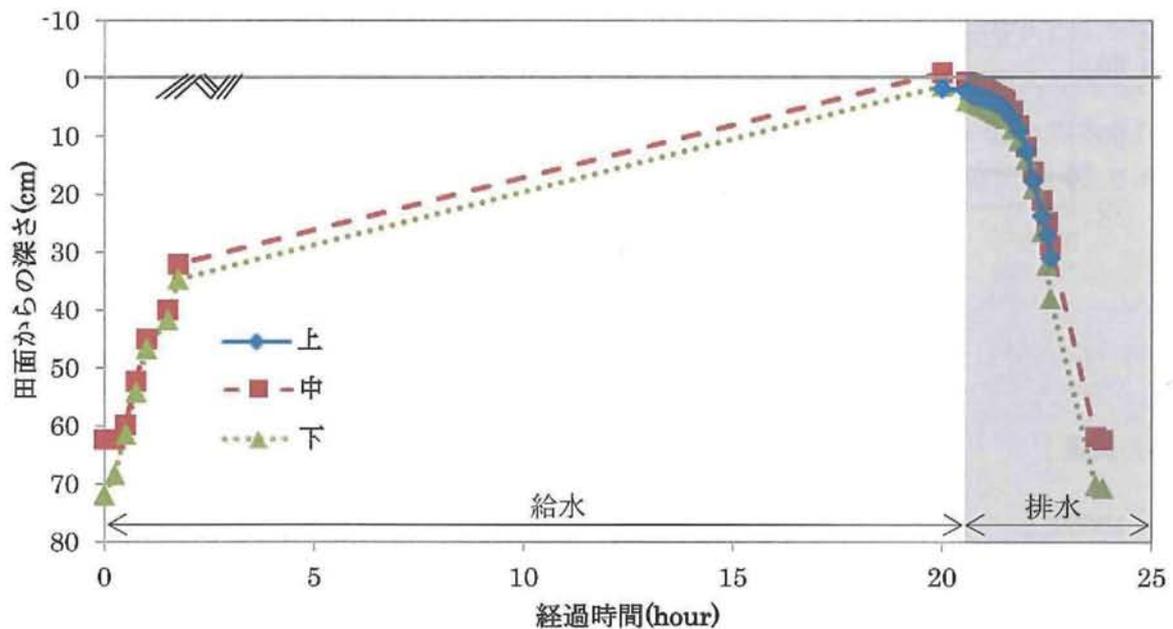


図 3-25 用水路側立ち上がり管水位の経時変化

10 月 5 日の 14:30 を給水開始(0 時間)とし、翌日(10 月 6 日)14:20 まで 23 時間 50 分の変動

※立ち上がり管上から給水したため給水過程での上は欠測、給水から 23 時間 40 分後、23 時間 50 分後の立ち上がり管上の水位は目視で確認できなかったため欠測

(3) 排水口水位

多機能排水樹の排水口水位の変動を図 3-26 に示した。給水開始から 15 分で 3cm 上昇し、1 時間後には 24.5cm 水位上昇した。

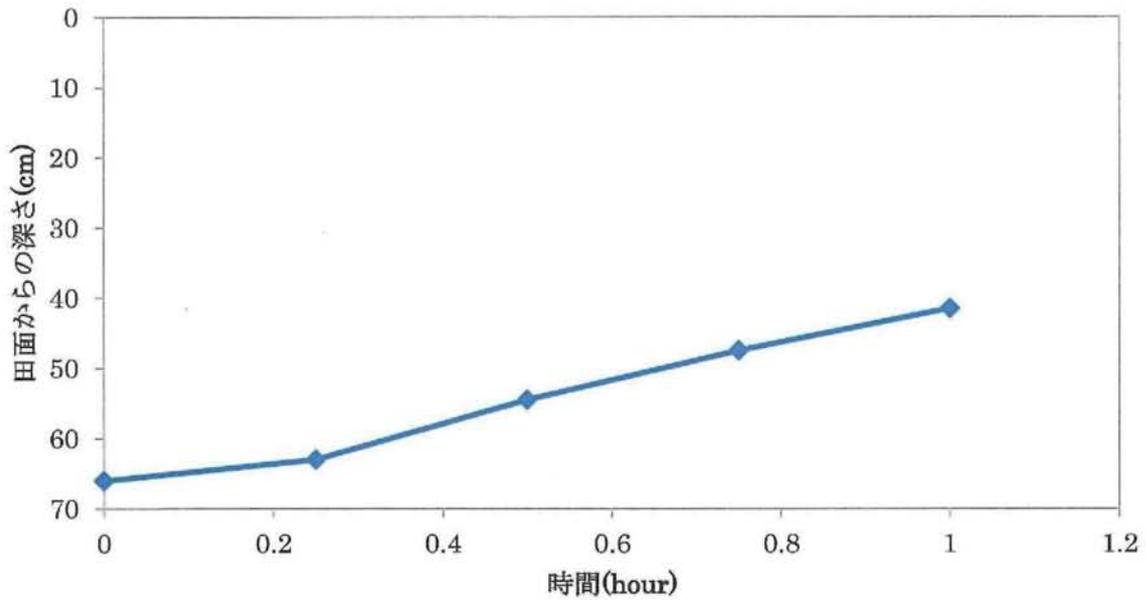


図 3-26 排水口水位の経時変化

(4) 流量

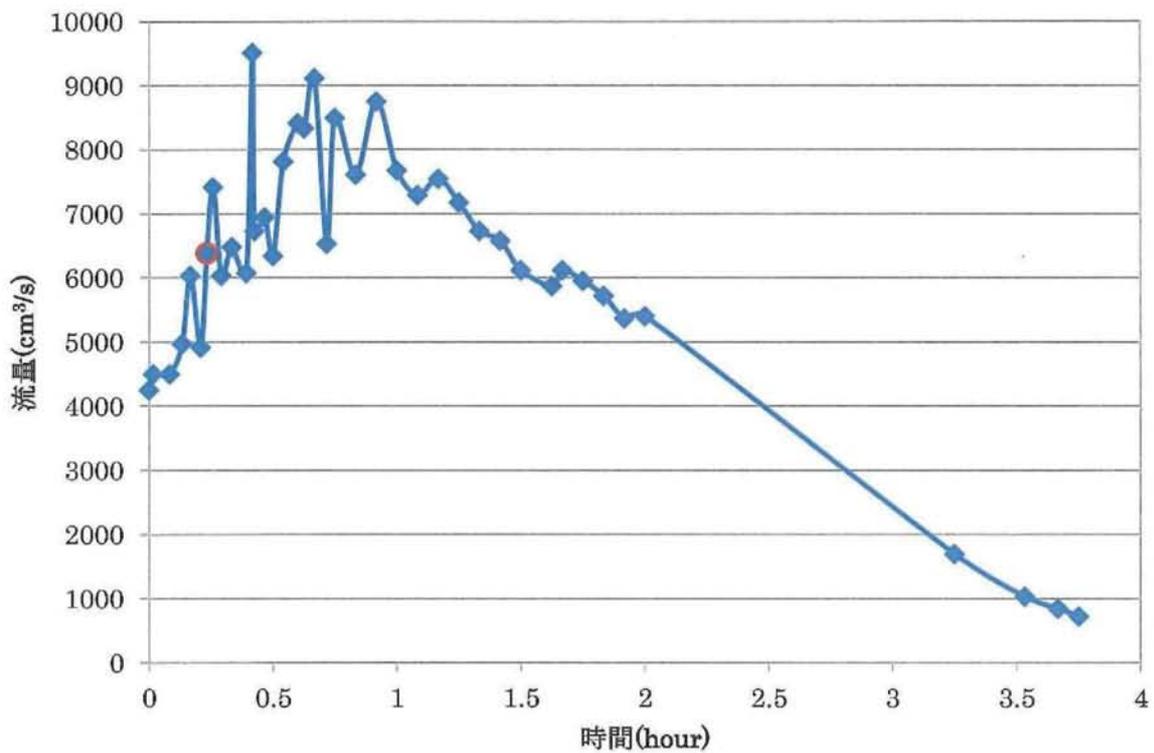


図 3-27 流量の経時変化

排水流量の経時変化を図 3-27 に示した。外した立ち上がり管が排水口付近で排水の妨げとなっていたため立ち上がり管を排水口から離した(赤い丸の時点)。このため 15 分後で流量が大きくなった。最大値は 25 分後の約 $9500\text{cm}^3/\text{s}$ であった。バケツに流入する時間をストップウォッチで測定したため、水しぶきやバケツ振動による誤差があったと考える。また排水開始直後は流量が大きかったため測定がうまく行えず、取水に時間がかかってしまった。測定方法を考慮すると、排水開始から 30 分~1 時間の間の流量が多かった。

地下水位が地表面に一致した状態(無湛水)を初期条件として暗渠排水試験を行った場合、一般に図 3-28 に示すような暗渠排水量-時間曲線が得られる。排水開始後は新たな流入はないため、図 3-28 に示すように、初期暗渠排水量が最大の単調な減少曲線となる(土地改良事業計画設計基準, 2000)。本試験では初期暗渠排水量よりも 30 分~1 時間後の排水量が最大となった。一般的な暗渠システムは上流端が地中に埋まっているため給気口がなく、暗渠管内に大気圧が入らず水が抜けにくい。連結暗渠区は上流側に立ち上がり管があるため大気圧が入り排水されやすく、給水口と排水口が一つずつあるため力のかかり方も一定だと考えられる。一方ストレート暗渠区は用水路側に立ち上がり管が 3 つありそれぞれが大気と連続しているため、より大気圧がかかり排水を促すと考えられる。

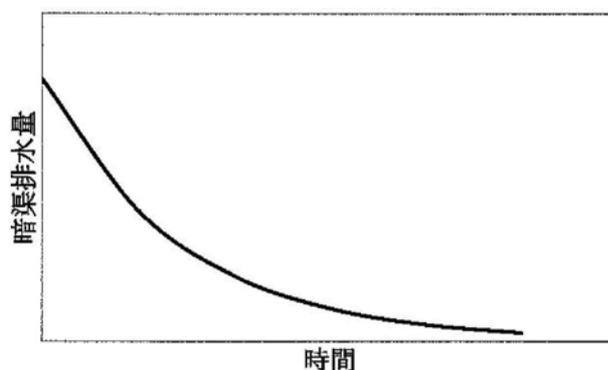


図 3-28 暗渠排水量-時間曲線(概念図)

3-6 地下灌漑試験の結果と考察

(1) 土壌水分

春、秋の地下灌漑試験を通し、土壌水分の変動はあまり見られなかった。2012年10月に連結暗渠区(補助暗渠あり、耕起した状態)で行われた地下灌漑試験における土壌水分変動の測定結果を図3-29に示した。各測点の作土で土壌水分が大きく変化したことがわかる。測点①と④、②と③がそれぞれ似たような変動を示した。①と④は補助暗渠に近いいためか、湿潤状態と乾燥状態がわかれた。このことから、補助暗渠からの距離が作土の土壌水分変動に影響を与えたと考える。耕盤によって作土と心土の水移動は阻害されているが、灌漑水は暗渠の埋戻し部(粃殻)と補助暗渠(粃殻)や、暗渠の継ぎ目から漏出し心土の小亀裂を伝って拡散したと考えられる(図3-30)。

今年度と昨年度の試験結果を比較すると、昨年度のほうが土壌水分の変動が大きかった。このことから、本暗渠、補助暗渠だけでなく圃場の耕起の有無が地下灌漑に大きく影響を及ぼすと考える。ただし、測定精度が、今年度と昨年度で等しかったか検討の余地が残される。

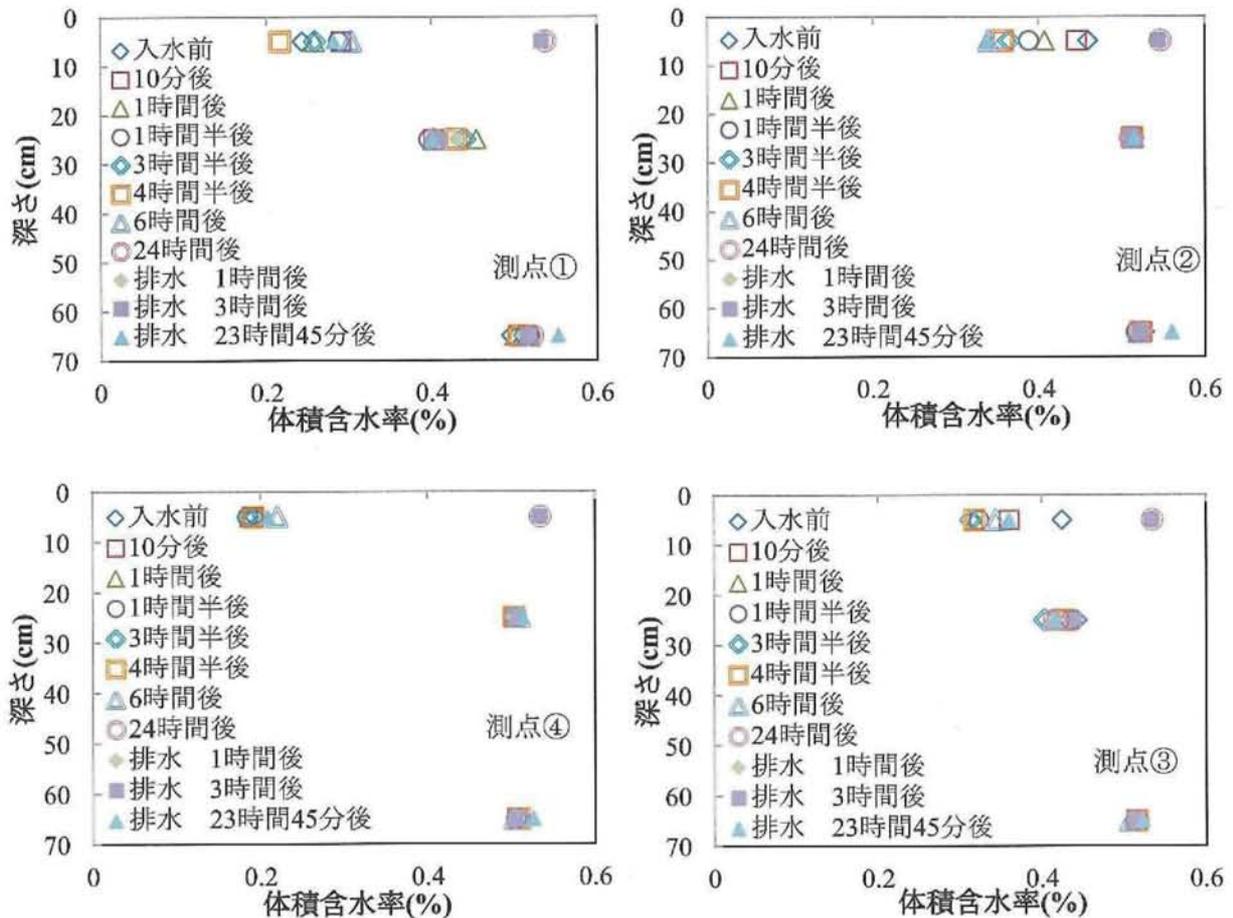


図3-29 昨年の連結暗渠区における地下灌漑試験の土壌水分の鉛直分布

測点は連結暗渠区で、図3-10と同じ地点

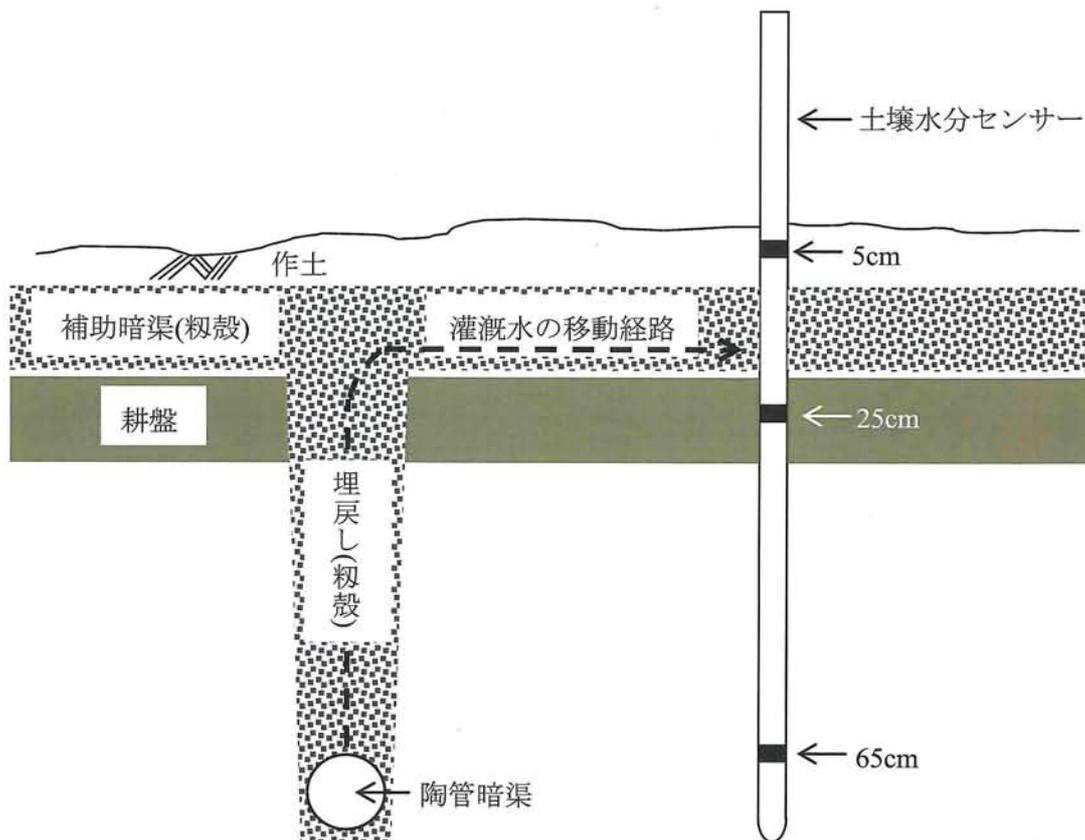


図 3-30 暗渠周辺の地下土壌構造と灌溉水の移動経路
 移動経路：本暗渠の埋戻し部補助暗渠(ともに籾殻)を移動

(2) 用水路側立ち上がり管水位

春と秋の排水時における用水路側立ち上がり管水位の経時変動を図 3-31 に示した。秋下では、排水開始から 3 時間 20 分で深さ 70.7cm まで水位が低下した。一方春下では排水開始から 28 時間で 71.7cm 水位低下した。上については、春は 15 分から 1 時間までの間に 1.5cm、15 分から 3 時間までの間に 10cm 水位が低下した。秋は 15 分から 1 時間までの間に 2.4cm、15 分から 1 時間 30 分までの間に 12.4cm 水位低下した。排水開始 1 時間から 3 時間 10 分の間に秋上は 57.6cm、秋中は 58cm、秋下は 63.2cm 変化したのに対し、春上は排水開始 1 時間から 3 時間の間に 8.5cm、春中は 5cm、春下は 13.5cm 変化した。以上のことから、補助暗渠による地表水の迅速な移動により秋は水位低下が早かった。したがって補助暗渠により排水機能が高まったことがわかる。

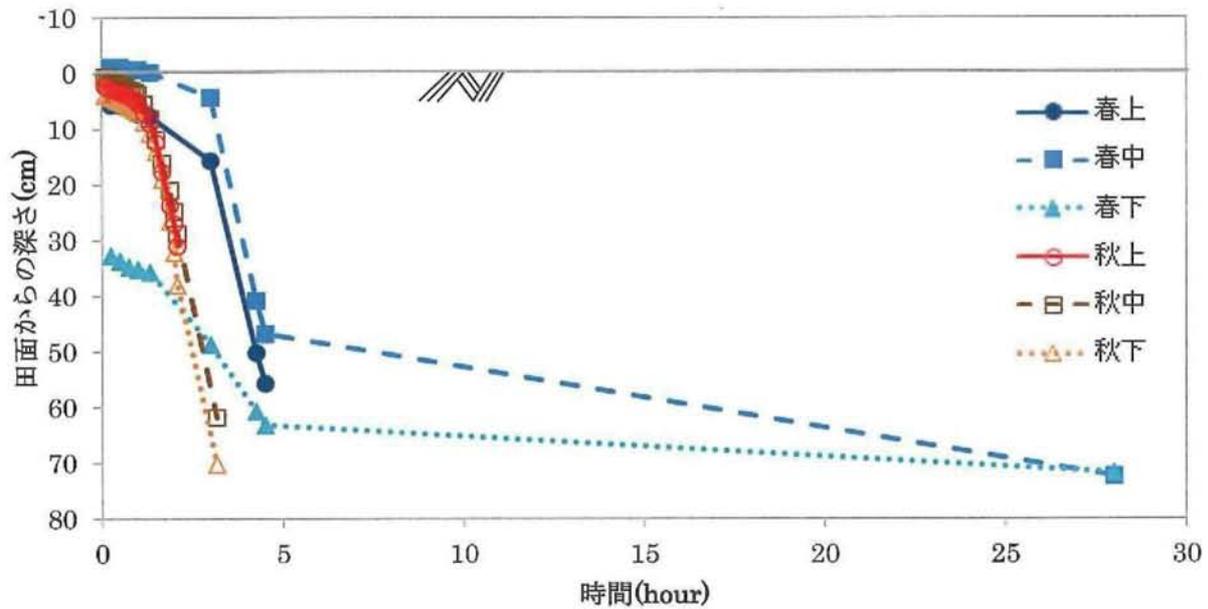


図 3-31 排水開始からの用水路側立ち上がり管水位の経時変化

排水開始を 0 時間とし，春は排水開始から 28 時間後まで，秋は排水開始から 3 時間 20 分後までの変動

(3) 排水口水位

春と秋の給水時における多機能排水柵内の排水口水位の経時変動を図 3-32 に示した。排水口水位については春と秋で水位上昇に大きな違いは見られなかった。

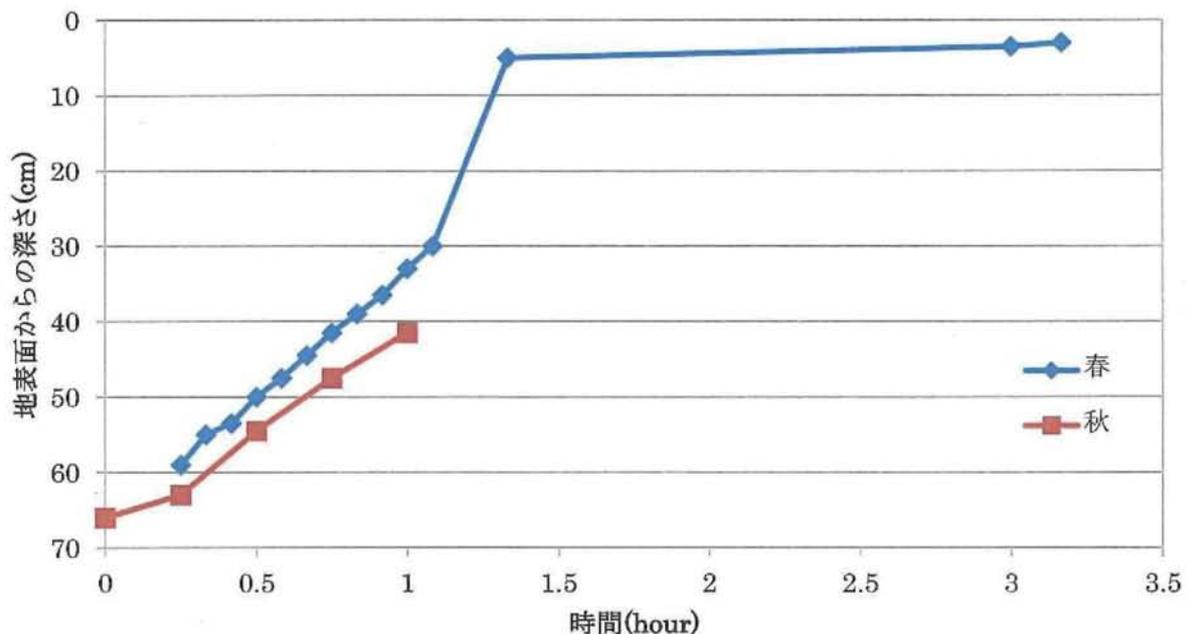


図 3-32 給水開始からの排水口水位の経時変化

給水開始を 0 時間とし，春は排水開始から 3.17 時間後まで，秋は給水開始から 1 時間後までの変動

(4) 暗渠管内流量の推定

ストレート暗渠区における多機能排水柵から排水路への排水は、図 3-27 で示したとおり、特異的であった。排水開始直後に最大流量を示さず、排水開始から 25 分で最大流量 Q_{\max} ($=9.5 \times 10^{-3}$ (m^3/s)) を観測した。

これだけの水を流せる要因を考察する。一般に、暗渠管内の流速 V は、マンニングの式、

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3.1)$$

から求められる (農林水産省, 2000)。また、流量 Q (m^3/s) は、

$$Q = VA = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A \quad (3.2)$$

で表す。ここに、 n : 陶管暗渠, および合成樹脂管の粗度係数 ($=0.012$), R ($=A_w/S$): 径深 (m), r : 暗渠管の半径 (m) I : 敷設勾配 ($=1/500$), S : 潤辺 (m), A_w : 通水断面積 (m^2) である。

多機能排水柵から排水路へは内径 0.15 (m) の塩ビ管を通じて排水される最大流量 Q_{\max} ($=9.5 \times 10^{-3}$ (m^3/s))。この時、現実の敷設勾配 I ($=1/250$) を式 (3.1) と (3.2) に代入しても再現できず、(仮想) 敷設勾配 I' ($=1/50$) を代入してはじめて、管内流速を求めると、1.27 (m/s) を得た (p.95 参照)。

一方、多機能排水柵から排水路への排水は、3 本の本暗渠 (吸水渠) の排水をまとめたものである。したがって質量保存則から、各吸水渠の 1 本当たり最大流量は 3.1×10^{-3} (m^3/s) となるはずである。ただし、式 (3.2) に敷設勾配 $I=1/500$ を代入すると、管内流量 Q は最大で 1.25×10^{-3} (m^3/s) となり実測の最大流量 Q_{\max} を説明できない。このため実測の最大流量 Q_{\max} を合理的に説明するには、敷設勾配 I を現実よりも大きな値を与えてはじめて質量保存則を成立させ得る。この時の仮敷設勾配 I' は、1/80 であった。

吸水渠上端畦畔には、立ち上がり管があり、排水時にここから大気が浸入し管内の水を押し出す。このため、本土壌水管理システムを利用することは、吸水管上端を地中で閉じた一般的な吸水管に比べ、敷設勾配以上に排水量を大きくできた理由と考える。吸水渠の管内洗浄ができるため、暗渠機能の長寿命化に奏功する。

第4章 表計算土壌水分動態モデルの応用

本章では、埋め戻し部を有した成層土壌水田における暗渠周辺の土壌水の運動についてエクセル（2010版）で行った数値計算について論ずる。水稻は、世界3大穀物である。このため、水田は広く世界的に広がり、その管理は今日的課題である。特に、水田は粘質土壌の低平地に多く、灌漑・排等の水管理には多くの労を伴ってきた。数値解析は、この土壌水の移動を予測するための手法として有用である。ここでは、エクセルを用い土壌水分動態モデルを紹介する。なお、数値解析には差分法（Finite Difference Method）を用い、浸透は定常条件とした。数値解析のために、全ポテンシャル、流れ関数など数枚のシートを準備した。それぞれのセルに基礎方程式を入力し、各シートを往来しながら計算精度を向上させた。結論的に、1）地下から灌漑した用水は、埋め戻し部のもみ殻を通じて作土層に移動した、2）地下水位は灌漑中、または排水中に迅速に変動した、3）数値計算で求めた土壌水分の鉛直分布は測定値を合理的に再現したことを明らかにした。

第4章は、「土壌-植物-大気システムにおける測定とモデル化技術の40年のあゆみ：応用と挑戦」に関する国際会議に発表した論文（エルゼビア社の *Procedia Environmental Science*）を示す。なお、2013年6月の出版から521回の引用された。

第5章 総合考察と今後の課題

現地観測

陶管暗渠と多機能排水柵による土壤水管理システムは、本研究により十分に機能検証できた。山地の伏流水や上部水田からの畦畔浸透のある粘質土水田であってもその機能が確認できた。2013年は水稻生育期間中(特に測定日前後)に降雨が多かったこと、土壤の地耐力がほぼ十分であったこと、2013年の稲作収量が、昨年度よりも減少したが周りと比べるとよかったことから、暗渠の排水性は十分だったと考える。以下、個別課題について述べる。

(1) 土壤水分

どの測点のどの深さにおいても土壤水分の変動は小さかった。中干し期間中に測定できなかったこと、測定の前日や当日に降雨があったことが影響したと考える。土壤水分が低下するには降雨のない一定程度の期間が必要だと考えられる。また8月9日から24日の期間は降雨がなく地下水位が低下していたが土壤水分の測定を行えなかった。このことも、土壤水分の変動がみられなかった原因のひとつであると考えられる。

(2) 地下水位

測定期間は降雨のある日が多く、降雨と地下水位変動の相関が高かった。圃場によって地下水位変動の形が異なることもわかった。ストレート暗渠区では稲刈り直前の9月10日には地下水位を地表面下55cmまで下げることができた。また8月6日から14日までの無降雨期に、他の3圃場と異なりぎざぎざと段階的に水位低下した。地下水位と土壤水分の間の相関は低かった。降雨が多かったため、地下水位が低下しても土壤が乾燥する前に再び雨が降り、土壤水分との関係がみられなかった。地下水位変動は基本的に亀裂浸透により、土壤水分変動は土塊内部の間隙に水が浸透してはじめて変化する。この土壤水移動の質的な違いが相関性を低くしたと考える。

(3) 土壤硬度

2回の測定に限られた。また天候の悪い日であったため地耐力の確認が困難であった。しかし農業機械での稲刈り作業は滞り無かったことから、コンバインの走行性に問題がなく、前日の降雨による地下水位の上昇は地耐力を著しく低下させることはなかったと判断した。

地下灌漑試験

(1) 土壤水分

春、秋どちらの地下灌漑試験においても、土壤水分の変動は測定できなかった。春の試験の測点iの作土のみ乾燥、湿潤が分かれた。アクセスチューブを設置直後に試験を開始したためアクセスチューブが土壤になじんでないこと、測定器PR1の電極が水分を含んだことなどが土壤水分の測定がうまく行えなかった理由と考える。昨年度の連結暗渠区での地下灌漑試験の結果を考慮すると、土壤水分の変動には圃場の耕起が重要であることが確認できた。

(2) 用水路側立ち上がり管水位

補助暗渠の有無により排水開始後の水位低下の速度に違いが生じた。立ち上がり管からの大気導入、および補助暗渠により地表水が移動しやすくなり、迅速に排水が行われたと考える。

(3) 排水口水位

排水口水位は春と秋の試験で変動に違いがみられなかった。いずれも給水された水はまず最も移動しやすい陶管暗渠管内を満たし、その後暗渠管の隙間から水が浸み出し、土壤中を移動したと考えられる。

(4) フラッシング効果の検証

pH, SS, EC, 排水量を測定値からフラッシング機能を検証した。浮遊物質 SS は、排水開始直後に高かったが時間の経過とともに急激に低下した。このことから、排水開始の高い管内流速で一気に洗浄し、粘質土や土砂などの堆積物を除去したと考える。また、暗渠排水量は、排水開始から約 30 分でピーク値を示した。排水量の大きさ、排水開始直後よりも 30 分後のほうが流量が大きいことなど、非常にユニークな暗渠流出特性を明らかにした。暗渠上端の立ち上がり管からの大気の導入が奏功していると考えられる。

今後の課題

較正試験

湿潤過程と乾燥過程で較正試験を行ったが、湿潤過程では較正試験装置のバケツ内に土壌を締固めて入れてしまったため、土壌の膨潤を妨げた。そのため水分を含んでも体積があまり変化せず、較正曲線の式にあてはめても実際の水田の状態と異なる体積含水率となってしまう。乾燥過程ではバケツ内をスコップで掘り起し、耕起した状態を想定し試験を行った。布を差し込むことで乾燥を進めたが、思うように乾燥が進まず、期間中に較正試験を完了させることができなかつた。また質量の測定は2つのはかりを用いたが、バケツをまわし様々な方向で質量をはかるたびに異なる値となった。

粘土質の土壌は膨潤・収縮により体積が変わるため、正確な体積含水率を求めるのは熟練の技が求められる。その際データ数を増やすことで精度の向上が可能であると考えられる。また乾燥過程では、ビールケースを逆さにし、その上にはかりを置いて質量を量った。この際2つのビールケースに板を渡し、測定時のビールケースの底の変形を防いだ。しかし実際にははかりが固定されておらず不安定な状態となってしまう可能性がある。このため机の上など安定した台ではかることでより精度の向上が期待される。質量の測定が困難ではあったが、相関係数が 60cm のセンサーで 0.9328、100cm のセンサーで 0.9057 と高い値となった。さらに乾燥を進め、より電圧の低い状態での体積含水率を求め、較正曲線を完成させる必要がある。

土壌水分

本研究で測定した土壌水分は、現地観測の期間も地下灌漑試験の期間もほとんど変動がなかった。アクセスチューブのなじみ方や圃場状態に関係なく、センサー自体に問題があることも考えられる。圃場での測定は2つある PR1 のうち片方のみを使用していたが、センサーの異常を知るためには両方を使用する必要もあると考える。

地下水位

地下水位と降雨の相関はあったが、無降雨期間のストレート暗渠区の特異的な地下水位変動

については気象との関係性がみられなかった。潮位データも気温データも供試圃場から離れた地点のものを用いたため、相関がなかったことも考えられる。毎回の計測ごとに気温を測定するか、圃場に温度計を設置し、気温と地下水位との関係性を調べる必要があると考える。

地下灌漑試験

用水路側立ち上がり管の水位測定を手動で行っていたが、水位計を用いるべきであった。そうすれば厳密に水位変動を知ることができ、また空いた人手で排水口水位、流量、土壌水分などの測定をより細かい間隔で行うことも可能であったと考える。

連結暗渠区とストレート暗渠区を同一条件の下で地下灌漑・排水試験を行うことも必要と考える。ストレート暗渠区の立ち上がり管(下)は本暗渠(C)により排水口とストレートで繋がっているため一番排水が行われやすく、本暗渠(B)は上流側からも排水が行われていて抵抗が大きくなり、本暗渠(A)はまっすぐ進み下流側に向かい、さらに本暗渠(B)と合流するため排水が行われにくいと考えている。これらのことを検証するため、耕起の有無を統一し、同一日時で試験を行い、連結暗渠区とストレート暗渠区の灌漑・排水の特性を考察する必要があると考える。

また、フラッシング効果の検証については本研究で初めて成果が見られた。今後は土砂を堆積させた模擬暗渠を作成し、管内の洗浄具合を可視化できたら良いと考える。

追記

本報告書は、2013年度新潟大学農学部卒業論文 壘実佳子『陶管暗渠と多機能排水柵による土壌水管理システムの機能検証』に加筆修正したものである。

謝辞

本研究は、多くの方の協力で行われた。JA ささかみの田中政喜氏には、供試水田の提供、および聞き取り調査に協力いただいた。新発田地域振興局地域整備部には、供試水田から至近距離にある大室の雨量のデータを提供していただいた。また、本研究はJSPS 科研費 23580345、およびNPO 法人食農ネットささかみの調査研究費の助成を受けた。ここに記して深謝の意を表します。

引用文献

粟生田忠雄(2013)：陶管暗渠を利用した低湿水田における効果的な土壌水管理システムの開発
阿賀野市の位置・地勢

<http://www.city.agano.niigata.jp/gaiyou/ichi.html> (2014年1月19日参照)

小田製陶ホームページ

<http://www.odakame.com/index.html> (2013年12月18日参照)

気象統計情報 潮汐・海面水位のデータ 潮位表 新潟東港

<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2013年12月13日参照)

気象統計情報 過去の気象データ検索 新津

<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2014年1月20日参照)

地盤工学会(2010):土質試験 基本と手引き 第二回改訂版,丸善, pp.19-21, pp.28-35.

新潟県河川防災情報システム 雨量情報 大室

<http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen/> (2013年11月11日参照)

新潟県白地図

http://technocco.jp/n_map/0150niigata.html (2013年11月21日参照)

農業環境技術研究所(2009):土壌情報閲覧システム 土壌分類解説

http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/soil_db/explain_14B.phtml (2013年11月19日参照)

農林水産省構造改善局(2000):土地改良事業計画設計基準・計画「暗渠排水」基準書・技術書,
農業土木学会, p.109, p.127.

補論

Appendix

浮遊物質質量(SS)の測定方法

1. 器具および装置

- ①ろ過器
- ②ろ過材：孔径 1 μ m で直径 24~55mm のガラス繊維ろ紙
- ③乾燥器：105~110℃に温度が調節できるもの

2. 試験操作

- ①ろ過材をあらかじめろ過器に取り付け、水で十分に吸引洗浄する。このろ過材を 105~110℃の乾燥器中で 2 時間乾燥し、デシケーター中で放冷した後、質量を求める。
- ②ろ過材を適当なろ過器に固定し、網目 2mm のふるいを通した試料の適量(乾燥後の浮遊物質質量が 5mg 以上になるようにする)を注ぎ入れ、吸引ろ過する。更に吸引を続けながら試料容器及びろ過器の壁に付着した浮遊物質を水でろ過材の上に洗い落とし、これを水で数回洗浄した後、水分をできるだけ吸引する。
- ③このろ過材をろ過器から取り外して時計皿等の上に移し、105~110℃の乾燥器中で 2 時間乾燥した後、デシケーター中で放冷する。
- ④このろ過材及び浮遊物質 SS の質量を量り次の
浮遊物質質量(mg/L)=(a-b) \times (1000/試料量(ml))
で算出する。ここで、a 及び b は、それぞれ a：ろ過乾燥後のろ過材及び浮遊物質の質量(mg)、b：ろ過材の質量(mg)である。

土粒子の密度試験

1. 実験器具

- ①ピクノメーター：容量 50mL 以上のもの
- ②はかり：0.001g まではかれるもの
- ③温度計：最小目盛 0.5 または 1℃のもの
- ④高温乾燥炉
- ⑤分離器具：乳鉢や乳棒
- ⑥デシケーター
- ⑦洗浄びん
- ⑧蒸発皿
- ⑨減圧機
- ⑩金属製網ふるい
- ⑪脱塩水

2. 試料の準備

- ①2mmふるい残留試料を密度試験用試料として用いる。その際に糲殻等の混入物は誤差に直結するため、ピンセットですべて取り除く。
- ②試料は分離器具を用いて十分ほぐしておく。

3. 試験方法

(1)ピクノメーターの検定

- ①ピクノメーターの質量 $m_f(g)$ を測定する。
- ②ピクノメーターに脱塩水を満たす。その時の全質量 $m'_a(g)$ とピクノメーター内の水温 $T'(g)$ を測定する。

(2)測定

- ①ピクノメーターに試料を入れ、脱塩水をピクノメーターの2/3程度になるように入れる。
- ②減圧機を用いて脱気をする。十分に気泡を取り除くために時々ピクノメーターを揺らす。
- ③ピクノメーターに脱塩水を加え、ストッパーを付けて満たす。全質量 $m_b(g)$ と内容物の温度 $T(°C)$ を測定する。
- ④ピクノメーターの内容物を蒸発皿に全量取り出し、 $(110 \pm 5)°C$ で一定質量になるまで炉乾燥する。
- ⑤炉乾燥試料をデシケータ内でほぼ室温になるまで冷まし、試料の炉乾燥質量 $m_s(g)$ を測定する。

4. 結果の整理

- ①温度 $T(°C)$ の脱塩水で満たされたピクノメーターの質量 m'_a を m_b を計測時の温度 $T(°C)$ における質量 $m_a(g)$ に変換する。変換は次の

$$m_a = \frac{\rho_w(T)}{\rho_w(T')} \times (m'_a - m_f) + m_f \quad (a.1)$$

を用いる。ここに、 m'_a ：温度 $T'(°C)$ の蒸留水を満たしたピクノメーターの質量(g)、 m_f ：ピクノメーターの質量(g)、 $\rho_w(T')$ ： (T') における脱塩水の密度(g/cm^3)、 $\rho_w(T)$ ： (T) における脱塩水の密度(g/cm^3)である。

- ②土粒子の密度 $\rho_s(g/cm^3)$ は次の

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \times \rho_w(T) \quad (a.2)$$

で算出する。ここに、 m_s ：炉乾燥試料の質量(g)、 m_b ：試料と温度 $T(°C)$ の脱塩水を満たしたピクノメーターの質量(g)である。

- ③3つの測定値の平均をその試料の土粒子の密度 $\rho_s(g/cm^3)$ とする。

土壌の粒度試験

1. 試験器具・試薬

- ①金属製網ふるい：JIS Z 8801-1に規定されたもの。

- ②分散装置：団粒化した土粒子を強制的に個々の粒子に分散することができるもの。
- ③浮ひょう：ガラス製の浮きで、密度 $0.995\sim 1.050\text{ g/cm}^3$ ごとに目盛線を付けたもの。
- ④電子天秤：メトラー社、PB303-S/FACT。
- ⑤ビーカー：容量 500mL 以上。
- ⑥温度計：最小目盛 0.5°C または 1°C 。
- ⑦メスシリンダー：容量 250mL および 1L。
- ⑧ノギス：最小読取値 0.05mm 以下
- ⑨ときほぐし器具：木づち、乳鉢および乳棒。
- ⑩試薬：a)過酸化水素 6%溶液, b)分散剤：ヘキサメタリン酸ナトリウムの溶液など, c)脱塩水。
- ⑪含水比測定器具。
- ⑫その他：時計、ホーローバット、攪拌用ガラス棒、ゴムへら、洗淨びん。

2. 試料の準備

- ①試料をよく混合し、その約 1/4 をとり含水比 $w(\%)$ を測定する。
- ②残りの試料を粒度試験用とし、全質量 $m(\text{g})$ をはかる。
- ③全試料を 2mm ふるいでふるい、粒径 2mm 以上の残留試料と粒径 2mm 未満の通過試料の 2 つに分ける。

3. 粒度試験の方法

2mm ふるい通過試料の沈降分析法

あらかじめ土粒子密度 ρ_s を求めておく。

(1)浮ひょうの検定

- ①浮ひょうを脱塩水の中に浮かべ、メニスカス上端 r_U および下端 r_L を読み取り、メニスカスの補正值 $C_m (=r_L - r_U)$ を求める。
- ②浮ひょうの球部をメスシリンダー(容量 250mL)の水に浸して、その体積 $V_B(\text{cm}^3)$ を 1 cm^3 まで測定する。
- ③ノギスにより浮ひょう球部の長さ $L_B(\text{mm})$ 、浮ひょう球部の上端から目盛線 1.000 までの長さ $l_1(\text{mm})$ および 1.050 までの長さ $l_2(\text{mm})$ を 0.1mm まで測定する。
- ④メスシリンダー(容量 1L)の内径をはかり、断面積 $A(\text{cm}^2)$ を 0.01 cm^2 まで計算する。
ここで、使用した浮ひょうの各測定値を表 A-1 に示す。

表 A-1 浮ひょうの検定

浮ひょう No.	$l_1(\text{mm})$	$l_2(\text{mm})$	$L_B(\text{mm})$	$V_B(\text{mm})$	$C_m(\text{mm})$
17.8	111.3	18	137	34	0.0008
17.26	114.6	18.9	139.5	36	0.0008
1082	116.3	8.6	144.3	41	0.0008
1079	117.5	9	140.8	40	0.0008

4. 試料の準備

- ①試料は炉乾燥質量に換算して、砂質土系の土では 115g 程度、粘質土系の土では 65g 程度を分取する。
- ②試料をよく混合し、その約 1/4 をとり含水比 $w_i(\%)$ を測定する。
- ③残りの試料を沈降分析用試料とし、質量 $m_i(g)$ をはかる。

5. 試料の分散

- ①ビーカーに試料と過酸化水素 6% 溶液約 100mL を入れ、一様になるまで攪拌する。
- ②ビーカーにアルミホイルでふたをした後、 $(110\pm 5)^\circ\text{C}$ の乾燥炉に約 1 時間入れる。
- ③乾燥炉からビーカーを取り出し、脱塩水約 100mL を加えて試料を水に浸し、15 時間以上放置する。
- ④これを分散容器に移し、脱塩水を加えて全量を約 700mL にする。
- ⑤分散剤 10mL を加え、分散装置で約 5 分間攪拌する。



図 A-1 分散装置(三洋試験機, SC-VS)

6. 沈降分析

沈降分析は試料の懸濁液の密度を測定して行う。

- ①分散後の試料の全量を容量 1L のメスシリンダーに移し、1L になるまで脱塩水を加える。
- ②これを恒温室内に置き、懸濁液の温度が水温あるいは室温と等しくなるまで放置する。
- ③メスシリンダーを取り出し、ふたをして逆さにしたり戻したりする操作を 1 分間続けて内容物を均一な懸濁液にした後、恒温室内に静置する。
- ④静置後、1, 2, 5, 15, 30, 60, 240, 1440 分に浮ひょうを浮かべ、その読み r と懸濁液の温度 $T(^\circ\text{C})$ を測定する。



図 A-2 沈降分析の様子

0.075mm~2mm ふるい残留試料のふるい分析方法は、沈降分析後の試料を用い、粒径 0.075mm~2mm の土粒子の粒度をふるい分けで求める。続いて、①メスシリンダー内の試料を 75 μm ふるいの上で水洗いし、細粒分を十分に洗い流す。②残留試料を $(110\pm 5)^\circ\text{C}$ で一定質量になるまで炉乾燥する。③乾燥後の試料を 850, 420, 250, 106, 75 μm ふるいでふるい分けて各ふるいに残留した試料の質量 $m(d_i)(g)$ を測定する。

7. 結果の整理

ふるい分析結果の計算手順を示す。

(1) 2mm ふるい残留試料

①全試料の炉乾燥質量 m_s (g)は

$$m_s = \frac{m}{1+w/100} \quad (\text{A.1})$$

で求める。ここに、 m ：全試料の質量(g)、 w ：全試料の含水比(%)である。

②2mm 以上の粒径 d_i に対する通過質量百分率 $P(d_i)$ (%)は

$$P(d_i) = \left(1 - \frac{\sum m(d_i)}{m_s}\right) \times 100 \quad (\text{A.2})$$

で計算する。ここに、 $\sum m(d_i)$ ：目開き d_i 以上のふるいに残留する試料の炉乾燥質量 $m(d_i)$ の総和(g)である。

(2) 75 μm ふるい残留試料

①沈降分析用試料の炉乾燥質量 m_{Is} (g)を式(A.3)で求める。

$$m_{Is} = \frac{m_I}{1+w_I/100} \quad (\text{A.3})$$

ここに、 m_I ：沈降分析用試料の質量(g)

w_I ：沈降分析用試料の含水比(%)

②0.075mm~2mm の粒径 d_i に対する通過質量百分率 $P(d_i)$ (%)は

$$P(d_i) = \frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \left(1 - \frac{\sum m(d_i)}{m_{Is}}\right) \times 100 \quad (\text{A.4})$$

で計算する。ここに、 m_{0s} ：2mm ふるい残留試料の炉乾燥質量(g)、 $\sum m(d_i)$ ：目開き d_i 以上のふるいに残留する試料の炉乾燥質量 $m(d_i)$ の総和(g)である。

8. 沈降分析結果の計算

粒径 0.075mm 未満の土粒子の通過質量百分率の計算は次の手順で行う。

①時間 t における浮ひょうの読み r に対する有効深さ L (mm)は

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_B - \frac{V_B}{A} \times 10 \right) \\ L_1 = l_1 - 20(r + C_m)(l_1 - l_2) \quad (\text{A.5})$$

で求める。ここに、 L_1 ：浮ひょう球部の上端から r までの長さ(mm)、 l_1 ：浮ひょう球部の上端から目盛線 1.000 までの長さ(mm)、 l_2 ：浮ひょう球部の上端から目盛線 1.050 までの長さ(mm)、 L_B ：浮ひょう球部の長さ(mm)、 V_B ：浮ひょう球部の体積(cm^3)、 A ：メスシリンダーの断面積(cm^2)である。

②有効深さ L (mm)の懸濁液中の土粒子径 d (mm)は次の

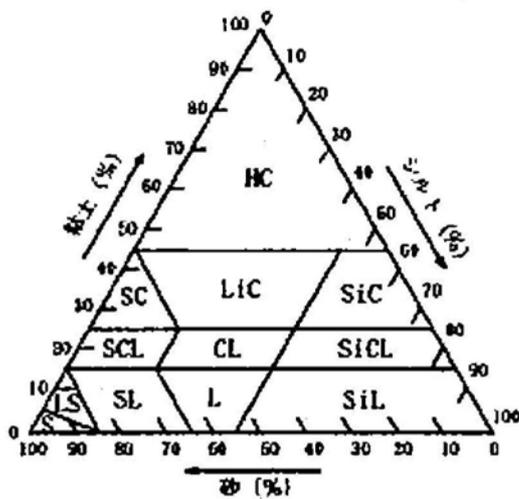
$$d = \sqrt{\frac{30\eta}{g_n(\rho_s - \rho_w)}} \cdot \frac{L}{t} \quad (\text{A.6})$$

で計算する。ここに、 t :メスシリンダー静置後の時間(min), T :時間 t における懸濁液の温度($^{\circ}\text{C}$), η : $T^{\circ}\text{C}$ の水の粘性係数($\text{Pa}\cdot\text{S}$), ρ_s :土粒子の密度(g/cm^3), ρ_w : $T^{\circ}\text{C}$ の水の密度(g/cm^3), g_n :標準の重力加速度である。

③土粒子径 $d(\text{mm})$ に対する通過質量百分率 $P(d)(\%)$ は次の

$$P(d) = \frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} (r + C_m + F) \rho_w \times 100 \quad (\text{A.7})$$

計算する。ここに、 V :懸濁液の体積($=1000\text{cm}^3$), F :浮ひようの読みを取ったときの懸濁液の温度に対する補正係数である。



- | | |
|--------------|---------------|
| S: 砂土 | LS: 壤質砂土 |
| SL: 砂壤土 | L: 壤土 |
| SiL: シルト質壤土 | SCL: 砂質埴壤土 |
| CL: 埴壤土 | SiCL: シルト質埴壤土 |
| SC: 砂質埴壤土 | LiC: 軽埴土 |
| SiC: シルト質埴壤土 | HC: 重埴土 |

図 A-3 国際土壌学会の土性分類(三角座標)

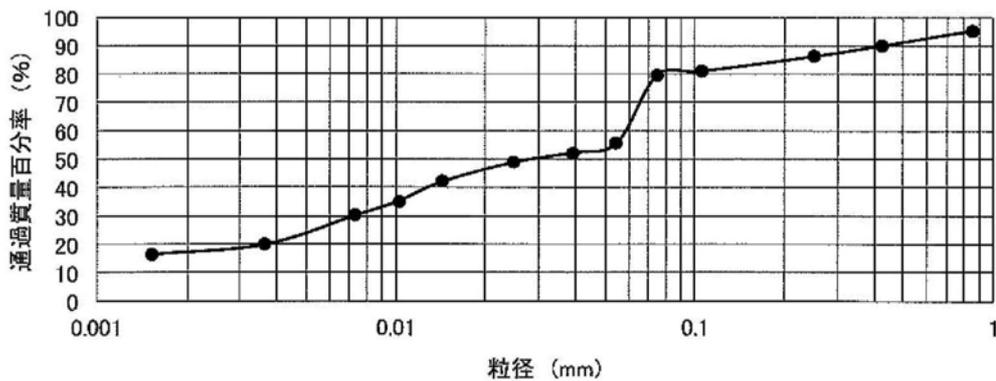
土の粒度試験 (2mmふるい通過分析)

調査件名		0cm			試験年月日		2014年1月15日			
					試験者		壘 実佳子			
2mmふるい通過試料					土粒子の密度 ρ_s		g/cm ³		2.604	
含水比	容器No.				塑性指数	I_p				
	m_a g	34.9	34.9	35	分散装置の容器No.					
	m_b g	34.5	34.5	34.7	メスシリンダーNo. (直径 ϕ cm)		6.560			
	m_c g	27.9	28	28	浮ひようNo.		17.8			
	ω_1 %	6.1	6.2	4.5	メニスカス補正值 C_m		0.0008			
平均値 ω_1 %				5.6	使用した分散剤、溶液濃度、溶液添加量					
(沈降分析用試料+容器)質量										
容器(No.)質量		g				全試料の乾燥質量に対する2mmふるい通過試料の乾燥質量の比 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$				
沈降分析用質量 m_1		g		50.1		1.000				
沈降分析用試料の乾燥質量		$m_{1s} = \frac{m_1}{1 + \omega_1/100}$ g		47.5		$M = \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times 100$				
						3415				
沈降分析										
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
測定時刻	経過時間	浮ひようの読み	測定時の水温	有効深さ	$\sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s - \rho_w)}}$	粒径 d $\text{⑥} \times \sqrt{\frac{L}{t}}$ mm	補正係数 F	加積通過率 P M × (③+F) %	通過質量百分率 P(d) % $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$	
	t min	少数部分 r r + C _m	°C	L mm						
	1	0.0150	0.0158	17.3	145.28	0.0045	0.05468	0.0005	55.7	55.7
	2	0.0140	0.0148	17.3	147.15	0.0045	0.03891	0.0005	52.3	52.3
	5	0.0130	0.0138	17.3	149.02	0.0045	0.02476	0.0005	48.8	48.8
	15	0.0110	0.0118	17.5	152.75	0.0045	0.01429	0.0005	42.0	42.0
	30	0.0090	0.0098	17.9	156.48	0.0045	0.01023	0.0005	35.2	35.2
	60	0.0075	0.0083	18.3	159.28	0.0045	0.00730	0.0005	30.1	30.1
	240	0.0045	0.0053	18.8	164.88	0.0044	0.00365	0.0005	19.8	19.8
	1440	0.0030	0.0038	19.5	167.68	0.0045	0.00153	0.001	16.4	16.4
ふるい分析 (沈降分析を行う場合)										
ふるい	容器No.	(残留試料+容器)質量	容器質量	残留試料質量	加積残留試料質量	加積残留率 %	加積通過率 P	通過質量百分率		
μm		g	g	m(d) g	$\Sigma m(d)$ g	$\frac{\Sigma m(d)}{m_{1s}} \times 100$	$\left(1 - \frac{\Sigma m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$ %	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$ %		
850		331.59	329.3	2.29	2.29	4.8	95.2			
425		331.81	329.3	2.51	4.8	10.1	89.9			
250		331.07	329.3	1.77	6.57	13.8	86.2			
106		331.73	329.3	2.43	9	19.0	81.0			
75		329.93	329.3	0.63	9.63	20.3	79.7			
メスシリンダー断面積(cm ²)	A			33.78	19°C	0.001027	0.030810			
水の粘性係数(Pa·s)	η 17°			0.00108	18°C	0.001053	20°C	0.001002		
	30 η			0.0324		0.03159		0.03006		
	gn($\rho_s - \rho_w$)			1574.505		1574.505	1575.486	1575.486		
蒸留水の密度(g/cm ³)	ρ_w 17°			0.999	18°C	0.999	20°C	0.998		
重力加速度(cm/s ²)	g			981		19°	0.998			
	l1			111.3						
	l2			18						
	LB			137						
	VB			34						

土の粒度試験（粒径加積曲線）

					試験年月日	2014年1月15日	
					試験者	豊実佳子	
試料番号 (深さ)	0						
ふるい分析	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %		
	75		75		中礫分 %		
	53		53		細礫分 %		
	37.5		37.5		粗砂分 %		
	26.5		26.5		中砂分 %	9.0	
	19		19		細砂分 %	6.4	
	9.5		9.5		シルト分 %	49.7	
	4.75		4.75		粘土分 %	30.1	
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %		
	0.85	95.2			425 μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.425	89.9			75 μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.25	86.2			最大粒径 mm		
	0.106	81.0			60%粒径 D_{60} mm		
	0.075	79.7			50%粒径 D_{50} mm		
	沈降分析	0.05468	55.7			30%粒径 D_{30} mm	
0.03891		52.3			10%粒径 D_{10} mm		
0.02476		48.8			均等係数 U_c		
0.01429		42.0			曲率係数 U_c		
0.01023		35.2			土粒子の密度 ρ_s , g/cm ³	2.604	
0.00730		30.1			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム	
0.00365		19.8			溶液濃度、溶液添加量	5%、10ml	
0.00153		16.4					

粒径加積曲線



特記事項 SiC:シルト質埴土
 過酸化水素で酸化し分解する段階でピーカーの内容物が多く吹きこぼれてしまい、
 0.075mm付近で急激に通過質量百分率が上昇してしまった。

土の粒度試験 (2mmふるい通過分分析)

調査件名		10cm		試験年月日		2014年1月15日	
				試験者		豊 実佳子	
2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s		g/cm ³ 2.613	
含水比	容器No.			塑性指数 I_p			
	m_a g	37.6	38.5	36.8	分散装置の容器No.		
	m_b g	37.1	38	36.4	メスシリンダーNo. (直径 ϕ cm)		6.430
	m_c g	28.1	28.1	27.1	浮ひようNo.		17.26
	ω_1 %	5.6	5.1	4.3	メニスカス補正值 C_m		0.0008
平均値 ω_1 %				5.0	使用した分散剤、溶液濃度、溶液添加量		
(沈降分析用試料+容器)質量		g					
容器(No.)質量		g		全試料の炉乾燥質量に対する2mm			
沈降分析用質量 m_1		g		50.5	ふるい通過試料の炉乾燥質量の比 m_s		1.000
沈降分析用試料の炉乾燥質量		$m_{1s} = \frac{m_1}{1 + \frac{\omega_1}{100}}$ g		48.1	$M = \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times 100$		3362

沈降分析

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
測定時刻	経過時間	浮ひようの読み		測定時	有効深さ	粒径 d	補正係数	加積通過率	通過質量百分率
	t	少数部分	r'	の水溫	L	$\sqrt{\frac{30\eta}{g_s(\rho_s - \rho_w) t}}$	$F = \frac{L}{d} \times \sqrt{\frac{L}{t}}$	P	$P(d)$ %
	min	r	$r + C_m$	°C	mm	mm	F	$M \times (③ + F)$	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
								%	m_s
	1	0.0160	0.0168	17.3	146.65	0.0045	0.05478	0.0005	58.2
	2	0.0150	0.0158	17.3	148.56	0.0045	0.03899	0.0005	54.8
	5	0.0130	0.0138	17.3	152.39	0.0045	0.02497	0.0005	48.1
	15	0.0105	0.0113	17.5	157.18	0.0045	0.01446	0.0005	39.7
	30	0.0080	0.0088	17.6	161.96	0.0045	0.01038	0.0005	31.3
	60	0.0070	0.0078	18	163.87	0.0045	0.00738	0.0005	27.9
	240	0.0040	0.0048	18.7	169.62	0.0044	0.00371	0.0005	17.8
	1440	0.0025	0.0033	19.5	172.49	0.0044	0.00151	0.001	14.5

ふるい分析 (沈降分析を行う場合)

ふるい	容器No.	(残留試料+容器)質量	容器質量	残留試料質量	加積残留試料質量 g	加積残留率 %	加積通過率 P	通過質量百分率
μm		g	g	m(d)	$\sum m(d)$	$\frac{\sum m(d)}{m_{1s}} \times 100$	$\left(1 - \frac{\sum m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
				g		m_{1s}	%	m_s %
850		331.06	329.3	1.76	1.76	3.7	96.3	
425		331.14	329.3	1.84	3.6	7.5	92.5	
250		330.5	329.3	1.2	4.8	10.0	90.0	
106		331.58	329.3	2.28	7.08	14.7	85.3	
75		330.04	329.3	0.74	7.82	16.3	83.7	

メスシリンダー断面積(cm ²)	A	32.46	19°C	0.001027	30 η	0.03081
水の粘性係数(Pa·s)	η 17°C	0.00108	18°C	0.001053	20°C	0.001002
	30 η	0.0324		0.03159		0.03006
	$gn(\rho_s - \rho_w)$	1583.334		1583.334		1584.315
蒸留水の密度(g/cm ³)	ρ_w 17°C	0.999	18°C	0.999	20°C	0.998
重力加速度(cm/s ²)	gn	981	19°C	0.998	$gn(1$	1584.315
	$l1$	114.6				
	$l2$	18.9				
	LB	139.5				
	VB	36				

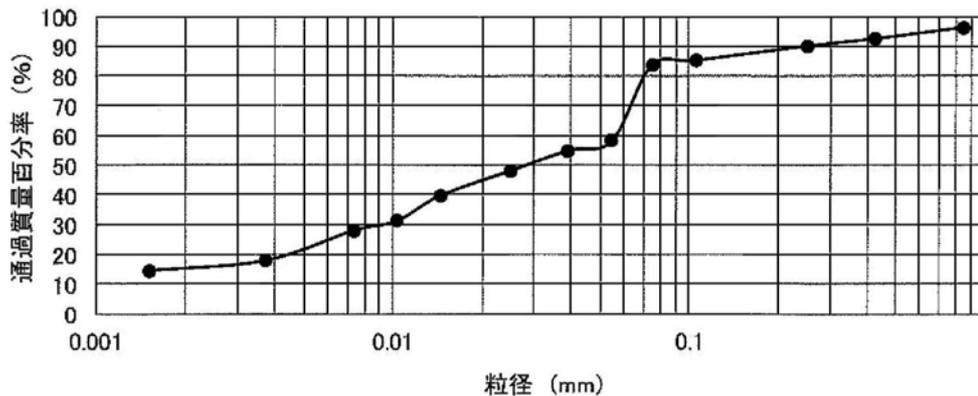
土の粒度試験（粒径加積曲線）

試験年月日 2014年1月15日

試験者 疊 実佳子

試料番号 (深さ)						
ふるい分析	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %	
	75		75		中礫分 %	
	53		53		細礫分 %	
	37.5		37.5		粗砂分 %	
	26.5		26.5		中砂分 %	6.3
	19		19		細砂分 %	6.3
	9.5		9.5		シルト分 %	55.8
	4.75		4.75		粘土分 %	27.9
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %	
	0.85	96.3	0.85		425μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.425	92.5	0.425		75μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.25	90.0	0.25		最大粒径 mm	
	0.106	85.3	0.106		60%粒径 D ₆₀ mm	0.013
	0.075	83.7	0.075		50%粒径 D ₅₀ mm	0.008
沈降分析	0.05478	58.2			30%粒径 D ₃₀ mm	0.002
	0.03899	54.8			10%粒径 D ₁₀ mm	
	0.02497	48.1			均等係数 U _c	
	0.01446	39.7			曲率係数 U _c	
	0.01038	31.3			土粒子の密度 ρ _s g/cm ³	2.613
	0.00738	27.9			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム
	0.00371	17.8			溶液濃度、溶液添加量	5%、10ml
	0.00151	14.5				

粒径加積曲線



特記事項 SiC:シルト質埴土
 過酸化水素で酸化し分解する段階でビーカーの内容物が多く吹きこぼれてしまい、
 0.075mm付近で急激に通過質量百分率が上昇してしまった。

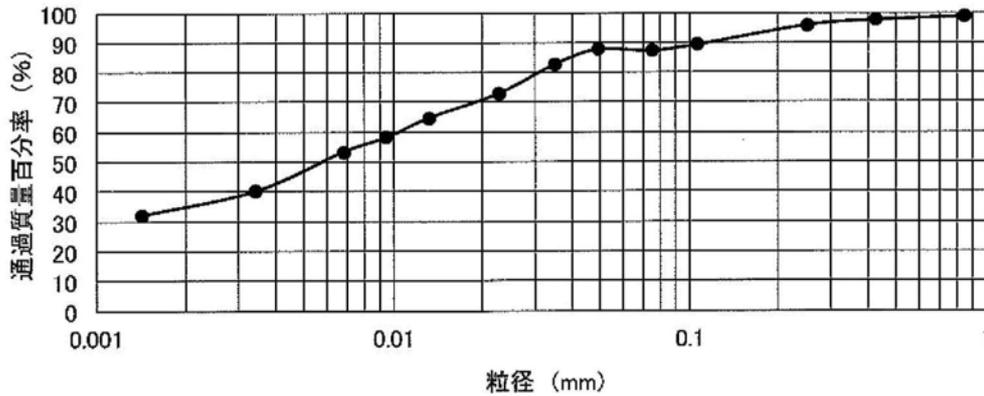
土の粒度試験 (2mmふるい通過分分析)

調査件名		25cm		試験年月日		2014年1月15日			
				試験者		豊実佳子			
2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s		g/cm ³ 2.730			
含水比	容器No.			塑性指数 I_p					
	m_s g	40	39.2	39.8	分散装置の容器No.				
	m_b g	39.6	38.7	39.3	メスシリンダーNo. (直径 Φ cm)		6.575		
	m_c g	28.3	27.2	26.9	浮ひようNo.		1082		
	ω_1 %	3.5	4.3	4.0	メニスカス補正值 C_m		0.0008		
平均値 ω_1 %				4.0	使用した分散剤、溶液濃度、溶液添加量				
(沈降分析用試料+容器)質量			g						
容器(No.)質量			g		全試料の炉乾燥質量に対する2mmふるい通過試料の炉乾燥質量の比 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$				
沈降分析用質量 m_1			g		50.1	1.000			
沈降分析用試料の炉乾燥質量			g		48.2	$M = \frac{V}{m_s} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times 100$			
					3270				
沈降分析									
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
測定時刻	経過時間	浮ひようの読み	測定時の水温	有効深さ	$\sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s - \rho_w)}}$	粒径 d	補正係数	加積通過率	通過質量百分率
	t	少数部分		L		$\textcircled{6} \times \sqrt{\frac{L}{r}}$	F	P	P(d) %
	min	r	°C	mm			M × (③+F)	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
		r+C _m					%	%	
	1	0.0255	0.0263	17.4	125.76	0.0044	0.04898	0.0005	87.6
	2	0.0240	0.0248	17.4	128.99	0.0044	0.03508	0.0005	82.7
	5	0.0210	0.0218	17.4	135.45	0.0044	0.02274	0.0005	72.9
	15	0.0185	0.0193	17.5	140.84	0.0043	0.01322	0.0005	64.7
	30	0.0165	0.0173	17.7	145.15	0.0043	0.00949	0.0005	58.2
	60	0.0150	0.0158	18.1	148.38	0.0043	0.00678	0.0005	53.3
	240	0.0110	0.0118	18.8	156.99	0.0043	0.00344	0.0005	40.2
	1440	0.0085	0.0093	19.4	162.38	0.0043	0.00143	0.0005	32.0
ふるい分析 (沈降分析を行う場合)									
ふるい	容器No.	(残留試料+容器)質量	容器質量	残留試料質量	加積残留試料質量 g	加積残留率 %	加積通過率 P	通過質量百分率	
μm		g	g	m(d)	$\sum m(d)$	$\frac{\sum m(d)}{m_{1s}} \times 100$	$\left(1 - \frac{\sum m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$	
				g			%	% %	
850		329.93	329.3	0.63	0.63	1.3	98.7		
425		329.89	329.3	0.59	1.22	2.5	97.5		
250		330.14	329.3	0.84	2.06	4.3	95.7		
106		332.44	329.3	3.14	5.2	10.8	89.2		
75		330.26	329.3	0.96	6.16	12.8	87.2		
メスシリンダー断面積(cm ²)		A	33.94						
水の粘性係数(Pa·s)		η 17°C	0.00108		18°C	0.001053		19°C	0.001027
		30 η	0.0324			0.03			0.03081
		gn($\rho_s - \rho_w$)	1698.1			1698			1699.092
蒸留水の密度(g/cm ³)		ρ_w 17°C	0.999		18°C	0.999		19°C	0.998
重力加速度(cm/s ²)		gn	981						
		l1	116.3						
		l2	8.6						
		LB	144.3						
		VB	41						

土の粒度試験（粒径加積曲線）

					試験年月日	2014年1月15日	
					試験者	梶 実佳子	
試料番号 (深さ)	25						
ふるい分析	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %		
	75		75		中礫分 %		
	53		53		細礫分 %		
	37.5		37.5		粗砂分 %		
	26.5		26.5		中砂分 %	3.0	
	19		19		細砂分 %	8.5	
	9.5		9.5		シルト分 %	33.9	
	4.75		4.75		粘土分 %	53.3	
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %		
	0.85	98.7	0.85		425μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.425	97.5	0.425		75μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.25	95.7	0.25		最大粒径 mm		
	0.106	89.2	0.106		60%粒径 D_{60} mm		
	0.075	87.2	0.075		50%粒径 D_{50} mm		
沈降分析	0.04898	87.6			30%粒径 D_{30} mm		
	0.03508	82.7			10%粒径 D_{10} mm		
	0.02274	72.9			均等係数 U_c		
	0.01322	64.7			曲率係数 U'_c		
	0.00949	58.2			土粒子の密度 ρ_s g/cm^3	2.730	
	0.00678	53.3			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム	
	0.00344	40.2			溶液濃度、溶液添加量	5%、10ml	
	0.00143	32.0					

粒径加積曲線



特記事項 HC:重塩土
 試料の分散が不十分であったため、粒子の沈降に不具合があった。
 このため、粒径加積曲線の0.075mm付近で右下がりになった。

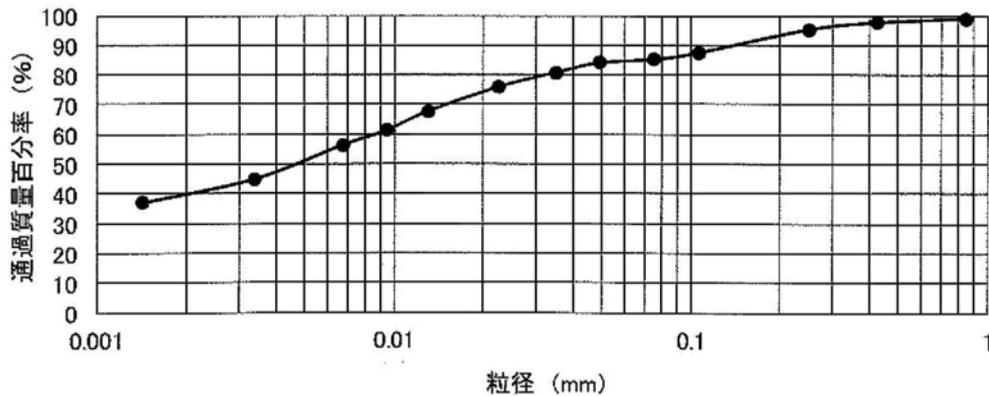
土の粒度試験 (2mmふるい通過分分析)

調査件名		75cm			試験年月日		2014年1月15日			
					試験者		豊実佳子			
2mmふるい通過試料					土粒子の密度 ρ_s		g/cm ³		2.725	
含水比	容器No.				塑性指数 I_p					
	m_a g	43.4	39.3	41.3	分散装置の容器No.					
	m_b g	42.8	38.9	40.8	メスシリンダーNo. (直径 Φ cm)		6.550			
	m_c g	26.8	27.7	27.4	浮ひようNo.		1079			
	ω_1 %	3.8	3.6	3.7	メニスカス補正值 C_m		0.0008			
平均値 ω_1 %					3.7		使用した分散剤、溶液濃度、溶液添加量			
(沈降分析用試料+容器)質量					g					
容器(No.)質量					g		全試料の炉乾燥質量に対する2mmふるい通過試料の炉乾燥質量の比			
沈降分析用質量 m_1					g		50.2		$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$	1.000
沈降分析用試料の炉乾燥質量					$m_s = \frac{m_1}{1 + \omega_1 / 100}$ g		48.4		$M = \frac{V}{m_s} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \times 100$	3258
沈降分析										
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
測定時刻	経過時間	浮ひようの読み		測定時の水温	有効深さ	粒径 d	補正係数	加積通過率	通過質量百分率	
t	少数部分	r	r'	°C	L	$\sqrt{\frac{30\eta}{g_s(\rho_s - \rho_w)}}$	F	P	P(d) %	
min	r	r + C _m			mm	⑥ × $\sqrt{\frac{L}{t}}$	M × (③ + F)	%	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$	
	1	0.0245	0.0253	17.4	127.06	0.0044	0.04931	0.0005	84.0	
	2	0.0235	0.0243	17.4	129.23	0.0044	0.03516	0.0005	80.8	
	5	0.0220	0.0228	17.4	132.49	0.0044	0.02252	0.0005	75.9	
	15	0.0195	0.0203	17.5	137.91	0.0043	0.01310	0.0005	67.8	
	30	0.0175	0.0183	17.6	142.25	0.0043	0.00941	0.0005	61.2	
	60	0.0160	0.0168	18	145.51	0.0043	0.00673	0.0005	56.4	
	240	0.0125	0.0133	18.8	153.1	0.0043	0.00341	0.0005	45.0	
	1440	0.0100	0.0108	19.4	158.53	0.0043	0.00141	0.0005	36.8	
ふるい分析 (沈降分析を行う場合)										
ふるい	容器No.	(残留試料+容器)質量	容器質量	残留試料質量	加積残留	加積残留率 %	加積通過率 P	通過質量百分率		
um		g	g	m(d)	試料質量 g	$\frac{\sum m(d)}{m_{1s}} \times 100$	$\left(1 - \frac{\sum m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$	$\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$		
				g	$\sum m(d)$	%	%	% %		
	850	329.82	329.3	0.52	0.52	1.1	98.9			
	425	329.94	329.3	0.64	1.16	2.4	97.6			
	250	330.45	329.3	1.15	2.31	4.8	95.2			
	106	333.1	329.3	3.8	6.11	12.6	87.4			
	75	330.4	329.3	1.1	7.21	14.9	85.1			
メスシリンダー断面積(cm ²)		A	33.68							
水の粘性係数(Pa·s)		η 17°C	0.00108			18°C	0.001053	19°C	0.001027	
		30 η	0.0324				0.03		0.03081	
		gn($\rho_s - \rho_w$)	1693.2				1693		1694.187	
蒸留水の密度(g/cm ³)		ρ_w 17°C	0.999			18°C	0.999	19°C	0.998	
重力加速度(cm/s ²)		gn	981							
		l1	117.5							
		l2	9							
		LB	140.8							
		VB	40							

土の粒度試験（粒径加積曲線）

					試験年月日	2014年1月15日	
					試験者	豊実佳子	
試料番号 (深さ)	75						
ふるい分析	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗隙分 %		
	75		75		中礫分 %		
	53		53		細礫分 %		
	37.5		37.5		粗砂分 %		
	26.5		26.5		中砂分 %		3.7
	19		19		細砂分 %		10.1
	9.5		9.5		シルト分 %		28.8
	4.75		4.75		粘土分 %		56.4
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %		
	0.85	98.9	0.85		425μmふるい通過質量百分率 %		
	0.425	97.6	0.425		75μmふるい通過質量百分率 %		
	0.25	95.2	0.25		最大粒径 mm		
	0.106	87.4	0.106		60%粒径 D_{60} mm		
	0.075	85.1	0.075		50%粒径 D_{50} mm		
沈降分析	0.04931	84.0			30%粒径 D_{30} mm		
	0.03516	80.8			10%粒径 D_{10} mm		
	0.02252	75.9			均等係数 U_c		
	0.01310	67.8			曲率係数 U'_c		
	0.00941	61.2			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.725
	0.00673	56.4			使用した分散剤		ヘキサメタリン酸ナトリウム
	0.00341	45.0			溶液濃度、溶液添加量		5%、10ml
	0.00141	36.8					

粒径加積曲線



特記事項 HC:重塩土

較正試験

較正試験で用いた含水比，体積含水率，電圧のデータ(エクセル表)を示した。

湿潤過程

60cm

電圧(mV)	平均	含水比(ω)	平均	体積含水率(%)	平均
183	184	29.03	28.72	24.16	23.91
185		29.61		24.65	
184		27.53		22.92	
236	240	32.31	32.13	26.89	26.75
242		31.68		26.37	
243		32.41		26.98	
299	298	37.77	38.01	31.44	31.64
299		37.21		30.97	
295		39.04		32.50	
355	355	42.86	41.93	35.68	34.90
355		41.52		34.56	
354		41.4		34.46	
365	366	42.31	41.56	35.22	34.60
367		40.56		33.76	
365		41.82		34.81	
382	383	39.11	40.55	32.56	33.75
385		39.2		32.63	
382		43.33		36.07	
402	403	45.16	44.41	37.59	36.97
405		43.64		36.33	
402		44.44		36.99	
424	423	45.31	44.61	37.72	37.13
423		45.35		37.75	
421		43.16		35.93	

100cm

電圧(mV)	平均	含水比(ω)	平均	体積含水率(%)	平均
151	153	29.03	28.72	24.16	23.91
153		29.61		24.65	
156		27.53		22.92	
164	164	32.31	32.13	26.89	26.75
166		31.68		26.37	
163		32.41		26.98	
188	184	37.77	38.01	31.44	31.64
180		37.21		30.97	
183		39.04		32.50	
315	315	42.86	41.93	35.68	34.90
316		41.52		34.56	
315		41.4		34.46	
333	320	42.31	41.56	35.22	34.60
334		40.56		33.76	
294		41.82		34.81	
348	352	39.11	40.55	32.56	33.75
357		39.2		32.63	
351		43.33		36.07	
372	376	45.16	44.41	37.59	36.97
379		43.64		36.33	
378		44.44		36.99	
401	398	45.31	44.61	37.72	37.13
398		45.35		37.75	
396		43.16		35.93	

乾燥過程

60cm

電圧(mV)	平均	体積含水率(%)
410	415	33.92
409		
427		
414	417	33.26
419		
419		
400	396	30.88
390		
397		
389	384	29.33
385		
377		
376	377	26.65
377		
377		
376	374	25.26
376		
371		
364	360	22.69
358		
357		
334	335	22.01
334		
338		

100cm

電圧(mV)	平均	体積含水率(%)
413	411	33.92
409		
412		
407	408	33.26
406		
412		
393	390	30.88
383		
393		
375	370	29.33
367		
368		
368	368	26.65
368		
368		
366	363	25.26
365		
359		
361	353	22.69
351		
348		
321	322	22.01
319		
325		

土壤水分測定

4枚の供試圃場における測点 a, 測点 b, および測点 c の土壤水分の鉛直分布測定データ(エクセル表, 電圧表示)を示した。

連結暗渠区

a測点	測定日											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	36	34	33	37	38	39	36	35	36	40	39	38
	36	37	37	47	41	44	40	24	41	47	43	43
	402	289	390	454	314	353	398	349	340	309	303	299
作土層	450	445	444	442	439	443	439	435	434	438	438	435
耕盤層	431	436	430	436	436	441	438	439	439	438	440	440
心土層	443	446	459	442	445	439	447	451	449	450	456	458

b測点	測定日											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	37	35	35	38	37	41	39	36	38	42	42	40
	37	37	38	60	42	53	45	29	43	49	46	42
	450	346	441	463	380	407	441	383	375	292	317	306
作土層	467	461	464	464	460	485	457	451	457	460	458	458
耕盤層	435	435	440	438	441	445	441	442	441	442	446	446
心土層	440	438	437	441	441	444	444	446	445	448	460	460

	c测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	37	38	34	42	40	37	37	36	39	42	41	39
	43	40	39	59	43	44	46	31	46	47	44	43
	442	307	439	454	354	371	429	346	372	196	229	183
作土層	466	460	463	459	458	460	455	452	461	462	458	426
耕盤層	441	441	447	442	443	451	445	447	431	432	433	436
心土層	433	432	431	436	436	442	440	444	444	443	451	452

従来暗渠区

	a测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	33	33	34	37	37	36	36	36	35	43	40	40
	38	37	40	42	47	49	40	40	41	50	43	44
	456	418	453	450	434	437	429	383	420	359	353	346
作土層	469	460	457	454	453	456	449	442	455	458	458	455
耕盤層	443	444	449	447	448	450	449	451	450	453	454	454
心土層	438	435	434	437	437	452	442	443	443	446	454	453

	b测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	32	32	33	35	46	34	35	35	35	42	38	39
	37	37	37	39	40	40	40	40	40	46	42	44
	303	253	308	328	278	298	285	217	75	75	77	72
作土層	466	457	452	454	450	446	446	442	457	459	456	461
耕盤層	440	440	444	444	445	440	446	447	444	449	448	448
心土層	413	412	417	419	420	413	422	425	423	426	428	432

	c测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	32	33	34	36	41	41	36	35	37	45	38	40
	37	37	38	40	41	41	42	26	41	48	42	43
	283	127	295	308	241	268	239	147	67	60	59	46
作土層	456	445	447	445	438	443	435	431	452	458	450	449
耕盤層	440	440	438	442	443	441	445	446	445	450	450	449
心土層	432	433	442	439	439	447	440	444	444	446	450	453

对照区

	a测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	36	34	34	36	37	36	36	36	38	43	39	39
	66	38	39	60	41	39	40	40	42	51	42	43
	464	438	443	462	431	446	438	382	407	319	370	322
作土層	466	459	456	459	451	452	442	437	453	457	453	450
耕盤層	439	439	443	441	443	447	444	446	432	439	440	440
心土層	416	415	411	418	420	415	420	422	419	422	426	425

	b测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	33	33	35	37	38	38	37	36	38	43	40	39
	40	37	38	49	45	42	43	41	44	51	47	42
	457	353	390	462	381	413	390	358	352	366	341	281
作土層	461	455	455	465	445	452	443	438	451	454	453	456
耕盤層	438	437	439	444	444	453	447	447	442	446	447	446
心土層	406	405	413	441	417	410	415	418	420	423	424	425

	c测点											
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
	34	34	35	38	39	38	35	35	37	42	40	39
	36	37	38	47	43	41	40	27	42	52	49	42
	460	333	372	456	353	369	362	278	325	168	303	225
作土層	464	459	453	461	460	466	456	425	460	457	461	424
耕盤層	447	450	441	450	451	458	454	455	440	439	440	438
心土層	432	431	432	442	442	449	440	444	444	449	452	450

ストレート暗渠区

a測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV	
		35		35		35		36		38		36		36		38		38		42		39		40	
		39		37		37		42		41		39		41		26		44		48		43		43	
		454		389		422		441		401		403		428		390		359		346		337		326	
作土層		462		458		456		454		449		446		443		443		453		456		452		449	
耕盤層		429		430		432		434		435		437		436		437		437		440		439		438	
心土層		441		434		447		442		443		437		443		447		446		455		454		454	

b測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV	
		36		37		37		42		40		38		39		41		40		45		41		41	
		42		37		42		50		48		43		41		31		45		49		45		44	
		456		430		441		449		426		432		417		406		392		359		372		359	
作土層		471		465		463		467		464		454		453		449		465		468		463		461	
耕盤層		436		435		438		438		440		433		439		441		437		441		442		441	
心土層		433		437		429		457		445		442		444		448		453		464		466		463	

c測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV		mV	
		34		34		34		37		38		36		36		35		38		44		40		39	
		318		49		57		307		58		52		49		37		47		52		48		44	
		458		445		449		451		438		434		429		424		447		449		446		448	
作土層		455		453		452		456		455		455		454		459		456		464		457		456	
耕盤層		437		436		437		439		440		438		440		447		441		446		445		443	
心土層		428		430		426		432		433		432		436		442		442		462		452		451	

校正後の土壤水分データ(エクセル表, 体積含水率表示)

連結暗渠区

a測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.522		0.517		0.517		0.515		0.512		0.516		0.512		0.509		0.509		0.512		0.512		0.509	
耕盤層		0.506		0.510		0.505		0.510		0.511		0.514		0.512		0.513		0.513		0.512		0.514		0.514	
心土層		0.516		0.518		0.529		0.515		0.518		0.513		0.519		0.522		0.521		0.522		0.526		0.528	

b測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.535		0.531		0.533		0.533		0.530		0.533		0.527		0.523		0.527		0.529		0.528		0.528	
耕盤層		0.509		0.510		0.514		0.512		0.514		0.518		0.514		0.515		0.515		0.515		0.519		0.518	
心土層		0.513		0.512		0.511		0.514		0.514		0.517		0.517		0.518		0.518		0.520		0.530		0.529	

c測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.534		0.530		0.532		0.529		0.528		0.530		0.526		0.524		0.530		0.531		0.528		0.520	
耕盤層		0.514		0.514		0.519		0.515		0.516		0.522		0.517		0.520		0.506		0.507		0.508		0.510	
心土層		0.508		0.507		0.506		0.510		0.510		0.515		0.513		0.517		0.517		0.516		0.522		0.523	

従来暗渠区

a測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.537		0.529		0.527		0.525		0.524		0.526		0.521		0.515		0.526		0.528		0.528		0.525	
耕盤層		0.516		0.517		0.521		0.519		0.520		0.522		0.521		0.522		0.522		0.524		0.525		0.525	
心土層		0.512		0.509		0.509		0.511		0.511		0.523		0.515		0.516		0.516		0.518		0.525		0.524	

b測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.535		0.527		0.523		0.525		0.522		0.518		0.518		0.515		0.527		0.529		0.526		0.530	
耕盤層		0.513		0.514		0.517		0.517		0.518		0.514		0.519		0.519		0.517		0.521		0.520		0.520	
心土層		0.490		0.490		0.494		0.496		0.497		0.491		0.499		0.501		0.499		0.502		0.504		0.507	

c測点		6月28日		7月4日		7月11日		7月18日		7月23日		7月26日		7月31日		8月9日		8月24日		8月30日		9月6日		9月10日	
作土層		0.527		0.518		0.519		0.517		0.512		0.516		0.509		0.506		0.523		0.528		0.521		0.521	
耕盤層		0.514		0.514		0.512		0.515		0.516		0.514		0.517		0.518		0.518		0.521		0.521		0.521	
心土層		0.507		0.508		0.515		0.513		0.513		0.519		0.514		0.517		0.517		0.519		0.521		0.524	

対照区

a測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.534	0.529	0.528	0.529	0.522	0.523	0.515	0.511	0.524	0.527	0.524	0.521
耕盤層	0.513	0.513	0.516	0.514	0.516	0.519	0.517	0.518	0.507	0.513	0.514	0.514
心土層	0.493	0.492	0.489	0.495	0.497	0.492	0.497	0.498	0.496	0.498	0.502	0.501

b測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.530	0.526	0.528	0.533	0.518	0.523	0.516	0.512	0.523	0.525	0.524	0.527
耕盤層	0.512	0.511	0.513	0.517	0.517	0.524	0.519	0.519	0.515	0.519	0.519	0.518
心土層	0.485	0.484	0.491	0.514	0.494	0.488	0.493	0.495	0.497	0.499	0.500	0.501

c測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.532	0.529	0.524	0.530	0.530	0.534	0.526	0.501	0.529	0.527	0.530	0.500
耕盤層	0.519	0.522	0.514	0.521	0.522	0.528	0.525	0.526	0.513	0.513	0.514	0.512
心土層	0.507	0.506	0.507	0.515	0.515	0.521	0.513	0.517	0.517	0.521	0.524	0.522

ストレート暗渠区

a測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.531	0.528	0.528	0.525	0.521	0.518	0.516	0.516	0.524	0.526	0.523	0.521
耕盤層	0.504	0.506	0.507	0.508	0.509	0.511	0.510	0.511	0.511	0.513	0.513	0.512
心土層	0.514	0.509	0.519	0.515	0.516	0.511	0.516	0.519	0.518	0.526	0.525	0.525

b測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.538	0.533	0.532	0.535	0.533	0.525	0.524	0.521	0.533	0.536	0.532	0.530
耕盤層	0.511	0.509	0.512	0.512	0.514	0.508	0.513	0.514	0.511	0.514	0.515	0.515
心土層	0.508	0.511	0.504	0.527	0.518	0.515	0.517	0.520	0.524	0.533	0.534	0.532

c測点												
	6月28日	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日
作土層	0.526	0.524	0.523	0.526	0.525	0.526	0.525	0.529	0.526	0.533	0.527	0.526
耕盤層	0.511	0.510	0.511	0.513	0.514	0.512	0.514	0.519	0.515	0.518	0.518	0.516
心土層	0.504	0.505	0.502	0.507	0.508	0.507	0.510	0.515	0.515	0.531	0.524	0.523

地下水位測定

連結暗渠区、従来暗渠区、対照区、およびストレート暗渠区における地下水位の手動測定データ(エクセル表)を示した。

連結暗渠区														
	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月18日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日	9月12日	9月13日
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	59	58	60	60	57	59	59	60	59	60	60	60		
水位(管頂から)(cm)	71	61.5	60	63	57	57	59	66.5	58	90	64	73		
地下水位(地表面を基準)(cm)	12	3.5	0	3	0	-2	0	6.5	-1	30	4	13	31	25

従来暗渠区														
	7月4日	7月11日	7月18日	7月23日	7月26日	7月31日	8月9日	8月18日	8月24日	8月30日	9月6日	9月10日	9月12日	9月13日
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	56	55	57	57	56	55	55	56	55.5	56	57.2	57.5		
水位(管頂から)(cm)	97.5	84.5	83	84.5	81	86	89	70	57	68	59	62		
地下水位(地表面を基準)(cm)	41.5	29.5	26	27.5	25	31	34	14	1.5	12	1.8	4.5	34	37

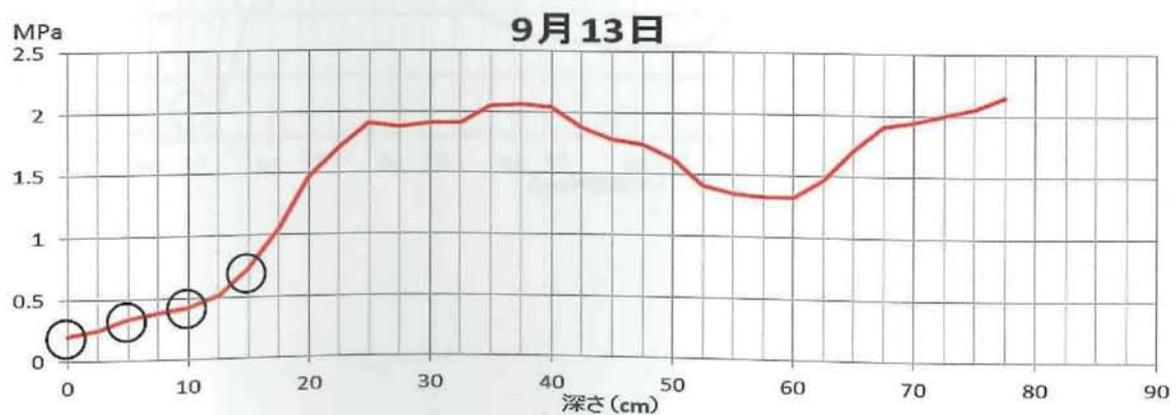
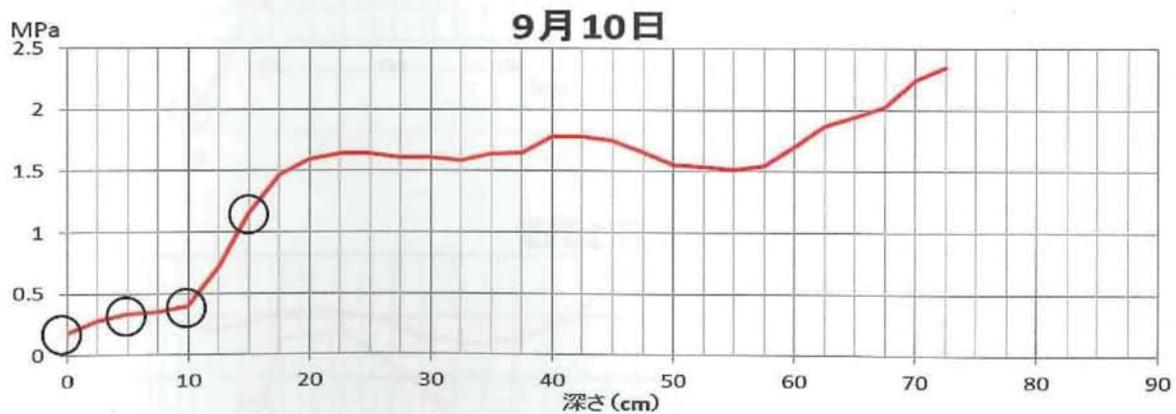
対照区															
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	54	53.5	55	54	53	54	54	54.5	54.5	54.5	55	55			
水位(管頂から)(cm)	100.5	92	82.5	74	65	55	88	62	54.5	64	56.5	71.2			
地下水位(地表面を基準)(cm)	46.5	38.5	27.5	20	12	1	34	7.5	0	9.5	1.5	16.2	60	53	

ストレート暗渠区														
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	47	48	52	51	47	48	47	48	48	48	48	47.5		
水位(管頂から)(cm)	66	61	54.5	64	61	55.5	71	51.5	46	95	78	86		
地下水位(地表面を基準)(cm)	19	13	2.5	13	14	7.5	24	3.5	-2	47	30	38.5	52.5	45

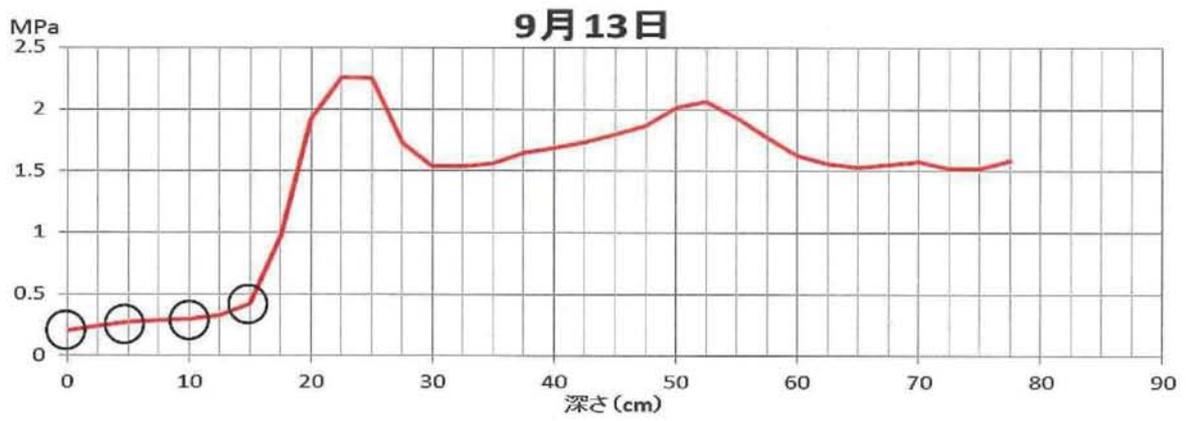
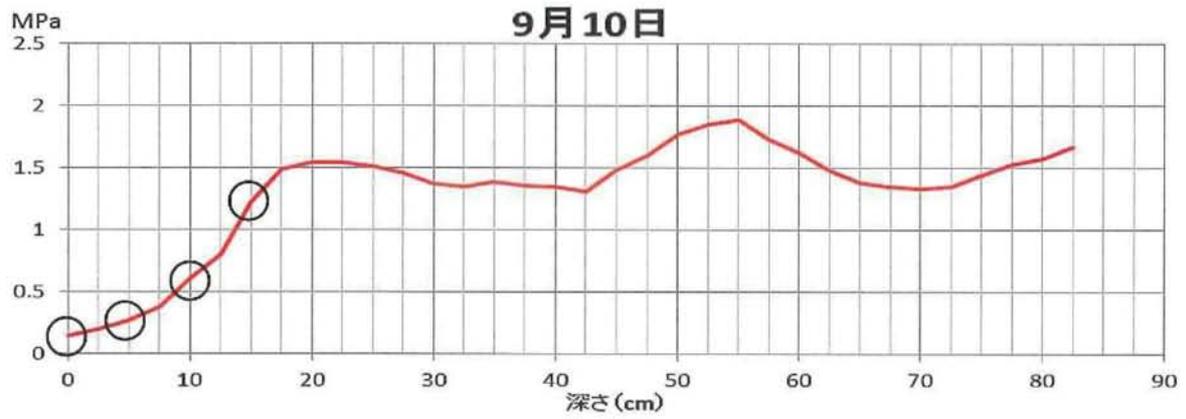
土壌硬度

各供試圃場における土壌硬度の測定結果を示す。土壌硬度計で複数回測定したものを平均してグラフを作成した。○：判読点(0cm, 5cm, 10cm, および 15cm 深さ)

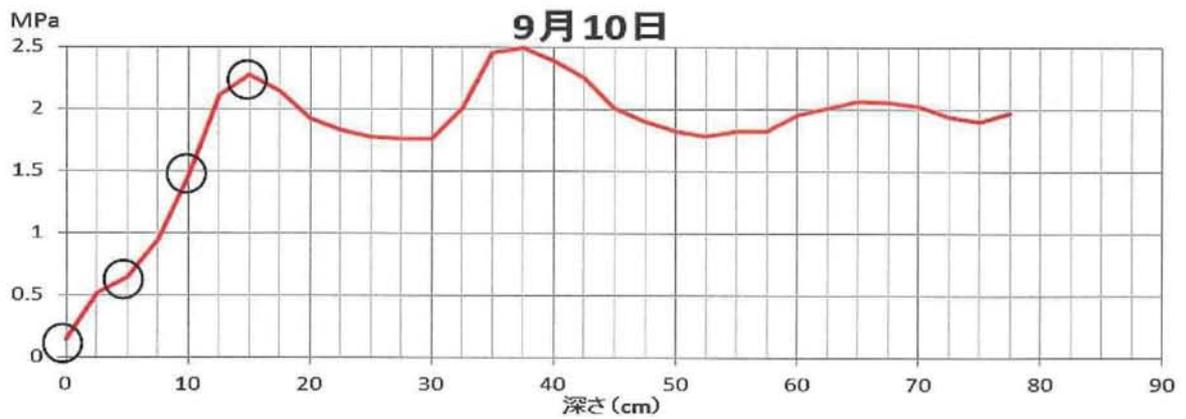
連結暗渠区

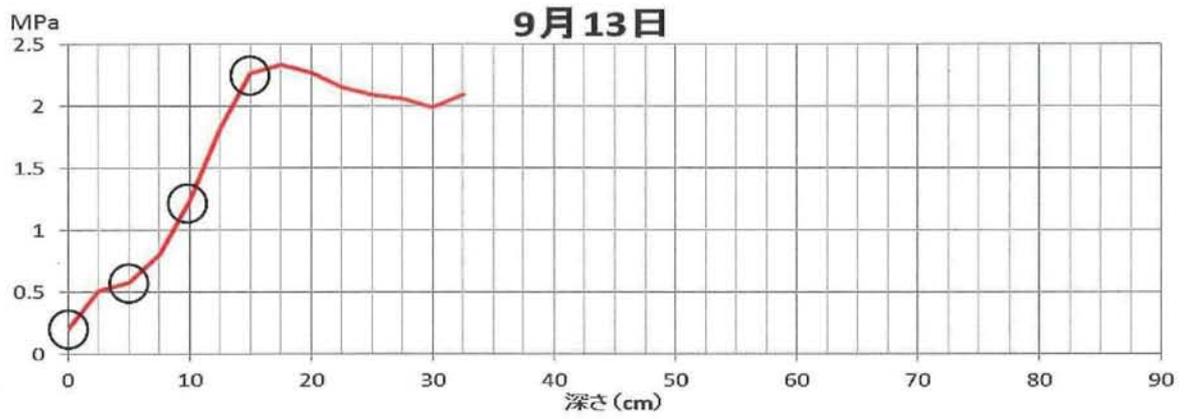


従来暗渠区

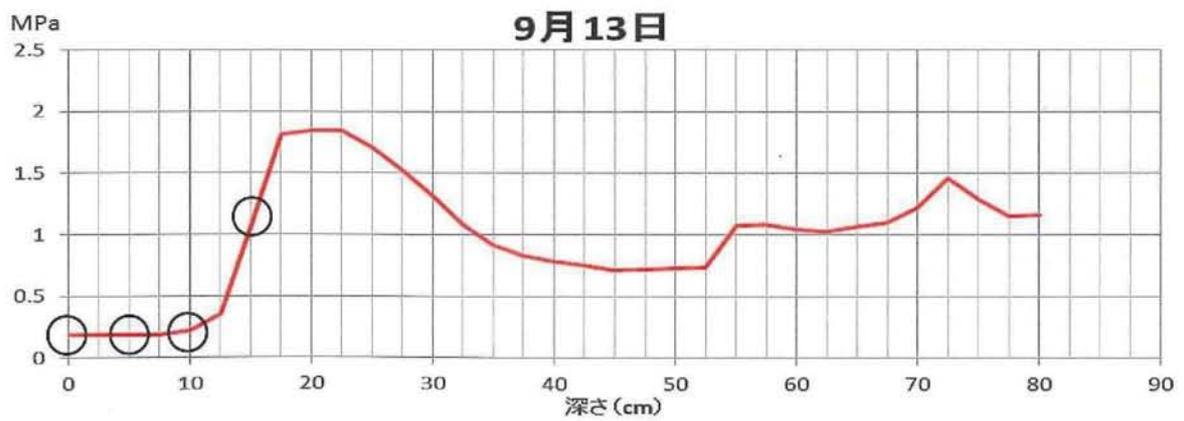
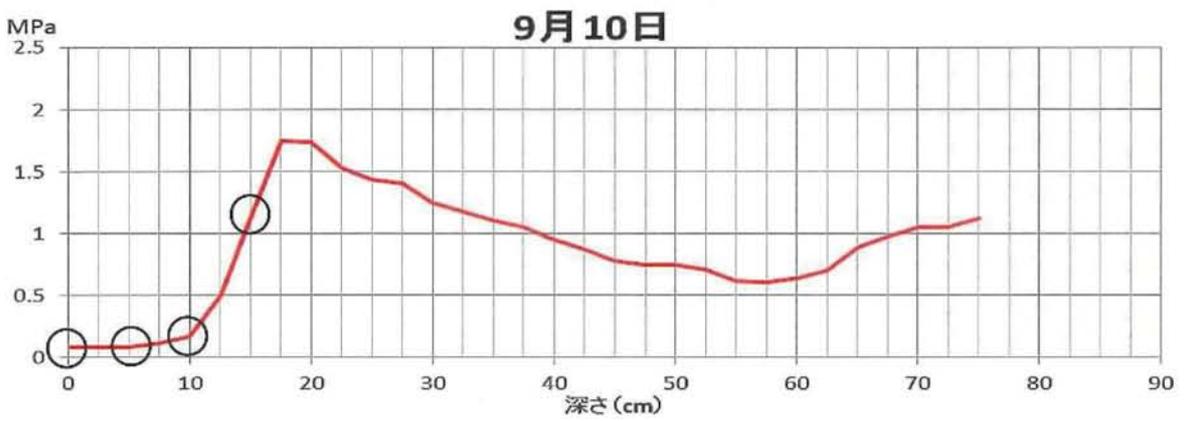


対照区





ストレート暗渠区



地下灌漑（春）

土壤水分

3 測点における土壤水分の鉛直分布測定データ(エクセル表, 電圧表示)を示した。

測点 i

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
-23.5	33	34	34	34	34	34	35	35	35	34	33	34	34
-13.5	31	32	32	32	32	32	34	37	35	34	33	34	34
-3.5	96	97	98	95	300	311	458	454	337	319	171		
6.5	312	294	278	299	457	455	458	452	454	445	446		
26.5	408	418	419	418	423	416	409	404	418	415	418		
66.5	445	468	474	467	470	464	456	453	462	451	460		

測点 ii

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
-22	100	36	33	33	33	33	35	35	35	34	34	35	35
-12	200	33	32	32	33	33	33	61	37	35	33	34	34
-2	300	156	131	169	140	342	353	446	441	383	372	306	306
8	400	443	432	430	433	433	442	444	436	442	432	436	436
28	600	421	430	432	427	433	420	415	417	417	431	423	423
68	1000	444	469	480	469	473	468	442	431	471	468	451	451

測点 iii

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
-19	100	33	34	34	33	33	35	37	35	35	35	34	34
-9	200	32	39	34	34	34	37	36	353	39	37	37	37
1	300	355	356	397	360	365	383	450	452	440	442	442	442
11	400	433	443	435	435	436	437	439	440	438	440	444	444
31	600	443	444	438	445	445	440	435	434	433	442	437	437
71	1000	442	444	472	450	437	469	469	460	465	452	464	464

較正後の土壤水分データ(エクセル表, 体積含水率表示)を示した。

測点 i

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
6.5	0.390	0.368	0.348	0.374	0.527	0.526	0.528	0.523	0.525	0.518	0.518	0.518	0.518
26.5	0.486	0.495	0.496	0.495	0.499	0.493	0.487	0.483	0.495	0.492	0.495	0.495	0.495
66.5	0.518	0.536	0.540	0.535	0.537	0.533	0.526	0.524	0.531	0.522	0.530	0.530	0.530

測点 ii

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
8	0.516	0.507	0.505	0.508	0.508	0.515	0.517	0.510	0.515	0.507	0.510	0.510	0.510
28	0.498	0.505	0.507	0.503	0.508	0.497	0.492	0.494	0.494	0.506	0.499	0.499	0.499
68	0.517	0.537	0.545	0.537	0.540	0.536	0.515	0.506	0.538	0.536	0.522	0.522	0.522

測点 iii

深さ(cm)	18日						19日 排水開始					20日	
	給水前	11:20	12:00	12:30	13:45	14:15	14:30	10:00	11:00	13:00	14:00	14:00	14:00
11	0.508	0.516	0.509	0.509	0.510	0.511	0.513	0.514	0.512	0.514	0.517	0.517	0.517
31	0.516	0.517	0.512	0.518	0.518	0.514	0.509	0.509	0.508	0.515	0.511	0.511	0.511
71	0.515	0.517	0.539	0.522	0.511	0.537	0.537	0.530	0.533	0.523	0.533	0.533	0.533

用水路側立ち上がり管水位, 排水口水位

用水路側立ち上がり管水位, 排水口水位の測定データ(エクセル表)を示した。

用水路側立ち上がり管水位

		排水開始からの時間(hour)	上	中	下
19日	10:15	0.25	5.7	-1.2	32.7
	10:30	0.5	5.7	-1.2	33.7
	10:45	0.75	6.2	-0.7	34.7
	11:00	1	7.2	-0.7	35.2
	11:20	1.3333333333	7.7	-0.2	35.7
	13:00	3	15.7	4.3	48.7
	14:15	4.25	50.2	40.8	60.7
	14:30	4.5	55.7	46.8	63.2
20日	14:00	28		72.3	71.7

排水口水位

給水開始からの時間(hour)	水位(cm) (排水樹上 端から)	排水口水位 (cm)(地表 面を基準)
0.25	87	59
0.3333333333	83	55
0.4166666667	81.5	53.5
0.5	78	50
0.5833333333	75.5	47.5
0.6666666667	72.5	44.5
0.75	69.5	41.5
0.8333333333	67	39
0.9166666667	64.5	36.5
1	61	33
1.0833333333	58	30
1.3333333333	33	5
3	31.5	3.5
3.1666666667	31	3
22.5	21	-7
22.8333333333	25	-3
23.6666666667	24	-4
25.5	49	21
26.5	72	44

フラッシング

排水の pH, SS, EC の測定データ(エクセル表)を示した。

pH

時間(分)	pH
給水前	6.06
排水前	5.99
0.25	6.54
0.5	6.6
0.75	6.57
1	6.57
1.25	6.55
1.5	6.52
1.75	6.54
2	6.53
2.25	6.54
2.5	6.59
2.75	6.48
3	6.48
3.25	6.46
3.5	6.42
3.75	6.42
4	6.37
4.25	6.34
10	6.21
25	6.12
60	5.97
180	5.93
240	5.85

SS

時間(分)	浮遊物質(mg/l)
給水前	163.6
排水前	16.4
0.25	934.5
0.5	398.2
0.75	665.5
1	363.6
1.25	310.9
1.5	170.9
1.75	123.6
2	120.0
2.25	132.7
2.5	89.1
2.75	83.6
3	80.0
3.25	67.3
3.5	74.5
3.75	65.5
4	56.4
4.25	61.8
10	20.0
25	12.7
60	16.4
180	29.1
240	40.0

EC

時間(分)	EC(mS/cm)
給水前	0.042
排水前	0.051
0.25	0.048
0.5	0.046
0.75	0.046
1	0.044
1.25	0.044
1.5	0.043
1.75	0.043
2	0.043
2.25	0.044
2.5	0.044
2.75	0.042
3	0.043
3.25	0.044
3.5	0.046
3.75	0.044
4	0.042
4.25	0.042
10	0.042
25	0.046
60	0.049
180	0.050
240	0.051

地下灌漑（秋）

土壌水分

3 測点における土壌水分の鉛直分布測定データ(エクセル表, 電圧表示)を示した。

測点①

深さ(cm)	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分後	4時間後	24時間後	
-25	38	40	37	38	37	37	
-15	41	41	40	41	41	41	
-5	262	267	452	320	319	304	
5	454	455	456	456	454	455	
25	432	431	431	432	430	431	
65	433	435	437	438	439	437	

測点②

深さ(cm)	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分後	4時間後	24時間後	
-23	38	48	37	38	38	38	
-13	41	42	44	41	42	42	
-3	163	170	470	381	377	348	
7	425	465	476	472	474	472	
27	389	388	387	388	388	388	
67	445	446	448	446	448	446	

測点③

深さ(cm)	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分後	4時間後	24時間後	
-24	38	39	37	37	37	37	
-14	41	41	41	42	41	41	
-4	99	102	460	298	297	186	
6	437	445	458	457	455	453	
26	428	428	427	428	427	429	
66	441	442	442	444	444	441	

測点④

深さ(cm)	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分後	4時間後	24時間後	
-24	38	44	36	36	37	36	
-14	41	41	41	41	41	40	
-4	208	201	467	351	337	263	
6	455	457	458	456	457	453	
26	437	436	437	437	437	437	
66	448	449	448	449	449	447	

校正後の土壌水分データ(エクセル表, 体積含水率表示)を示した。

測点①

	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
深さ(cm)	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分	4時間後	24時間後	
5	0.525	0.526	0.526	0.526	0.525	0.526	
25	0.507	0.506	0.506	0.507	0.505	0.506	
65	0.508	0.509	0.511	0.512	0.513	0.511	

測点②

	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
深さ(cm)	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分	4時間後	24時間後	
7	0.501	0.533	0.542	0.539	0.540	0.539	
27	0.469	0.468	0.467	0.468	0.468	0.468	
67	0.518	0.518	0.520	0.518	0.520	0.518	

測点③

	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
深さ(cm)	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分	4時間後	24時間後	
6	0.511	0.518	0.528	0.527	0.526	0.524	
26	0.504	0.504	0.503	0.504	0.503	0.504	
66	0.514	0.515	0.515	0.517	0.517	0.514	

測点④

	5日		6日		11:00排水開始		7日
	14:00	15:30	10:30	14:20	15:00	11:00	
深さ(cm)	給水前	1時間後	20時間後	3時間20分	4時間後	24時間後	
6	0.526	0.527	0.528	0.526	0.527	0.524	
26	0.511	0.510	0.511	0.511	0.511	0.511	
66	0.520	0.521	0.520	0.521	0.521	0.519	

用水路側立ち上がり管水位，排水口水位

用水路側立ち上がり管水位，排水口水位の測定データ(エクセル表)を示した。

用水路側立ち上がり管水位

	給水開始からの時間(hour)	上	中	下	
5日	14:00	0		62.3	71.9
	14:45	0.25		62.3	68.4
	15:00	0.5		59.8	61.4
	15:15	0.75		52.3	54.2
	15:30	1		45	46.7
	16:00	1.5		40	41.7
	16:15	1.75		32.1	34.7
6日	10:30	20	1.7	-1	1.3
	11:05	20.58	2.2	0.6	3.9
	11:10	20.67	2.7	0.8	3.9
	11:15	20.75	3	1.1	4.2
	11:20	20.83	3	1.4	4.4
	11:25	20.92	3.2	1.8	4.7
	11:30	21	3.4	1.9	4.9
	11:35	21.08	3.7	2.1	5.2
	11:40	21.17	3.9	2.5	5.5
	11:45	21.25	4.2	2.9	5.9
	11:50	21.33	4.5	3.1	6.2
	11:55	21.42	4.8	3.4	6.5
	12:00	21.5	5.4	3.8	7
	12:10	21.67	7	5.5	8.7
	12:20	21.83	9	8.1	10.7
	12:30	22	12.4	11.8	14
	12:40	22.17	17.7	16.1	19
	12:53	22.38	23.7	21	26.5
	13:00	22.5	27	24.8	32.2
	13:05	22.58	31	28.8	38
14:10	23.67		61.8	70.2	
14:20	23.83333333		62.3	70.7	

排水口水位

給水開始からの時間(hour)	水位(cm) (排水柵上 端から)	排水口水位 (cm)(地表 面を基準)
0	94	66
0.25	91	63
0.5	82.5	54.5
0.75	75.5	47.5
1	69.5	41.5

ストレート区の暗渠排水流量

排出流量の測定値(エクセル表)を示す。測定は、2013年10月6日であった。

時間(hour)	時刻	かかった時間(秒)	容器	流量(cm ³ /s)
0	11:00	2	バケツ	4250
0.016667	11:01	2	バケツ	4500
0.083333	11:05	2	バケツ	4500
0.133333	11:08	1.76	バケツ	4972
0.166667	11:10	1.45	バケツ	6034
0.208333	11:12:30	1.78	バケツ	4916
0.233333	11:14	1.37	バケツ	6387
0.258333	11:15:30	1.18	バケツ	7415
0.291667	11:17:30	1.45	バケツ	6034
0.333333	11:20	1.35	バケツ	6481
0.391667	11:23:30	1.44	バケツ	6076
0.416667	11:25:00	0.92	バケツ	9511
0.425	11:25:30	1.3	バケツ	6731
0.466667	11:28	1.26	バケツ	6944
0.5	11:30	1.38	バケツ	6341
0.541667	11:32:30	1.12	バケツ	7813
0.6	11:35:50	1.04	バケツ	8413
0.625	11:37:30	1.05	バケツ	8333
0.666667	11:40	0.96	バケツ	9115
0.716667	11:43	1.34	バケツ	6530
0.75	11:45	1.03	バケツ	8495
0.833333	11:50	1.15	バケツ	7609
0.916667	11:55	1	バケツ	8750
1	12:00	1.14	バケツ	7675
1.083333	12:05	1.2	バケツ	7292
1.166667	12:10	1.16	バケツ	7543
1.25	12:15	1.22	バケツ	7172
1.333333	12:20	1.3	バケツ	6731
1.416667	12:25	1.33	バケツ	6579
1.5	12:30	1.43	バケツ	6119
1.625	12:37:30	1.49	バケツ	5872
1.666667	12:40	1.43	バケツ	6119
1.75	12:45	1.47	バケツ	5952
1.833333	12:50	1.53	バケツ	5719
1.916667	12:55	1.63	バケツ	5368
2	13:00	1.62	バケツ	5401
3.25	14:15	2.03	ポリケース	1700
3.533333	14:32	3.34	ポリケース	1033
3.666667	14:40	4.08	ポリケース	846
3.75	14:45	4.76	ポリケース	725

ストレート区における多機能排水柵から排水路への排水量(実測値)から吸水渠(内径 75mm)の陶管暗渠管内流量を推定した。

暗渠(吸水渠)の管内流量(m ³ /s)を求める											
土地改良事業計画設計基準「暗渠排水」 p.140											
r:半径(m)=	0.0375			A:断面積(m ²)=	0.00442						
I:敷設勾配=	0.002			n ₀ :粗度係数(素焼土管)=	0.012						
I':疑似勾配(>I)	0.0125							吸水渠の質量保存のため I'=0.0125			
h≥rの場合				V=1/n*R^(2/3)*I^(1/2)							
		管底からの水位		A	S	V	Q=VA	V'		流量/秒	
θ(rad)	θ(deg)	h(m)	h/2r	通水断面積(m ²)	潤辺(m)	管内流速(m/s)	Q(m ³ /s)	Q(m ³ /h)	管内流速(m/s)	Q'(m ³ /s)	
0.00	0.0	0.0750	1.00	0.00442	0.2356	0.263	0.00116	4.183	0.658	0.00291	
0.09	5.0	0.0749	1.00	0.00442	0.2291	0.268	0.00118	4.262	0.670	0.00296	
0.17	10.0	0.0744	0.99	0.00441	0.2225	0.273	0.00120	4.338	0.683	0.00301	
0.26	15.0	0.0737	0.98	0.00440	0.2160	0.278	0.00122	4.405	0.695	0.00306	
0.35	20.0	0.0727	0.97	0.00438	0.2094	0.283	0.00124	4.459	0.707	0.00310	
0.44	25.0	0.0715	0.95	0.00434	0.2029	0.287	0.00125	4.492	0.718	0.00312	
0.52	30.0	0.0700	0.93	0.00429	0.1963	0.291	0.00125	4.499	0.728	0.00312	
0.61	35.0	0.0682	0.91	0.00422	0.1898	0.295	0.00124	4.476	0.737	0.00311	
0.70	40.0	0.0662	0.88	0.00413	0.1833	0.297	0.00123	4.418	0.743	0.00307	
0.79	45.0	0.0640	0.85	0.00402	0.1767	0.299	0.00120	4.324	0.748	0.00300	
0.87	50.0	0.0616	0.82	0.00388	0.1702	0.300	0.00116	4.191	0.750	0.00291	
0.96	55.0	0.0590	0.79	0.00373	0.1636	0.300	0.00112	4.021	0.749	0.00279	
1.05	60.0	0.0563	0.75	0.00355	0.1571	0.298	0.00106	3.815	0.745	0.00265	
1.13	65.0	0.0533	0.71	0.00336	0.1505	0.296	0.00099	3.576	0.739	0.00248	
1.22	70.0	0.0503	0.67	0.00315	0.1440	0.292	0.00092	3.309	0.729	0.00230	
1.31	75.0	0.0472	0.63	0.00293	0.1374	0.286	0.00084	3.020	0.716	0.00210	
1.35	77.5	0.0456	0.61	0.00281	0.1342	0.283	0.00080	2.869	0.708	0.00199	
1.40	80.0	0.0440	0.59	0.00269	0.1309	0.280	0.00075	2.716	0.700	0.00189	
1.44	82.5	0.0424	0.57	0.00257	0.1276	0.276	0.00071	2.560	0.690	0.00178	
1.48	85.0	0.0408	0.54	0.00245	0.1244	0.272	0.00067	2.404	0.680	0.00167	
1.53	87.5	0.0391	0.52	0.00233	0.1211	0.268	0.00062	2.247	0.669	0.00156	
1.57	90.0	0.0375	0.50	0.00221	0.1178	0.263	0.00058	2.092	0.658	0.00145	

マンニング式で吸水渠(陶管, 内径 75mm, 敷設勾配 1/500, 3条)を求める際, 設計図面通りの敷設勾配 I を用いると, 実測の最大排水量 Q_{max} (=9511 cm³/s) は再現できなかった。実際の敷設勾配よりも大きな仮想勾配 I'(=1/80)を与えることで実測値 (9511/3≒3120cm³/s) を再現できた。

ストレート区の暗渠排水量から集水渠の管内流量を推定した。

集水渠の管内流量(m ³ /s)を求める									
土地改良事業計画設計基準「暗渠排水」 p.140									
r:半径(m)=	0.05			A:断面積(m ²)=	0.00785				
I:敷設勾配=	0.004			n ₀ :粗度係数(塩ビ)=	0.012				
I:疑似勾配=	0.025								排水渠と集水渠の質量保存のため(仮想敷設勾配)I'=0.025
h≥rの場合				V=1/n*R^(2/3)*I^(1/2); (R=A/S)					
管底からの水位			A	S	V	Q=VA	Q'=V'A		
θ(rad)	θ(deg)	h(m)	h/2r	通水断面積(m ²)	潤辺(m)	管内流速(m/s)	流量/秒 Q(m ³ /s)	流速/秒 V(m/s)	流量/秒 Q'(m ³ /s)
0.00	0.0	0.1000	1.00	0.00785	0.3142	0.451	0.00354	1.12655	0.00885
0.09	5.0	0.0998	1.00	0.00785	0.3054	0.459	0.00361	1.14779	0.00901
0.17	10.0	0.0992	0.99	0.00785	0.2967	0.468	0.00367	1.16943	0.00917
0.26	15.0	0.0983	0.98	0.00782	0.2880	0.476	0.00373	1.19084	0.00932
0.35	20.0	0.0970	0.97	0.00778	0.2793	0.485	0.00377	1.21140	0.00943
0.44	25.0	0.0953	0.95	0.00772	0.2705	0.492	0.00380	1.23052	0.00950
0.52	30.0	0.0933	0.93	0.00763	0.2618	0.499	0.00381	1.24757	0.00952
0.61	35.0	0.0910	0.91	0.00750	0.2531	0.505	0.00379	1.26199	0.00947
0.70	40.0	0.0883	0.88	0.00734	0.2443	0.509	0.00374	1.27322	0.00934
0.79	45.0	0.0854	0.85	0.00714	0.2356	0.512	0.00366	1.28076	0.00915
0.87	50.0	0.0821	0.82	0.00690	0.2269	0.514	0.00355	1.28414	0.00886
0.96	55.0	0.0787	0.79	0.00663	0.2182	0.513	0.00340	1.28298	0.00850
1.05	60.0	0.0750	0.75	0.00632	0.2094	0.511	0.00323	1.27691	0.00807
1.13	65.0	0.0711	0.71	0.00598	0.2007	0.506	0.00303	1.26566	0.00756
1.22	70.0	0.0671	0.67	0.00560	0.1920	0.500	0.00280	1.24900	0.00700
1.31	75.0	0.0629	0.63	0.00521	0.1833	0.491	0.00255	1.22680	0.00639
1.35	77.5	0.0608	0.61	0.00500	0.1789	0.485	0.00243	1.21360	0.00607
1.40	80.0	0.0587	0.59	0.00479	0.1745	0.480	0.00230	1.19898	0.00574
1.44	82.5	0.0565	0.57	0.00458	0.1702	0.473	0.00217	1.18296	0.00542
1.48	85.0	0.0544	0.54	0.00436	0.1658	0.466	0.00203	1.16554	0.00508
1.53	87.5	0.0522	0.52	0.00415	0.1614	0.459	0.00190	1.14673	0.00475
1.57	90.0	0.0500	0.50	0.00393	0.1571	0.451	0.00177	1.12655	0.00442

吸水渠から多機能排水枡までの集水渠（塩ビ製）は、敷設勾配（1/250）である。しかし、この敷設勾配では排水約30分後の最大排水量 Q_{max} （=9511cm³/s）は再現できなかった。仮定の敷設勾配 P （=1/40）を与えることで流量 Q （=9520 cm³/s）を算出できた。

ストレート区の暗渠排水量から集水渠の管内流量を推定した。

排水枡から排水路までの塩ビ管内流量(m ³ /s)の最大値から推定									
r:半径(m)=	0.075	A:断面積(m ²)=	0.01767	通水断面積(m ²)	R=A/S				
I:敷設勾配=	0.004	n ₀ :粗度係数(塩ビ)=	0.012	流速(m/s)	V=1/n * R^(2/3) * I^(1/2)				
I':敷設勾配(仮想)=	0.020			排水渠の実質敷設勾配	I=0.04	最大排水量を流すため(仮想敷設勾配I'=0.020)			
h < r の場合	←水位が管の半径以下(現地調査の写真で確認)								
中心角		管底からの水位		A	S	V	Q=VA	V'	Q'=V'A
θ(rad)	θ(deg)	h(m)	h/2r	通水断面積(m ²)	潤辺(m)	管内流速(m/s)	流量/秒 Q(m ³ /s)	管内流速(m/s)	流量/秒 Q'(m ³ /s)
0.00	0.0	0.0000	0.00	0.00000	0.0000	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0.09	5.0	0.0003	0.00	0.00000	0.0131	0.017	0.00000	0.039	0.00000
0.17	10.0	0.0011	0.01	0.00002	0.0262	0.044	0.00000	0.098	0.00000
0.26	15.0	0.0026	0.02	0.00007	0.0393	0.075	0.00000	0.167	0.00001
0.35	20.0	0.0045	0.03	0.00016	0.0524	0.109	0.00002	0.244	0.00004
0.44	25.0	0.0070	0.05	0.00030	0.0654	0.145	0.00004	0.325	0.00010
0.52	30.0	0.0100	0.07	0.00051	0.0785	0.183	0.00009	0.410	0.00021
0.61	35.0	0.0136	0.09	0.00079	0.0916	0.222	0.00018	0.497	0.00039
0.70	40.0	0.0175	0.12	0.00116	0.1047	0.261	0.00030	0.585	0.00068
0.79	45.0	0.0220	0.15	0.00161	0.1178	0.301	0.00048	0.672	0.00108
0.87	50.0	0.0268	0.18	0.00214	0.1309	0.339	0.00073	0.759	0.00162
0.96	55.0	0.0320	0.21	0.00276	0.1440	0.377	0.00104	0.843	0.00233
1.05	60.0	0.0375	0.25	0.00345	0.1571	0.414	0.00143	0.925	0.00320
1.13	65.0	0.0433	0.29	0.00423	0.1702	0.449	0.00190	1.003	0.00424
1.22	70.0	0.0493	0.33	0.00506	0.1833	0.482	0.00244	1.077	0.00546
1.31	75.0	0.0556	0.37	0.00596	0.1963	0.513	0.00305	1.146	0.00683
1.35	77.5	0.0588	0.39	0.00642	0.2029	0.527	0.00338	1.179	0.00757
1.40	80.0	0.0620	0.41	0.00689	0.2094	0.541	0.00373	1.210	0.00834
1.44	82.5	0.0652	0.43	0.00737	0.2160	0.555	0.00409	1.240	0.00914
1.48	85.0	0.0685	0.46	0.00786	0.2225	0.567	0.00446	1.268	0.00996 ←排水約30分後の排水量
1.53	87.5	0.0717	0.48	0.00835	0.2291	0.579	0.00483	1.295	0.01081
1.57	90.0	0.0750	0.50	0.00884	0.2356	0.590	0.00522	1.320	0.01167

多機能排水枡からの最大排出水量 Q_{max} (=9511cm³/s) の再現を試みた。この排水管の内径は150mm、材質は塩ビである。マンニング式から敷設勾配 I と通水断面積 A を推定した。排水口の排水写真(本文 p.36, 図 3-18) から、管内水位は半径とほぼ等しい。この流量を流すためには、仮想敷設勾配 I' を 1/50 とする必要がある。この時、排水管内の最大値流量 Q'_{max} (=9960 cm³/s) は実測の最大流量をほぼ再現できた。この時の管内水深 h は 68.5mm であった。

排水時、暗渠(吸水渠)上端の立ち上がり管から大気が入ることで、これまでのマンニング式では表現しきれない動水勾配 (=仮想敷設勾配) が生じた。

2013年度 共同研究報告書
環境に配慮した高品質米生産のための
陶管暗渠を用いた土壌水管理システムの開発

2014年7月 発行

あおうだ ただお
粟生田 忠雄

新潟大学農学部
〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050
E-mail: aoda@agr.niigata-u.ac.jp

印刷・製本
共立印刷株式会社
〒950-0971 新潟市中央区近江2丁目16番15号