

2012年度共同研究報告書

**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**

2013年5月

新潟大学農学部

栗生田忠雄

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

要 旨

低湿な排水不良水田には、水稻の健全な生育や農作業性の維持・向上のため暗渠排水が欠かせない。本研究は、阿賀野市山寺地区の営農水田において新たに提案する陶管暗渠による土壌水管理機能の評価を行った。具体的には、1) 陶管暗渠の水口から水尻まで連結され、補助暗渠がその埋め戻し部と連続した連結暗渠区、2) 暗渠の最上端が地中にある従来型の暗渠を施工した従来暗渠区、および 3) 暗渠のない対照区において、土壌水分、地下水位、地耐力、水稻収量等を測定した。なお、連結暗渠区と従来暗渠区においては、水閘の代わりに W 排水柵が施工されている。また、暗渠末端の W 排水柵の立ち上がり管は地下水位を制御でき、地下灌漑を可能とする。

測定結果から明らかになったことを以下に列記する。

- ①連結暗渠区では、上流水田の畦畔浸透による余剰水を制御できた。
- ②連結暗渠区では、地下灌漑が可能であった。給水開始から約 24 時間で地表面湛水が確認された。また、排水も約 24 時間で完了した。
- ③ 3 枚の供試圃場において、土壌水分は作土層でのみ変動した。耕盤と心土では土壌水分はほとんど変動しなかった。
- ④水稻耕作期間中の地下水位の変動幅は、連結暗渠区が対照区よりも小さかった。また、連結暗渠区の地下水位は、潮汐現象に似た変動した。
- ⑤連結暗渠区では、水口が大気と連続できるため、急速な排水が可能であり、フラッシング効果が示唆された。
- ⑥表計算ソフトを用いて数値解析モデルを開発した。このモデルから、暗渠排水の影響範囲を推定できた。
- ⑦陶管暗渠により土壌水制御ができるようになったため、暗渠施工前と水田雑草に変化が生じた。水稻収量は平年並であった。
- ⑧陶管暗渠により土壌水制御ができるようになったため、地耐力が確保でき、農業機械の走行性が確保できた。

また、地下灌漑・排水の際の迅速な土壌水制御は陶管暗渠と補助暗渠のネットワークによるものとする。このように陶管暗渠を用いた土壌水管理システムは、粘質土水田であっても余剰水を迅速に制御できることが検証された。

目次

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	供試圃場の条件と観測方法	3
2-1	供試圃場の土壌条件	3
(1)	土の密度試験	
(2)	土の粒度試験	
2-2	暗渠の設置条件	4
(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)	暗渠の排水口 (W 排水桝)	
2-3	現地観測	6
(1)	土壌水分	
1)	土壌水分測定装置	
2)	土壌水分測定方法	
3)	土壌水分センサーの校正	
4)	土壌水分センサーの校正試験装置	
5)	校正手順	
(2)	地下水位	
(3)	土壌硬度	
(4)	水温, 電気伝導度(EC)	
2-4	結果と考察	11
(1)	土壌の密度	
(2)	土壌の粒度分析	
(3)	土壌水分測定	
1)	連結暗渠区	
2)	従来暗渠区	
3)	対照区	
4)	地下水位変動	
5)	地下水位と作土層の土壌水分	
6)	土壌硬度	

7) 水温, 電気伝導度(EC)

第3章 地下灌漑	22
3-1 地下灌漑の概要	22
(1) 地下灌漑の定義	
(2) 地下灌漑の条件	
(3) 転作畑における作物栽培のための地下水位管理	
(4) 地下排水	
(5) 試験の実施時期	
3-2 土壌水分	23
3-3 地下水位	23
3-4 排水口水位	23
3-5 結果と考察	25
(1) 土壌水分 (春期試験, 地下灌漑のみ)	
(2) 土壌水分 (秋期試験, 地下灌漑・排水)	
(3) 地表面の様子	
(4) 地下水位 (秋期試験)	
(5) 排水口水位 (秋期試験)	
(6) 暗渠管内の用水の流速	
第4章 暗渠周辺の土壌水分移動についての数値解析	31
4-1 はじめに	31
4-2 数値解析の方法	31
(1) 支配方程式	
(2) 水分特性曲線と不飽和透水係数	
(3) 数値解析モデルの基本構造	
(4) 成層を考慮した水田の浸透モデル	
4-3 数値解析の結果と考察	34
(1) 水田作土 k_1 > 耕盤の透水係数 k_2 = 心土の透水係数 k_3 の場合	
(2) $k_1 = k_2 < k_3$ の場合	
(3) 流線と等ポテンシャル線の分布	
4-4 数値解析のまとめ	35
第5章 総合考察と今後の課題	37
5-1 現地観測	
5-2 地下灌漑・排水	

5-3 今後の課題	
付 記	・ ・ ・ ・ ・ 39
謝 辞	
引用文献	
補 論	
A-1 土粒子の密度試験	・ ・ ・ ・ ・ 41
A-2 土粒子の粒度試験	・ ・ ・ ・ ・ 42
A-3 土壌水分センサーの校正試験	・ ・ ・ ・ ・ 54
A-4 土壌水分測定	・ ・ ・ ・ ・ 54
A-5 地下水位測定	・ ・ ・ ・ ・ 57
A-6 土壌硬度	・ ・ ・ ・ ・ 58
A-7 水温，電気伝導度（EC）	・ ・ ・ ・ ・ 58
A-8 土地下灌漑・排水	・ ・ ・ ・ ・ 61
A-9 地下水位，排水口水位	・ ・ ・ ・ ・ 63
A-10 陶管暗渠による土壌水管理システムの開発	・ ・ ・ ・ ・ 64

第1章 はじめに

1-1 本研究の背景と目的

農地の暗渠排水は古くて新しい問題である。歴史的には、湿潤な水田の余剰な土壌水を制御することによって生産性と作業性を向上させてきた（農業土木学会古典復刻委員会，1990）。排水性向上のため、粗朶，陶管，ポリスリーブ，籾殻，砂利など様々な素材の暗渠が開発されてきた。暗渠の施工は，トレンチャーで溝を掘り，土管を埋設し籾殻や砂利で埋め戻す方法が一般的である。ただし，暗渠管内の経年的な粘土の堆積，不陸による排水性低下などのメンテナンスの課題が全国的に指摘されている。

こうした中，重粘土の排水不良水田では，地下水位や土壌水分の管理が困難であるため，水稻の生産性や農業機械の作業性の低下問題を有することが少なくない。また，農地の土壌水管理等を目的とした圃場整備は，新潟県の場合 2009 年度末現在で 58.8%の完成率であり，64000ha 余りの面積が残されている（新潟県農地部農地計画課，2009）。圃場整備の際，農地の土壌水管理には暗渠排水が有効である。特に，地下水位の高い低湿地や粘質土壌で排水性の低い農地では不可欠である。一方，暗渠の材質，間隔，埋設深度，フラッシング等のメンテナンス法，暗渠を用いた地下灌漑など効果的な圃場整備には未解明な点が残されている。また近年，水田フル活用の要請により畑作を可能とする圃場が求められている。

そこで本研究は，阿賀野市山寺地区における，重粘土の排水不良水田を調査対象とし，陶管暗渠を利用した新たな土壌水管理システムについて，その土壌水の管理効果を検証した。排水不良水田に着目したのは，土壌水管に困難を伴う水田の技術的な知見が排水良好な農地も含め一般的に普及できる可能性を持つためである。具体的な供試圃場は，以下の3枚である。

1) 水口と水尻を連結した陶管暗渠，および籾殻を充填した補助暗渠を格子状に組み合わせた圃場。水口と水尻にはそれぞれ立ち上がり管を有する（以降，連結暗渠区と記す）。

2) 水口と水尻が繋がっていない従来型の暗渠を敷設した圃場（以降，従来暗渠区と記す）。

3) 暗渠を施工していない圃場（以降，対照区と記す）。

これらの供試圃場で土壌水分変動，地下水位，暗渠排水量などを定期的に観測し，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効果を定量的に考察した。

1-2 調査地概要

供試圃場のある阿賀野市は，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 余りの水田が広がる穀倉地帯である（阿賀野市ホームページ，図 1-1 参照）。

供試圃場は新潟県阿賀野市山寺地区にある。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，特に試験地区は馬谷地と呼ばれ，排水性が低く土壌水分の制御に苦勞を伴っていた。

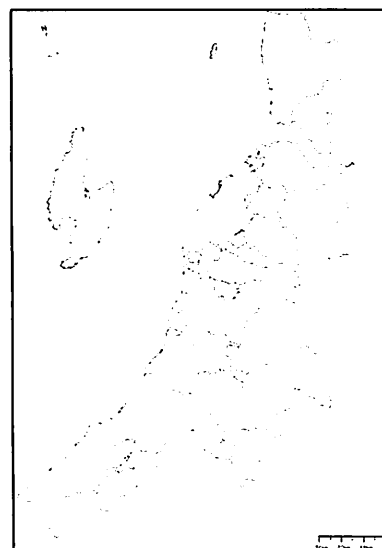


図 1-1 新潟県阿賀野市（色塗り部）

この地区は、1980 年代に基盤整備が行われ、用排分離型の 30a 区画、水田となった。ただし近年では、暗渠の埋め戻し部の目詰まりや、水こうの操作性低下など暗渠の排水機能が低下しており、その改善が求められていた。

第2章 供試圃場の条件と観測方法

2-1 供試圃場の土壌条件

供試圃場は長辺 80m、短辺 26.5m の 20a 区画で、減農薬・減化学肥料水田である。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（農業環境技術研究所，2008）

項目	作土層 (cm)	緻密度 (mm)	仮比重 (g/cm ³)	固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)	保水性 pF1.5(%)	保水性 pF2.7(%)	有効水 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 (H ₂ O)	pH (KCl)	EC (mS/cm)	全窒素 (%)	全炭素 (%)	CEC (me/100g)	交換性 CaO	交換性 MgO	交換性 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	

(1) 土の密度試験（JIS A 1202）

土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、土の状態を表す最も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。土粒子は無機鉱物で構成されており、その密度は 2.5~2.8g/cm³ である。有機質分で構成される泥炭などでは土粒子の密度は 1.4~2.3g/cm³ と低い値である。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。なお、土粒子密度は粒度試験（沈降分析）に供した。密度試験の詳細は補論に記した。

(2) 土の粒度試験（JIS A 1204）

土壌を構成する土粒子粒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最も重要な情報である。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。粒度は、土の物理的性質や力学的性質と密接な関係がある。ここでは、10月22日にオーガーで排出した土壌をサンプルとした。採取したのは0~5cm、10cm、25cm、70cmの4つの深度である。このサンプルを沈降分析法によって粒度試験した。なお、粒度試験の詳細は補論に記した。

2-2 暗渠の設置条件

(1) 暗渠の材質と大きさ

試験圃場に埋設されている暗渠は、素焼き土管（以降、陶管と記す）である。陶管は、①適応できる土の範囲が広い、②吸水能力が大きい、③水酸化鉄などが付着しにくい、等の特徴を有する。陶管暗渠のサイズは内径 75mm、長さ 450mm、肉厚 10mm である。なお、陶管表面に深さ 2mm、幅 4mm の直溝を設け、土との接触面積を増やし吸水効率を上げる工夫が施されている（写真 2-1 参照）。



写真 2-1 陶管暗渠の接合部、表面直溝

(2) 暗渠の埋設条件

連結暗渠区、および従来暗渠区の陶管暗渠は勾配 1/500 で、最も浅い上流部で 60cm、最も深い排水柵入り口で 79cm になるように敷設した（施工は、2011 年 4 月 21 日）。試験圃場における陶管暗渠と補助暗渠の鉛直断面を図 2-1、施工平面を図 2-2 に示した。

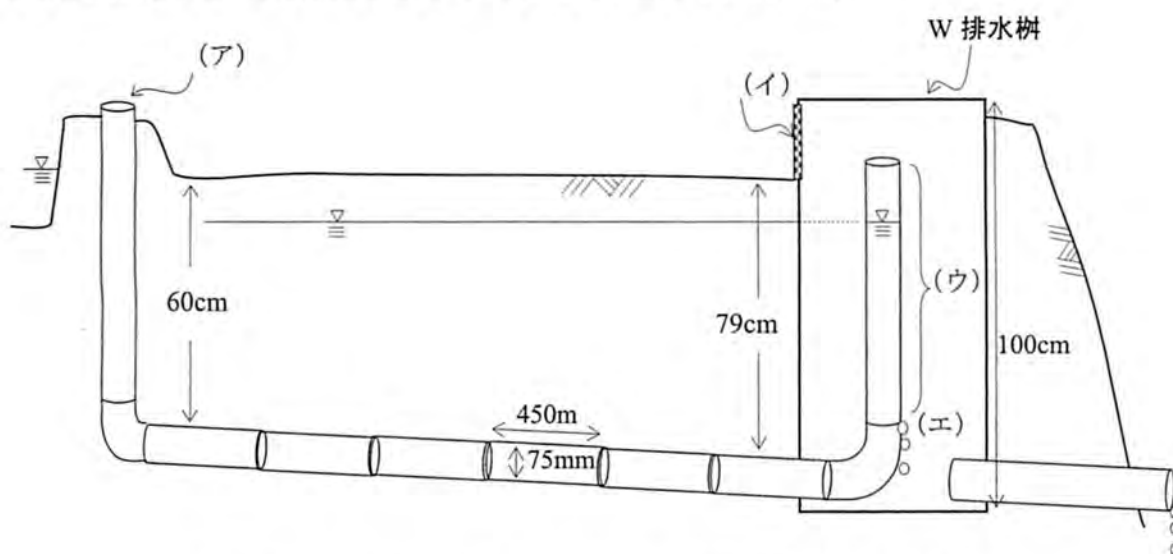


図 2-1 W 排水柵による土壌水制御 (地表排水と陶管暗渠の関係)

(ア)：水口の立ち上がり管（固定、給水時以外は閉栓）

(イ)：地表水の制御板

(ウ)：地下水位制御用の立ち上がり管（落水時に撤去、水位は目視可能）

(エ)：暗渠排水口（落水時のみ）

W 排水柵は簡単なコンクリート柵。常時はコンクリートの蓋で閉じる。

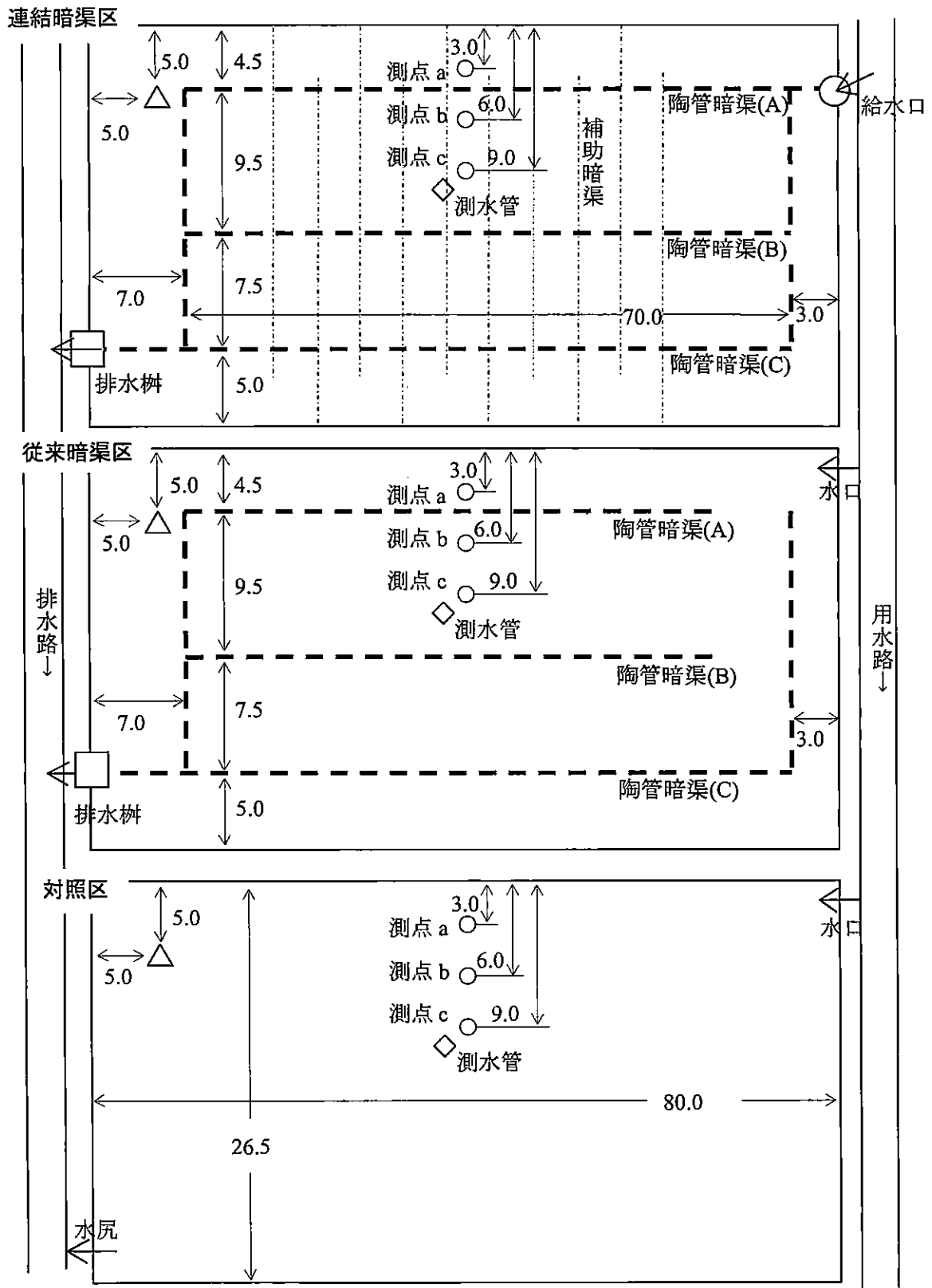


図 2-2 供試圃場平面図 (単位 : m)

連結暗渠区 : 給水口から排水口まで連結した暗渠システム (排水口 ; W 排水樹, 暗渠勾配 ; 1/500)

従来暗渠区 : 従来型の暗渠システム (排水口 ; W 排水樹, 暗渠勾配 ; 1/500)

対照区 : 暗渠の敷設なし

○ : 土壌水分測点, ◇ : 地下水位測定用測水管, △ : 土壌硬度測定点

(3) 補助暗渠の埋設条件

連結暗渠区には、補助暗渠を施工した（施工日 2011 年 10 月 16 日）。初級充填により、補助暗渠の排水性と耐久性を向上させた。補助暗渠は、作土層での水平方向の水移動を迅速になるように、長辺畦畔と直交する方向に深さ 40cm に施工し、陶管暗渠の埋め戻し部と連続させた。また、補助暗渠は 4m 間隔で 17 本施工した。なお、トラクターのアタッチメントの都合上、片側約 3m 施工できない部分が残った（図 2-2 参照）。

(4) 暗渠の排水口(W 排水樹)

本研究の連結暗渠区と従来暗渠区には土壌水管理システムの特徴である W 排水樹を設置した。この W 排水樹は、①田面排水、②暗渠排水、③地下水位の調整を可能とする。効果として、①多機能な排水樹の設置により設備が集約され、工事コストが削減可能、②水位調整機能により、圃場の汎用化が可能、③地下水位を目視できるので、水位管理が簡便、④圃場整備済みの水田でも、W 排水樹を設置することで地下灌漑でき、農地の汎用化が可能、⑤適度な重量があるので、畦畔内で安定、⑥間断灌水時の水位調整による節水効果などである（小田製陶所，2012）。なお、これまで多くの圃場で用いられてきた塩ビ製の暗渠水閘は、材質の劣化で開閉し難くなる。一方、W 排水樹の立ち上がり管は、水位を目視できる、抜き差しにより暗渠を開閉できるなど、メンテナンス性が容易である。

2-3 現地観測

(1) 土壌水分

1) 土壌水分測定装置

土壌水分の測定は、土壌の鉛直水分分布を測定できるプロファイルプローブ（Delta-T 社，PR1）を用いた。PR1 は一対のステンレススチールリングの形をした電子センサーの付いた、25mm 径の密封されたロッドで、センサーは固定の間隔で配列されている。PR1 にパワーをかけると、100MHz の信号を出し、この信号が一対のステンレススチールのリングにかかり、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の水分量でその誘電特性が決まる。その誘電特性がプローブの電子系と異なる時は、100MHz 信号の一部が戻されて、信号の反射された部分が印加した信号と合わさって、定在波を創り、その定在波の電圧が土壌水分として測定される。この土壌水分測定装置 PR1 を用いて土壌水分の鉛直分布を測定した。

2) 土壌水分測定方法

土壌水分の鉛直分布は、各試験区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、PR1 をこのチューブに挿入して測定した（図 2-3 参照）。アクセスチューブは湛水の侵入を防ぐため、地表面から約 32cm 立ち上げキャップした。このため、地表土壌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 80cm であった。水稻耕作期間中の各試験区における各測点の土壌測定深度はおよそ 8cm，28cm，および 68cm であった。この土壌水分センサーは多測点での自動計測できないため、週一回現地で測定した。

3 枚の試験区における土壌水分の測点は、陶管暗渠による土壌水分調整機能を比較検討できるようにそれぞれ空間配置を統一した。試験区の上流側に測点を偏在させたのは、上の水田からの畦畔浸透による余剰水を陶管暗渠により制御する機能を評価するためである。なおそれぞれの測点は、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，測点 c：上流側長辺畦畔から 9m に配置した。各試験区の下流側は畦畔横浸透のため、余剰水が少なく比較的乾きやすかった。

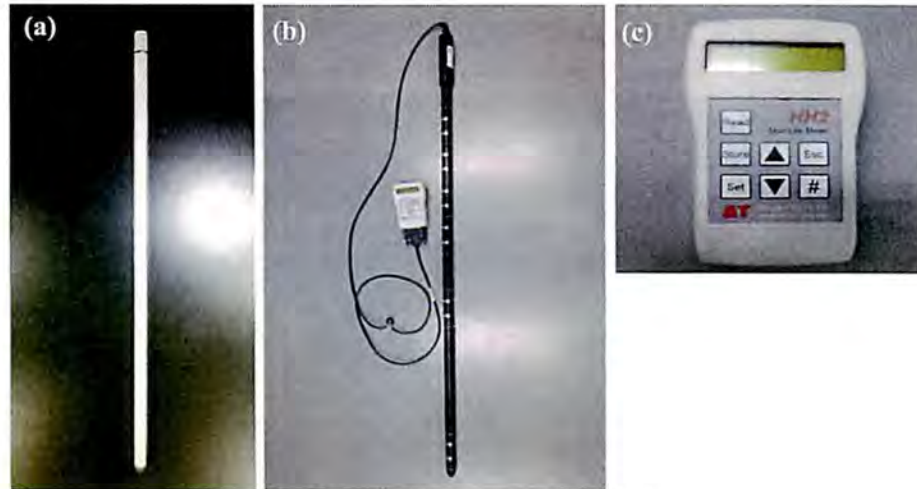


図 2-3 土壌水分センサー式

- (a)アクセスチューブ（長さ 1154mm，内径 26mm φ）
- (b)プロファイルプローブ(PR1)（直径 25mm，ロッド長 1080mm，測定深度 1000mm）
- (c)データ読み取り器(Delta-T 社，HH2)

3) 土壌水分センサーの校正

本研究で用いた土壌水分センサー（PR1）は、畑状態の不飽和土壌で用いることを前提に開発された。これを湿潤な水田土壌で使うためには目盛り設定（校正試験）が必要である。校正試験により、供試圃場の土壌に対する電圧（mV）と体積含水率 θ （%）の関係を求めた。体積含水率 θ は土壌水分表記のひとつで、考察する土壌の全体積 V に対する水の体積 V_w の比である。

4) 土壌水分センサーの校正試験装置

ポリ容器（内径 280mm，高さ 275mm）の底中央に穴を穿ち、アクセスチューブをセットした。ポリ容器とアクセスチューブの隙間には耐水性ボンド（コニシ製，バスボンド Q，#04888）を充填した。24 時間乾燥後に水漏れしないことを確認した。



図 2-4 校正試験装置



図 2-5 耐水性ボンドによる固定

供試圃場で採取した作土層の土壌を風乾させ、2mm 篩いで根や籾殻を選別し初期重量を測定した。なお、土壌の採取深さは 0~5cm、湿潤重量は 7152.9g、採取日は 2012 年 12 月 5 日であった。締固めながら容器に充填し乾燥密度を均一化した。

5) 校正手順 (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 の位置で土を採取した。その後、脱塩水を 500ml 加え、試料中に水分が一定になるまで放置 (今回は 4~7 日とした) した。供試体に水分が飽和状態 (電圧が 400mV 前後) 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。



図 2-6 脱塩水 3000ml 投入 (飽和状態)

ここで、体積含水率 θ は、

$$\theta = w \cdot \rho_d \quad \dots(2.1)$$

である。ここに、 w : 含水比(%), ρ_d : 乾燥密度(g/cm^3)である。なお、含水比 w , および乾燥密度 ρ_d は、

$$\left. \begin{aligned} w &= w_w / w_s \times 100 \\ \rho_d &= w_s / V \end{aligned} \right\} \quad \dots(2.2)$$

で表す。ここに、 w_s : 土粒子の重量(g), w_w : 水の重量(g), V : 体積(cm^3)である。なお、容器に充填した土壌の乾燥密度は $0.795 (\text{g}/\text{cm}^3)$ であった。電圧 (横軸; x) と体積含水率 (縦軸; y) を最小自乗法により

$$y = 0.3395 \cdot \ln(x) - 1.559 \quad \dots(2.3)$$

で近似した。この時の相関係数 R^2 は、0.90 であった。校正曲線は図 2-7 に示した。

一方、井本ら (2006) は PR1 を用いて土壌水分を測定する際、センサー毎に校正式を求める必要のあることを明らかにした。ただし、本研究では、作土、耕盤、および心土それぞれの土壌水の精度を追求することよりも、移動方向を明らかにすることに力点を置いた。また、これまでに研究 (粟生田, 2012) から、本試験圃場では主に作土層で土壌水分が変動した。このため、センサー毎、土層毎の校正式を求めることはせず、1 つの校正式 (2.3) で土壌水分を求めた。

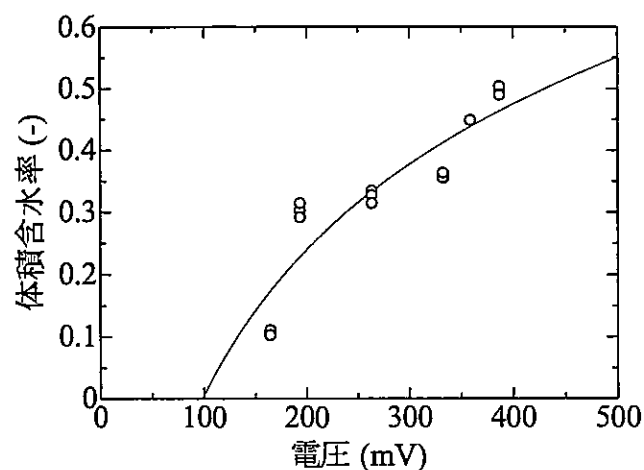


図 2-7 土壌水分センサーPR1 の校正曲線

(2) 地下水位

地下水位は、塩ビ製の測水管（長さ 1500mm、内径 83mm）を土壌水分測点 c に隣接するように設置した（長辺畦畔から 9m 地点）。この測水管を地表面下 100cm になるように埋設した。この測水管の先端部、内径 1.0cm の孔を深さ 90cm から 70cm まで、10cm 間隔で 4 方向に計 16 か所に穿ち、地下水と連続させた。この測水管に圧力式水位センサー（センシズ社、HM-910-02-05）を自由水面下に沈設し、データロガー（Hioki 社、3635-55）に接続して自動計測した。計測期間は 7

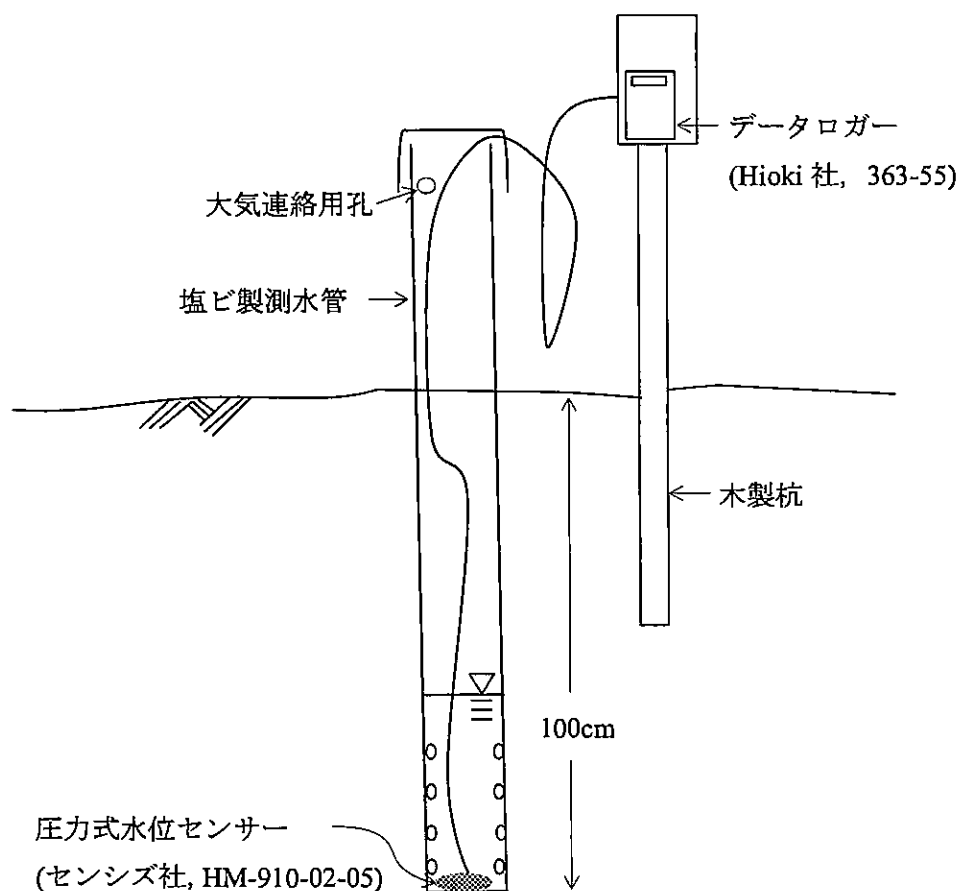


図 2-8 測水管の縦断面図

月5日13時から9月7日11時までで、計測間隔は1時間である。また、確認のため土壌水分測定の際に地下水位をメジャー（Tajima 社、L-13-20）で計測した。測水管の鉛直断面図を図2-8に示した。なお、従来暗渠区は水位計の不具合により、データが得ることができなかった。

水圧式水位センサーの水位測定値は電圧表示のため、水深に校正する必要があった。そこで、手動計測した電圧(V)を横軸に、地表面を基準とした地下水位(cm)を縦軸にとり校正曲線を描いた。連結暗渠区の校正曲線を図2-9、対照区のそれを図2-10に示した。

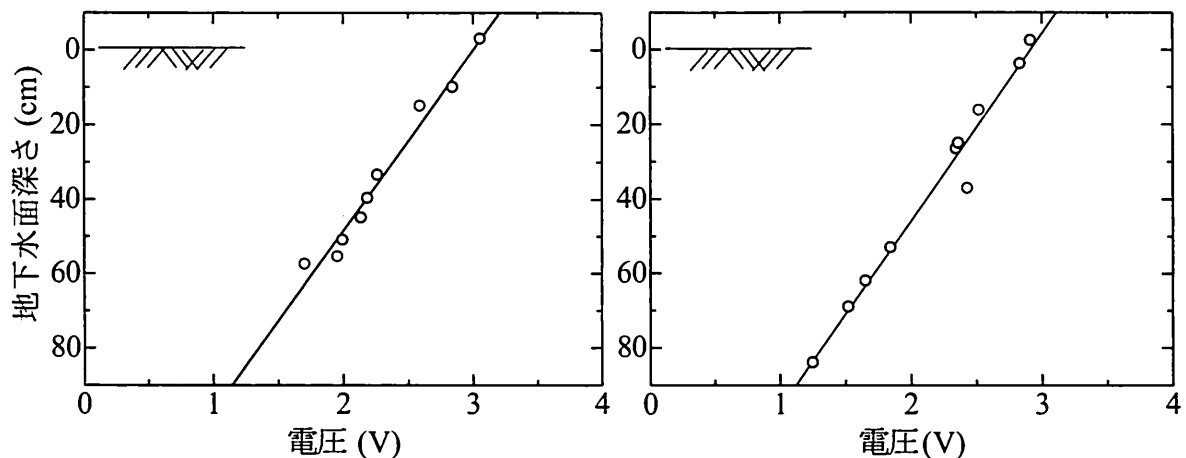


図2-9 連結暗渠区の地下水位センサー校正 図2-10 対照区の地下水位センサー校正

地下水位計の校正式は、

$$\left. \begin{array}{l} \text{連結暗渠区} : y = -4.848 \cdot x + 1.455 \cdot 10^2 \\ \text{対照区} : y = -5.022 \cdot x + 1.463 \cdot 10^2 \end{array} \right\} \dots (2.4)$$

となった。なお、両式の相関係数 R^2 は 0.99 であった。

(3) 土壌硬度

水田土壌は乾燥してはじめて硬化する。ここでは、水口から水尻まで連結した暗渠排水システムによる余剰な土壌水分制御機能を、農業機械の走行性（トラフィカビリティ）で評価した。土壌硬度の測定に用いたのは、貫入式土壌硬度計（大起理化、DIK-5521、先端コーンの最大断面積=6.0cm²、先端角 30°、図2-11 参照）である。土壌硬度計の緒言を表2-2に示した。測定深度は地表面から深さ90cmとした。土壌硬度（または地耐力）は、地表面から深さ0、5、10、15cmの4点の平均値をコーン指数（単位；MPa）として評価し、連結暗渠区、従来暗渠区、および対照区で比較した。なお、土壌硬度の測定点は、稲刈り時に農業機械が旋回する部分とした。それは、最も土壌の乾燥し難い上流側長辺畦畔の旋回部（長辺畦畔、下流側短辺畦畔からそれぞれ5m、図2-2 参照）である。測定は稲刈り（9月15日）前に3回（8月24、31日、および9月7日）、稲刈り後に1回（9月22日）行った。

表 2-2 貫入式土壌硬度計 (DIK-5521) の諸元

項目	摘要
測定可能範囲	147~2451 kPa (コーン断面積 2.0cm ²)
土壌硬度	49~814 kPa (コーン断面積 6.0cm ²) ←本試験で採用
最大深度	90 cm
コーン先端角	30 度
バネのヤング率	490 N/50 mm (=50Kg/50mm)
記録方式	ドラム自動回転記録式
外形寸法	W250×D110×H1250 mm
本体重量	約 3 kg

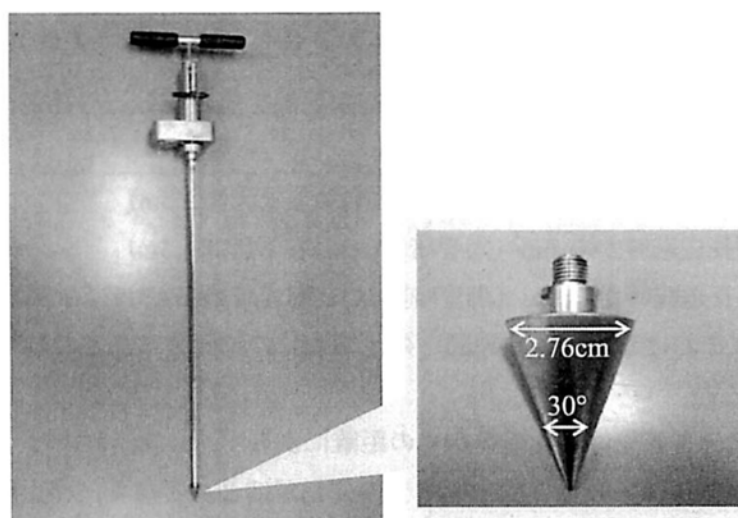


図 2-11 貫入式土壌硬度計 (大起理化 DIK-5521)

(4) 水温, 電気伝導度 (EC)

伏流水の存在を把握するため EC 計 (TOA 社, CM-21P, CT-27112B (30)) を用い地下水の温度と電気伝導度を測定した。測定は地下水の測水管に EC 計を下ろし, 20cm 刻みで測定した。測定日は 2012 年 7 月 27 日, および 8 月 12 日であった。

2-4 結果と考察

(1) 土壌の密度

供試区の土粒子密度は, 深さ 0~5cm で 2.53 g/cm³, 深さ 10cm で 2.59 g/cm³, 深さ 25cm で 2.55 g/cm³, 深さ 70cm で 2.65 g/cm³ であった。深さ 0~25cm で比較的土粒子密度が小さかったのは, 施用された堆厩肥や動植物の死骸などの有機物によるものと考えられる。

(2) 土壌の粒度分析

国際土壌学会に従って, 砂 (粗砂: 2.0~0.2mm, 細砂: 0.2~0.02mm), シルト (粒径 0.02~0.002mm), 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 2-3 に示した。

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。本試験で得られた粒度の方が土壤閲覧システムのものより細かくなった。いずれからも供試区の土壤は細粒土で透水性が低いと判断できた。

表 2-3 砂，シルト，および粘土の含有率と土性分類

深さ(cm) 含有率(%)	0~5	10	25	75
砂	16.9	11	16.1	12.5
シルト	42.1	30.7	40.8	29.7
粘土	39.0	56.8	41.6	57.4
合計	98	98.5	98.5	99.6
土性分類	LiC (軽埴土)	HC (重埴土)	LiC (軽埴土)	HC (重埴土)

(3) 土壤水分測定

各供試区における土壤水分測定の平面的な空間配置を規定する。各測点は長辺畦畔のほぼ中央とした（図 2-2 参照）。

測点 a：上流側長辺畦畔から 3m（陶管暗渠(A)から上流側 1.5m）

測点 b：上流側長辺畦畔から 6m（陶管暗渠(A)から下流側 1.5m）

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

以下に各試験区における水稻耕作期間中の土壤水分の鉛直分布測定の結果を示す。

1) 連結暗渠区

土壤水分の鉛直分布変動は陶管暗渠からの距離によらず，a，b，および c の全測点でほぼ一様に変動した。耕盤より深い心土では土壤水分の変化がほとんどなく，作土層の変動が比較的大きかった。具体的には，心土における土壤水分は，測定期間中ほぼ変化なく飽和状態だった。耕盤も心土よりは土壤水分が低かったが，ほぼ変化なく飽和状態だった。作土では 8 月中旬から土壤水分が緩やかに減少した。これは，落水によるものと考ええる。

土壤水分の変動様式から，鉛直方向，特に上向きの水移動が水平方向のそれよりも卓越したと考える。つまり，水稻の蒸散，および地表面からの蒸発による土壤水の鉛直上向き移動による乾燥と考える。したがって，細粒土壤の多い水田における土壤乾燥には，亀裂を発達させ水分の上向き移動による土壤乾燥が欠かせないと考える（図 2-12 参照）。

2) 従来暗渠区

土壤水分の変動は，連結暗渠区とほぼ同じであった。ただし，連結暗渠区に比べ作土層での変動が小さかった。補助暗渠がないため作土層の土壤水の水平移動し難く，連結暗渠区と比べ乾きにくかったと考える。作土層では，8 月 11 日に土壤水分の低下がみられたが，それ以外ではほぼ飽和状態だった（図 2-13 参照）。

3) 対照区

3 つの測点における深さごとの土壤水分の変動は他の 2 枚の暗渠区とほぼ同様であった。ただし他の 2 枚の試験区に比べ，耕盤でも変動がみられた。測点 a，測点 b の耕盤では 8 月中旬から土壤水分が減少した。測点 b の作土では 8 月 11 日，測点 c の作土では 8 月 11，17 日に土壤水分が減少した（図 2-14 参照）。

この対照区は、連結暗渠区、および従来暗渠区に比べもともと排水性が高く、トラフィカビティも低くないことが裏付けられた。

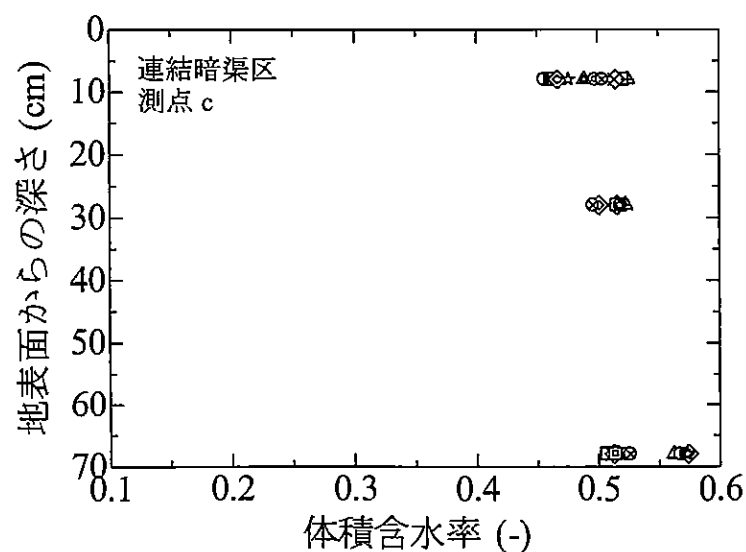
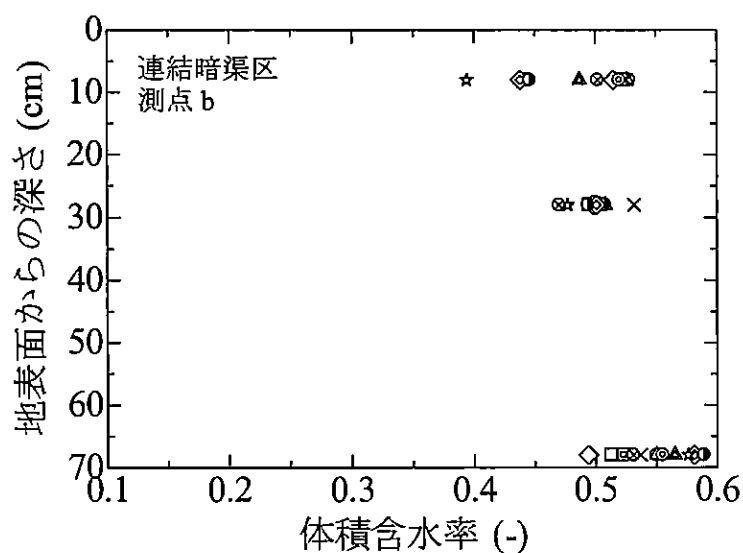
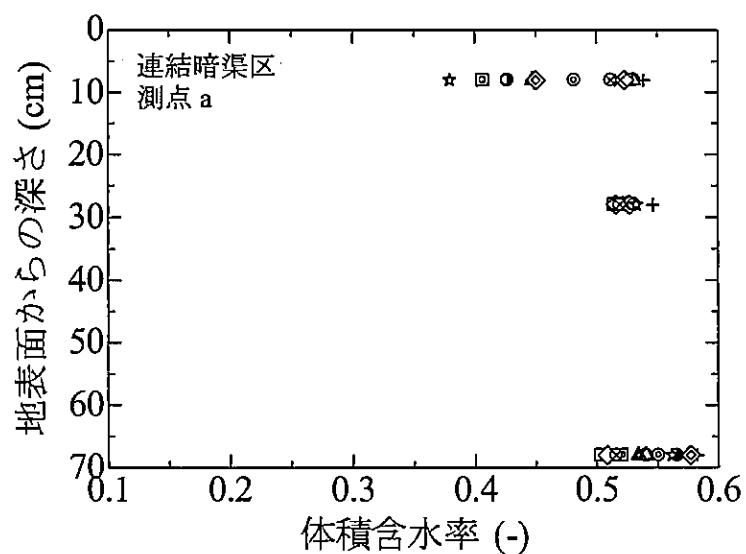


図 2-12 連結暗渠区における土壌水分の鉛直分布

上から、測点 a, 測点 b, 測点 c

- 6月20日
- △ 6月22日
- 6月29日
- ◇ 7月5日
- +
- × 7月20日
- ◎ 7月27日
- ▲ 8月4日
- ▣ 8月11日
- ◆ 8月17日
- 8月24日
- ☆ 8月31日
- ⊗ 9月7日

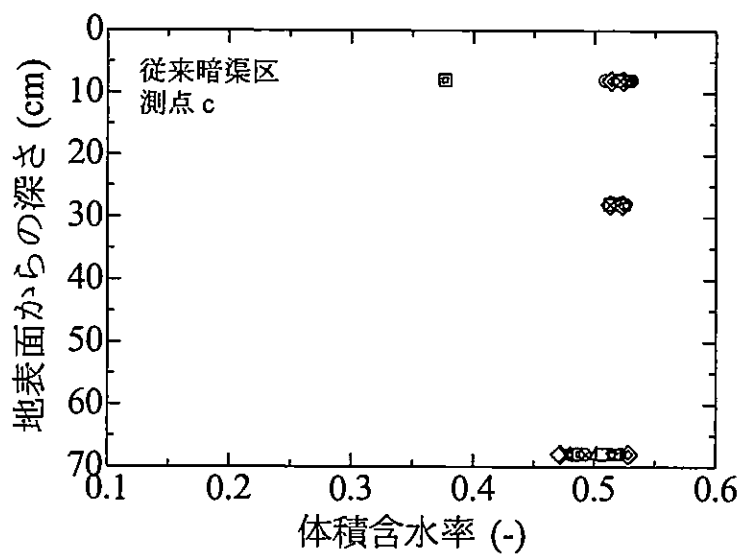
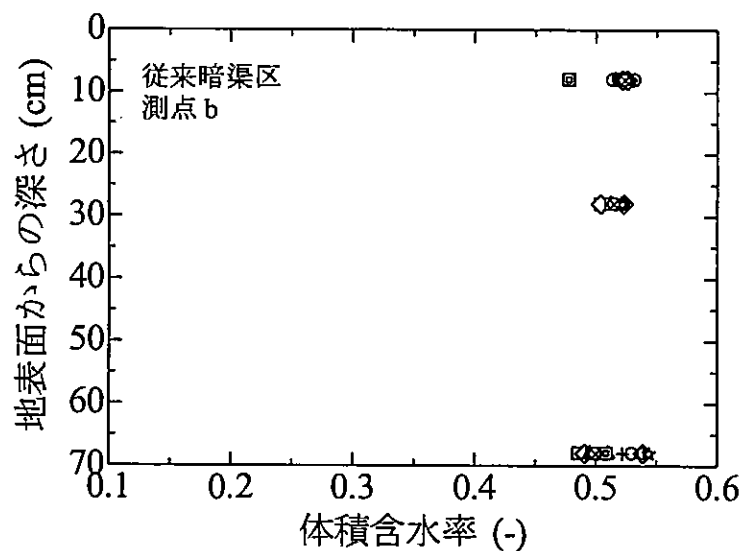
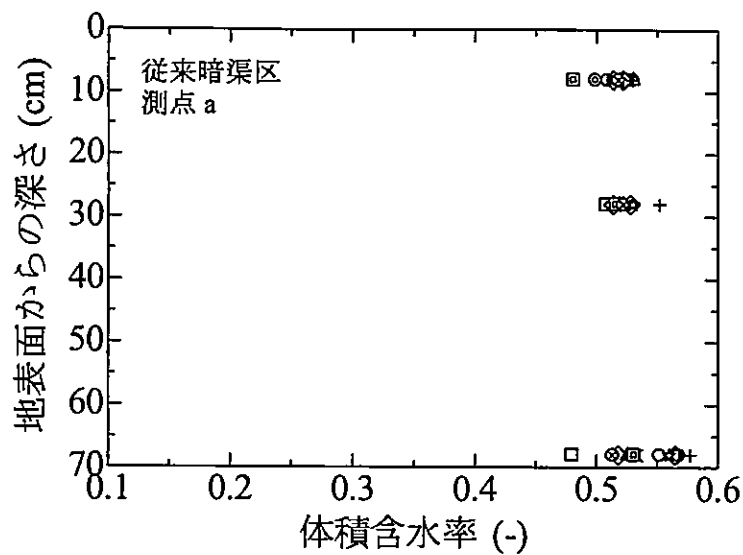


図 2-13 従来暗渠区における土壌水分の鉛直分布

上から、測点 a, 測点 b, 測点 c

- 6月20日
- △ 6月22日
- 6月29日
- ◇ 7月 5日
- ＋ 7月13日
- × 7月20日
- 7月27日
- ▲ 8月 4日
- 8月11日
- ◆ 8月17日
- ◐ 8月24日
- ☆ 8月31日
- ◎ 9月 7日

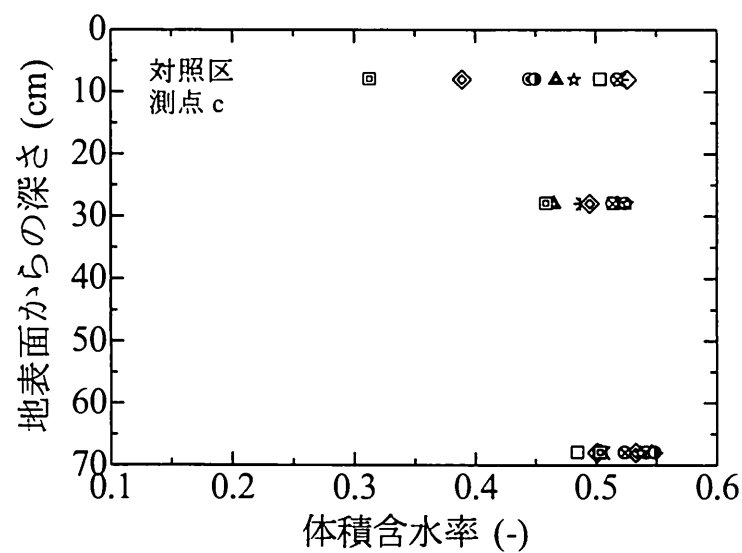
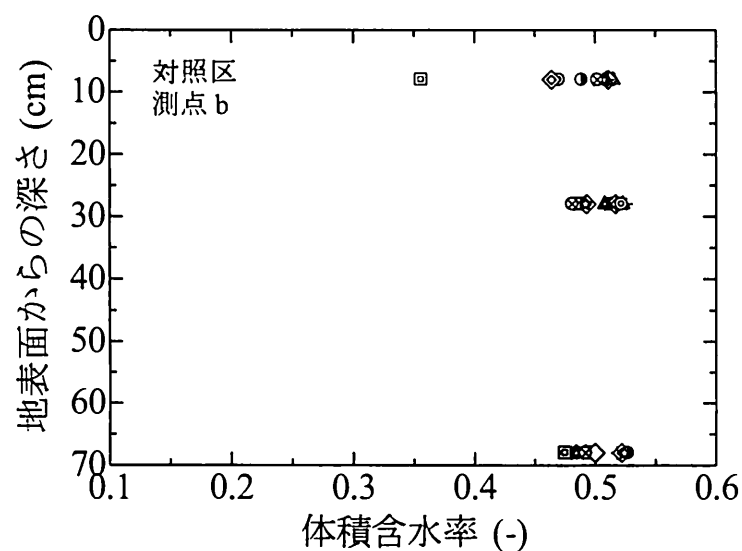
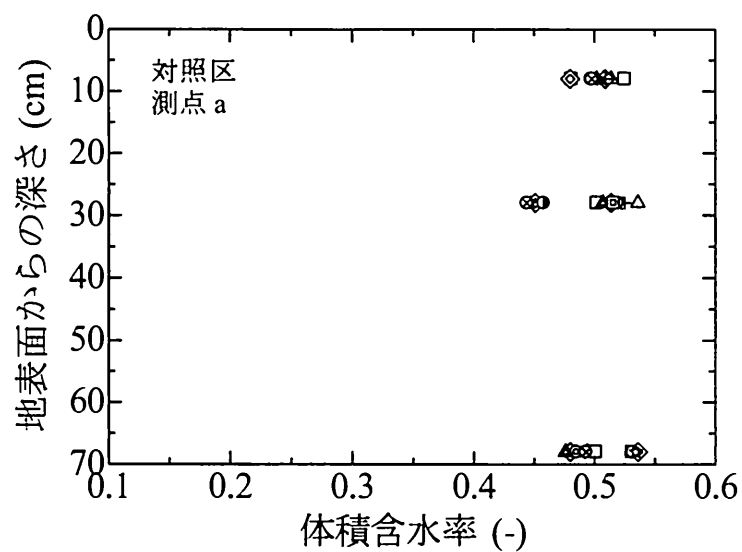


図 2-14 対照区における土壌水分の鉛直分布

上から、測点 a, 測点 b, 測点 c

- 6月20日
- △ 6月22日
- 6月29日
- ◇ 7月5日
- ＋ 7月13日
- × 7月20日
- 7月27日
- ▲ 8月4日
- ▣ 8月11日
- ◆ 8月17日
- ◐ 8月24日
- ☆ 8月31日
- ⊗ 9月7日

4) 地下水位変動

地下水位は、3枚の試験区でほぼ同じ変動を示した（図2-15参照）。数日おきに大きな変動があるのは、間断灌漑の影響であろう。中干し期間中（6月22日～27日）には測定することができなかった。中干しによる地下水位の低下を判断できなかった。稲刈り前の9月7日の測定では、地下水位は地表面を基準として連結暗渠区；-15cm、従来暗渠区；-2cm、対照区；-3.8cmであった。これら各試験区の地下水位は、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水位（計画地下水位）には十分でなかった。このため、9月7日の地下水位からは作物生育の適性を判断できなかった。ただし、前日の降雨（49mm）、2012年の稲作収量（平年並み）を考慮すると、連結暗渠区の余剰な土壤水の制御能力が不十分であったとは考え難い。なお、9月10日以降の地下水位計は、稲刈り作業に支障をきたすため撤収した。

表 2-5 土地利用形態別地下水位および低下日数（農林水産省、2000）

土地利用形態	降雨後 2~3 日の地下水位	常時地下水位深さ (cm)
	(地表面を基準とした深さ, cm)	(降雨後 7 日以降)
水田	30~40	40~50
転換畑	40~50	30~60

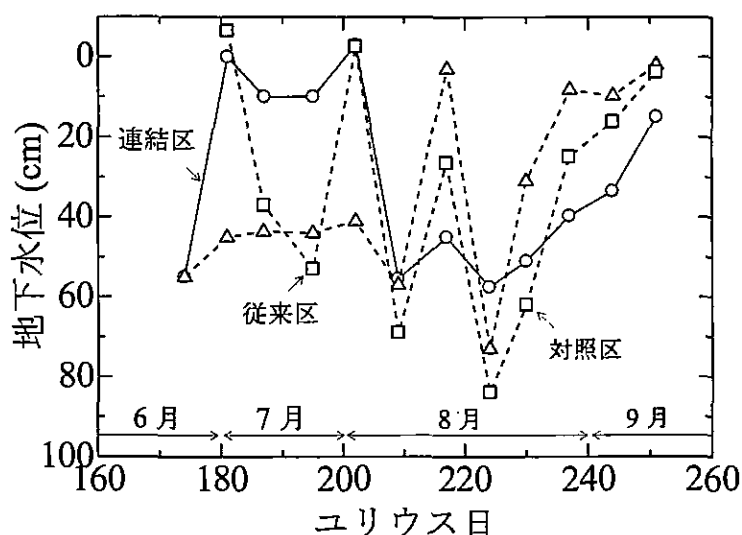


図 2-15 各試験圃場における地下水位の変動（地表面基準）

測定：2012年6月20日から9月7日まで。

図2-16に連結暗渠区の地下水位変動と降雨の関係を、図2-17に対照区におけるそれを示した。なお、試験圃場に設置した雨量計の動作不良のため、最寄りの大室テレメータの雨量を用いた（国土交通省、2012）。

連結暗渠区と対照区では異なる変動をした。連結暗渠区では地下水位の変動幅は約70cmであった。これに対し、対照区のそれは約90cmであった。前者の保水性が高いこと、後者は比較的保水性が低いことが原因と考える。連結暗渠区の地下水位は1日のうちに複数回ピークを示すなど小刻みに変動した。例えば、7月10日は2度の谷を示した。この地下水位が谷を示す時刻と潮

夕の時刻がほぼ重なっていた。2枚の試験区における地下水位変動は降雨を反映したものと、反応しないものがあった。7月中旬の降雨に関して、対照区では約30cm地下水位上昇したが、連結暗渠区ではcmの上昇に留まった。一方、7月25日、8月6日と7日、および8月22日の降雨に対して、連結暗渠区では地下水位の上昇が見られたが、対照区ではその上昇は無かった。その他、降雨データがゼロでも地下水位が上昇することがあった。これは、水管理（間断灌漑）によるものと推定できた。ただし、間断灌漑データがないためグラフには表示できなかった。

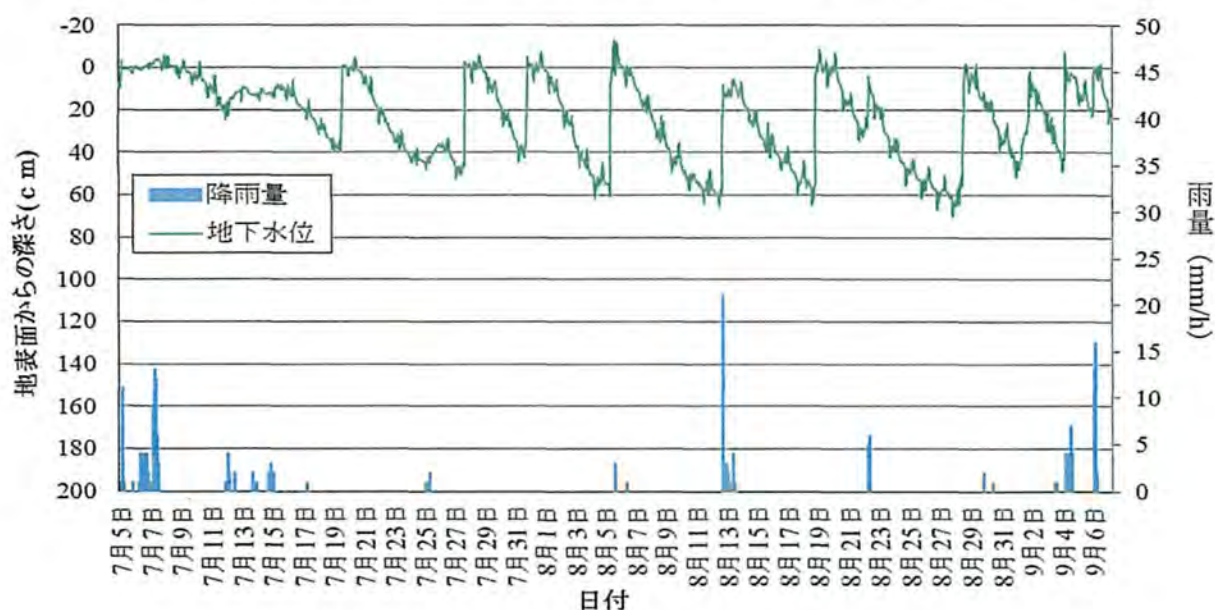


図 2-16 連結暗渠区における地下水位変と降雨量

測定：7月5日13時から9月7日11時まで。

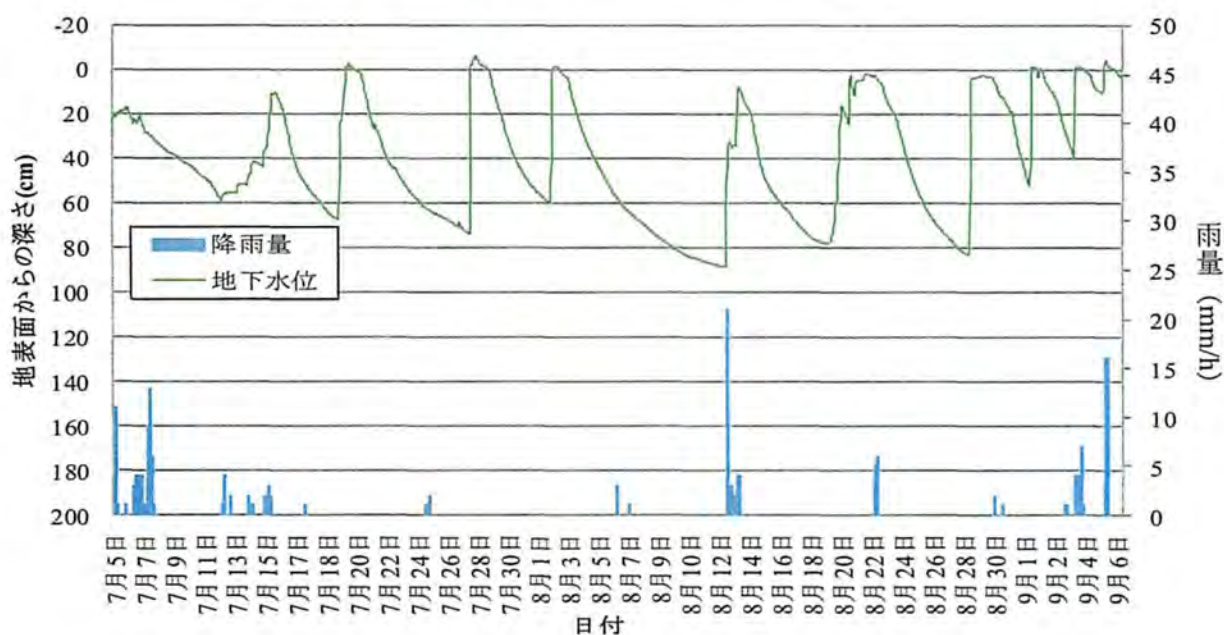


図 2-17 対照区における地下水位変と降雨量

測定：7月5日13時から9月7日11時まで。

5) 地下水位と作土層の土壌水分

地下水位と作土層(地表面から深さ 8cm)の土壌水分変動について相互関係を分析した。地下水位のデータは連結暗渠区と対照区については自動観測の値を用いた。従来暗渠区は水位計の不具合により自動測定 of データが取れなかったため、手動観測値を示した。

○連結暗渠区

地下水位は降雨と間断灌溉によって変動したが、土壌水分は変化が少なかった。ただし、8 月 11 日、31 日は地下水位の低下と土壌水分の低下が重なっており、相関がみられた。この時の土壌水分は上流側畦畔から 3m の測点 a で最も低く、続いて 6m の測点 b、最も高いのが 9m の測点 c であった。上の圃場からの畦畔浸透による水分上昇を抑制したと考えられる。9 月 3 日に落水が行われたが、降雨の影響により土壌水分、地下水位ともに上昇した(図 2-18 参照)。

○従来暗渠区

7 月 20 日~8 月 17 日の期間において、地下水位と土壌水分の変動は相関が高かった。その他の期間は 3 測点とも地下水位の高低によらず、一定の土壌水分を保っていた。連結暗渠区と同様に、落水による変化は土壌水分、地下水位ともに見られなかった(図 2-19 参照)。

○対照区

8 月 11 日には相関がみられた。この時の土壌水分は測点 a が最も高く、続いて測点 b、最も低いのが測点 c であった。間断灌溉の水が少ない方の時期だったが、上の圃場からの畦畔浸透により、測点 a は乾きにくかったと考える(図 2-20 参照)。

土壌水分が測定期間を通じ、高い値で推移し変動が少なかったことから、地下水位との相関は低かった。測点 c は地下水位を測定した測水管と 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ではなかった。グライ土壌で耕盤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深くなかったと考える。

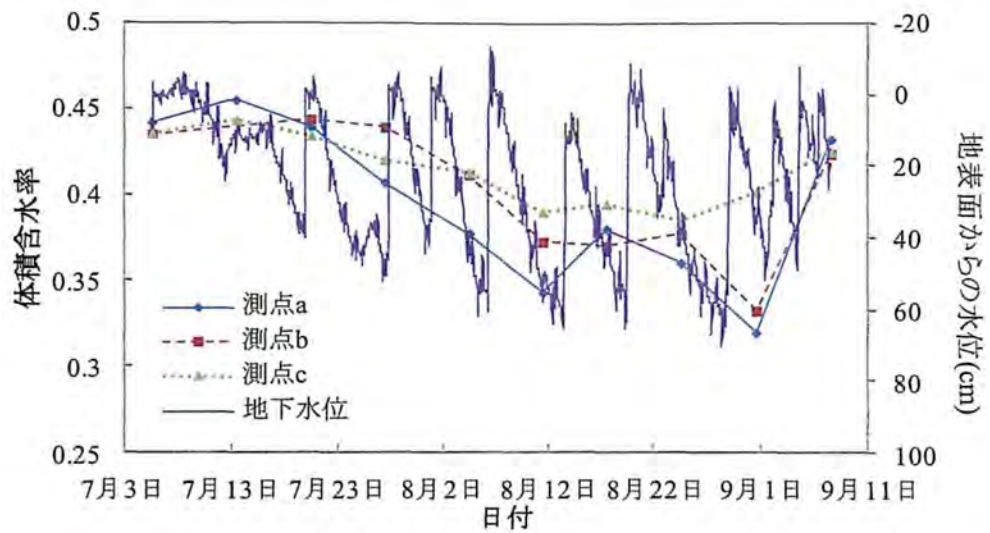


図 2-18 連結暗渠区における作土層の土壌水分と地下水位変動

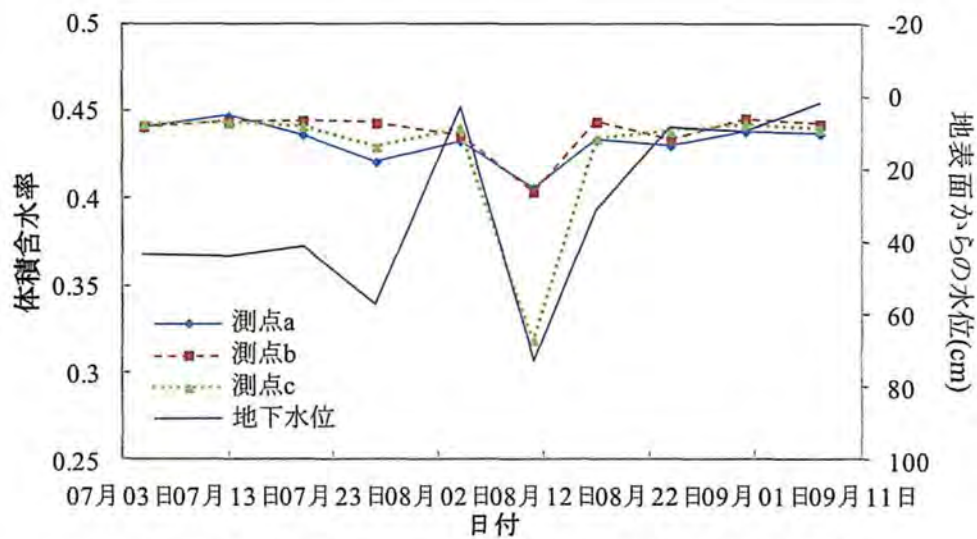


図 2-19 従来暗渠区における作土層の土壌水分と地下水位変動

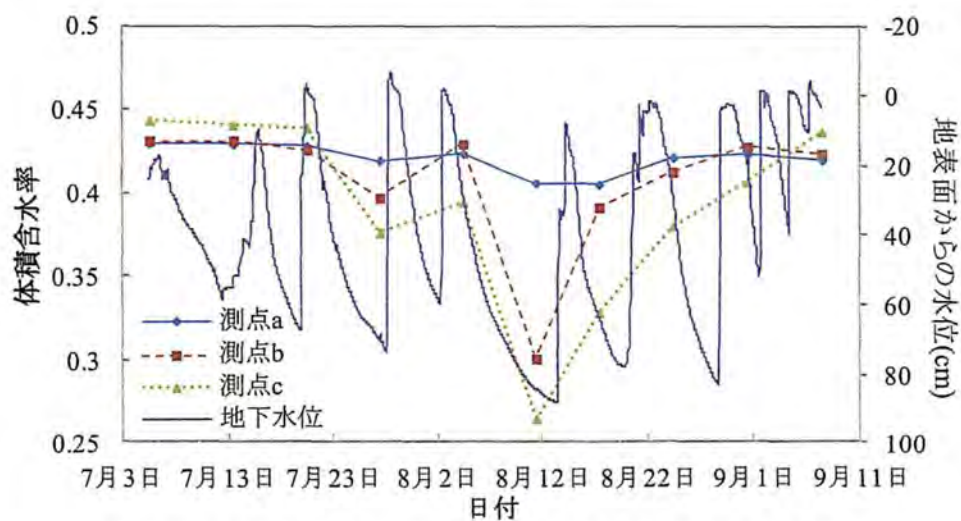


図 2-20 対照区における作土層の土壌水分と地下水位変動

6) 土壌硬度

3 枚の試験区における土壌硬度の変化は表 2-5 に示す通りである。

表 2-5 各試験区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)
8 月 24 日	0.16	0.13	0.34
8 月 31 日	0.19	0.14	0.31
9 月 7 日	0.21	0.24	0.34
9 月 22 日	0.37	0.32	0.39

9 月 3 日に落水が行われた。暗渠が埋設されていない下圃場では変化がないが、上圃場、中圃場では 8 月 31 日から 9 月 7 日にかけてコーン指数が向上した。上圃場では 1.9 倍、中圃場では 2.3 倍の向上であった。

農林水産省構造改善局(2000)は、地耐力を地表面下 15cm までの間を 5cm ごとに測定したコーン指数（落水後又は降雨後 7 日以降）の測定値 (N/mm^2 ; $1\text{N/mm}^2=1\text{MPa}$) 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。稲刈り前の 9 月 7 日は前日に 49mm の降雨があったため、各圃場で若干低かった。しかし、上圃場、中圃場の暗渠を開けてからのコーン指数の変化をみると、暗渠の排水効果が十分発揮された。また稲刈り時の作業性についての聞き取り調査から、農業機械の走行性には支障がなかった。ただし、乾きすぎて稲が倒伏傾向にあったとのこと。このことから、暗渠の排水性が十分だったと考える。

一方、対照区では常にコーン指数が高かった。もともと対照区は連結暗渠区や従来暗渠区と比べ排水性が高く、暗渠を敷設必要性が低かったことを裏付けた。

7) 電気伝導度 (EC)、水温

図 2-21 に水温、図 2-22 に EC の変動を示した。地下水位は表 2-6 に示すとおり、7 月 27 日が連結暗渠区：-55.5cm、従来暗渠区：-57cm、対照区：-69cm、8 月 11 日が連結暗渠区：-57.5cm、従来暗渠区：-73cm、対照区：-83cm であった。水温は深くなるにつれて低くなり、反対に EC は高くなった。7 月の水温は、3 枚の試験区で地表面下約 80cm において勾配変化した。7 月の EC は、連結暗渠区と従来暗渠区の深さ約 80cm において勾配が変化した。8 月は地下水位が低く 2 深度のみの水質測定でであった。

水温、EC とともに急変すれば伏流水の存在を推定できる。7 月の測定では緩い勾配の変化が確認でき、伏流水の可能性が示唆された。ただし、測定値が多くないため伏流水を規定するには至らなかった。

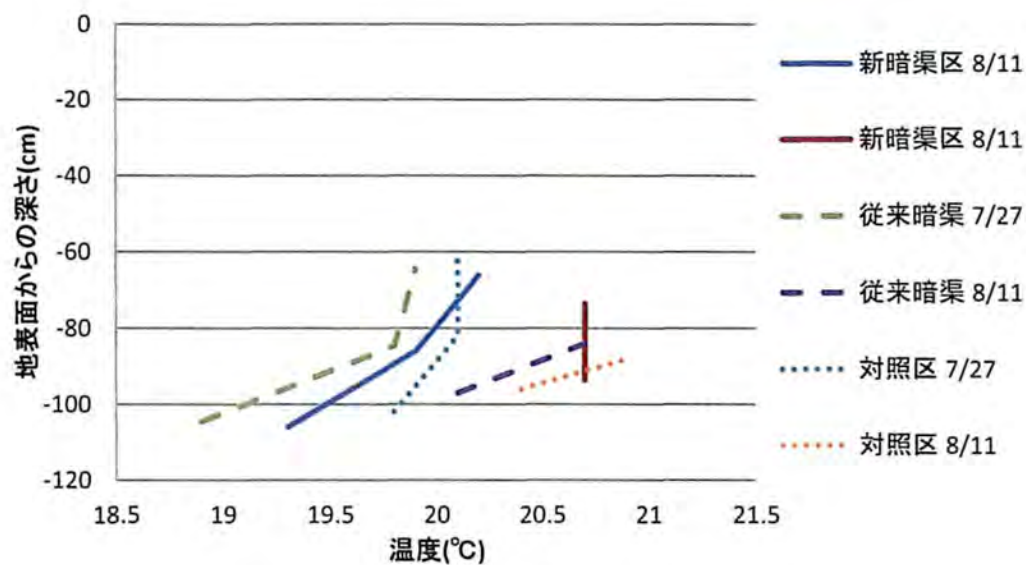


図 2-21 地下水の温度の鉛直分布

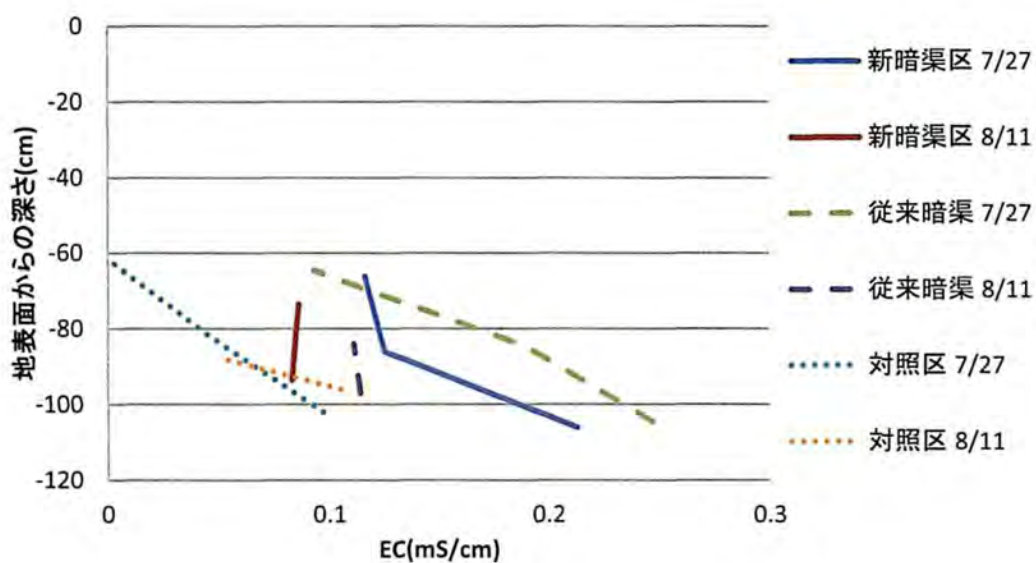


図 2-22 地下水の EC の鉛直分布

表 2-6 各試験区の地下水位（単位：cm）

測定日/試験区	連結暗渠区	従来暗渠区	対照区
7 月 27 日	-55.5	-57.0	-69.0
8 月 11 日	-57.5	-73.0	-84.0

第3章 地下灌漑・排水

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、地下水位を上昇させることにより作土層に給水、または地下水面下の土層において毛管上昇作用により心土層内の水位を上昇させることによって灌漑することである（農林水産省構造改善局，2000）。

用水路からの水位差のみで給水した。本試験区における地下灌漑方式を記す。水口側の立ち上がり管（図2-3（ア））の栓を外し給水口とした。次に、用水路に内径50mm（断面積 $1.96 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ）のサクションホースを沈め、満水状態としてサイフォン式に給水口に繋げた。地下水位は、W排水樹の立ち上がり管の水位調節により暗渠管内に正の水圧を生じさせた。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、初殻などから灌漑水を拡散させた（図3-1（a）参照）。



図3-1 連結暗渠区における自然圧による地下灌漑

(a)：サクションホースによる給水（水口）、(b)：W排水樹立ち上がり管の水位測定（水尻）

(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。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中に効率よく移動することが求められる。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た組み合わせ、暗渠本管との連結を良好とすることも重要である（構造改善局，2000）。

(3) 転換畑における作物栽培のための地下水位管理

地下水位を地表面から-50cmから-60cmに下げれば、ほとんどの畑作物は栽培可能になるが、大豆等の転作作物に適する地下水位は-30cm前後から-70cm前後である。新潟県内の転換畑で栽培される大豆は、約-30cmに下げるとほぼ正常な生育ができた（農林水産省構造改善局，2000）。

(4) 地下排水

地下排水は、従来の暗渠の排水機能を発揮させた、余剰な土壌水分の排除である。ただし、排

水時に、用水路側の立ち上がり管が大気と連続させることが可能である点が、従来型の暗渠と異なる。

(5) 試験の実施時期

連結暗渠区における地下灌漑・排水試験は、水稻の耕作されていない、代掻き前の4月（春期）と稲刈り後の10月（秋期）に実施した。いずれの時期も、作土層は深さ10cm程度に耕起されており、供試圃場の土壌は適度な乾燥状態にあった。

3-2 土壌水分

土壌水分はDelta-T社のPR1とHH2を用いて、地表面下8cm（作土）、28cm（耕盤）、68cm（心土）の3深度で測定した。調査地点は陶管暗渠、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（ただし、2012年4月の調査では3点）。測点の空間配置は図3-3の通りである。上流側の陶管暗渠(A)から2.0m、補助暗渠から0.5mの測点を測点①、陶管暗渠(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、陶管暗渠(A)と陶管暗渠(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、陶管暗渠(A)と陶管暗渠(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。

給水時間は、春期試験では4月27日11:00から4月28日10:30までであった。また、秋期試験では10月26日の10:30から27日の11:00まで、27日11:00から排水を開始した。

土壌水分の鉛直分布測定は、春期の場合、地下灌漑開始から1時間後、2.5時間後、3.0時間後、4.2時間後、22時間後、49時間後に行った。秋期の場合、土壌水分の鉛直分布測定は、地下灌漑開始前、開始から10分後、1時間後、1.5時間後、3.5時間後、4.5時間後、6時間後、24時間後、排水開始から1時間後、3時間後、23.75時間後に行った。



図 3-2 PR1 による土壌水分測定

3-3 地下水位

地下水位は、春期試験では測定しなかった。秋期試験では、土壌水分の測定と同様に10月26~28日に測定を行った。測定地点は測水管を設置していた所で、上流側長辺畦畔から9mの場所である。測水管を埋めていたことによりできた孔を利用し、メジャーで測定した。測定は給水開始から35分後まで、45分から1.5時間後までは5分間隔、3.25時間後から4.5時間後までは15分間隔で行い、次は6時間後、24時間後、24.8時間後、排水開始から1時間後、3時間後、23.75時間後に行った。

3-4 排水口水位

W排水枠の立ち上がり管における水位をメジャーで測定した。なお、水位の測定高さを排水枠の上端面とした。排水口の水位測定は、春期試験では系統的に行わなかった。秋期には、地下水位測定と同様に10月26日~28日に測定を行った。

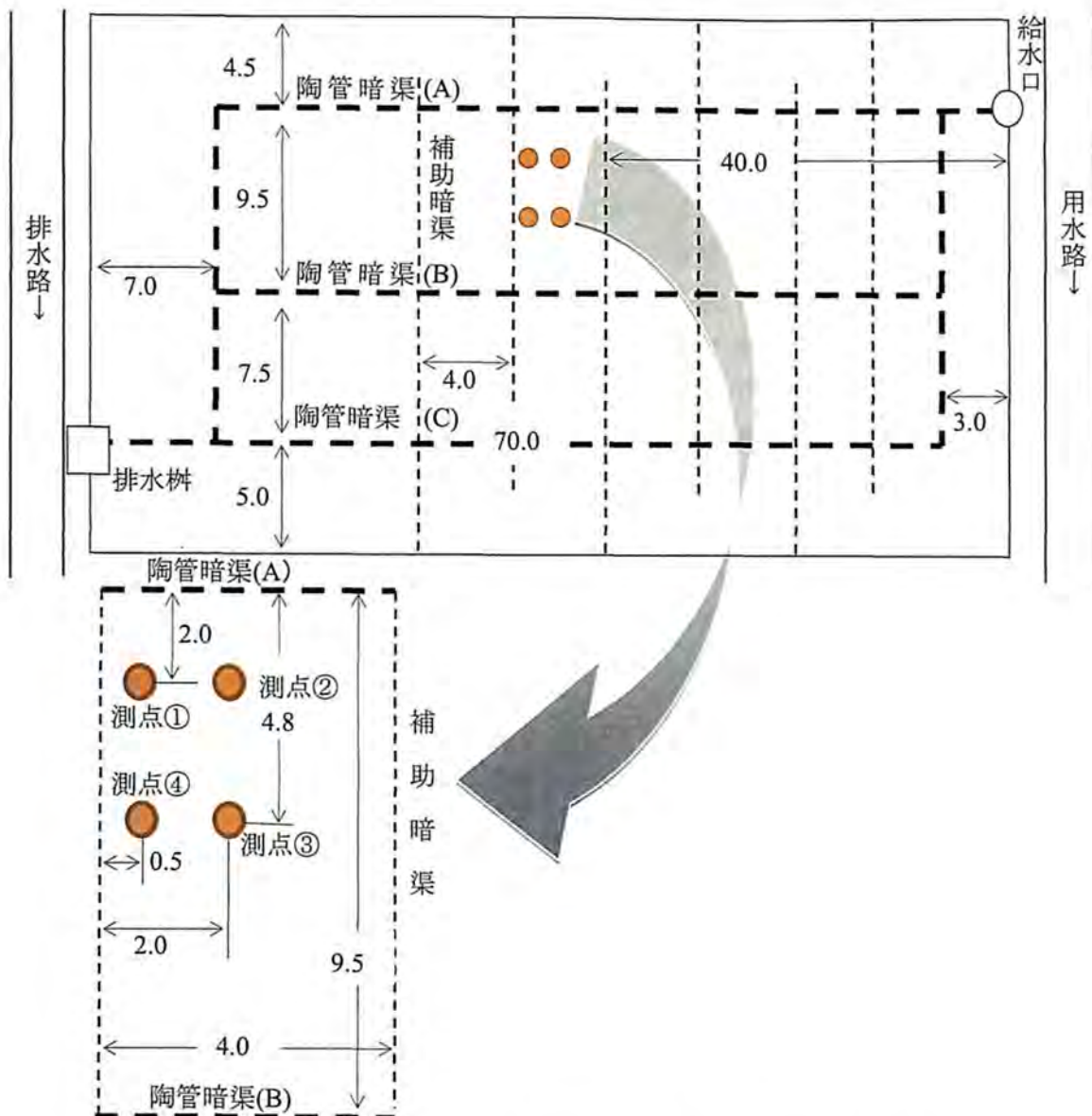


図 3-3 地下灌漑・排水試験（連結暗渠区）の平面図（単位 m）

土壌水分センサーは陶管暗渠，および補助暗渠から用水浸出状況を知るため，4 か所に設置した。

測点①：上流側長辺畦畔から 6.5m，陶管暗渠(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，陶管暗渠(A)から 2.0m，2 本の補助暗渠から等距離 2.0m の位置（春期試験では欠測）

測点③：上流側長辺畦畔から 9.3m，陶管暗渠(A)と陶管暗渠(B)から等距離 4.8m 2 本の補助暗渠から等距離 2.0m の位置

測点④：上流側長辺畦畔から 9.3m，陶管暗渠(A)と陶管暗渠(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 5cm(作土)，25cm(耕盤)，および 65cm(心土)である。

補助暗渠は，2011 年 10 月 16 日に施工(適要：初敷充填，深さ：0.4m，間隔：4m，

本数：17 本) 勾配なし，短編畦畔に平行。ただし，トラクターのアタッチメントの都合上，片側 3m 程度短い。

3-5 結果と考察

(1) 土壌水分（春期試験，地下灌漑のみ）

連結暗渠区において自然圧給水による地下灌漑を4月27日～28日に49時間行った。各測点における作土層（深さ12cm）の土壌水分は給水開始から22時間後に0.5（飽和状態）に達した。耕盤層（深さ32cm）と心土（深さ72cm）では、土壌水分は給水開始から給水終了までほぼ飽和状態でほとんど変化なかった（図3-4参照）。

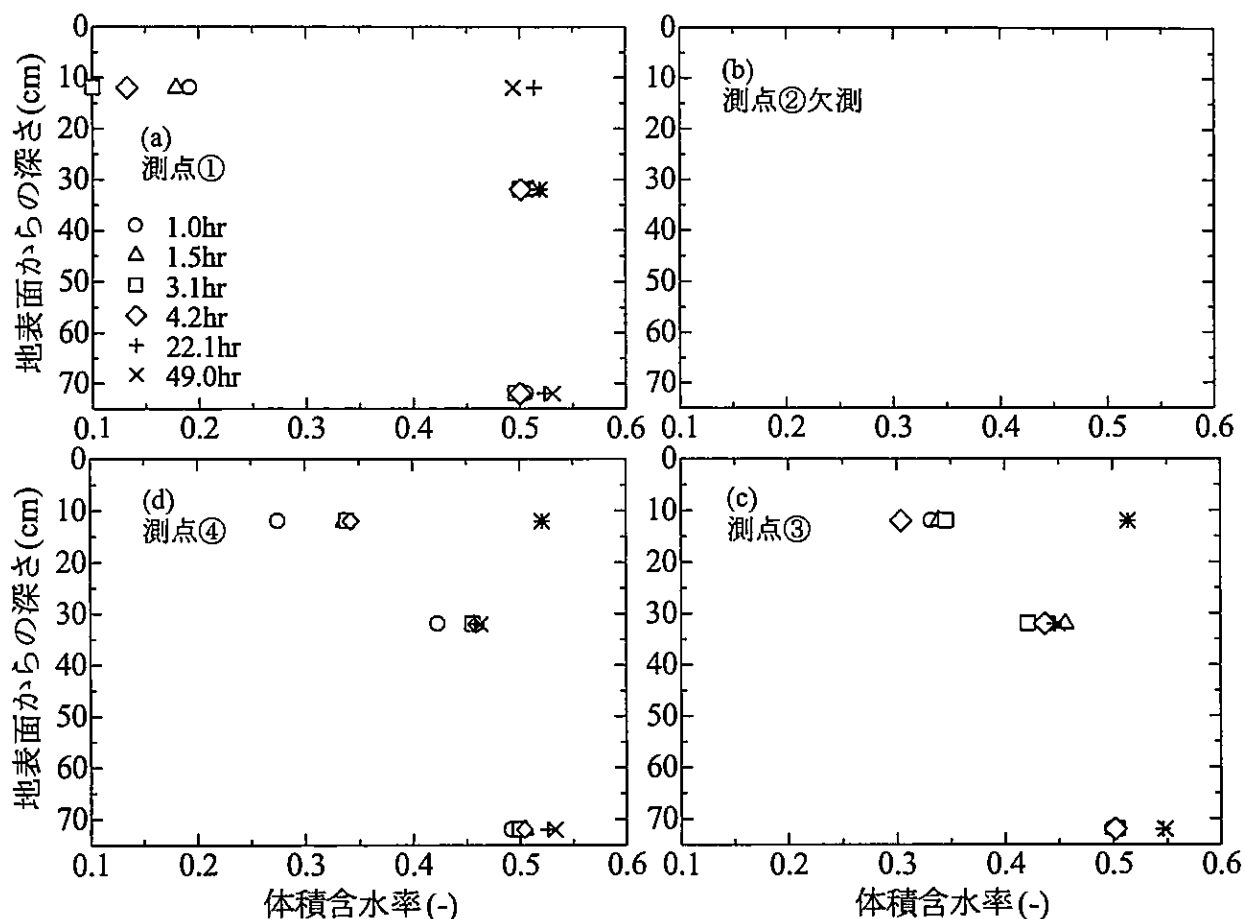


図 3-4 連結暗渠区における春期の地下灌漑試験での土壌水分変動

(2012 年 4 月実施)

左上から時計回りに，(a) 測点①，(b) 測点②欠測，(c) 測点③，(d) 測点④。

(2) 土壌水分（秋期試験，地下灌漑・排水）

秋期の地下灌漑・排水試験において，作土層の土壌水分変動は，測点①と④，測点②と③が似ていた。測点①と④は，補助暗渠からの水平距離が 50cm である。測点②と③は，200cm である。つまり，補助暗渠に近い程土壌水分の変動幅が大きく，反対に測点が補助暗渠から離れると土壌水分の変動は小さかった。一方，土壌水分の増減の速度は各点で大きな差はなかった。地下灌漑開始から 24 時間で飽和になり，灌漑開始から 48.3 時間（排水から 24 時間）で灌漑前の水分状態に戻った（図 3-5 参照）。以下，各測点を個別に考察する。

測点①

心土では測定期間を通じほぼ変動がなく，飽和状態であった。耕盤では，給水開始から 1 時間でほぼ飽和状態となった。作土では給水から 24 時間後には飽和状態になり，排水から 23.75 時間後には試験を始める前の状態まで乾燥した。

測点②

心土では測定期間を通じほぼ変動がなく，飽和状態であった。耕盤では変化がなく測定期間を通じほぼ同じ値を示した。作土では測点①と比べ，土壌水分にばらつきがみられた。また給水を始める前から土壌水分が高く，給水を開始すると一旦低くなった。給水開始から 24 時間で飽和状態になり，排水開始から 23.75 時間で元の状態まで乾燥した。

測点③

心土の変動は測点①，②と同じであった。耕盤ではほぼ変化がなく，一定の値を示した。作土では，測点②と同様にばらつきがみられ，給水前から土壌水分が高かく給水を開始すると一旦低くなった。給水から 24 時間で飽和状態になり，排水から約 24 時間で元の状態まで乾燥した点は測点①，②と同じであった。

測点④

心土の変動は他の測点と同様であった。耕盤では変化がなく，測定期間を通じほぼ同じ値を示した。作土では，給水開始から 6 時間後まではほとんど変動がなかったが，24 時間後には飽和状態になった。排水から約 24 時間で元の状態まで乾燥した。また他の測点に比べばらつきがなく，乾燥と湿潤がはっきり分かれていた。

これら土壌水分の測定結果から，透水性の低い重粘土の圃場であっても，灌漑，排水それぞれ約 1 日で効果がみられた。供試圃場は耕盤によって作土と心土の水移動が阻害されているが，暗渠の継ぎ目から漏出した灌漑水は，おもに暗渠の埋戻し部の粘殻，および補助暗渠を通じて，また少し心土内の微小亀裂を伝って移動したと考える（図 3-7 参照）。

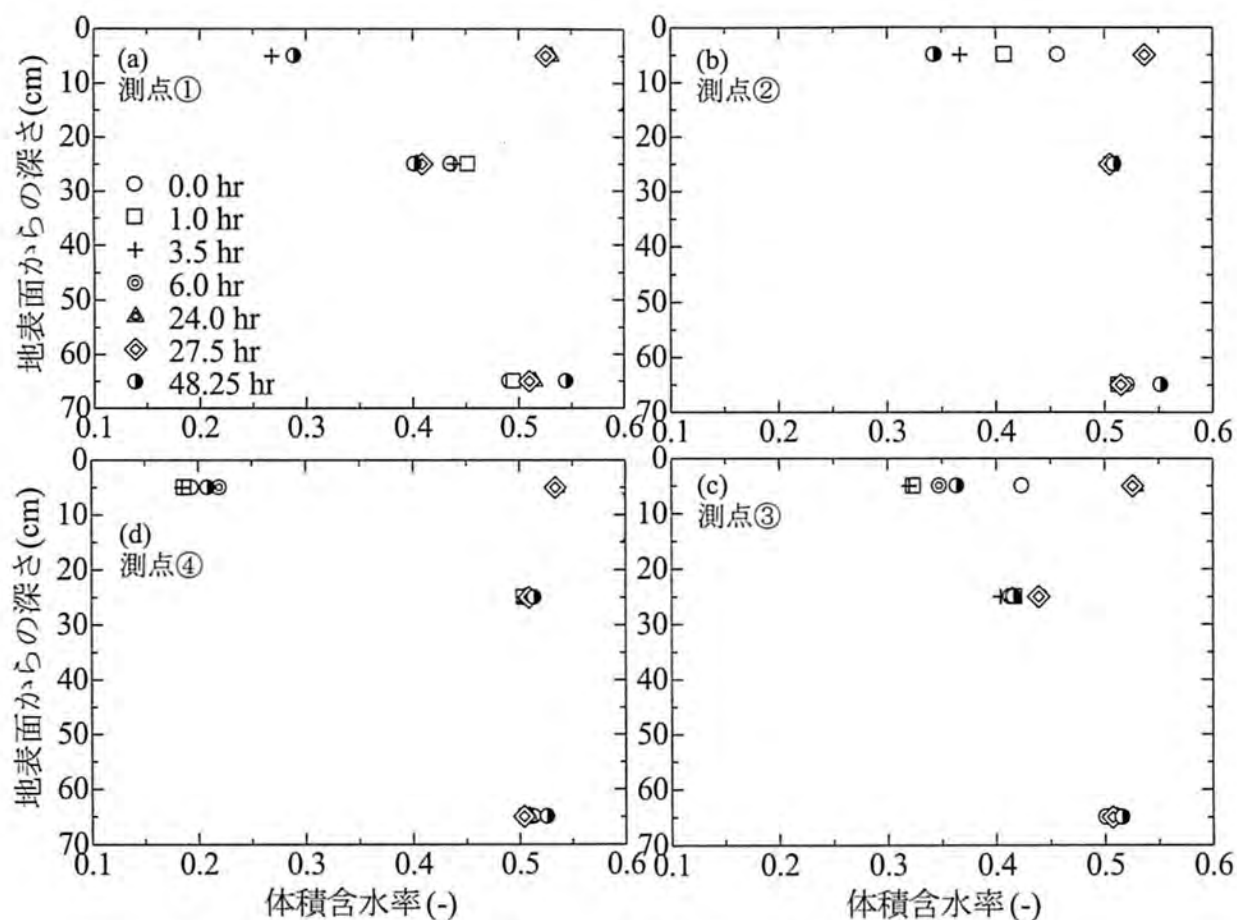


図 3-5 連結暗渠区における秋期の地下灌漑・排水試験での土壌水分変動
(2012 年 10 月実施)

左上から時計回りに、(a) 測点①、(b) 測点②、(c) 測点③、(d) 測点④。

(3) 地表面の様子

連結暗渠区における秋期地下灌漑・排水試験の際の地表面の乾湿状況を図 3-6 に示した。給水開始から 24 時間後にはが 1cm の湛水となった。そして、排水開始から約 24 時間で灌漑試験開始前の乾いた状態まで戻った。



図 3-6 秋期の地下灌漑・排水試験の際の田面の变化

(a) : 地下灌漑開始前、(b) : 地下灌漑開始から 24 時間後 (約 1cm の湛水)、(c) : 灌漑開始から 48.25 時間 (排水開始から 23.8 時間) 後。田面の 4 本のポールは土壌水分センサー PR1 用のアクセスチューブである。

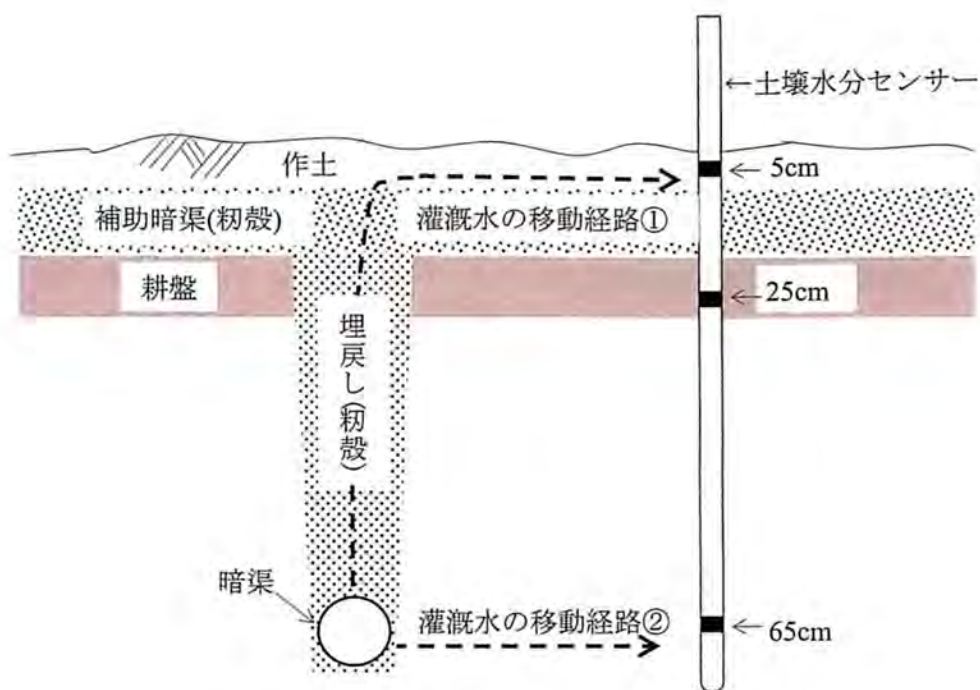


図 3-7 暗渠周辺の土壌構造と灌漑水の移動経路

移動経路①：暗渠の埋戻し部と補助暗渠の初殻を移動（メイン）。

移動経路②：暗渠の継ぎ目から漏出し、心土の微小亀裂を伝った移動（サブ）。

(4) 地下水位（秋期試験）

給水開始から 1 時間 25 分までは地下水位は上昇したが、その後一時低下した。給水パイプの目詰まりと陶管暗渠管からの拡散のため、一時的に地下水位が低下したのではないかと考える。給水開始から 24 時間後には湛水が 1cm ある状態になった。排水開始から約 24 時間後には給水を始める前の地下水位まで低下した。これより、灌漑も排水も 1 日で完了したと考えられる（図 3-8 参照）。

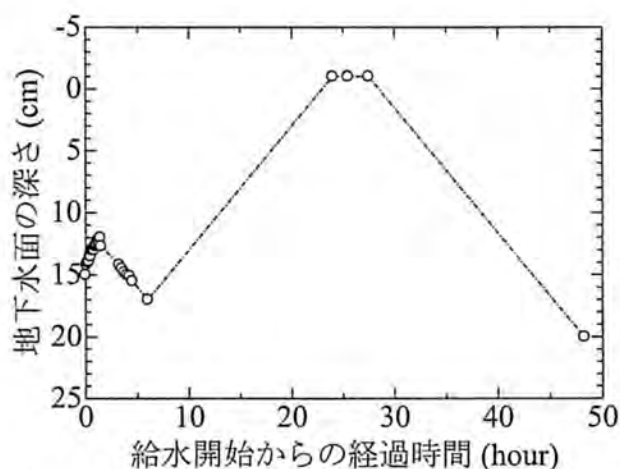


図 3-8 秋期の地下灌漑・排水試験における地下水位の経時変動

10 月 26 日の 10:30 を測定開始(0 時間)から 10 月 28 日 10:45 (43.75 時間) までの変動。

(5) 排水口水位（秋期試験）

排水口における水位標高は、地下排水開始直前に-80.5cmであった。給水開始から4.5時間後までは急激な水位上昇がみられた。上昇量は71.7cmで地表面基準とした水位標高は-8.8cm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を満水で移動した。つづいて、透水性の高い初殻部分を移動したと考える。

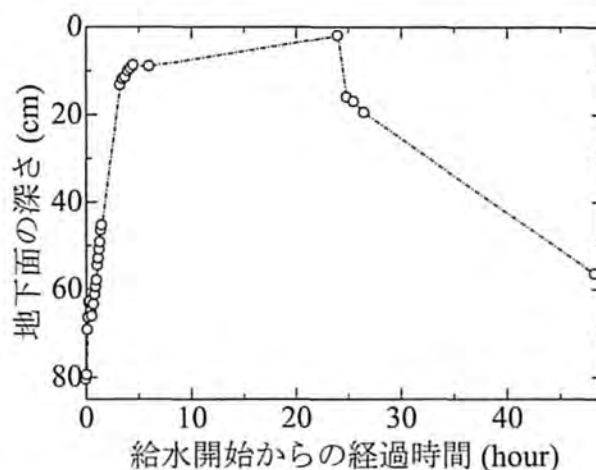


図 3-9 秋期の地下灌漑・排水試験における排水口の水位標高の経時変化
灌漑は 0 から 24 時間まで、排水は 24.25 時間から 43.75 時間まで行った。

排水開始から 20 分で排水口水位が 14cm 低下した。陶管暗渠を勢いよく水が流れることが分かった（図 3-9 参照）。図 3-10 と図 3-11 には排水直後と 5 分後の排水の色の違いを示した。排水開始から 5 分後には、浮遊物質の少ない澄んだ水が確認された。排出流量を定量化していないが、2 枚の図から陶管暗渠のフラッシング効果が示唆された。



図 3-10 排水直後の排水



図 3-11 排水開始から 5 分後の排水

(6) 暗渠管内の用水の流速

連結暗渠区における陶管暗渠の水口と水尻（排水樹の排出口）の高低差は 19cm である。図 3-9 に示すように、給水開始から 50 分で排水口の水位が 19.2cm 上昇した。したがって、給水から 50 分後に陶管暗渠は満水になったと考えられる。連結暗渠区の暗渠内径は 0.075m、総敷設長は 254m

である。よって、陶管暗渠の容積は 1.12m^3 である。

給水口に接続したサクションホースの断面積は、 $1.96 \times 10^{-3}\text{m}^2$ (∵ 内径 0.05m)。これより給水の暗渠管内の移動速度 V (=流速) はマンニングの式

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

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

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

で表す。ここに、 n : 暗渠管内の粗度係数 (=0.0133), 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。

50 分間で陶管暗渠を満水にさせ、かつ (3.1) 式と (3.2) 式を満たす値は、表 3-1 に示すとおりである。その際、陶管暗渠の粗度係数は継ぎ目を考慮して、0.0159 とした。

表 3-1 陶管暗渠管内の流速の算出

管内粗度 係数 n	中心角 (rad)	中心角 (degree)	管内水位 h (m)	通水断面積 A_w (m^2)	潤辺 S (m)	径 深 $R(=A_w/S)$ (m)	管内流速 V (m/s)
0.159	1.48	85.0	0.0342	1.96×10^{-3}	0.111	0.0177	0.190

第4章 暗渠周辺の土壌水移動についての数値解析

4-1 はじめに

水土の観測には適切な道具と手法が不可欠である。道具とはセンサーであり、手法とは道具の選択や配置についての計画である。これらが上手く機能してはじめて水土・環境の観測が成立する。水土を連続した系とみた場合、センサー配置の計画や観測値の検定のためには、数値シミュレーションが有効な手段である。ただし、この数値モデルはブラックボックスではなく何をどのように計算しているか簡単に確認できることが望ましい。

近年、表計算ソフトを用いた流体力学の数値シミュレーション研究が進んでいる（木村，1999；森下，2000；岩井ら，2005）。表計算ソフトを用いて基礎となる微分方程式を解くのである。このシミュレーションは、BASIC や FORTRAN または C などの計算言語上に差分法 FDM や有限要素法 FEM のプログラムを組むことを必要としない。このため、解析言語、およびプログラミングを習得する時間と労力を大幅に削減できる。また、表計算ソフトの 2 次元のセルを解析領域の格子点として用いることで要素分割の手間が省ける。こうして、これまで必要不可欠であったプログラミング作業を不要とした数値計算を可能とした。そして、それぞれのセルに差分化した基礎式や境界条件を代入すれば、電卓の延長として解を求められる。さらに、計算精度や繰り返し計算回数の設定、計算結果の図化などにも対応できる。

ここでは、測点の平面的密度やセンサーの埋設深度を規定するための一助として表計算ソフトを用いた土壌水流動モデルを開発した。支配方程式の数値解析解として得られる流線網は、浸透領域内のあらゆる点における圧力ポテンシャル、流れの向きと速度が予測可能であり、観測点の規定と観測値の予測に有効である。また、成層土壌条件は水分特性や透水係数のパラメータを変えることでシミュレートできる。ここでは、表計算ソフトの特徴を活かした土壌水流動の数値解析モデル（粟生田・登尾，2012）について概説する。

4-2 数値解析の方法

（1）支配方程式

表計算ソフトを用いて数値解析を行った。使用したソフトは、Microsoft Excel 2010 である。ここでは定常浸透流を数値解析した（吉田ら，1996；藤縄，2010）。浸透流についてポテンシャル h の支配方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots (4.1)$$

である。また、流れ関数 ψ の支配方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{k_y} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{k_x} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots (4.2)$$

で表される。ここに、 x, y : 水平（右向き正）および鉛直（上向き正）の座標軸である。なお、(4.2) 式は定常浸透流でのみ適応可能である。これらの支配方程式を差分化し、表計算ソフトのセルに入力した。差分式の詳述は割愛する。

次に、境界における支配方程式を示す。指定（ディリクレ）境界条件の流線、および自然（ノイマン）境界条件は図 4-1 に示した。ポテンシャル h と流れ関数 ψ に関する境界条件は、

A-B 上では、 $\psi=100\%$, $\partial h/\partial n = \partial h/\partial x = 0$

B-C 上では、 $\psi=0\%$, $\partial h/\partial n = \partial h/\partial x = 0$

C-D 上では、 $h=100\text{cm}$, $\partial\psi/\partial n = 0$

D-E-A 上では、 $\psi=100\%$, $\partial h/\partial n = \partial h/\partial x = 0$

B(暗渠)では、 $h=z$, ($p=0$)

で与えられる（粟生田，2012）ここに、 n は浸透領域境界における外向き法線、 z は位置水頭、 p は単位面積あたり水圧である。

（2）水分特性曲線と不飽和透水係数

数値モデル内部の水分特性曲線は、

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{\alpha}{\alpha + |p|^\beta} \quad \text{..... (4.3)}$$

で与えた(Haverkamp, et al., 1977)。また不飽和透水係数は、

$$k = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^m \quad \text{..... (4.4)}$$

で示した (Irmay, 1954)。ここに、 k_s ：飽和透水係数、 θ ：体積含水率、 θ_r ：残留体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率、 α , β , および m ：それぞれフィッティングパラメータである(表 4-1 参照)。

なお、 x 方向の透水係数 k_x は、2 節点における土壌水分の相加平均とした(ここで留意すべきは、 y 軸とセル番号 j の関係である。 y 軸は上向きが正であるが、表計算ソフトの性格上、縦のセル番号 j は下向きを正にせざるを得ない)。このように隣接するセルの土壌水分の相加平均で透水係数を規定するため、成層土壌条件でも数値解析できる。

表4-1 各土層の土壌パラメータ

	α	β	θ_s	θ_r	m
作土	1.2×10^{12}	7.7	0.46	0.06	3.0
耕盤	1.2×10^{12}	7.7	0.46	0.06	3.0
心土	1.2×10^{12}	7.7	0.46	0.06	3.0
初穀	1.13×10^3	2.4	0.46	0.06	3.0

作土、耕盤、心土は同じ土壌であるため、水分特性曲線のパラメータを共通とした。数値解析では、飽和透水係数 k_s のみを各層で場合分けした。

（3）数値解析モデルの基本構造

表計算ソフトには、2次元のセルがある。このセルを数値解析の節点、または要素として浸透流解析の領域を規定した。本研究の浸透モデルは鉛直 y 方向 95cm、水平 x 方向 250cm とした。なお、セルの数は簡単のため縦横それぞれ 26 とした (x, y それぞれの刻み幅は $\Delta x=10\text{cm}$, $\Delta y=3.8\text{cm}$)。

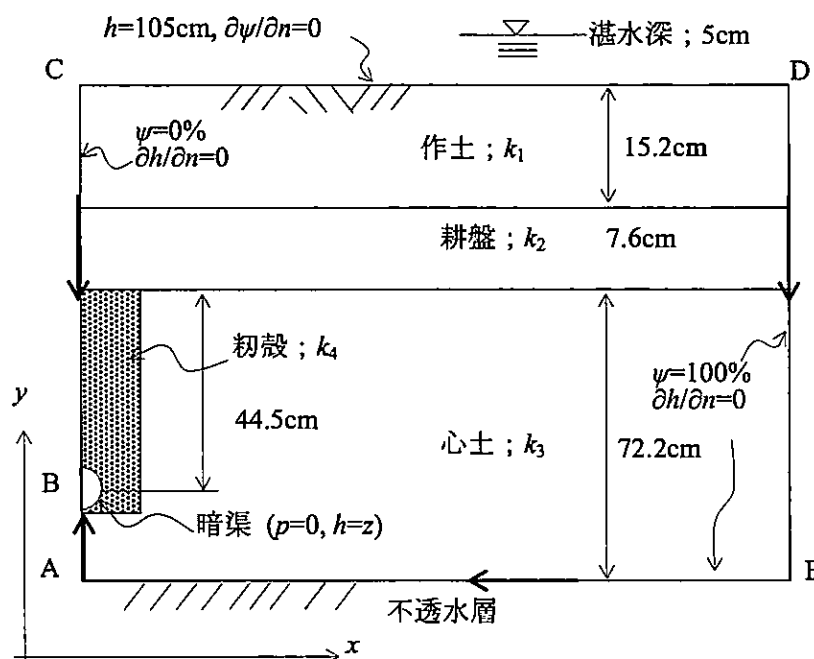


図 4-1 成層条件を考慮した暗渠周辺の境界条件

基準面は不透水層との境界（座標軸の原点は A 点）。 h ：ポテンシャル(cm)，（全水頭＝圧力水頭 $p/\rho g$ ＋位置水頭 z ）， p ：単位面積あたりの水圧 (cm)， ρ ：水の密度 (g/cm^3)， g ：重力加速度 ($=980\text{cm s}^{-2}$)， ψ ：流れ関数， k_i ($i=1\sim 4$)：透水係数，B：暗渠の位置， n ：浸透系外への外向き法線ベクトル，矢印：境界上の流線の向き，初めの飽和透水係数は $5.0\times 10^{-2}(\text{cm s}^{-1})$ 。

また、浸透モデルの土層構造、および境界条件を図 4-1 で示した。なお、各土層の水分特性や透水性のパラメータは、エクセルのソルバー機能でフィットさせ、解析領域内のセルにそれらを与えた。

表計算ソフトには、位置水頭、圧力水頭、土壌水分、不飽和透水係数、ポテンシャル、流れ関数を計算する 6 枚のシートを準備した。また、パラメータや境界条件変更時の参照エラーを避けるため、各シートには表示領域と解析領域を設けた。例えば、不飽和透水係数を計算するには、変数である土壌水分を土壌水分シートの表示領域の当該セルから参照した。さらに各シートにおける反復計算は、必要な精度に収束するまで、解析領域の数値をコピーし表示領域への貼り付けを繰り返した（コントロール-Y のショートカットキーを援用）。反復計算中は、全てのセルの計算値がモニター表示されるため、計算値の収束状況も追跡できる。図 4-2 に表計算浸透流モデルの構造概念図を示した。

なお、数値解析の精度は 15 桁以上であり、BASIC 言語の倍精度に相当し、特に解析精度に関する注意を要しない。このように本解析モデルは、シート間を往復しながら、計算精度を高める。煩雑な手作業を伴うが、計算途中のバグ処理をしやすくする利点を有する。また各シートの計算結果を 2 次元、3 次元のグラフで確認しながら計算精度を高める構造になっている。このようにこの表計算ソフトを用いた浸透流モデルは、数値解析そのものをブラックボックスにしないため

の工夫である。

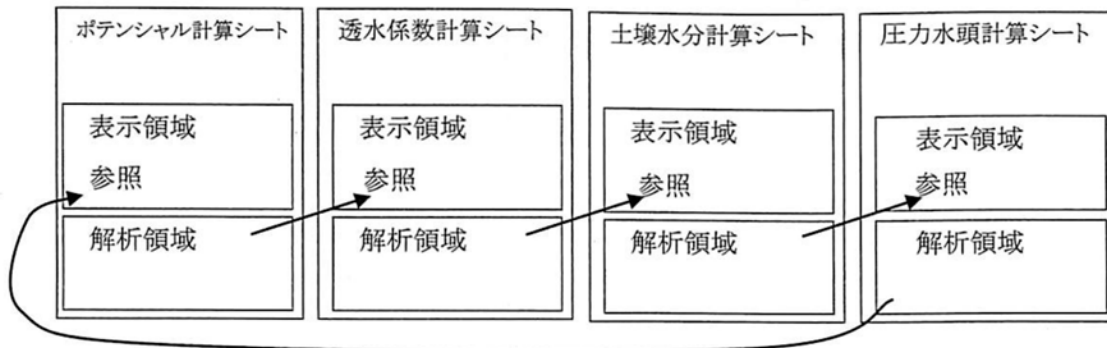


図 4-2 表計算浸透流モデルの構造概念

各計算シートの表示領域と解析領域。解析には変数となるシートの参照領域の当該のセル値を参照。

(4) 成層土を考慮した水田の浸透モデル

水田は、鉛直方向に上から作土、耕盤、心土とそれぞれ透水性の異なる土壌を有する。また、余剰水排除のため暗渠、および疎水材部（刎殻）を有することが一般的である。また、水田の浸透流は暗渠を中心に左右対称である。本モデルの浸透領域は、地表面から深さ 95cm、横 250cm とした。土層の厚さはそれぞれ、作土で 15.2cm、耕盤で 7.6cm、心土で 72.2cm、疎水材部が 64.6cm、暗渠埋設深さ 67.3cm（暗渠管の中心）、および暗渠内径 3.8cm とした。地表面には常時一定深さの湛水 5cm があるものと設定し、定常浸透を解析した。

4-2 数値解析の結果と考察

(1) 水田作土 $k_1 >$ 耕盤の透水係数 k_2 = 心土の透水係数 k_3 の場合

作土の透水係数 k_1 が他の 2 層より 10 倍大きい場合、流れ関数の解である流線は、湛水のある地

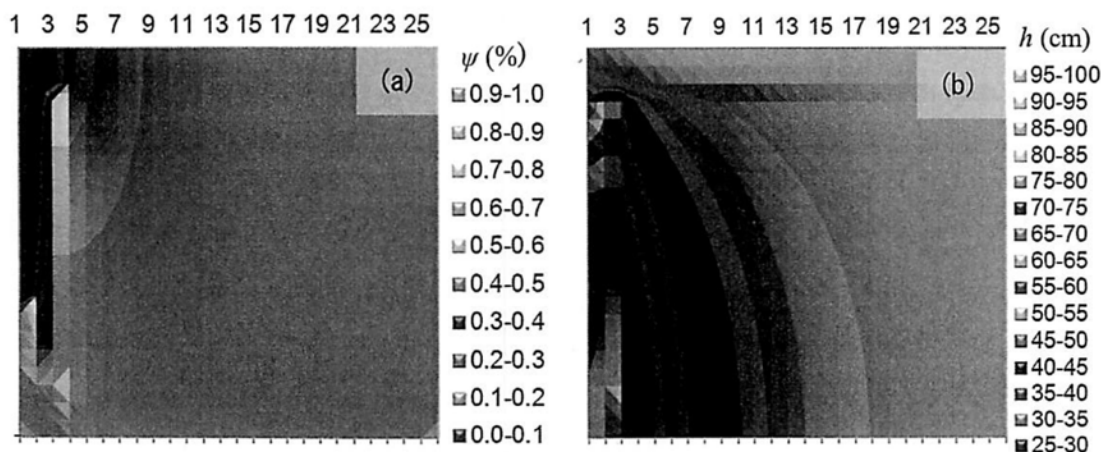


図 4-3 暗渠周辺の流線 (a) と等ポテンシャル線 (b) の鉛直分布

作土層の透水係数が大きい場合 $k_1=10^{-4}$ (cm s^{-1}), $k_2=10^{-5}$ (cm s^{-1}), $k_3=10^{-5}$ (cm s^{-1}) 浸透領域は幅 250cm、高さ 95cm。刻み幅は、 $\Delta x=10\text{cm}$, $\Delta y=3.8\text{cm}$ である。

表面から作土から耕盤、心土へと鉛直に降下し、あたかも均質な土層のように浸透した。疎水材部では、粗砂の排水性の高さにより流線が集中し、流線は鉛直に降下した。全ての流線は暗渠に向かった。流線の分布から、全暗渠排水量の約 90% が暗渠から片側 90cm の範囲からの排水であった。等ポテンシャル線は疎水材部付近で急激に減少した。集水面積は限定していることが示された(図 4-3 参照)。

(2) $k_1=k_2<k_3$ の場合

心土の透水係数 k_3 が耕盤の透水係数 k_2 より 10 倍大きくなると流線分布は全く異なり、心土の横浸透が卓越した。流線は作土層で鉛直に降下し、耕盤の上部境界で屈折した。また、 $\psi=90\%$ の流線は暗渠埋設線から約 2.3m の距離の田面から流入した。集水面積が大きいことが示された。等ポテンシャル線は、作土、耕盤、心土それぞれの境界で屈曲した。暗渠直下では、上向き浸透流を合理的に示した(図 4-4 参照)。

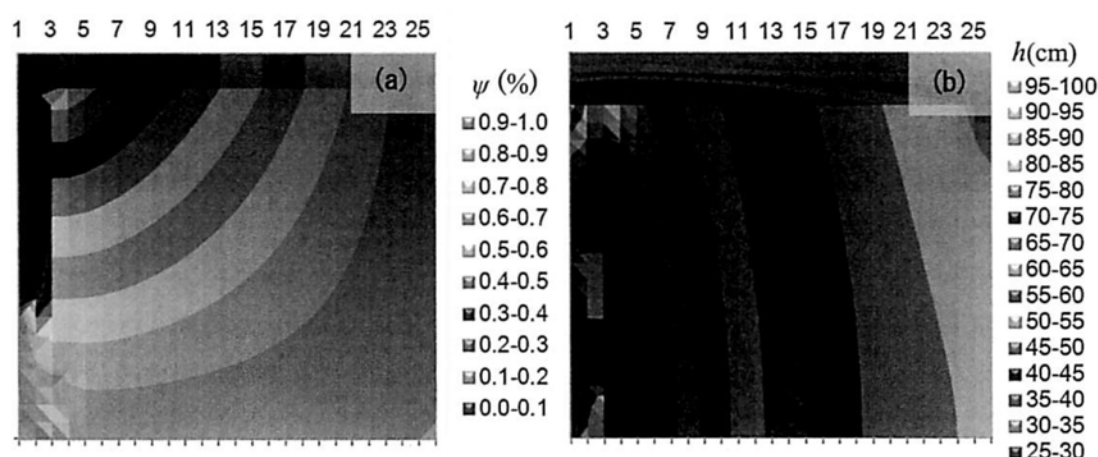


図 4-4 暗渠周辺の流線(a)と等ポテンシャル線(b)の鉛直分布

心土の透水係数が大きい場合 $k_1=10^{-5}(\text{cm s}^{-1})$, $k_2=10^{-5}(\text{cm s}^{-1})$, $k_3=10^{-4}(\text{cm s}^{-1})$ 浸透領域は幅 250cm, 高さ 95cm. 刻み幅は, $\Delta x=10\text{cm}$, $\Delta y=3.8\text{cm}$ である。

(3) 流線と等ポテンシャル線の分布

流線と等ポテンシャル線を重ね合わせると、流線網となる。この流線網は、流線と等ポテンシャル線で囲まれたマス目の縦横比は浸透領域のどこでも等しくなった。このように流線、および等ポテンシャル線分布は、層境界での流線の屈曲や流れの集中など合理的に示すことができた。既往の FEM 解析結果(吉田ら, 1996) とほぼ同等の分布を再現しており、精度的に遜色ないと判断できた。ただし、暗渠周辺部における流線曲率の急激な変化には刻み幅が大きいため対応しきれなかった。

4-3 数値解析のまとめ

表計算ソフトを用いることで、成層土壌などフィールドに近い条件でも浸透流解析を可能にした。同一の境界条件での FEM 解析結果とも遜色ない精度で解を求められた。今日、多くの大学でプログラミングを基礎教育から外している。表計算ソフトは多くの教育機関の情報処理演習の中で普及しており、この表計算ソフトを用いた浸透流解析モデルは、土壌水分や圧力水頭などの測定範囲の規定に役立つ。また、様々な境界条件に対応でき、初学者や現場技術者にも観測値予測

のツールとして利用できる。ただし、解析の理解を高めるための本モデル工夫は煩雑さと裏腹な関係にある。流れ関数、ポテンシャル、圧力水頭、土壌水分、透水係数、および位置水頭の各シートを行き来する必要があるためである。利用者の意見を聴きつつ改良が求められる。

第5章 総合考察と今後の課題

5-1 現地観測

今年度の耕作期間中の試験圃場（連結暗渠区）の土壤水分の鉛直水分分布は暗渠の排水効果が明確でなかった。湛水による作土層の膨潤のための透水性低下や降雨の影響であると考え。しかしながら、春期（4月）と秋期（10月）地下灌漑・地下排水試験では、ともに連結暗渠区の土壤水分管理効果が明らかとなった。これは、作土層の乾燥による亀裂の発達と補助暗渠・陶管暗渠埋め戻し部の連結による迅速な土壤水移動によるものと考え。

地下水位は間断灌漑による変動をとられることができた。土壤水分と地下水位の相関性は地表灌漑の情報不足のため必ずしも高くなかった。地耐力は、前日の降雨のため稲刈り前に若干低かったが、農業機械の走行性に問題はなかった。

刈り取り期の暗渠の解放による土壤水分、および地下水位の低下は少なかった。また、土壤の地耐力がほぼ十分であったこと、2012年の稲作収量が平年並みであった。以上から、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壤水田であっても、陶管暗渠による土壤水管理システムの十分に余剰な土壤水分の排除と地下水位制御の機能が発揮されたと考える。

陶管暗渠の排水効果により、水田の雑草種類に変化が生じた。図5-1は、陶管暗渠を施工した2011年以降に増えてきた雑草（ヤナギタデ、*Persicaria hydropiper*）である。この雑草は、タデ科の一年草である。水田雑草のひとつで、河原などにも生育するが、どちらかというと湿った場所を好む。もともと湿潤な水田に生育していたものが、適度に乾くようになって繁茂したものであろう。陶管暗渠の排水機能がこういった面からも検証されたと考える。



図 5-1 連結暗渠区で発生した雑草*と赤トンボ

*：ヤナギタデ（*Persicaria hydropiper*）

5-2 地下灌漑・排水

補助暗渠からの距離が作土の土壤水分変動に影響していた。土壤水分の鉛直分布の測定値から、灌漑水は暗渠の継ぎ目から漏出し、主に暗渠の埋戻し部と補助暗渠を伝うことがわかった。また、微量ながら心土の小亀裂を伝って拡散したと考える。土壤水分、地下水位の測定値から、重粘土の排水不良水田でも灌漑、排水ともに約1日で効果が発揮された。また、排水口の急激な水位上

昇から、給水された水は、まず最も移動しやすい暗渠管内を満水で移動した。つづいて暗渠管の隙間から浸出し、透水性の高い粗粒部分を移動した。排水された水の色からはフラッシングの効果も確認できた。これは給水口の立ち上がり管により、陶管暗渠内部が大気と連続するため、陶管暗渠内の水を押し出す効果があったと考える。

5-3 今後の課題

土壌水分センサーPR1の校正における相関係数は0.895であった。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困難を伴う。しかしながら、測定点数を増やすことで校正精度の向上ができよう。今後、土層、センサー毎に湿潤過程、乾燥過程それぞれの校正曲線を求めることが課題である。また、降雨と地下水位の相関は必ずしも高くなかった。供試圃場の雨量と地表面の灌漑を明確に把握することが求められる。

表計算ソフトを用いた数値解析では、暗渠周辺の土壌水移動やポテンシャル分布などを合理的に再現できた。暗渠の埋設深さやその間隔などの施工計画の一助となろう。今後、土壌水分パラメータの改善で、より現実に近い流線網を描くことが可能となろう。

このように陶管暗渠を水口から水尻まで連続させ、かつ補助暗渠を施工した連結暗渠区における土壌水制御機能が明らかとなった。透水性の低い粘性土壌水田における本研究の結果は、透水性の高い圃場には適応可能と考える。ただし、本研究は中区画（30a）の水田においてその効果を検証したものである。大区画の水田への適用、暗渠の敷設勾配やその間隔、延長、および暗渠の屈曲抵抗などは未解明な点が残された。また、地下カンガイによる地温制御、今後の研究進展が求められる。

付 記

本報告は、木村友紀（2013）：地下灌漑を可能とする陶管暗渠による土壌水管理システム，新潟大学農学部卒業論文を加筆修正したものである。

謝 辞

本研究は、有限会社小田製陶所，科研費（23580345），およびNPO 法人食農ネットささかみの助成を受けて行われた。また，JA さかみ営農課の田中政喜氏から営農水田を借用した。新潟大学農学部生産環境科学科の吉川夏樹先生から地下水位センサーおよびデータロガーを借用した。農業・食品産業技術総合研究機構 農業工学研究所の嶺田拓也氏より雨量計の使用と水田雑草の同定に協力頂いた。さらに，新発田地域振興局地域整備部には雨量のデータを提供いただいた。ここに記して深謝の意を表す。

引用文献

- 栗生田忠雄，登尾浩助（2012）：水土動態予測のための表計算ソフトウェアによるモデリング，水土の知，80 巻 9 号，pp.727-730.
- 栗生田忠雄（2012）：阿賀野市山寺地区における陶管暗渠を利用した土壌水管理システムの機能評価報告書，新潟大学農学部，48p.
- 栗生田忠雄，木村友紀，小田正雄（2012）：陶管暗渠による土壌水管理システムの開発，農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨，pp，122-123
- 栗生田忠雄，登尾浩助，稲生栄子（2012）：表計算ソフトを用いた浸透流解析の可能性，土壌水分ワークショップ 2012 講演要旨集，pp.12.1-12.3.
- 阿賀野市の位置・地勢 <http://www.city.agano.niigata.jp/gaiyou/ichi.html>（2012 年 12 月 28 日参照）
- 井本博美，鴨下顕彦，加藤洋一郎，常田岳志，宮崎 毅（2006）：Profile Probe による黒ボク土と立川ロームの土壌水分測定－室内キャリブレーションと現場測定－，土壌の物理性，104 号，pp.51-60.
- 岩井 裕，大村高弘，小林健一，富村寿夫，羽田光明，平澤茂樹，吉田英生（2005）：エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション，丸善，149p.
- 小田製陶所ホームページ <http://odakame.com/>（2012 年 1 月 17 日参照）
- 気象庁朝夕観測資料（佐渡） <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/genbo.php>（2013 年 5 月 31 日参照）.
- 木村欽一（1999）：エクセルで解く線形・非線形方程式の数値計算，177p.
- 国土交通省【川の防災情報】テレメータ雨量 大室(おおむろ) <http://www.river.go.jp/nrpc0304gDisp.do?mode=&officeCode=3841&obsrvtnPointCode=23&timeAxis=60>（2012 年 9 月 25 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.
- 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.27-38.
- 新潟県農地部（1995）：土地改良事業と土壌調査，新潟県農地部，122p.
- 新潟県農地部農地計画課（2009）：新潟県の水田整備状況（平成 21 年度），<http://www.pref.niigata.lg.jp/nochikeikaku/1356752697413.html>（2013 年 5 月 10 日参照）.
- 農業環境技術研究所（2009）土壌情報閲覧システム分類，http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/soil_db/howto.phtml（2012 年 4 月 11 日参照）.
- 農業土木学会古典復刻委員会編（1990）：農業土木古典選集 1 巻 草創期の土地改良，日本経済評

論社.

農林水産省構造改善局整備課（1983）：暗渠排水の設計と施工，畑地農業振興会，216p.

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，184p.

藤縄克之（2010）：環境地下水学，共立出版，pp.70-77.

森下悦生（2000）：Excelで学ぶ流体力学，丸善，186p.

吉田昭治，井村英樹，南健二（1996）：浸透流における流れ関数と流線網の有限要素解析，農業土木学会論文集，185号，pp.51-60.

Haverkamp, R., Vauclin, M., Touma, J., Wierenga, P.J. and Vachaud, G.(1977): A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, Soil Sci. Soc. Am. J, 41, pp.285-294.

Irmay, S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. Am. Geophys. Union, 35(3), pp.463-467.

補論 (Appendix)

-実験方法，測定値等-

A-1 土粒子の密度試験

A1-1 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
- ⑦洗淨びん
- ⑧蒸発皿
- ⑨減圧機
- ⑩金属製網ふるい：目開き 2mm
- ⑪脱塩水

A1-2 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。その際に粕殻等の混入物は誤差に直結するため、ピンセットで全て取り除く。
- ②試料は分離器具を用いて十分ほぐしておく。

A1-3 密度試験の方法

(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 $T'(°C)$ 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。



図 A-1 密度試験の様子

A1-4 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 をはかった時の温度 $T(°C)$ における質量 $m_a(g)$ に次式

$$m_a = \frac{\rho_w(T)}{\rho_w(T')} \cdot (m_a - m_f) + m_f \quad \dots\dots(A.1)$$

で変換する。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)、 $\rho_w(T')$ ：温度(T')における蒸留水の密度(g/cm³)、 $\rho_w(T)$ ：(T)における蒸留水の密度(g/cm³)である。

②土粒子の密度 ρ_s は次式で算定する。

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \cdot \rho_w(T) \quad \dots\dots(A.2)$$

で求める。ここに、 m_s ：炉乾燥試料の質量(g)、 m_b ：試料と温度 T (°C)の蒸留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 ρ_s (g/cm³)とする。

A-2 土壌の粒度試験

A2-1 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 0.995～1.050g/cm³ ごとに目盛線を付けたもの。
- ④電子天秤
- ⑤ビーカー：容量 500mL 以上のもの。
- ⑥温度計：最小目盛 0.5°C または 1°C のもの。
- ⑦メスシリンダー：容量 250mL および 1000cm³ のもの。
- ⑧ノギス：最小読取値が 0.05mm 以下のもの。
- ⑨ときほぐし器具：木づち、乳鉢および乳棒など。
- 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、洗浄びん

A2-2 粒度試験の試料準備

- 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 (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。

A2-3 粒度試験の方法 (2mm ふるい通過試料の沈降分析)

2mm ふるい通過試料の沈降分析を行う前に、あらかじめ土粒子の密度 ρ_s を求めておく。

(1) 浮ひょうの検定

- ① 浮ひょうを蒸留水の中に浮かべ、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 $C_m = (r_U - r_L)$ 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 (cm^3) を 1cm^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 (mm), 浮ひょう球部の上端から目盛線 1.000 までの長さ ℓ_1 (mm) および 1.050 までの長さ ℓ_2 (mm) を 0.1mm まで測定する。
- ④ メスシリンダー(容量 1000cm^3) の内径をはかり、断面積 A (cm^2) を 0.01cm^2 まで計算する。
ここで、今回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 (mm)	ℓ_2 (mm)	ℓ_B (mm)	V_B (cm^3)	C_m (mm)
4-16	104	16.5	134.4	34	0.0005
17.26	117.35	23.2	140	36	0.0005
17.8	114.1	20.9	137.5	36	0.0005
658	118.4	10.5	131.85	34	0.0005

A2-4 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_1 (%) を測定する。
- ③ 残りの試料を沈降分析用試料とし、質量 m_1 (g) をはかる。

A2-5 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、蒸留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。

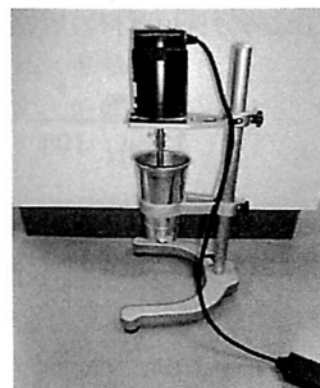


図 A-2 分散装置

A2-6 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 分散後の試料全量を 1000cm^3 のメスシリンダーに移し、 1000cm^3 になるまで蒸留水を加える。
- 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。

0.075～2mm ふるい残留試料のふるい分析

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。

①メスシリンダー内の試料を0.075mm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, 0.075mmふるいでふるい分けて各ふるいに残留した試料の質量 $m(d_i)(\text{g})$ を測定する。

A2-7 結果の整理（ふるい分析結果の計算）

(1) 2mm ふるい残留試料

①全試料の炉乾燥質量 $m_s(\text{g})$ を式

$$m_s = \frac{m}{1 + w/100} \quad \dots(\text{A.3})$$

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 $P(d_i)(\%)$ を式(A.2)

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

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) 0.075mm ふるい残留試料

①沈降分析用試料の炉乾燥質量 $m_{1s}(\text{g})$ を

$$m_{1s} = \frac{m_1}{1 + w_1/100} \quad \dots(\text{A.5})$$

で求める。ここに、 m_1 ：沈降分析用試料の質量(g)、 w_1 ：沈降分析用試料の含水比(%)である。

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

$$P(d_i) = \frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \left(1 - \frac{\sum m(d_i)}{m_{1s}} \right) \times 100 \quad \dots(\text{A.6})$$

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)である。

A2-8 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 $L(\text{mm})$ を

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_B - \frac{V_B}{A} \times 10 \right)$$

$$L_1 = l_1 - 20(r + C_m)(l_1 - l_2) \quad \dots (A.7)$$

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

②有効深さ $L(\text{mm})$ の懸濁液中の土粒子径 $d(\text{mm})$ は

$$d = \sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s - \rho_w)}} \cdot \frac{L}{t} \quad \dots (A.8)$$

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(Pa 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 ：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

$$P(d) = \frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} (r + C_m + F) \rho_w \times 100 \quad \dots (A.9)$$

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

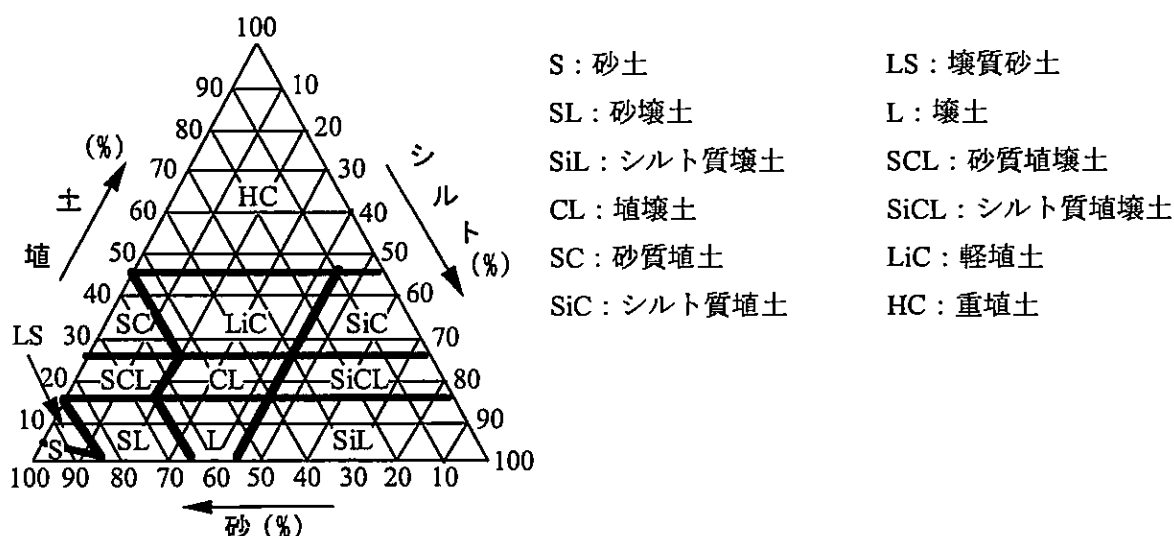


図 A-3 国際土壌学会の土性分類(三角座標)

土の粒度試験 (2mmふるい通過分分析)

調査件名 0cm 試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.53
含水比	容器No.			塑性指数 I_p	
	m_a g	40.8	36.6	41.9	分散装置の容器No.
	m_b g	40.3	36.3	41.4	メスシリンダーNo. (直径 Φ cm)
	m_c g	27.7	28.1	29.4	浮ひようNo.
	ω_1 %	4.0	3.7	4.2	メニスカス補正值 C_m
	平均値 ω_1 %		3.9		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					81.9
容器(No.)質量 g					29.0
沈降分析用質量 m_1 g					52.9
沈降分析用試料の 炉乾燥質量 $m_{1s} = \frac{m_1}{1 + \frac{\omega_1}{100}}$ g					50.9
				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 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$	1.000
				$M = \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \times 100$	3249

沈降分析

①		②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
測定時刻	経過時間 t min	浮ひようの読み		測定時の水温 ℃	有効深さ L mm	$\sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s-\rho_w)}}$ $⑥ \times \sqrt{\frac{L}{t}}$ mm	粒径 d mm	補正係数 F	加積通過率 P M × (③+F) %	通過質量百分率 P(d) % $\frac{m_i - m_{e,i}}{m_i} \times P$
		少数部分 r	r' r+C _m							
	1	0.0235	0.0240	11.7	124.11	0.0050	0.05535	-0.0005	76.3	76.3
	2	0.0225	0.0230	11.6	125.86	0.0050	0.03941	-0.0005	73.1	73.1
	5	0.0205	0.0210	11.7	129.36	0.0050	0.02527	-0.0005	66.6	66.6
	15	0.0165	0.0170	12	136.36	0.0050	0.01498	-0.0005	53.6	53.6
	30	0.0135	0.0140	13.1	141.61	0.0049	0.01064	0	45.5	45.5
	60	0.0115	0.0120	14.4	145.11	0.0048	0.00751	0	39.0	39.0
	240	0.0075	0.0080	14.5	152.11	0.0048	0.00385	0	26.0	26.0
	1440	0.0055	0.0060	12	155.61	0.0050	0.00163	-0.0005	17.9	17.9

ふるい分析 (沈降分析を行う場合)

ふるい μm	容器No.	(残留試料+容器)質量 g	容器質量 g	残留試料質量 m(d) g	加積残留 試料質量 g Σ m(d)	加積残留率 % $\frac{\sum m(d)}{m_{1s}} \times 100$	加積通過率 P $\left(1 - \frac{\sum m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$ %	通過質量百分率 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$ %
850		330.84	329.79	1.05	1.05	2.1	97.9	
425		332.33	329.79	2.54	3.59	7.1	92.9	
250		332.03	329.79	2.24	5.83	11.5	88.5	
106		332.91	329.79	3.12	8.95	17.6	82.4	
75		330.49	329.79	0.7	9.65	19.0	81.0	

メスシリンダー断面積(cm ²)	A	33.42						
水の粘性係数(Pa・s)	η 11°	0.00127	12°C	0.001235	13°C	0	14°C	0.001169
	30η	0.0381		0.03705		0		0.03507
	gn(ρ s-	1500.93		1500.93		###		1501.911
蒸留水の密度(g/cm ³)	ρ w 11°	1	12°C	1	13°C	1	14°C	0.999
重力加速度(cm/s ²)	gn	981						
	l1	104						
	l2	16.5						
	LB	134.4						
	VB	34						

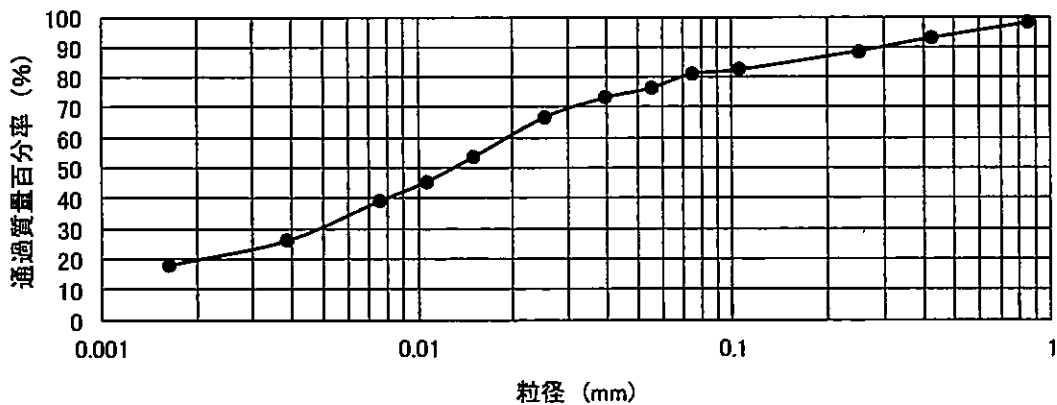
土の粒度試験（粒径加積曲線）

試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

試料番号 (深さ)	0						
	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %		
ふるい分析	75		75		中礫分 %		
	53		53		細礫分 %		
	37.5		37.5		粗砂分 %		
	26.5		26.5		中砂分 %	9.4	
	19		19		細砂分 %	7.5	
	9.5		9.5		シルト分 %	42.1	
	4.75		4.75		粘土分 %	39.0	
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %		
	0.85	97.9			425μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.425	92.9			75μ mふるい通過質量百分率 %		
	0.25	88.5			最大粒径 mm		
	0.106	82.4			60%粒径 D_{60} mm		
沈降分析	0.075	81.0			50%粒径 D_{50} mm		
	0.05535	76.3			30%粒径 D_{30} mm		
	0.03941	73.1			10%粒径 D_{10} mm		
	0.02527	66.6			均等係数 U_c		
	0.01498	53.6			曲率係数 U'_c		
	0.01064	45.5			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.530	
	0.00751	39.0			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム	
	0.00385	26.0			溶液濃度、溶液添加量	5%, 10ml	
	0.00163	17.9					

粒径加積曲線



特記事項 LiC:軽埴土

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 2012年12月10日

試験者 木村友紀

2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.59
含水比	容器No.			塑性指数 I_p	
	m_a g	32.3	32.5	33.4	分散装置の容器No.
	m_b g	32	32.3	33.2	メスシリンダーNo. (直径 ϕ cm)
	m_c g	26.9	27.2	27.9	浮ひようNo.
	ω_1 %	5.9	3.9	3.8	メニスカス補正值 C_m
平均値 ω_1 %				4.5	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				80.0	
容器(No.)質量 g				29.0	全試料の炉乾燥質量に対する2mm $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$
沈降分析用質量 m_l g				51.0	ふるい通過試料の炉乾燥質量の比 m_s
沈降分析用試料の炉乾燥質量 $m_{ls} = \frac{m_l}{1 + \frac{\omega_1}{100}}$ g				48.8	$M = \frac{V}{m_{ls}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \times 100$
					3339

沈降分析

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
測定時刻	経過時間 t min	浮ひようの読み 少数部分 r	測定時の水温 $^{\circ}\text{C}$	有効深さ L mm	$\sqrt{\frac{30\eta}{g_s(\rho_s - \rho_w)}}$	粒径 d mm $\textcircled{6} \times \sqrt{\frac{L}{t}}$	補正係数 F	加積通過率 P % $M \times (\textcircled{3} + F)$	通過質量百分率 $P(d)$ % $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
	1	0.0265	0.0270	11.8	130.95	0.0049	0.05577	0	90.1
	2	0.0255	0.0260	11.9	132.83	0.0049	0.03972	-0.0005	85.1
	5	0.0235	0.0240	11.8	136.59	0.0049	0.02547	-0.0005	78.5
	15	0.0195	0.0200	12.3	144.13	0.0049	0.01511	-0.0005	65.1
	30	0.0175	0.0180	13.1	147.89	0.0048	0.01067	0	60.1
	60	0.0165	0.0170	14.1	149.78	0.0047	0.00749	0	56.8
	240	0.0135	0.0140	14.3	155.42	0.0047	0.00381	0	46.7
	1440	0.0110	0.0115	11.8	160.13	0.0049	0.00163	-0.0005	36.7

ふるい分析 (沈降分析を行う場合)

ふるい μm	容器No.	(残留試料+容器)質量 g	容器質量 g	残留試料質量 $m(d)$ g	加積残留試料質量 $\Sigma m(d)$ g	加積残留率 % $\frac{\Sigma m(d)}{m_{ls}} \times 100$	加積通過率 P % $\left(1 - \frac{\Sigma m(d)}{m_{ls}}\right) \times 100$	通過質量百分率 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$ %
850		30.29	29.5	0.79	0.79	1.6	98.4	
425		28.17	27.2	0.97	1.76	3.6	96.4	
250		31.15	29.88	1.27	3.03	6.2	93.8	
106		30.7	28.07	2.63	5.66	11.6	88.4	
75		28.34	27.86	0.48	6.14	12.6	87.4	

メスシリンダー断面積(cm ²)	A	32.35					
水の粘性係数(Pa・s)	η 12 $^{\circ}\text{C}$	0.001235	13 $^{\circ}\text{C}$	0.001201	14 $^{\circ}\text{C}$	0.001169	
	30 η	0.03705		0.03603		0.03507	
	$gn(\rho_s - \rho_w)$	1559.79		1560.771		1560.771	
蒸留水の密度(g/cm ³)	ρ_w 12 $^{\circ}\text{C}$	1	13 $^{\circ}\text{C}$	0.999	14 $^{\circ}\text{C}$	0.999	
重力加速度(cm/s ²)	gn	981					
	l_1	117.35					
	l_2	23.2					
	LB	140					
	VB	36					

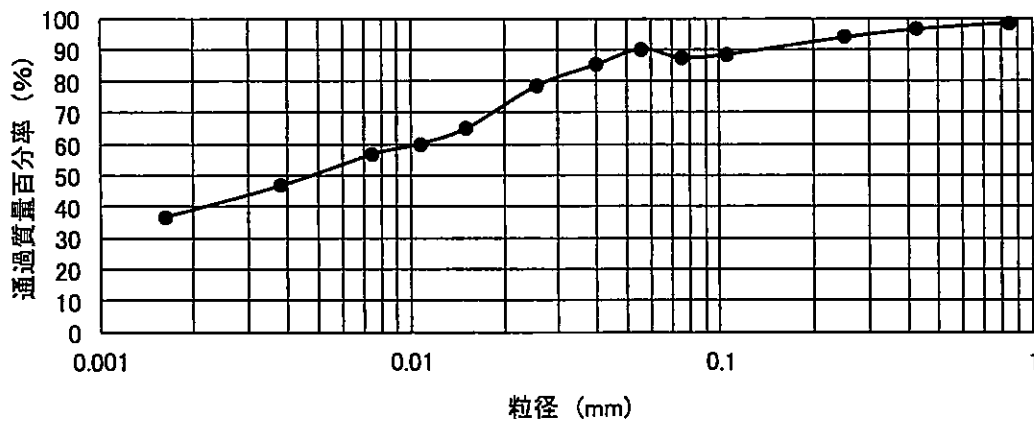
土の粒度試験（粒度加積曲線）

試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

試料番号 (深さ)	##					
	10					
	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %	
ふるい分析	75		75		中礫分 %	
	53		53		細礫分 %	
	37.5		37.5		粗砂分 %	
	26.5		26.5		中砂分 %	4.6
	19		19		細砂分 %	6.4
	9.5		9.5		シルト分 %	30.7
	4.75		4.75		粘土分 %	56.8
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %	
	0.85	98.4	0.85		425μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.425	96.4	0.425		75μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.25	93.8	0.25		最大粒径 mm	
	0.106	88.4	0.106		60%粒径 D_{60} mm	0.013
	0.075	87.4	0.075		50%粒径 D_{50} mm	0.008
	0.05577	90.1			30%粒径 D_{30} mm	0.002
沈降分析	0.03972	85.1			10%粒径 D_{10} mm	
	0.02547	78.5			均等係数 U_c	
	0.01511	65.1			曲率係数 U'_c	
	0.01067	60.1			土粒子の密度 ρ , g/cm ³	2.590
	0.00749	56.8			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム
	0.00381	46.7			溶液濃度、溶液添加量	5%、10ml
	0.00163	36.7				

粒度加積曲線



特記事項

HC:重埴土

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、粒度加積曲線の0.074mm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 25cm

試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

含水比	2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.55
	容器No.				塑性指数 I_p	
	m_a g	33.7	34.2	33.1	分散装置の容器No.	
	m_b g	33.5	34	32.9	メスシリンダーNo. (直径 ϕ cm)	6.535
	m_c g	29.3	29.1	28	浮ひょうNo.	17.8
	ω_1 %	4.8	4.1	4.1	メニスカス補正值 C_m	0.0005
	平均値 ω_1 %			4.3	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			80.6			
容器(No.)質量 g			29.0	全試料の炉乾燥質量に対する2mm $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$		
沈降分析用質量 m_1 g			51.6	ふるい通過試料の炉乾燥質量の比 m_s		
沈降分析用試料の $m_{1s} = \frac{m_1}{1 + \frac{\omega_1}{100}}$ g			49.5	$M = \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \times 100$		
炉乾燥質量				3326		

沉降分析

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
測定時刻	経過時間 t min	浮ひようの読み 少数部分 r	測定時 の水温 °C	有効深さ L mm	$\sqrt{\frac{30\eta}{g_s(\rho_s - \rho_w)}}$	粒径 d ⑥ × $\sqrt{\frac{L}{t}}$ mm	補正係数 F	加積通過率 P M × (③ + F) %	通過質量百分率 P(d) % $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
	1	0.0235	0.0240	11.7	132.74	0.0049	0.05687	-0.0005	78.2
	2	0.0215	0.0220	11.7	136.47	0.0049	0.04078	-0.0005	71.5
	5	0.0195	0.0200	11.8	140.2	0.0049	0.02614	-0.0005	64.9
	15	0.0160	0.0165	12.1	146.72	0.0049	0.01544	-0.0005	53.2
	30	0.0145	0.0150	12.6	149.52	0.0049	0.01086	0	49.9
	60	0.0120	0.0125	13.3	154.18	0.0049	0.00780	0	41.6
	240	0.0085	0.0090	14	160.7	0.0048	0.00393	0	29.9
	1440	0.0065	0.0070	11.6	164.43	0.0049	0.00167	-0.0005	21.6

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 m(d)	加積残留 試料質量 g Σ m(d)	加積残留率 % $\frac{\sum m(d)}{m_{1s}} \times 100$	加積通過率 P $\left(1 - \frac{\sum m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$ %	通過質量百分率 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$ %
μ m		g	g	g	Σ m(d)			
850		330.5	329.77	0.73	0.73	1.5	98.5	
425		331.4	329.77	1.63	2.36	4.8	95.2	
250		331.52	329.77	1.75	4.11	8.3	91.7	
106		333.15	329.77	3.38	7.49	15.1	84.9	
75		330.99	329.77	1.22	8.71	17.6	82.4	

メスシリンダー断面積(cm ²)	A	33.52		
水の粘性係数(Pa・s)	η	12℃ 0.0012	13℃ 0	14℃ 0.001169
	30η	0.0371	0.04	0.03507
	gn(ρ s-c	1520.6	1522	1521.531
蒸留水の密度(g/cm ³)	ρ v 12℃	1	13℃ 1	14℃ 0.999
重力加速度(cm/s ²)	gn	981		
	l1	114.1		
	l2	20.9		
	LB	137.5		
	VB	36		

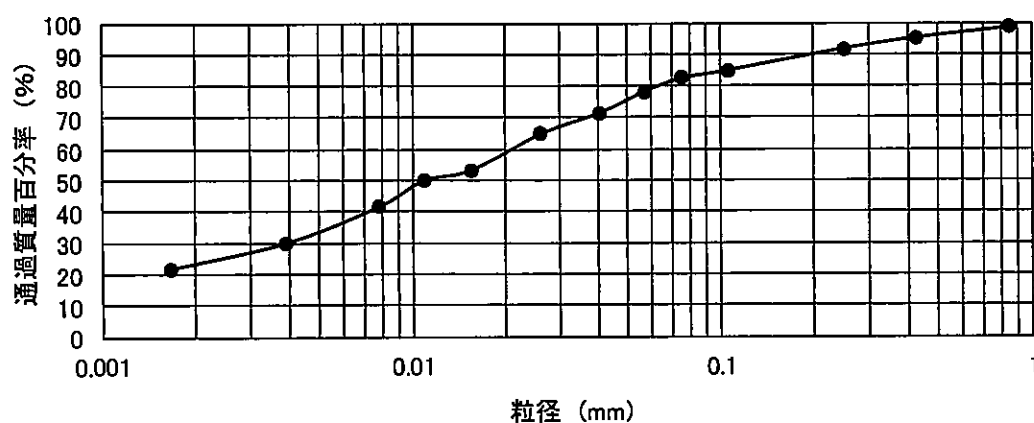
土の粒度試験（粒度加積曲線）

試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

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 %
	19		19		細砂分 %
	9.5		9.5		シルト分 %
	4.75		4.75		粘土分 %
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %
	0.85	98.5	0.85		425 μ mふるい通過質量百分率 %
	0.425	95.2	0.425		75 μ mふるい通過質量百分率 %
	0.25	91.7	0.25		最大粒径 mm
	0.106	84.9	0.106		60%粒径 D_{60} mm
	0.075	82.4	0.075		50%粒径 D_{50} mm
沈降分析	0.05687	78.2			30%粒径 D_{30} mm
	0.04078	71.5			10%粒径 D_{10} mm
	0.02614	64.9			均等係数 U_c
	0.01544	53.2			曲率係数 U_c
	0.01066	49.9			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³
	0.00780	41.6			2.550
	0.00393	29.9			使用した分散剤
	0.00167	21.6			ヘキサメタリン酸ナトリウム
					溶液濃度、溶液添加量

粒度加積曲線



特記事項 LiC:軽埴土

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 2012年12月10日

試験者 木村友紀

2mmふるい通過試料				土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.65
容器No.				塑性指数 I_p	
m_a g	38.9	38.6	39.2	分散装置の容器No.	
m_b g	38.6	38.3	38.8	メスシリンダーNo. (直径 ϕ cm)	6.530
m_c g	29	29.7	28.8	浮ひようNo.	658
ω_1 %	3.1	3.5	4.0	メニスカス補正值 C_m	0.0005
平均値 ω_1 %			3.5	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			79.7		
容器(No.)質量 g			29.0	全試料の炉乾燥質量に対する2mm $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s}$	
沈降分析用質量 m_1 g			50.7	ふるい通過試料の炉乾燥質量の比 m_s	
沈降分析用試料の炉乾燥質量 $m_{1s} = \frac{m_1}{1 + \frac{\omega_1}{100}}$ g			49.0	$M = \frac{V}{m_{1s}} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \times 100$	
				3280	

沈降分析

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
測定時刻	経過時間 t min	浮ひようの読み		測定時 の水溫 ℃	有効深さ L mm	$\sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s-\rho_w)}}$ $\textcircled{6} \times \sqrt{\frac{L}{t}}$ mm	粒径 d $\textcircled{6} \times \sqrt{\frac{L}{t}}$ mm	補正係数 F	加積通過率 P M × (③+F) %	通過質量百分率 P(d) % $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$
		少数部分 r	r' r+C _m							
	1	0.0255	0.0260	12	123.14	0.0048	0.05309	-0.0005	83.6	
	2	0.0245	0.0250	12	125.3	0.0048	0.03787	-0.0005	80.4	
	5	0.0230	0.0235	12	128.53	0.0048	0.02426	-0.0005	75.4	
	15	0.0205	0.0210	12.4	133.93	0.0048	0.01430	-0.0005	67.2	
	30	0.0185	0.0190	13	138.24	0.0047	0.01012	0	62.3	
	60	0.0170	0.0175	13.5	141.48	0.0048	0.00735	0	57.4	
	240	0.0135	0.0140	14	149.03	0.0047	0.00367	0	45.9	
	1440	0.0115	0.0120	11.7	153.35	0.0048	0.00156	-0.0005	37.7	

ふるい分析 (沈降分析を行う場合)

ふるい μm	容器No.	(残留試料+容器)質量 g	容器質量 g	残留試料質量 m(d) g	加積残留 試料質量 g $\Sigma m(d)$	加積残留率 % $\frac{\Sigma m(d)}{m_{1s}} \times 100$	加積通過率 P $\left(1 - \frac{\Sigma m(d)}{m_{1s}}\right) \times 100$ %	通過質量百分率 $\frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times P$ %
850		28.34	28.08	0.26	0.26	0.5	99.5	
425		27.63	27.21	0.42	0.68	1.4	98.6	
250		30.79	29.52	1.27	1.95	4.0	96.0	
106		31.46	27.86	3.6	5.55	11.3	88.7	
75		30.65	29.86	0.79	6.34	12.9	87.1	

メスシリンダー断面積(cm²) A

33.473

水の粘性係数(Pa・s)

η 12°C

0.001235

13°C

0.001201

14°C

0.001169

30 η

0.03705

0.03603

0.03507

gn($\rho_s - \rho_w$)

1618.65

1619.631

1619.631

蒸留水の密度(g/cm³)

ρ_w 12°C

1

13°C

0.999

14°C

0.999

重力加速度(cm/s²)

gn

981

l1

118.4

l2

10.5

LB

131.85

VB

34

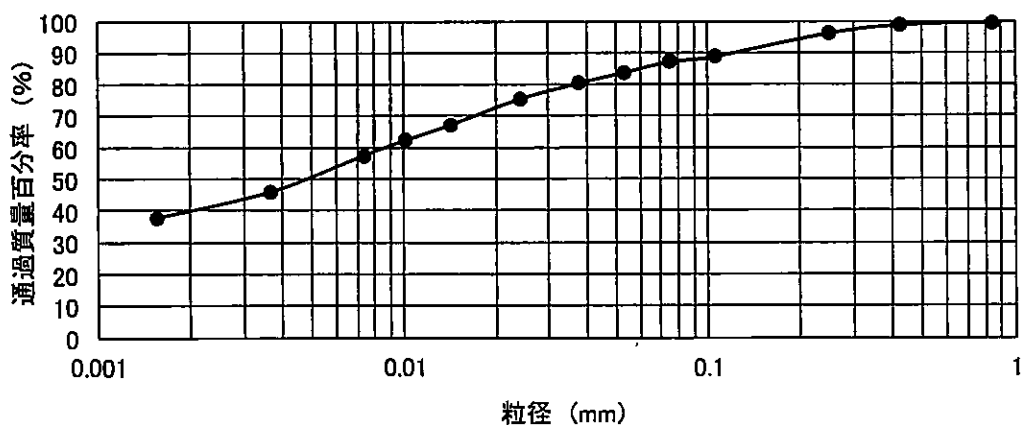
土の粒度試験 (粒径加積曲線)

試験年月日 2012年12月10日

試験者 木村友紀

試料番号 (深さ)	##					
	75					
	粒径mm	通過質量百分率%	粒径mm	通過質量百分率%	粗礫分 %	
ふるい分析	75		75		中礫分 %	
	53		53		細礫分 %	
	37.5		37.5		粗砂分 %	
	26.5		26.5		中砂分 %	3.5
	19		19		細砂分 %	9.0
	9.5		9.5		シルト分 %	29.7
	4.75		4.75		粘土分 %	57.4
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %	
	0.85	99.5			425 μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.425	98.6			75 μ mふるい通過質量百分率 %	
	0.25	96.0			最大粒径 mm	
	0.106	88.7			60%粒径 D_{60} mm	0.003
	0.075	87.1			50%粒径 D_{50} mm	0.0018
沈降分析	0.05309	83.6			30%粒径 D_{30} mm	
	0.03787	80.4			10%粒径 D_{10} mm	
	0.02426	75.4			均等係数 U_c	
	0.01430	67.2			曲率係数 U'_c	
	0.01012	62.3			土粒子の密度 ρ_s , g/cm ³	2.650
	0.00735	57.4			使用した分散剤	ヘキサメタリン酸ナトリウム
	0.00367	45.9			溶液濃度、溶液添加量	5%、10ml
	0.00156	37.7				

粒徑加積曲線



特記事項 HC:重埧土

A-3 土壌水分センサーの校正試験

校正試験で用いた含水比，体積含水率，電圧の測定値を示した。

含水比	体積含水率	電圧(mV)
10.6	0.099852	165
11.7	0.110214	165
10.8	0.101736	165
32.1	0.302382	194
30.9	0.291078	194
33.3	0.313686	194
35.5	0.33441	264
34.7	0.326874	264
33.3	0.313686	264
37.9	0.357018	333
37.7	0.355134	333
38.5	0.36267	333
47.54	0.4478268	359
52.94	0.4986948	387
53.45	0.503499	387
51.92	0.4890864	387

A-4 土壌水分測定

3枚の供試圃場の測点a，測点b，および測点cにおいて，水分センサーPR1を用いて測定した土壌水分の鉛直分布（電圧表示）を示した。

連結暗渠区（上圃場）

上圃場		a測点													
		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日	
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	
-22	36	36	33	34	37	32	33	35	35	39	41	41	33		
-12	375	354	324	40	40	54	32	40	40	39	40	40	42		
-2	454	449	438	433	434	432	295	295	246	267	264	223	260		
8	462	461	455	452	472	448	403	366	327	369	346	303	438		
28	453	454	441	443	482	451	448	450	447	457	462	464	447		
68	474	474	428	434	533	483	488	466	449	525	509	503	443		

		b測点													
		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日	
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	
-22	35	37	31	34	37	34	33	34	39	39	43	41	37		
-12	93	60	54	37	38	38	27	37	38	37	38	37	44		
-2	440	439	436	423	516	437	353	282	244	277	289	284	310		
8	458	456	450	442	604	455	448	409	360	357	365	316	426		
28	425	429	418	421	546	463	433	433	428	425	417	398	390		
68	487	487	439	417	583	470	493	507	452	531	542	523	462		

		c測点													
		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日	
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	
-22	36	37	33	34	36	33	34	35	36	39	39	39	41	35	
-12	400	376	356	42	38	86	34	39	43	40	37	38	39		
-2	452	451	452	438	439	438	300	294	261	274	256	269	292		
8	447	454	449	442	454	441	421	411	381	387	375	396	428		
28	451	452	443	443	450	445	444	444	443	425	447	445	419		
68	452	503	432	439	512	437	441	443	440	521	511	519	456		

従来暗渠区（中圃場）

中圃場 a測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		40	36	32	34	37	36	34	35	36	38	39	39	36
-12		358	352	43	37	34	44	41	38	40	36	35	35	40
-2		452	453	412	381	441	440	303	409	300	375	382	366	333
8		461	460	450	450	460	444	422	439	402	440	435	447	445
28		442	451	433	441	489	442	445	447	443	458	451	461	451
68		490	447	401	445	524	464	440	455	462	508	512	501	439

b測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		36	35	33	34	36	34	33	35	36	37	37	38	37
-12		286	148	29	39	37	40	40	41	39	37	38	38	45
-2		449	440	419	423	437	442	377	416	313	411	393	435	413
8		463	453	449	451	455	456	454	443	399	455	440	458	453
28		437	438	428	428	445	437	441	439	439	452	452	450	442
68		461	436	408	413	450	420	420	418	435	472	473	479	424

c測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		37	36	32	33	36	35	33	34	35	37	37	38	36
-12		427	410	37	48	48	223	40	44	41	37	38	42	44
-2		454	451	402	416	441	452	305	438	203	324	423	308	446
8		462	454	452	453	454	451	434	450	301	441	447	453	449
28		440	448	442	439	452	443	445	443	439	452	456	455	439
68		441	426	432	392	454	398	402	401	410	458	450	442	416

対照区（下圃場）

下圃場 a測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		36	34	35	38	34	35	35	35	36	37	37	38	35
-12		472	214	377	394	408	159	178	40	59	79	76	83	
-2		482	467	454	445	442	396	447	300	251	335	272	440	
8		441	454	435	434	432	420	426	402	401	423	426	421	
28		468	426	440	454	446	447	432	443	370	377	366	363	
68		417	425	401	462	409	407	396	462	468	463	466	416	

b測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		35	33	35	36	33	34	33	34	37	38	38	38	35
-12		54	173	38	38	39	37	38	38	35	36	36	36	39
-2		451	448	440	436	438	241	345	157	225	353	323	425	
8		442	438	437	437	429	390	434	284	383	411	432	426	
28		452	443	444	456	439	450	433	408	416	410	414	402	
68		414	418	424	446	406	407	405	395	451	457	453	415	

c測点		6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
cm	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
-22		36	35	37	34	36	33	33	34	34	38	38	38	38
-12		266	59	465	45	38	40	37	37	38	35	34	35	39
-2		453	450	453	459	452	456	198	188	74	95	99	90	413
8		452	453	429	455	451	448	364	387	252	311	369	403	445
28		447	446	442	418	409	411	382	384	378	418	454	456	440
68		476	481	407	425	487	431	427	429	429	464	486	469	453

校正後の土壌水分値（体積含水率）を下記に示した。

連結暗渠区（上圃場） a 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.531144	0.530363	0.525643	0.52326	0.53886	0.520057	0.481917	0.447219	0.406623	0.45016	0.426972	0.379158	0.511923
28	0.524056	0.52485	0.514383	0.516013	0.546413	0.522462	0.520057	0.521662	0.519252	0.527223	0.531144	0.5327	0.519252
68	0.540383	0.540383	0.503602	0.508618	0.582651	0.54716	0.550871	0.53425	0.52086	0.577202	0.566051	0.561779	0.516013

連結暗渠区（上圃場） b 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.528011	0.526434	0.521662	0.515199	0.627708	0.525643	0.520057	0.487242	0.441263	0.438248	0.446233	0.394294	0.501914
28	0.501068	0.504443	0.495084	0.497661	0.591334	0.531923	0.507787	0.507787	0.503602	0.501068	0.494221	0.477419	0.470103
68	0.550132	0.550132	0.512745	0.494221	0.614958	0.53733	0.554543	0.564633	0.52326	0.581297	0.588684	0.575827	0.531144

連結暗渠区（上圃場） c 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.519252	0.52485	0.52086	0.515199	0.52485	0.514383	0.497661	0.488999	0.461691	0.46732	0.455971	0.475604	0.503602
28	0.522462	0.52326	0.516013	0.516013	0.521662	0.517636	0.516826	0.516826	0.516013	0.501068	0.519252	0.517636	0.495945
68	0.52326	0.561779	0.506954	0.512745	0.568168	0.5111	0.514383	0.516013	0.513565	0.574447	0.567464	0.573061	0.526434

従来暗渠区（中圃場） a 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.530363	0.529581	0.521662	0.521662	0.529581	0.516826	0.498515	0.512745	0.481022	0.513565	0.509447	0.519252	0.517636
28	0.515199	0.522462	0.507787	0.514383	0.551608	0.515199	0.517636	0.519252	0.516013	0.528011	0.522462	0.530363	0.522462
68	0.552344	0.519252	0.480124	0.517636	0.576515	0.5327	0.513565	0.525643	0.531144	0.565342	0.568168	0.560343	0.512745

従来暗渠区（中圃場） b 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.531923	0.524056	0.52086	0.522462	0.525643	0.526434	0.52485	0.516013	0.478323	0.525643	0.513565	0.528011	0.524056
28	0.5111	0.511923	0.503602	0.503602	0.517636	0.5111	0.514383	0.512745	0.512745	0.52326	0.52326	0.521662	0.515199
68	0.530363	0.510275	0.48636	0.490748	0.521662	0.496804	0.496804	0.495084	0.509447	0.53886	0.539622	0.544164	0.500219

従来暗渠区（中圃場） c 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.531144	0.52485	0.52326	0.524056	0.52485	0.522462	0.508618	0.521662	0.376772	0.514383	0.519252	0.524056	0.52086
28	0.513565	0.520057	0.515199	0.512745	0.52326	0.516013	0.517636	0.516013	0.512745	0.52326	0.526434	0.525643	0.512745
68	0.514383	0.501914	0.506954	0.471946	0.52485	0.477419	0.481022	0.480124	0.488121	0.528011	0.521662	0.515199	0.493356

対照区（下圃場） a 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8		0.514383	0.52485	0.509447	0.508618	0.506954	0.496804	0.501914	0.481022	0.480124	0.499368	0.501914	0.497661
28		0.535793	0.501914	0.513565	0.52485	0.518445	0.519252	0.506954	0.516013	0.451135	0.457888	0.447219	0.444253
68		0.494221	0.501068	0.480124	0.531144	0.487242	0.485475	0.475604	0.531144	0.535793	0.531923	0.53425	0.493356

対照区（下圃場） b 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8		0.515199	0.511923	0.5111	0.5111	0.504443	0.470103	0.508618	0.355825	0.463577	0.488999	0.506954	0.501914
28		0.52326	0.516013	0.516826	0.526434	0.512745	0.521662	0.507787	0.48636	0.493356	0.488121	0.49162	0.481022
68		0.49162	0.495084	0.500219	0.518445	0.484589	0.485475	0.483701	0.474693	0.522462	0.527223	0.524056	0.492489

対照区（下圃場） c 測点

	6月20日	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
8	0.52326	0.524056	0.504443	0.525643	0.522462	0.520057	0.445245	0.46732	0.312753	0.388547	0.45016	0.481917	0.517636
28	0.519252	0.518445	0.515199	0.495084	0.487242	0.488999	0.462635	0.464517	0.458842	0.495084	0.52485	0.526434	0.513565
68	0.5419	0.545665	0.485475	0.501068	0.550132	0.506119	0.502759	0.504443	0.504443	0.5327	0.549391	0.536562	0.524056

A-5 地下水位測定

連結暗渠区（上圃場）、従来暗渠区（中圃場）、および対照区（下圃場）における地下水位の手動測定値を示した。

連結暗渠区

上圃場	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	43.5	欠測	47	45	46	44	46	46.5	46	46.4	45	47
水位(管頂から)(cm)	98.5	欠測	57	55	43	99.5	91	104	97	86.1	78.5	62
地下水位(地表面を基準)(cm)	55	欠測	10	10	-3	55.5	45	57.5	51	39.7	33.5	15

従来暗渠区

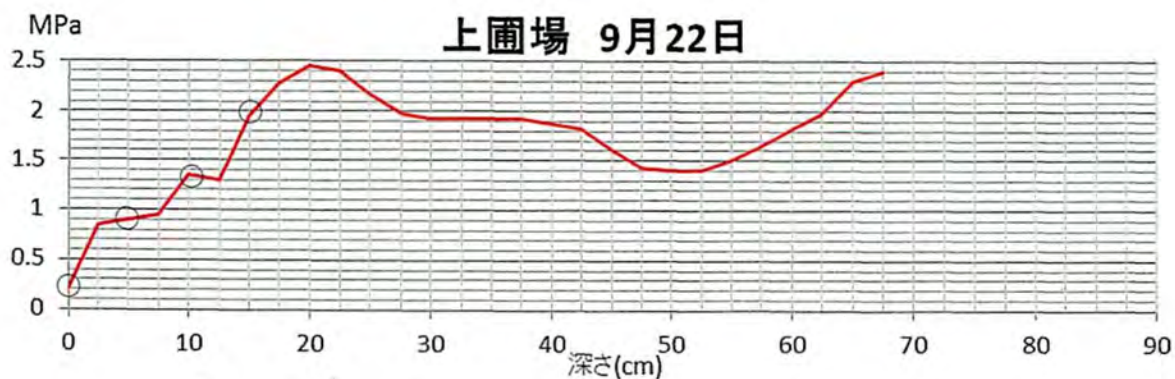
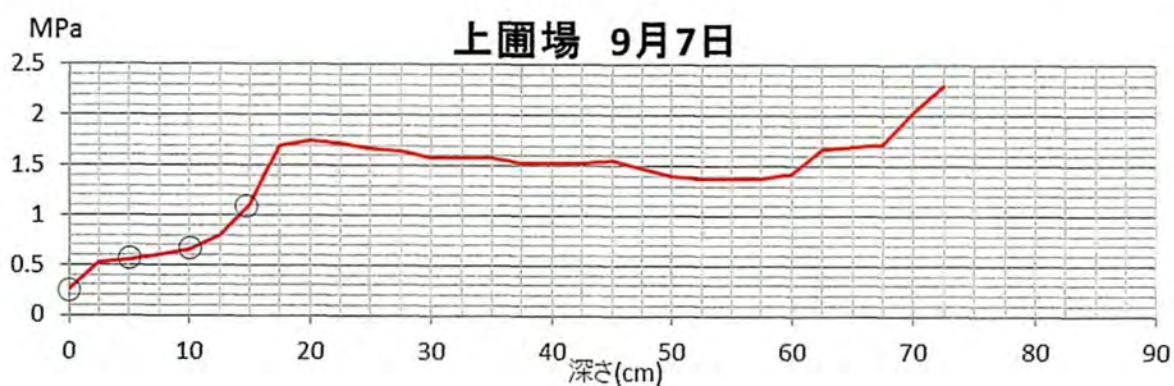
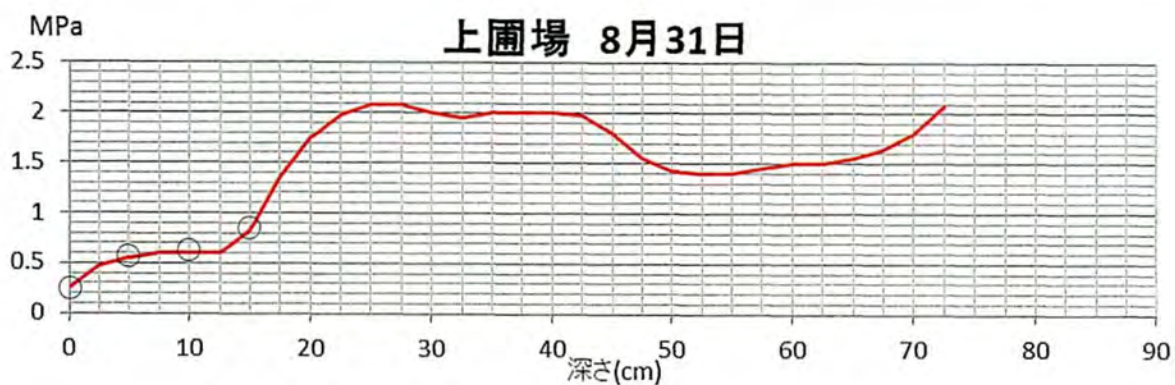
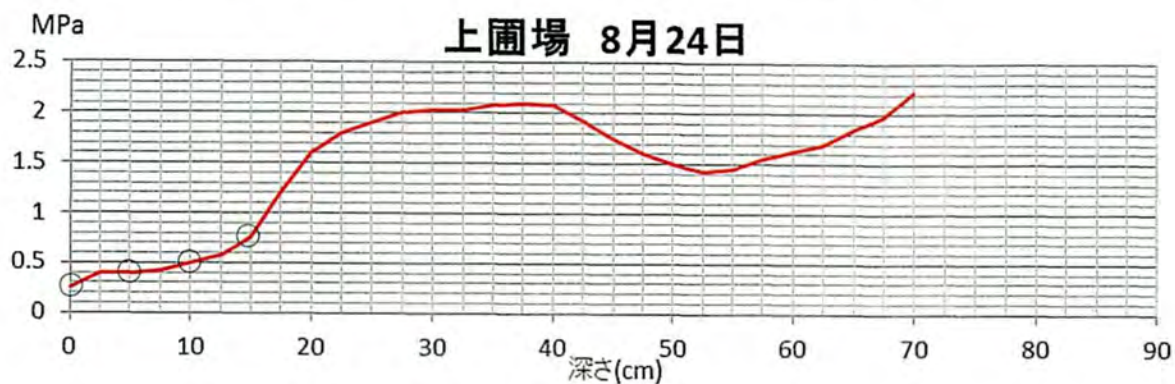
中圃場	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	42	44	44	44	46.5	45.5	46	46	46.5	47	47.9	47.5
水位(管頂から)(cm)	97	89	87.5	88	87.5	102.5	49	119	77.5	55.3	57.7	49.5
地下水位(地表面を基準)(cm)	55	45	43.5	44	41	57	3	73	31	8.3	9.8	2

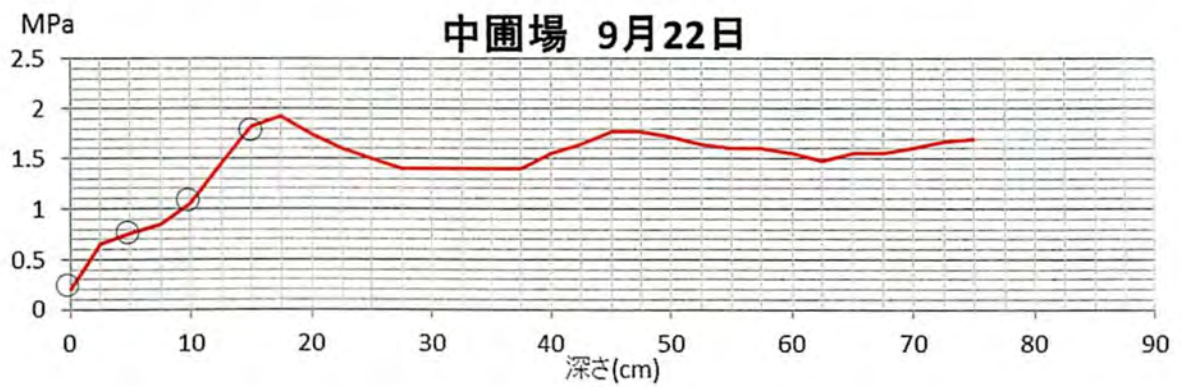
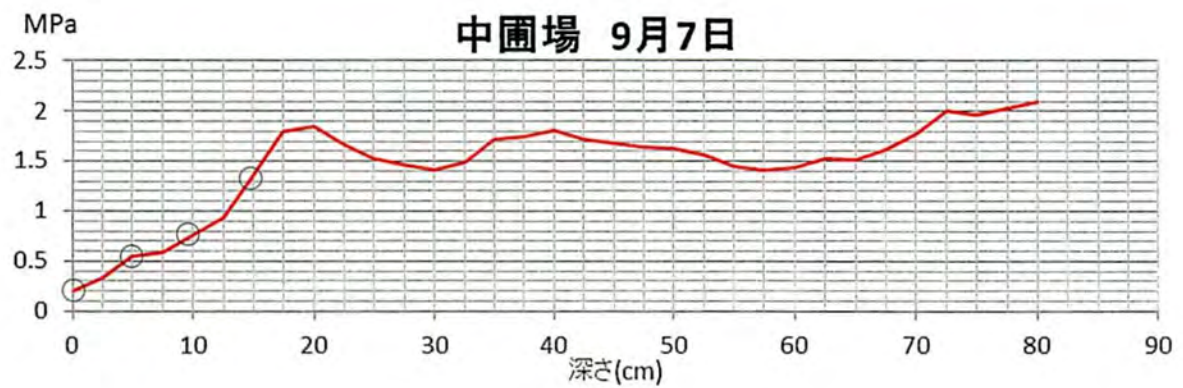
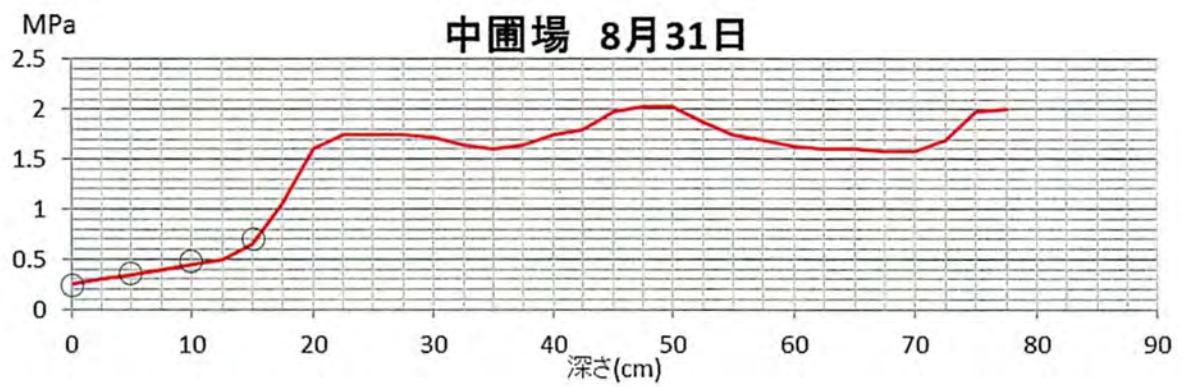
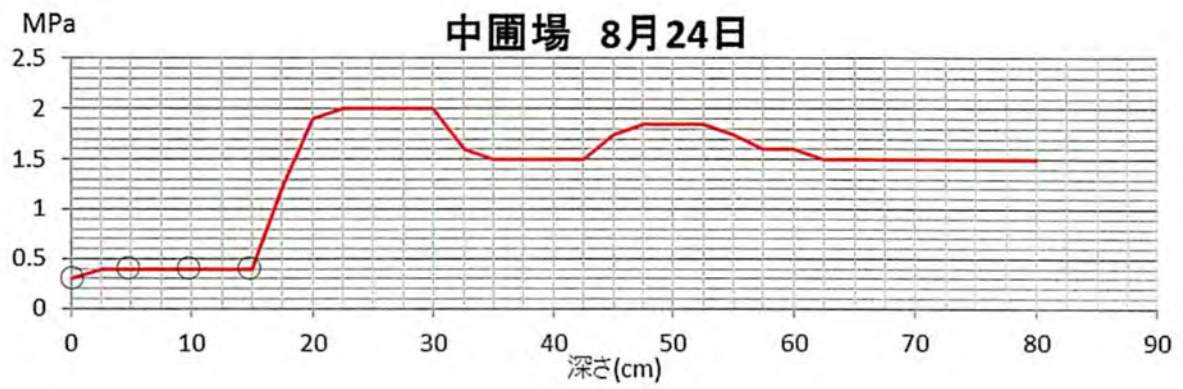
対照区

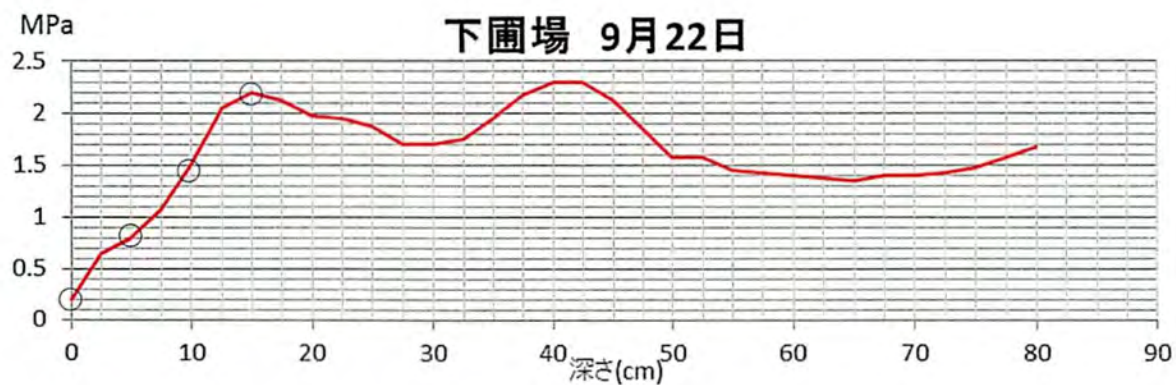
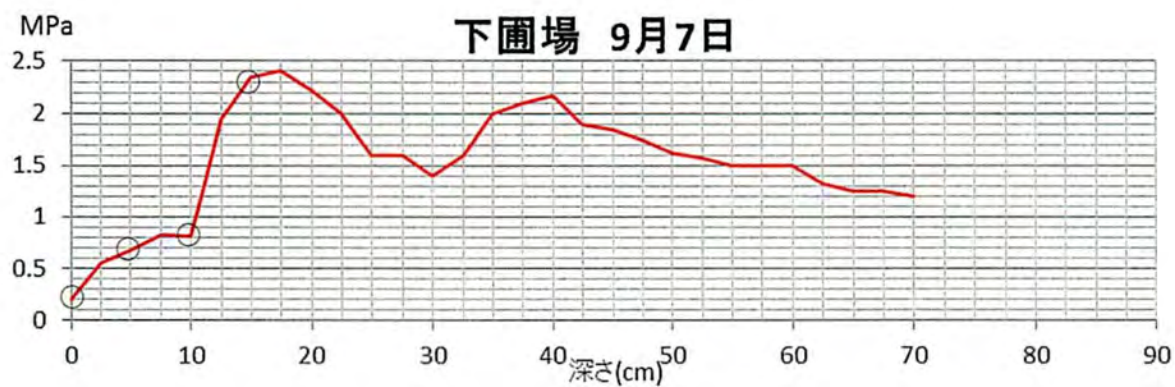
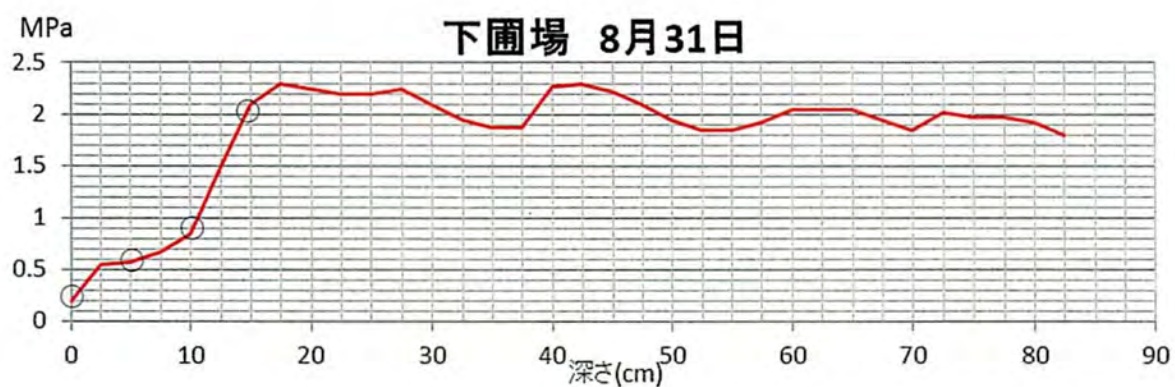
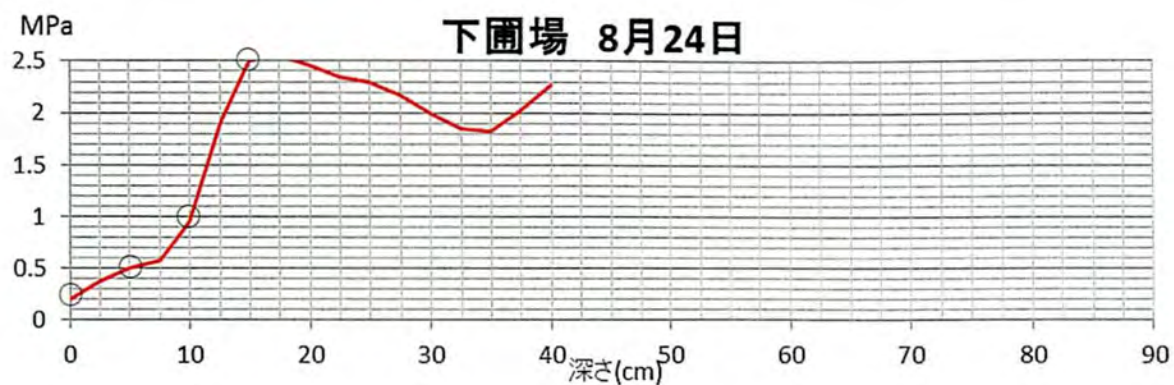
下圃場	6月22日	6月29日	7月5日	7月13日	7月20日	7月27日	8月4日	8月11日	8月17日	8月24日	8月31日	9月7日
立ち上がり(地表面から管頂)(cm)	46	46	46.5	47	49	48	48	48	48.5	48	48	48
水位(管頂から)(cm)	110	39.5	83.5	100	46.5	117	74.5	132	110.5	73	64.2	51.8
地下水位(地表面を基準)(cm)	64	-6.5	37	53	-2.5	69	26.5	84	62	25	16.2	3.8

A-6 土壌硬度

連結暗渠区（上圃場）、従来暗渠区（中圃場）、および対照区（下圃場）の地耐力を示した。○点は土壌硬度を規定する判読点（0cm, 5cm, 10cm, および 15cm 深さ）である。







A-7 水温、電気伝導度 (EC)

各試験区における水温、EC の測定値を示した。

上圃場			
	深さ(cm)	水温(°C)	EC(mS/cm)
7月27日	-410	19.3	0.213
	-390	19.9	0.125
	-370	20.2	0.116
8月11日	-427	20.7	0.083
	-407	20.7	0.086

中圃場			
	深さ(cm)	水温(°C)	EC(mS/cm)
7月27日	-280	18.9	0.247
	-260	19.8	0.189
	-240	19.9	0.093
8月11日	-287	20.1	0.114
	-274	20.7	0.111

下圃場			
	深さ(cm)	水温(°C)	EC(mS/cm)
7月27日	-150	19.8	0.097
	-130	20.1	0.046
	-110	20.1	0.001
8月11日	-144	20.4	0.105
	-136	20.9	0.053

A-8 地下灌漑・排水

連結暗渠区の4測点における土壌水分の鉛直分布測定値（電圧表示）を示した。

測点①

深さ(cm)	22日		26日						27日		排水スタート		28日	
	15:00	設置後	10:15	10:40	11:30	12:00	14:00	15:00	16:30	10:30	12:00	14:00	23時間45分後	10:45
-25	36		37	36	35	32	41	36	37	35	35	34		35
-15	35		37	37	38	36	38	36	37	37	37	37		34
-5	125		182	173	184	169	174	147	163	322	298	271		171
5	170		208	237	217	235	217	193	245	471	466	465		231
25	367		356	323	373	318	359	348	323	324	349	329		322
65	482		419	443	424	446	439	430	446	450	435	443		491

測点②

深さ(cm)	22日		26日						27日		排水スタート		28日	
	15:00	設置後	10:15	10:40	11:30	12:00	14:00	15:00	16:30	10:30	12:00	14:00	23時間45分後	10:45
-25	37		40	37	37	35	37	38	38	37	37	35		37
-15	36		38	38	38	38	38	38	38	37	39	37		35
-5	117		198	203	205	187	198	198	198	388	340	321		210
5	198		379	365	328	311	291	285	272	483	478	480		271
25	452		442	440	439	435	438	439	441	437	434	437		442
65	462		457	453	447	444	449	450	448	452	445	450		501

測点③

深さ(cm)	22日		26日						27日		排水スタート		28日	
	15:00	設置後	10:15	10:40	11:30	12:00	14:00	15:00	16:30	10:30	12:00	14:00	23時間45分後	10:45
-25	38		38	37	36	34	34	37	38	35	34	34		37
-15	34		38	38	38	38	37	37	38	37	37	37		35
-5	94		73	85	83	69	103	76	100	447	329	169		114
5	221		344	288	256	260	253	256	275	467	471	465		288
25	334		362	339	337	355	324	347	333	335	335	359		336
65	488		443	442	440	439	442	442	432	444	443	439		451

測点④

	22日		26日										27日	排水スタート	28日	
深さ(cm)	15:00 設置後	10:15 入水前	10:40 10分後	11:30 1時間後	12:00 1時間半後	14:00 3時間半後	15:00 4時間半後	16:30 6時間後	24時間後	10:30 1時間後	12:00 3時間後	14:00 23時間45分後	10:45 23時間45分後			
-25	36	37	37	36	36	35	38	38	36	36	36	37				
-15	34	38	38	38	38	37	38	38	38	39	38	35				
-5	46	49	50	50	49	49	50	44	181	68	62	61				
5	149	181	180	178	177	177	180	195	467	466	466	189				
25	443	432	428	429	428	429	428	436	431	428	434	441				
65	468	439	432	431	431	433	435	428	435	433	429	456				

校正後の土壌水分（体積含水率）を示した。

測点①

深さ(cm)	設置後	入水前	10分後	1時間後	1時間半後	3時間半後	4時間半後	6時間後	24時間後	1時間後	3時間後	23時間45分後
5	0.170928	0.243615	0.290642	0.258877	0.287589	0.258877	0.216647	0.302603	0.538095	0.53425	0.533476	0.281403101
25	0.448202	0.437238	0.402188	0.454045	0.396567	0.440261	0.429049	0.402188	0.403302	0.430082	0.40882	0.401070922
65	0.546413	0.495945	0.516013	0.500219	0.518445	0.512745	0.505282	0.518445	0.521662	0.509447	0.516013	0.553078819

測点②

深さ(cm)	設置後	入水前	10分後	1時間後	1時間半後	3時間半後	4時間半後	6時間後	24時間後	1時間後	3時間後	23時間45分後
5	0.225863	0.459794	0.446233	0.407723	0.388547	0.364598	0.357092	0.34027	0.54716	0.543411	0.544915	0.338943411
25	0.52326	0.515199	0.513565	0.512745	0.509447	0.511923	0.512745	0.514383	0.5111	0.508618	0.5111	0.515198951
65	0.531144	0.527223	0.524056	0.519252	0.516826	0.52086	0.521662	0.520057	0.52326	0.517636	0.521662	0.560343178

測点③

深さ(cm)	設置後	入水前	10分後	1時間後	1時間半後	3時間半後	4時間半後	6時間後	24時間後	1時間後	3時間後	23時間45分後
5	0.265458	0.424883	0.360865	0.318427	0.324014	0.31418	0.318427	0.344223	0.535022	0.538095	0.533476	0.360864661
25	0.414254	0.443259	0.419608	0.417476	0.436224	0.403302	0.428012	0.413174	0.415331	0.415331	0.440261	0.416405151
65	0.550871	0.516013	0.515199	0.513565	0.512745	0.515199	0.515199	0.506954	0.516826	0.516013	0.512745	0.522461682

測点④

深さ(cm)	設置後	入水前	10分後	1時間後	1時間半後	3時間半後	4時間半後	6時間後	24時間後	1時間後	3時間後	23時間45分後
5	0.123422	0.193518	0.191522	0.187497	0.185467	0.185467	0.191522	0.220362	0.535022	0.53425	0.53425	0.20910145
25	0.516013	0.506954	0.503602	0.504443	0.503602	0.504443	0.503602	0.510275	0.506119	0.503602	0.508618	0.514382869
65	0.535793	0.512745	0.506954	0.506119	0.506119	0.507787	0.509447	0.503602	0.509447	0.507787	0.504443	0.526434159

A－9 地下水位，排水口水位

秋期の地下灌漑・排水試験における地下水位，および排水口水位の測定値を示した。

min	hour	測定時間	地下水位(cm)	min	hour	測定時間	水位 (cm)(排水 枡上端か ら)	排水口水位 (cm)(地表 面を基準)
0	0	10:10	15	0	0	10:10	109.5	80.5
5	0.083333	10:35	14.2	5	0.083333	10:35	108.5	79.5
10	0.166667	10:40	14	10	0.166667	10:40	98.3	69.3
15	0.25	10:45	14	15	0.25	10:45	95.5	66.5
20	0.333333	10:50	13.9	20	0.333333	10:50	92	63
25	0.416667	10:55	13.5	25	0.416667	10:55	91.8	62.8
30	0.5	11:00	13.5	30	0.5	11:00	94	65
35	0.583333	11:05	13	35	0.583333	11:05	95.2	66.2
45	0.75	11:15	13	45	0.75	11:15	92.5	63.5
50	0.833333	11:20	13	50	0.833333	11:20	90.3	61.3
55	0.916667	11:25	12.7	55	0.916667	11:25	88.5	59.5
60	1	11:30	12.6	60	1	11:30	87	58
65	1.083333	11:35	12.5	65	1.083333	11:35	83.6	54.6
70	1.166667	11:40	12.2	70	1.166667	11:40	82	53
75	1.25	11:45	12.2	75	1.25	11:45	80	51
80	1.333333	11:50	12.5	80	1.333333	11:50	78.3	49.3
85	1.416667	11:55	12	85	1.416667	11:55	75.6	46.6
90	1.5	12:00	12.7	90	1.5	12:00	74.4	45.4
195	3.25	13:45	14.2	195	3.25	13:45	42.3	13.3
210	3.5	14:00	14.5	210	3.5	14:00	40.9	11.9
225	3.75	14:15	14.8	225	3.75	14:15	40.5	11.5
240	4	14:30	15	240	4	14:30	39.1	10.1
255	4.25	14:45	15.1	255	4.25	14:45	38.5	9.5
270	4.5	15:00	15.5	270	4.5	15:00	37.8	8.8
360	6	16:30	17	360	6	16:30	38	9
1440	24	10:30	-1	1440	24	10:30	31	2
1530	25.5	12:00	-1	1490	24.83333	11:20	45	16
1650	27.5	14:00	-1	1530	25.5	12:00	46	17
2895	48.25	10:45	20	1590	26.5	13:00	48.5	19.5
				2895	48.25	10:45	85.5	56.5

陶管暗渠による土壌水管理システムの開発

新潟大学農学部 ○栗生田 忠雄, 木村 友紀
有限会社 小田製陶所 小田 正雄

1. はじめに

水田の暗渠による土壌水分管理は古くて新しい課題である。この課題として、効果的排水、地下灌漑、長寿命化等の機能開発が挙げられる。そこで本研究は、陶管を利用した新たな土壌水分管理システムを開発し、地下灌漑効果を検討した。

2. 実験の材料と方法

2.1 供試ほ場の土性

供試ほ場は新潟県阿賀野市の中山間地の水田である。このほ場は、背後の山地からの伏流水とグライ土¹⁾のため土壌水分制御には苦勞を伴ってきた。

2.2 土壌水管理システム（本暗渠と補助暗渠）

土壌水管理システムの特徴は、イ) 給水口から排水口まで連続している、ロ) 地下水位制御機能を有する、ハ) 地下灌漑機能を有している、ニ) 地表水と暗渠の排水を一つの排水柵で受け持つ、ホ) 必要に応じて補助暗渠を施工するものである。図-1 に土壌水制御のための W 排水柵と暗渠の鉛直断面図を示した。

供試ほ場には、陶管暗渠が敷設した。敷設勾配は、1/500 である（最も浅い上流部で 60cm, 最も深い排水口で 79cm 深さ）。また、本暗渠に直交する方向に補助暗渠（粉殻充填）を 2011 年 10 月に施工した。補助暗渠の施工深さは 40cm, 施工間隔は 4m であった。なお、地下灌漑中、W 排水柵の立ちあがり管（図-1（ロ））で水位を測定した。

2.3 土壌水分（測定装置と測定方法）²⁾

土壌水分の測定は、本暗渠と補助暗渠で囲まれた井桁の 3 点で鉛直分布を測定した（図-2 参照）。測定機器は ΔT の PR1 である。なお、供試圃場の土壌が粘質で土壌水分は電圧 (mV) で表示した。土壌水分の鉛直分布測定は、地下灌漑開始から 10 分後、20 分後、30 分後、1 時間後、2.5 時間後、3 時間後、4 時間後、22 時間後、および 49 時間後に行った。

3. 結果と考察

3.1 暗渠排水口水位

暗渠末端部の排水口における水面標高の経時変化を示したものである（排水口の立ち上がり管の管頂（地表面より 10cm 高い）から測定）。給水開始直前の水位標高は、-77cm であった。給水開始から 1 時間で排水口の水位は 37cm 上昇し -40cm になった。その後、給水開始 4 時間後には -17cm まで排水口水位が上昇した。このことから、給水された水は、まず移動しやすい暗渠管内を移動しつつ管内を満水にした。つづいて、暗渠管の隙間から

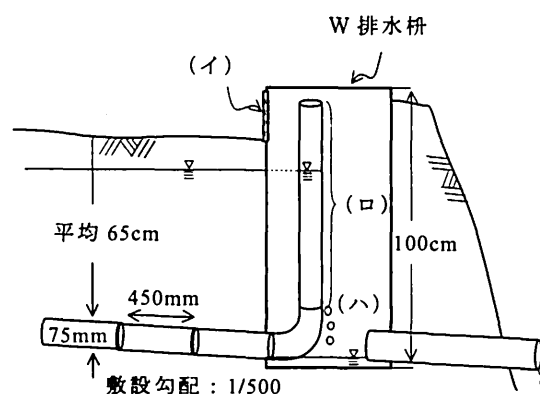


図-1 W排水柵による土壌水制御
（地表排水と暗渠排水）

(イ): 地表水の制御板
(ロ): 地下水位制御用の立ち上り管
（落水時には取り除く）
(ハ): 暗渠排水口（落水時のみ）

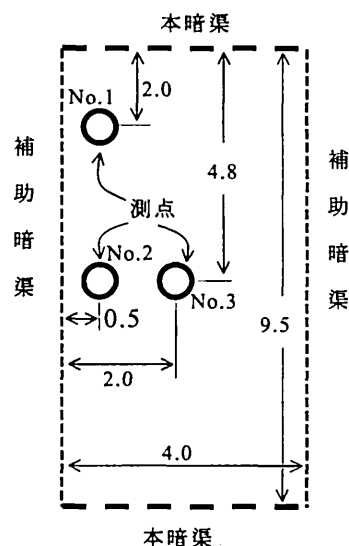


図-2 土壌水分の鉛直分布測定の
配置（単位：m）

本暗渠と補助暗渠で囲まれた井
桁の内部に 3 測点を設けた。No.3
は井桁のほぼ中央であり、濡れ難
い点である。測定深度は、0cm（地
表面）、10cm（作土）、30cm（耕盤）
70cm（心土）とした。

浸出し透水性の高い初殻部分を移動したと考えられる。灌漑水の供給は断続的で土壌の透水係数が小さいものの、排水口での水位を維持したため約1日の給水で地表面下10cmまでほぼ飽和状態になった。また、4m間隔で施工された補助暗渠は、作土の土壌水分を水平方向への拡散に寄与したと考えられる。さらに、排水口の立ち上がり管で水位調節したため、排水口水位は灌漑水が施されなくても大きな低下はなかった。

給水開始から1時間で37cmの排水口の水位が上昇した。つまり給水から1時間で暗渠は満水になった。試験圃場の暗渠内径は0.075m、総敷設長は、254mである。よって、暗渠の容積は 1.12m^3 である。

暗渠管内の流速 V (m s^{-1})、流量 Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)は計算できる³⁾。暗渠の管の継ぎ目の抵抗を考慮した粗度係数 n を0.0192とした。これより、給水開始から1時間までの暗渠本管の流速は 0.158m s^{-1} ($=568 \text{m h}^{-1}$)、流量は $1.12 \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ 、通水断面積は $1.96 \times 10^{-3} \text{m}^2$ (全断面積の44%)と算出した。

3.2 土壌水分(電圧)変動

測点No.3に着目する。電圧で示した土壌水分は、深くなるにつれて大きくなった。地表面では、緩やかな水分上昇であった。なお、測定値には反映されていないが、地表面付近には灌漑水の浸みだしが目視できた。大間隙を通じて灌漑水が移動したためと考えられる。深さ10cm(作土)では、実験開始3時間までほとんど変動しなかったが、22時間後には急激に大きくなり、約450mVの値を示した。疎水材部と補助暗渠の初殻が地表面下で3次元的に連続しているため、ここを通じて灌漑水が浸透したためと考える。深さ30cm(耕盤)では、心土よりも変動が小さく350mV前後の値で一様であった。耕盤の透水性の低さを反映したものと考えられる。深さ70cm(心土)では、若干の増加がみられたが、測定期間を通じて450mV前後でほぼ一定であった。微小な増加は心土の小亀裂を通じた土壌水の移動と考える。

4. まとめ

土壌水分の鉛直分布の測定値から、灌漑水は、暗渠の継目から漏出し、主に疎水材部と補助暗渠を伝うことが分かった。また灌漑水は、微量ながら心土の小亀裂を伝って拡散したと考える。

圃場の土質に応じた補助暗渠の配置基準の検討などが今後の課題である。

参考文献

- 1) 農業環境技術研究所(2009): 土壌情報閲覧システム分類, http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/soil_db/howto.phtml (2012年4月11日参照)。
- 2) 栗生田忠雄(2012): 阿賀野市山寺地区における陶管暗渠を利用した土壌水管理システムの機能評価報告書, 48p.
- 3) 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, 農林土木学会, 184p.

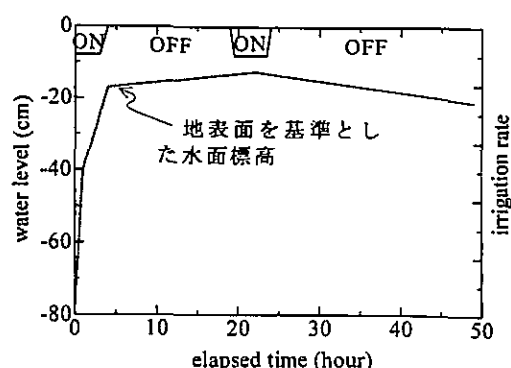


図-3 地下灌漑中の排水口水位変動

暗渠管の末端部の立ち上がり管の管頂から測定した。4月27日午前11時を測定開始時刻(0時間)とし、翌日(4月28日)午後4時まで49時間断続的に測定した。

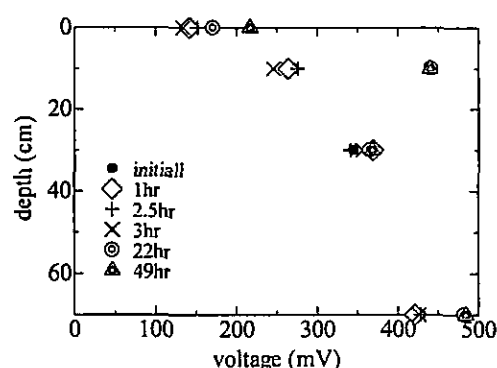


図-4 土壌水分の鉛直分布(測点No.3)

本暗渠と補助暗渠で囲まれた井桁の内部に3測点を設けた。No.3は井桁のほぼ中央であり、濡れ難い点である。測定深度は、0cm(地表面)、10cm(作土)、30cm(耕盤)70cm(心土)とした。

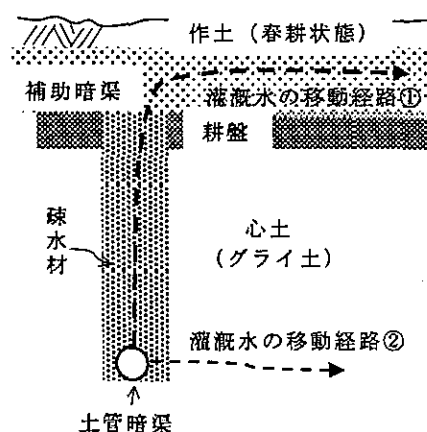


図-5 灌漑水の移動経路概念

灌漑水は暗渠の継ぎ目から浸出し、疎水材、補助暗渠(初殻充填)を伝って拡散したと考えられる。

2012年度共同研究報告書
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

2013年 5 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
