J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 148, p. 3～15 (2021)

シンポジウム特集
論　文
Original Paper

# 水田の暗渠への水の流れの実相の解明とその機能診断への応用

吉田修一郎 [1]・本多阿暉 [1]・松本宜大 [1]・佐藤太郎 [2]・関川 力 [3]・千葉克己 [4]

# The real picture of subsurface drainage of paddy fields and application to diagnosis of its function

Shuichiro YOSHIDA[1], Agun HONDA[1], Yoshihiro MATSUMOTO[1], Taro SATO[2], Tsutomu SEKIKAWA[3] and Katsumi CHIBA[4]

**Abstract:** The function of subsurface drainage system depends not only on the drainpipe but also on the condition of the filler material and the soil structure. This study aims to present the feasibility of functional diagnosis of the system for clayey paddy field by measuring the pressure head distribution along the water pathway from the plowed layer to the drainage canal.

Three measuring sites (DA: Drainage canal side of Field A; IA: Irrigation canal side of Field A; and IB: Irrigation canal side of Field B) were chosen very above the drainpipes in the two neighboring clayey paddy fields. The pressure transducers were installed at the bottom of the plowed soil, inside the drainpipes and the drainage canal. The tensiometers were installed at the plowsole and upper part and the bottom of the backfilled trench filled with rice husk filler. These points are on the route of the major water flow during the drainage of excess water in the clayey paddy field.

At DA and IA, total head loss for the entry of water from the filler to the drainpipe was very high, while it was negligible at IB, where total head loss in the filler layer of the backfilled trench was the highest. The flow resistance, defined as the head loss divided by water flow rate, in the plowsole: $R_{\mathrm{plowsole}}$, was about 60 h (hours) at DA and DI, while it was higher at IA (275 h). The flow resistance in the filler ($R_{\mathrm{filler}}$), was as high as 564 h at IB, while that between the filler and drainpipe ($R_{\mathrm{entry}}$) was more than 200h at DA and IA (333 and 232 h). These results were consistent with the visual observations and the analysis of the husk filler taken at the field.

Although the measurement of hydraulic head above the drainpipes is a promising method to analyze the cause of functional degradation, further studies on the spatial distribution of the vertical hydraulic head profiles are required to develop a procedure to know the averaged state of the subsurface drainage system of each field.

[1]Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo , Yayoi, 1-1-1, Bunkyo, Tokyo, JAPAN. Corresponding author: 吉田修一郎，東京大学大学院農学生命科学研究科.
[2]Shibata Regional Development Bureau, Niigata Prefecture, 3-3-2, Yutaka-cho, Shibata, Niigata, JAPAN.
[3]Niigata Prefectural Agricultural Research Institute, 857, Nagakura-cho, Nagaoka, Niigata, JAPAN.
[4]Department of Food Science and Business, Miyagi University, 1 Gakuen, Taiwa-cho, Kurokawagun, Miyagi, Japan.
2020 年 12 月 10 日受稿　2021 年 4 月 26 日受理

**Key Words** : field drainage, subsurface drainage, function diagnosis, hydraulic head distribution, flow resistance

## 1. はじめに

近年，施工からの年数が経過し，排水機能が低下した暗渠は増加傾向にあり，機能診断方法やその科学的な裏付けが求められている．耕盤による浸透抑制が機能している水田や，粘質土圃場の排水不良は，「地下水位」が高いことによるものではなく，作土の過剰な水分が効率よく排水されないことが原因であることが多い．この点を重視し，我が国の水田の暗渠は，欧米とは異なり，作土直下まで疎水材を充填するとともに，深さ 50 ～ 80 cm への浅い施工が標準となっている（農林水産省, 2017）．また，水田の暗渠排水では，作土より下の層は，補助暗渠部を除き不透水層とみなされ，作土および補助暗渠部での水平方向の流れと，疎水材での鉛直降下流の組み合わせにより，排水が行われることが想定される．この時，本暗渠の疎水材内や補助暗渠内には，水位は形成されないことを仮定し，暗渠部の圧力水頭をゼロとする境界条件が設計においては多く用いられてきた．例えば，荻野・村島（1985）では，本暗渠と補助暗渠で構成される圃場の定常状態での耕盤上での水位形成において，両暗渠直上部の境界条件を圧力水頭ゼロとして与え，作土の横方向のマクロな透水係数と暗渠間隔が，暗渠排水量を決定するようなモデルを提示している．その後，この境界条件の設定においては，暗渠直上部を「浸出境界」とする数値解析（例えば，Ebrahimian and Noory, 2015）や，疎水材も多孔体として計算領域内に含めた解析（古賀ら，2005）も行われてはいる．しかし，暗渠の排水能力を定量的に検討する際に，暗渠直上部から吸水管に至る部分の水の流れ（暗渠直上部の鉛直流れ）が暗渠排水量を律速するような現実的な現象を，現場での測定に基づき定量的に解析する方法は，確立されていない．

施工後年数が経過した暗渠では，作付け履歴や圃場の管理により，地表から暗渠に向かう経路の通水性は，施工直後とは大きく異なるのが普通である．暗渠疎水材には，暗渠管内への土粒子の流入を防ぐ被覆材（Envelope

material）としての役割と，暗渠への水の流入を助ける人工の水みちとしての機能がある．この二つの機能を併せ持ち，かつ安価で容易に入手できる素材として，水稲のもみがらが広く用いられている．永石（1977a, 1977b, 1980）は，佐賀県の水田および畑において，もみがら疎水材の調査を行い，施工後 10 年を耐用年数のおおよその目安とし，田畑輪換田においては，数年で腐敗が進むと報告した．その後，山形県において，清野ら（1994）は，もみがらが完全に分解されるまでの期間が，畑で 11 ～ 12 年，水田では，その約 3 倍であったとの報告をしている．また，もみがらの分解が，暗渠機能の低下の原因になっている事例はなかったものの，腐敗に伴って，渠溝が空洞化し，陥没を引き起こした事例が示されている．吉田ら（2005）は，新潟県の粘質な水田において，もみがら疎水材の泥土混入率を調べた結果．通水性に影響を及ぼす目安とされる 400 % に達するためには，早いところで 7 年 ～ 8 年，遅いところで 12 年以上を要していたことを明らかにした．また，分解損失率の測定により，もみがらの腐敗は，平均的に見れば徐々に進行し，早いところでは 8 年経過した頃には細粉化すること，田畑輪換がもみがらの腐敗に及ぼす影響は，疎水材が乾きにくい地域では小さいことなどを示した．また，渠溝の空洞化は，最短で施工後 8 年で発生し，12 年で多発すること，腐敗が進行しても，土の軟弱性による渠溝幅の縮小が著しいところでは，空洞が発生しにくいことを明らかにした．

疎水材は，作土直下まで充填されて，作土を横に流れてきた水を集水する機能が期待されるが，施工後の年数が経過すると，徐々に沈下し，疎水材と作土の間に耕うんや代かきにより透水性の低い土層が形成される（例えば，村島 · 荻野, 1992）．吉田 · 足立（2005）は，粘土質水田の本暗渠直上の浸入能を 1 m 間隔で測定するとともに，各位置において地表から疎水材上端までの深さを測定したところ，疎水材層の数センチの沈下により，浸透能が桁違いに低下していることを示した．また，水田の排水性には，亀裂の消長が強く影響する（例えば，山崎ら, 1966; 丸山, 1966; 田渕, 1966; Tabuchi, 1985; 長浜ら, 1968; Inoue, 1993）．特に作土下端から耕盤付近の通水性は，亀裂の消長と関わるため，暗渠の排水能力は，圃場の乾湿により顕著な季節変化を示す（吉田ら, 2008）．

吸水渠や集水渠に関しては，泥の堆積などの機能低下の問題も含めた検討が，国内外を問わず広く行われてきた．堆積 · 集積が集中する箇所は，堆積物の性状により，例えば，村島 · 荻野（1992）では，泥土の堆積量が上流側で多く，下流側で少ない現象が一般的に観察されるとしたが，一方で Ford（1979）は，鉄酸化物（iron ocher）の顕著な集積は，吸水管の下流 1/3 に発生すると指摘している．吸水管や集水渠に堆積する泥土は，大きな排水により掃流されるが，排水機能が低下すると，堆積が起こりやすくなり，悪循環に陥る．つまり，泥土の堆積には，それより上流部の排水機能の低下も関係している．近年施工される暗渠では，用水路側に洗浄や灌漑を目的とした管の立ち上がり部が設置されたものが多く，このような設備があれば，定期的に吸水管の洗浄を容易に行うことができる．また，それぞれの吸水渠が直接出口に向かうタイプの暗渠であれば，出口側から洗浄ノズルを注入して，管内を洗浄することも可能である．

以上のように，暗渠排水を構成する各部分の劣化に関する研究や，排水量の経年的な低下の観測が広く行われ，その進行速度や対策についての研究も進められてきた．一方で，総合的な機能診断方法や，個々の部分の劣化が全体の排水能力に及ぼす影響を客観的に推定する手法については，いまだ研究が不十分である．2017 年度の土地改良事業計画設計基準「暗渠排水」（農林水産省, 2017）の改定においては，暗渠の機能診断や機能回復に関して言及され，その具体的な内容として，暗渠断面の掘削による調査などが「詳細機能調査」方法として挙げられている．しかし，各部の劣化がどの程度排水機能の低下に影響しているのかを目視や試料採取調査で判断することは現実には難しく，暗渠の診断方法としては不確実な面が否めない．

暗渠を経由して排水路に至る水の経路は，①疎水材へ浸入する前の区間（作土，耕盤，補助暗渠），②疎水材層内部，③吸水管に浸入する部分，④吸水管 · 集水渠に分けられる．この流れは，実際には 3 次元的なものであるが，本暗渠直上の代表点での作土下端から排水路に至る経路上での水の流れやすさを評価する場合には，その経路を一続きの一次元的なものとみなすことで，解析が容易になる．

そこで，本研究では，排水路の水位上昇の影響も考慮しつつ，吸水渠部分の降雨時の全水頭分布から通水阻害箇所を特定する方法を検証し，転換畑を含む水田の暗渠の土層，疎水材，吸水管全体をカバーする総合的な機能診断の可能性について考察する．

## 2. 方法

### 2.1 試験圃場

試験は新潟県上越市内の粘土質水田転換畑 2 筆において 2019 年 10 月に行った．どちらも，もみがらを疎水材とし，$\phi$ 75 mm の素焼き土管を吸水管とした暗渠が，Fig. 1 のように 8.4 m 間隔，深さ 70 cm ～ 80 cm に 2009 年に施工され，その後 2018 年まで水稲が作付けられてきた圃場である．2018 年秋には，暗渠と直交する方向に間隔 2 m で幅 30 cm，深さ 40 cm（深さは設計値）のもみがらトレンチ補助暗渠が施工された．この際，圃場 A では施工直後に作土が埋め戻され，圃場 B では翌春に作土が埋め戻された．その後，2019 年の夏作としてエダマメが栽培され，その収穫後に耕うんが行われた状態で，暗渠直上部での水圧計測を行った．センサー設置時に，圃場 A の排水路側（DA）· 用水路側（IA）の作土は，作業に支障のない程度に乾燥していたが，圃場 B の用水路側

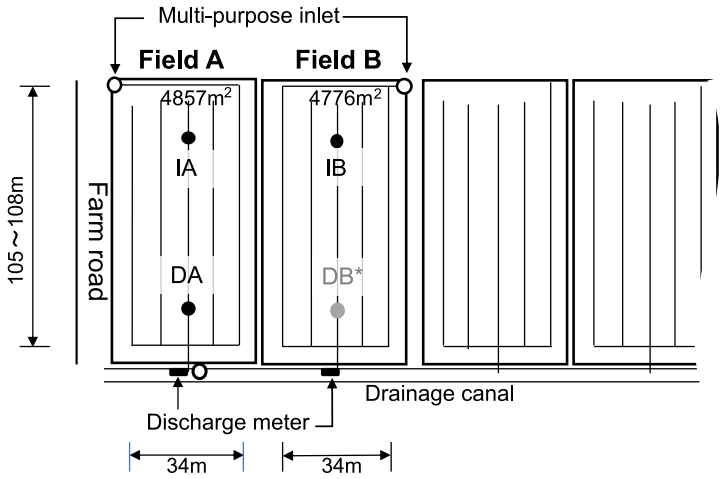



**Fig. 1** 測定圃場および測定点の概要.
Rough sketch of the paddy fields and the monitored locations.
*The monitoring was failed at the Drainage canal side of Field B.

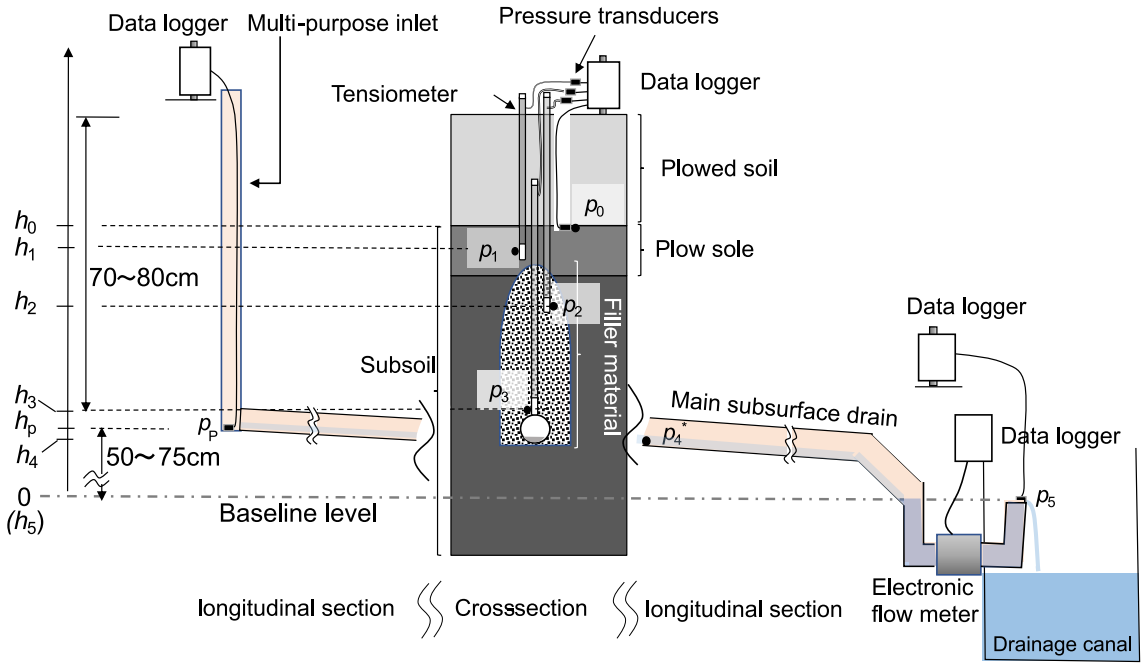



**Fig. 2** 暗渠直上部および吸水渠に沿った水圧の計測点.
*$p_4$ は，圧力水頭分布計測点下部の吸水管内の全水頭を表す．満流状態でないときには，この値は位置水頭値に等しいとみなした．
The measuring points for water pressure above and along the drainpipes.
*$p_4$ denotes the total hydraulic head in the drainpipe below the measuring point of pressure head profiles. It was not measured but estimated from the flow regime in the drainpipe and the height at the point. When the drainpipe was not completely filled with water, $H_4$ was regarded to be equal to the elevation head.

（IB）は極めて湿った状態であった．なお，圃場 B の排水路側（DB）にも測定器を設置したが，データロガーの不備により欠測となったため，結果は提示していない．

### 2.2 現場観測

Fig. 2 に示す通り，作土下端，用水路側の立ち上がり管および排水路の圧力水頭 $p_0$，$p_p$，$p_5$ を，水位計（センシズ社製 ZTV-020KP）を用いて測定した．また，耕盤および疎水材内の圧力水頭 $p_1$，$p_2$，$p_3$ をテンシオメータ（センシズ社製 ZTVN-100KP とポーラスカップ付塩化ビニルパイプ）を用いて測定した．測定点 0 ～ 3 の直下の管内の圧力水頭 $p_4$ は，管内が満流状態でないときに限り，大気圧（0 cm）とみなして，管への浸入抵抗の計算に用いた．各計測点での圧力水頭値に，レベルにより測量した各センサーの感知部の高さ，すなわち位置水頭 $h_0$

～ $h_5$，$h_p$ を加え，各点での全水頭値 $H_0$ ～ $H_5$，$H_p$ を求めた．なお，位置水頭の基準は，暗渠の出口の高さとした（$h_5 = 0$ cm）．

### 2.3 暗渠排水量および降水量

暗渠排水量と降水量は，電磁流量計（愛知時計社製 SU65）および雨量計により測定した．結果は 10 分間隔で整理した．

### 2.4 もみがら疎水材の分析

測定機器を設置した圃場 A の用水路側，圃場 A の排水路側，圃場 B の用水路側で本暗渠のもみがら疎水材を採取した．永石（1977b）や吉田ら（2005）に準じた方法で，泥土混入率と腐敗度の測定を行なった．

泥土混入率（Filtered Soil Content）の定量では，最初に，試料を 70 °C で 48 時間炉乾し，質量（$w_1$）を測定し，6 % の過酸化水素水に 24 時間浸した．その後 0.52 mm メッシュの篩の上で洗浄し，再度 70 °C で 48 時間炉乾した後，質量（$w_2$）を測定した．

一方，腐敗度の定量では，採取した試料をまず 0.52 mm メッシュの篩で水道水により十分に洗浄し，70 °C で 48 時間炉乾した．質量（$w_3$）を測定した後，2 % の水酸化ナトリウム水溶液に 24 時間浸し，洗浄して再び 70 °C で 48 時間炉乾した．炉乾後に質量（$w_4$）を測定した．

泥土混入率（FSC）は以下のように定義して求めた．

$$FSC = (w_1 - w_2)/w_2 \times 100 \quad (\%) \tag{1}$$

また，腐敗度の指標としては，次式で定義される「アルカリ分解損失率（Decomposition Index）」を用いた．

$$DI_{2\%} = (w_3 - w_4)/w_3 \times 100 \quad (\%) \tag{2}$$

なお，吉田ら（2005）によれば，10 %NaOH を用いたときの $DI_{10\%}$ は，2 %NaOH を用いたときの $DI_{2\%}$ から次式を用いて変換可能である．

$$DI_{10\%} = DI_{2\%} \times 1.19 + 4.88 \tag{3}$$

## 3. 結果および考察

### 3.1 降雨時の水頭分布

観測期間中の日雨量が，それぞれ 2 番目と 1 番目となった 2019 年 10 月 6 日の温帯低気圧による降雨と，2019 年 10 月 12 日 ～ 13 日の台風 19 号による降雨の時の暗渠直上部の全水頭分布の変化について分析を行った．なお，暗渠機能の診断の対象となりうる降雨の条件については後述する．

#### 3.1.1 通常降雨時の全水頭分布

Fig. 3 は，2019 年 10 月 6 日の降雨量（a）および降雨時の暗渠排水量と各点での全水頭の経時変化（b ～ d）を示したものである．ただし，「暗渠排水量」は，それぞれの圃場全体から集水渠でまとめられて排水路へ流出する比流量であり，調査地点の吸水渠毎の流量ではない．Fig. 3b ～ 3d（後述の Fig. 5b ～ 5d も同様）では，水頭観測点の高さを破線と $h_i$（$i = 0,1,2,3$）で示しており，全水頭 $H_i$（$i = 0,1,2,3$）が対応する破線より上にある時には，圧力が正圧となっていることを示す．

2019 年 10 月 6 日の降雨イベントでは，排水路の水位は，暗渠出口より上には上昇せず，両圃場の用水路側の暗渠の立ち上がり管内にも，水位は形成されなかった．（そのため，$H_p$ を図中には示していない．）すなわち，吸水管内は満水とならずに推移した．

10 月 6 日深夜の雨の降り始めに対応して，圃場 A の排水路側（Fig. 3b），用水路側（Fig. 3c）とも，耕盤（$H_1$），疎水材上部（$H_2$），疎水材下部（$H_3$）の順に全水頭の増加が起こり，その後，さらに雨が強くなってから作土下端に水位が一時的に形成された．一方，圃場 B の用水路

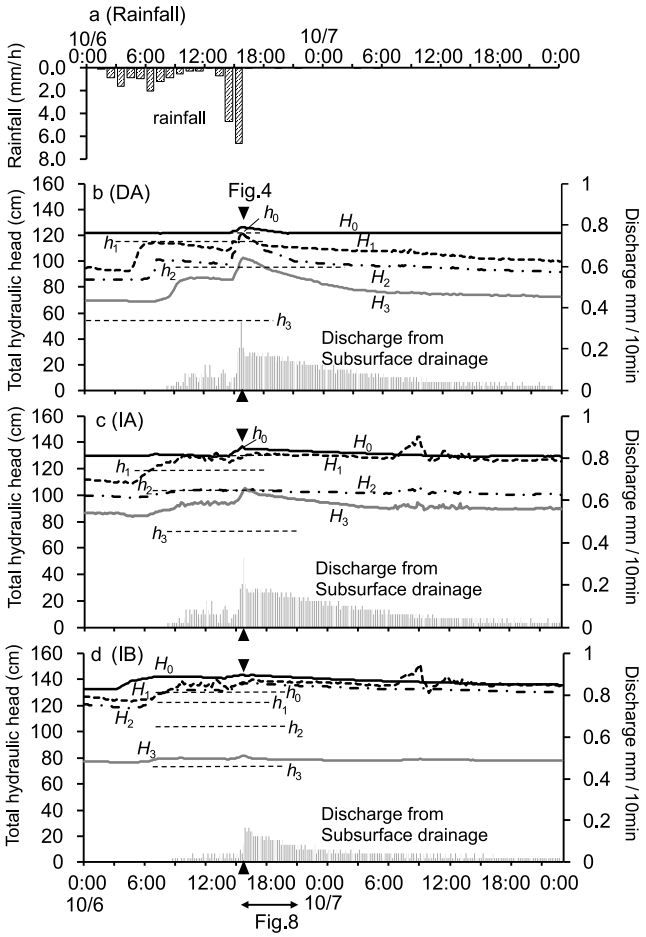



**Fig. 3** 通常の降雨に伴う全水頭および暗渠排水量の経時変化（2019 年 10 月 6 日 ～ 7 日）．a：降水量，b：圃場 A の排水路側の全水頭および暗渠排水量（A 全体），c：圃場 A の用水路側の全水頭および暗渠流排水量（A 全体），d： 圃場 B の用水路側の全水頭および暗渠流量（B 全体）．$h_i$ を記した破線は，全水頭の測定点 $i$ の高さ（位置水頭の値）を記している．$H_i$ と $h_i$（$i = 0,1,2,3,p$）の差が，圧力水頭に相当する．
Temporal change in total water head and discharge of subsurface drainage along with the normal rainfall (From 6 to 7 Oct. 2019). The broken lines indicated with $h$ represent the height of the measuring point $i$ from the baseline. The difference between $H_i$ and $h_i$ is the pressure head at the point $i$.

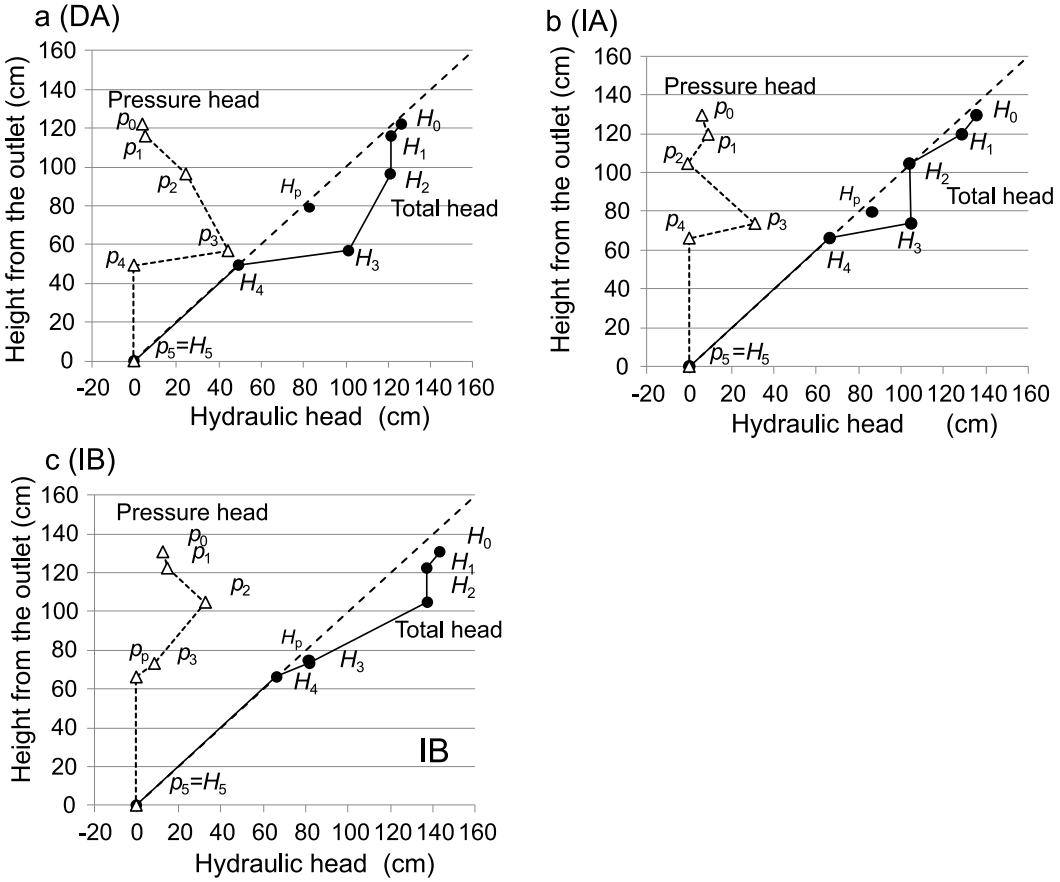



**Fig. 4** 圧力水頭および全水頭の分布（2019 年 10 月 6 日 15 : 40）．a : 圃場 A の排水路側，b : 圃場 A の用水路側，c : 圃場 B の用水路側．
Distribution of water pressure head and total water head (From 6 to 7 Oct. 2019).

側（Fig. 3d）では，耕盤（$H_1$），疎水材上部（$H_2$）での全水頭の増加が起こる前から，作土下端に水位（$H_0 > h_0$）が形成されたが，吸水管近傍では，ほとんど全水頭の上昇は起こらなかった．

Fig. 4 は，暗渠排水量が最大となった 10 月 6 日 15 : 40（Fig. 3 に▼▲示した）における圧力水頭と全水頭分布を示したものである．圃場 A の排水路側（Fig. 4a）では，吸水管近傍での水頭損失が 50 cm 以上と顕著で，疎水材は最上部まで飽和しており，動水勾配は約 0.5 であった．圃場 A の用水路側（Fig. 4b）では，吸水管近傍での水頭損失が 40 cm であるが，作土から疎水材に至る区間の動水勾配が 1 を超えており，この部分の抵抗も大きくなっていた．疎水材部分は，吸水管直上での圧力水頭に相当する 30 cm 程度の高さまで飽和し，ほぼ静水圧分布（勾配はほぼゼロ）となり，その最上層は，部分的に不飽和になっていたと考えられる．圃場 B の用水路側（Fig. 4c）では，吸水管周辺の水頭損失はほとんどなく，一方で，疎水材内の 2 つの測点 $H_2$（疎水材上部），$H_3$（疎水材下部）間（間隔 35 cm）で 55 cm の水頭損失が発生していた．また，その上層（耕盤下部）では，静水圧分布となっており，水の流れが疎水材内で強く阻害されて，その上層で滞水していたと考えられる．

### 3.1.2 台風時の全水頭分布

Fig. 5 は，2019 年 10 月 12 ～ 13 日の台風 19 号による非常に激しい降雨の際の暗渠排水量と各点での全水頭の経時変化を示したものである．降雨強度が強まると，排水路の水位（$H_5$）が暗渠出口より上昇し，これに対応して用水路側にある暗渠の立ち上がり管内の水位（$H_p$）も大幅に上昇した．すなわち，吸水管内は満水となり，この影響は，疎水材層より上の圧力水頭分布に及んだ．暗渠排水量は，圃場 A，B とも，この間にはあまり増大せず，排水路の水位が下がりだしてからピークに達している．すなわち，排水路の水位上昇による暗渠管内での排水の滞留が発生した．

このような条件下にあった 2019 年 10 月 12 日 22 : 00（Fig. 5 に▼▲で示した時刻）の全水頭分布を Fig. 6a ～ 6c に示した．この時刻に排水路水位（$p_5 = H_5$）は最大となり，暗渠の出口は，40 cm の深さに潜った状態となった．圃場 A の排水路側（Fig. 6a）では，10 月 6 日の時に比べ，おおよそ排水路水位の上昇分に相当するだけ疎水材下端の圧力水頭（$p_3$）が増加しており，地表面まで完全に飽和した状態であった．作土下端（$H_0$）から疎水材下端（$H_3$）までの間の全水頭差は 15 cm しかなく，排水路の水位上昇と吸水管近傍の通水抵抗により，暗渠排

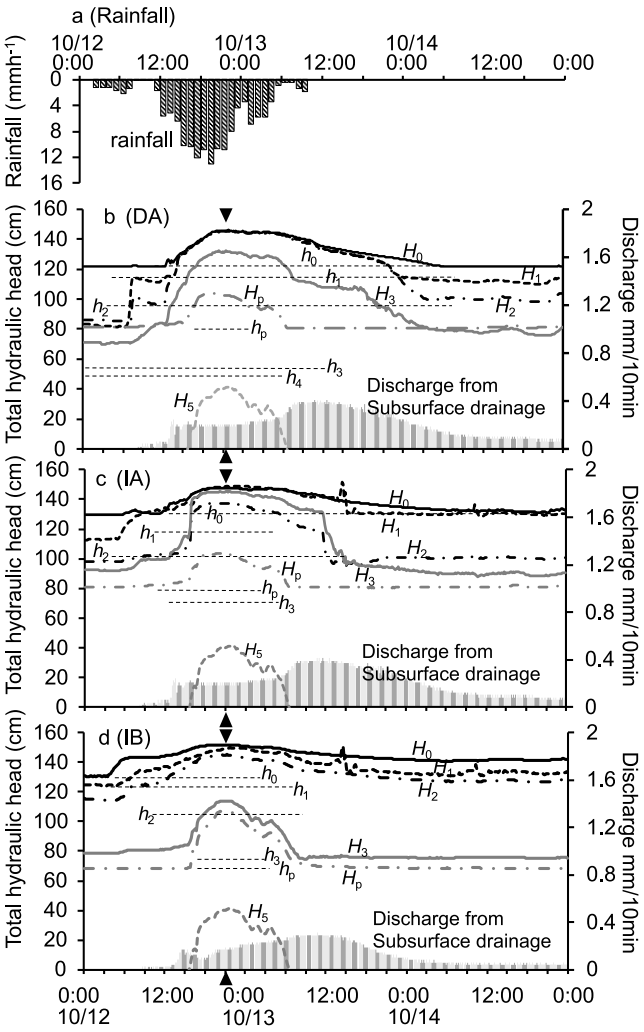



**Fig. 5** 台風の降雨に伴う全水頭および暗渠排水量の経時変化（2019 年 10 月 12 日 ～ 14 日）．a：降水量，b：圃場 A の排水路側の全水頭および暗渠排水量（A 全体），c：圃場 A の用水路側の全水頭および暗渠流排水量（A 全体），d：圃場 B の用水路側の全水頭および暗渠流量（B 全体）．$h_i$ を記した破線は，全水頭の測定点 $i$ の高さ（位置水頭の値）を記している．$H_i$ と $h_i$（$i = 0,1,2,3,p$）の差が，圧力水頭に相当する．
Temporal change in total water head and discharge of subsurface drainage along with the Typhoon (From 12 to 14 Oct. 2019). The broken lines indicated with $h$ represent the height of the measuring point $i$ from the baseline. The difference between $H_i$ and $h_i$ is the pressure head at the point $i$.

水が著しく遅滞していたと考えられる．Fig. 5c にも現れているが，圃場 A の用水路側（Fig. 6b）では，疎水材下端の全水頭（$H_3$）が，疎水材上端の値（$H_2$）より一時的に 10 cm 程度高くなった．疎水材は飽和しており，上方への水の逆流が発生していたと解釈することもできなくはないが，上層の水位低下時も，しばらく同じ状況が続いていることを考えると，これら 2 点の測定位置の若干の違いによる 2 次元的な圧力分布の不均一か，急激な水の浸入による空気の封じ込めにより過大な圧力が疎水材下端に一時的に発生したものでないかと考えられる．圃場 B の用水路側（Fig. 6c）では，全層が飽和し，排水路水位の上昇に相当する分，全水頭分布は全層で増大している．10 月 6 日より，疎水材層の水頭損失の割合がやや小さくなったが，この層が水の流下を律速しているという傾向は変わらない．このように，排水路水位の上昇の影響が，圃場内の排水に及んでいる場合には，水の流れが複雑であり，場所によっては逆流も考慮する必要がある．そのため，最大暗渠排水量を確認するうえでは有効なイベントと言えるが，排水が不良な場合の通水阻害要因を全水頭分布から特定するには, 必ずしも向いていないと考えられる．

### 3.2 疎水材の劣化状況と通水性能

調査時の疎水材層，およびもみがら疎水材上層の劣化状態を Table 1 に示した．疎水材上端の深さは，地表から 24 ～ 40 cm あり，特に最も深くなっていた圃場 B の用水路側では，補助暗渠に充填したもみがらが，本暗渠の疎水材とつながっていなかった．また，施工時の渠溝幅は 15 cm あるが，各点の渠溝上部では渠溝が縮小しており，特に圃場 B の用水路側では 5 cm まで縮小していた．疎水材上端の深さは，数センチの違いにより浸透能が桁違いに変わることが指摘されている（吉田 · 足立, 2005）．しかし，補助暗渠が十分な深さに施工されている場合には，この影響は緩和される．しかし，この地点（圃場 B の用水路側）では，疎水材の上端位置が深すぎて，しかも狭小になっていることから，疎水材上端付近で通水阻害が発生すると考えられた．

もみがら疎水材の腐敗は，圃場 B の用水路側，圃場 A の排水路側で進んでおり，圃場 A の用水路側では両地点より軽度であった．2 % の水酸化ナトリウムを用いた分解損失率の測定値（$DI_{2\%}$）を，(3) 式を用いて 10 % の水酸化ナトリウムに浸漬した場合の値（$DI_{10\%}$）に換算すると，60 ～ 76 % となる．同市内での吉田ら（2005）の調査における施工後 10 年経過した圃場の疎水材もみがらの分解損失率（$DI_{10\%}$）の範囲は，40 ～ 75 % であったので，施工後ほぼ水田単作を続けていたわりには，腐敗が進んでいると考えられる．

もみがらへの土の混入は，圃場 A の排水路側で 590 % と非常に高かったが，圃場 A，B の用水路側では，それぞれ 147，202 % と圃場 A の排水路側より低かった．もみがら疎水材層の乾燥密度は，50 ～ 200 kg m$^{-3}$ 程度であること（遠藤ら, 1987; 清野ら, 1994）を考えると，もみがらの重量の 5 ～ 10 倍以上の土の混入（すなわち，泥土混入率 500 % ～ 1000 % 以上）があると，疎水材層の密度は土壌に近づき，疎水材層としての通水機能を十分に果たせなくなると考えられる．Fig. 7 は，もみがら疎水材の泥土混入率と透水係数の関係に関する永石（1980）の試験結果を図化したものである．泥土混入率が 100 % 以上のサンプルは限られてはいるが，Table 1 に示した泥土混入率（147 ～ 590 %）におけるもみがら疎水材の透水係数は，0.1 ～ 10 m d$^{-1}$ のオーダーである．暗渠排水量が，例えば 2 mm h$^{-1}$ のとき，調査圃場のように 7 m 間隔で暗渠が埋設され，疎水材の幅が 8.5 cm であったとすると，疎水材を通過する平均フラックスは，約 230

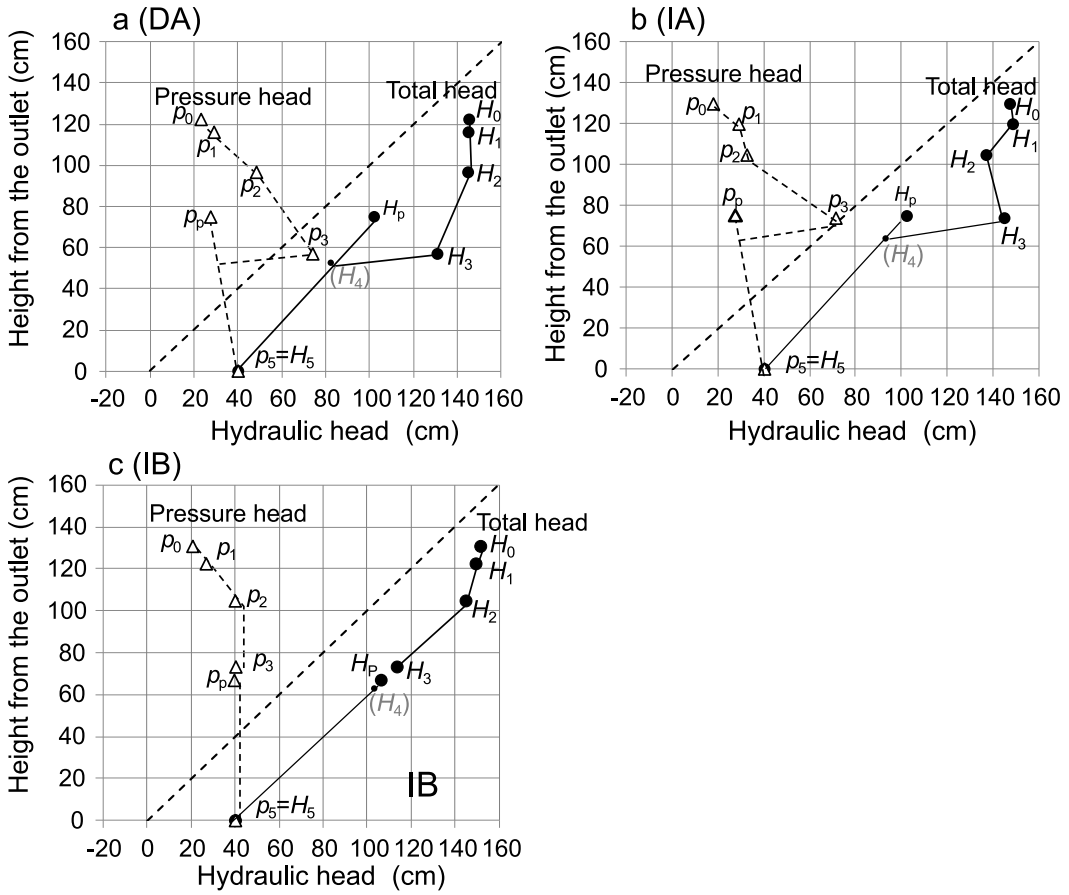



**Fig. 6** 圧力水頭および全水頭の分布（2019 年 10 月 12 日 22 : 00）．a：圃場 A の排水路側，b：圃場 A の用水路側，c：圃場 B の用水路側．
Distribution of water pressure head and total water head (22 : 00 6 Oct 2019).

**Table 1** もみがら疎水材層の劣化状況試験結果．
Deterioration status of backfilled trench and husk filler.

| 位 置<br>Location | 疎水材上端の深さ／上部での渠溝幅<br>Depth / width of husk filler<br>（cm） | 泥土混入率<br>FSC<br>（%） | アルカリ分解損失率<br>$DI_{2\%}$<br>（%） |
|---|---|---|---|
| DA: Drainage canal side of Field A | 30/8.5 | 590 | 57 |
| IA: Irrigation canal side of Field A | 24/7.5 | 147 | 46 |
| IB: Irrigation canal side of Field B | 40/5 | 202 | 60 |

mm $h^{-1}$ すなわち，5.5 m $d^{-1}$ となる．圃場Aの排水路側の泥土混入率の実測値から考えると，疎水材層の通水性はこれより小さくなると予想されるが，実際の水頭分布（Fig. 4a）では，むしろ疎水材層の動水勾配は 1 より小さくなっているにもかかわらず，圃場全体では最大 2 mm $h^{-1}$ の排水が観測されている．このような矛盾が生じる理由としては，泥土混入率と透水係数の関係に大きな幅があること（Fig. 7）と，観測点での降下フラックスが，圃場全体の平均を中心として大きくばらついている可能性があることが挙げられる．現場において不かく乱状態でのもみがらの透水係数を測定する方法が確立されれば，圧力水頭の計測によりその場所の水フラックスを正確に算定できるが，現時点で有効な方法はない．吉田ら（2005）によれば，泥土混入率は，疎水材の上部と吸水管周辺部（疎水材層下端）で高くなる傾向があることがわかっており，上層での泥土の混入が多い圃場 A の排水路側については，下端においても泥土の堆積が多いことが予想される．吸水管近傍での水頭損失が大きいのは，吸水管周囲の顕著な泥土混入が原因となっている可能性が高い．

圃場 A の用水路側については，泥土の混入が少ない（Table 1）が，全水頭勾配（Fig. 4b）は，圃場 A の排水路

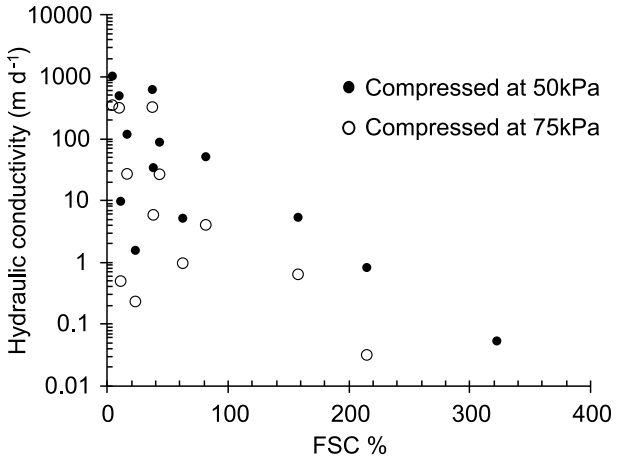



**Fig. 7** もみがら疎水材の泥土混入率と飽和透水係数の関係（永石（1980）の表 2 のデータを図化したもの）.
Relationship between FSC and hydraulic conductivity of filler rice husk (from Table 2 of Nagaishi 1980).

側より小さくなっており，この点では整合している．圃場 B の用水路側については，全水頭分布（Fig. 4c）は，疎水材層で大きな通水抵抗が発生していることを示しているが，泥土混入率は高くない（Table 1）．疎水材層上端の深さが 40 cm と非常に深く，しかも幅が顕著に縮小していたことから，疎水材層上部に設置したテンシオメータが，疎水材の充填状態が悪いところに設置されていた可能性も完全には否定できない．センサーの設置は，検土杖で下穴を穿孔して，そこにテンシオメータを挿すことにより行っている．疎水材層下端への設置では, 検土杖が吸水管に当たったのを確認して，そこに設置するため，確実に疎水材の内部に設置ができる．しかし，疎水材上部については，吸水管の直上に設置する以外に疎水材の正確な位置を確認する方法がない，そのため，渠溝が完全に鉛直ではない場合や，上部が非常に狭くなっている場合には，テンシオメータの先端が，疎水材層から少しずれてしまう可能性もある．この場合，$H_2$ は耕盤下端付近の全水頭という意味になり，疎水材層での水頭損失を過大評価することになる．いずれにしても，疎水材上部の圧力水頭が高くなり，疎水材層の全水頭勾配が相対的に大きくなった場合には，疎水材の透水性か，疎水材上部の渠溝の状態に問題があるため，この部分の改修か，補助暗渠を通常より深く施工するなどの対策が有効であると判断できる．

### 3.3 暗渠各部の通水抵抗

Nishida et al.（2020）は，作土から補助暗渠や疎水材，吸水管を経由して排水路に流出する水の通水経路を，一次元的にとらえ，各区間の通水抵抗による排水機能の定量化を試みた．本報でも，同様な方法を用いて，通水性の定量化を試行した．ただし，適用に際しては，事前に検討すべき課題がある．一つ目は，鉛直方向の各層の流量には違いはない（各部での貯留水量の時間変化はない）とする仮定である．二つ目は，圃場内の位置による暗渠への浸入速度の違いは考慮せず，各層での流量は，圃場全体からの暗渠排水量を均等に配分したものと仮定する点である．

一つ目の仮定は，各部が完全に飽和していれば確実に成立する．しかし，不飽和部がある場合には，（鉛直）位置により流量に違いがないかどうかを確認する必要がある．ここでは，2019 年 10 月 6 日 ～ 7 日の全水頭分布（Fig. 3b ～ d）について考える．圃場 A の排水路側（Fig. 3b）では，Fig. 4a で示している時刻（15 : 40）前後で，全層が飽和となっている．一方，圃場 A の用水路側（Fig. 4b）では，疎水材上端の全水頭（$H_2$）が $h_2$ とほぼ同じ値，すなわち大気圧になっている．疎水材の空気侵入圧は限りなくゼロに近いため，空気の侵入が進んでも，テンシオメータの指示値はゼロのままとなる．つまり，この状態は，疎水材上部が不飽和状態になっていることを意味している．また，圃場 B の用水路側では，測定点での圧力水頭は，全て正圧であるが，疎水材下端の圧力水頭が，10 cm に満たないことから, これより上部で不飽和になっている可能性がある．疎水材下端より上 20 cm の層は，グライ層であり，暗渠流出に寄与する粗大な間隙は，疎水材部分を除けば極めて少ない．同地域の粘土質転換畑での測定例（足立ら, 1998）では，疎水材部分も含めた土層の短期間の排水に関与する間隙率は，乾燥が最も下層まで及んだ時に 4 % 程度，通常は 2 % 以下である．圃場 A の用水路側では，疎水材下端の全水頭 $H_3$ は 10 月 6 日の 16 : 00 からの 14 時間に 14 cm 低下した．するとこの間に排水される水量は，上記の間隙率を用いると 2.8 mm ～ 5.6 mm となるので，時間当たりに換算すると 0.2 ～ 0.4 mm $h^{-1}$ である．一方，この期間の暗渠排水量は, 0.6 mm $h^{-1}$ ～ 1.2 mm $h^{-1}$ であるため，下層土に排水可能な間隙がある場合には，この貯留水の排水量は無視できない．圃場 A の用水路側の通水抵抗を求める場合には，この点を考慮する必要がある．

圃場 B の用水路側では，前述の通り疎水材層の中間で不飽和になっている可能性があるが, $H_3$ と $H_2$ は, 16 : 00 以降同じような正圧値を維持していることから，疎水材層への流出入はほぼ均衡していると考えられる．そのため，不飽和になっていたとしても，位置によるフラックスの違いは考慮する必要はないと考えられる．

二つ目の仮定について，その妥当性を検証するためには各部の流量を個々に求める必要がある．しかし，3. 2 で述べた通り，これは非常に困難である．一方で，排水不良個所は，圃場内のある部分に偏って分布することが多いため，その場所がどうなっているのかを明らかにしたいことは多い．そのため，圃場全体の平均である暗渠排水量を用いるこのアプローチには一定の正当性が認められるとここでは考えることにする．

なお，Nishida et al.（2020）では，作土を水平方向に流れて本暗渠に至る区間の通水抵抗の経時変化も定量するために，本暗渠の中間（最遠点）における作土下端の水位変化を計測しているが，本研究では，暗渠直上部分

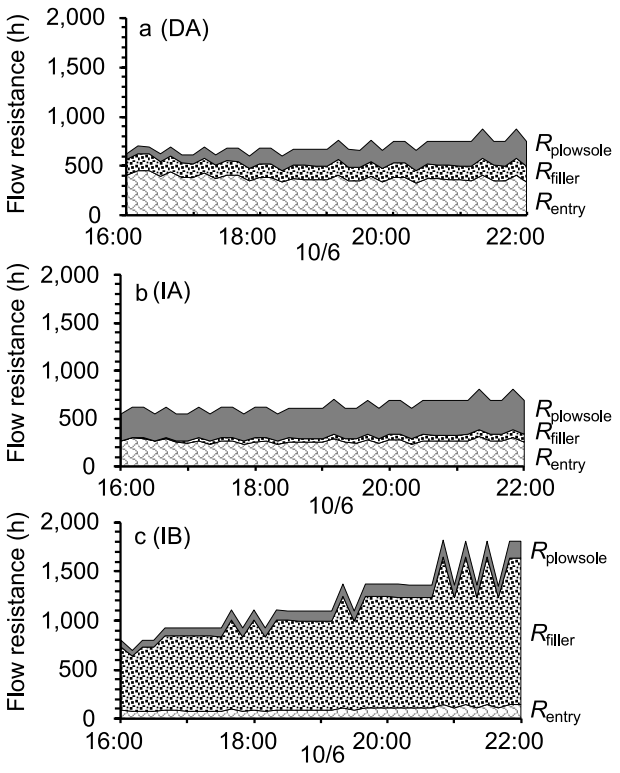



**Fig. 8** 通水抵抗の経時変化（2019 年 10 月 6 日）．a：圃場 A の排水路側，b：圃場 A の用水路側，c：圃場 B の用水路側．
Distribution of flow resistance (6 Oct 2019).

の鉛直水圧分布のみの測定であるため，作土の水平方向の流れについては言及しない．

通水抵抗は，耕盤（作土下端から疎水材上端）$R_{plowsole}$，疎水材内部 $R_{filler}$，吸水管周囲から吸水管内への浸入部 $R_{entry}$ の 3 つの区間について次式により求めた．

$$R_{plowsole} = (H_0 - H_2)/Q \quad (4)$$

$$R_{filler} = (H_2 - H_3)/Q \quad (5)$$

$$R_{entry} = (H_3 - H_4)/Q \quad (6)$$

ただし，$H_0$，$H_2$，$H_3$，$H_4$ は Fig. 2 に示した各位置での全水頭（cm），$Q$ は当該暗渠の出口で観測される排水量（cm h$^{-1}$）を表す．吸水管が満水となるときには，吸水管内の全水頭 $H_4$ は，その位置での位置水頭 $h_4$ に圧力水頭 $p_4$ を加えた値となるが，満水となっていない場合には，位置水頭 $h_4$ に等しい．満水時の管内圧力については，複数ある吸水渠の各区間での集水量が，圃場全体で均一であると仮定すれば，排水口での水圧から理論的に計算することは可能である．しかし，本研究では，非満水時のデータのみについて通水抵抗の算出を行った．すなわち，$H_4 = h_4$ となるときを対象とした．（4）～（6）式で明らかなように，通水抵抗の次元は，時間となり，単位は h で表す．また，定義より，通水抵抗の絶対値は暗渠排水量に反比例し，それぞれの抵抗値の比は，全水頭損失の比となる．そのため，通水抵抗値は，暗渠排水量の多少と全水頭損失箇所という二つの情報を併せ持つ量となっている．

Fig. 8a ～ 8c は，2019 年 10 月 6 日の通常の降雨後に暗渠からの排水が増加した時間帯の各通水抵抗の経時変化を示したものである．この時には，吸水管内は満水とならなかった．経路全体の抵抗値（直列抵抗となるため，3 つの区間の抵抗の和となる）がわかるように，積み上げグラフで表した．測定を行った 3 地点の通水抵抗を 3 つの区間に分けると，その大勢を占めていたのは，圃場 A の排水路側では，吸水管周囲部の抵抗 $R_{entry}$，圃場 A の用水路側では，耕盤層の抵抗 $R_{plowsole}$，圃場 B の用水路側では，疎水材層の抵抗 $R_{filler}$ であった．特に，圃場 B の疎水材層の抵抗は，値も他の 2 地点より大きく，排水機能に少なからず影響を及ぼしていると考えられた．

場所によらず，$R_{entry}$ は時間変化がほとんどないが，$R_{plowsole}$ と $R_{filler}$ は，時間の経過とともに増加する傾向がみられた．通水抵抗が増加する要因としては，その区間の飽和度の低下がまず考えられる．圃場 A の排水路側では，耕盤が 18 : 00 頃にはすでに不飽和になっており，$R_{plowsole}$ が増加する傾向にあることを説明できる．また，圃場 B の用水路側では，$R_{filler}$ が顕著に増加する傾向にある．これも，疎水材の下端と上端の間に不飽和層があると考えれば，この層のフラックスの減少が通水抵抗の増加につながっていると説明することができる．このように，通水抵抗の値が変化する場合には，どのタイミングの値を通水性能の評価に用いるべきかを定める必要がある．Nishida et al.（2020）は，各降雨イベントでの通水抵抗の最小値が，最も飽和に近い状態での抵抗を反映し，唯一性のある値であると考えた．そこで，この通水抵抗の最小値を Table 2 にまとめた．これらの特徴としては，吸水管近傍の通水抵抗が，圃場 A の排水路側と用水路側で 200 h を超えた値になっている点，疎水材より上部の通水抵抗が圃場 A の用水路側で 200 h を超えている点，疎水材の通水抵抗が圃場 B の用水路側で 500 h を超えている点が挙げられる．なお，本節の冒頭で述べた通り，圃場 A の用水路側では，流量が上層と下層で異なっており，その差は最大で 50 % くらいになりうる．この場合，$R_{plowsole}$ や $R_{filler}$ を計算する際の $Q$ が半分になるとすると，通水抵抗値は最大で 2 倍になる．

Nishida et al.（2020）の粘土質転換畑（もみがら疎水材，ポリエチレン吸水管）での測定では，本研究の $R_{plowsole}$ と $R_{filler}$ の和に相当する疎水材層に耕盤を加えた層の通水抵抗のレンジは，16 ～ 110 h であり，また，本研究の $R_{entry}$ に対応する吸水管周囲での通水抵抗のレンジは，17 ～ 125 h であった．この圃場の暗渠排水量は，最大で 3.4 mm h$^{-1}$ が観測されており，今回の調査圃場の最大暗渠排水量（圃場 A が 2.4 mm h$^{-1}$，圃場 B が 1.8 mm

**Table 2** 排水経路上の通水抵抗の計算結果.
Evaluated flow resistance of water pathway.

| 位 置 Location | 区 間 Section | 通水抵抗 Resistance ($h$) |
|---|---|---|
| DA: Drainage canal side of Field A | $R_{\mathrm{plowsole}}$ | 57 |
| | $R_{\mathrm{filler}}$ | 123 |
| | $R_{\mathrm{entry}}$ | 330 |
| IA: Irrigation canal side of Field A | $R_{\mathrm{plowsole}}$ | 275 |
| | $R_{\mathrm{filler}}$ | $< 1$ |
| | $R_{\mathrm{entry}}$ | 232 |
| IB: Irrigation canal side of Field B | $R_{\mathrm{plowsole}}$ | 61 |
| | $R_{\mathrm{filler}}$ | 564 |
| | $R_{\mathrm{entry}}$ | 70 |

$\mathrm{h}^{-1}$）に比べると高い排水能力が維持されている．今回の調査圃場の暗渠排水能力は，圃場全体の平均では，転換畑の排水に必要な目安と考えられる 2 mm $\mathrm{h}^{-1}$ に近い値であったが，通水抵抗が大きくなっている層のある個所が複数みられることから，排水能力が低下した吸水渠区間が各所に分布していると考えられる．補助暗渠の施工を行う前には，両圃場の排水性は，極めて悪かったとの耕作者の証言があり，補助暗渠施工前は，疎水材より上部の区間の通水抵抗も大きかったと考えられる．しかし，この区間の通水性が，高密度な補助暗渠の施工により改善されたことで，次に疎水材層の通水性能の劣化が，排水能力を律速するようになったものと考えられる．

### 3.4 吸水管への浸入抵抗

吸水管近傍の通水抵抗が，全体の排水性を左右するのは，吸水管以降の排水容量に余裕があり，かつ作土から疎水材への水の流入がスムーズな場合である．吸水管内が満水ではないにもかかわらず，疎水材内の水位が疎水材上端まで達するような場合には，吸水管への浸入部分の抵抗を減らすことで，システム全体の排水能力は向上する．しかし，すでに施工された暗渠の吸水管周囲の流動抵抗を改善するのは難しく，むしろこの部分の抵抗が年数とともに高まらないようにする設計が求められる．

吸水管近傍での水の流れの抵抗は，吸水管の周りの被覆材（envelope）における半径方向の流れの抵抗（$W_{\mathrm{r}}$: resistance of radial flow）と，吸水管への浸入部分が，吸水管全周ではないことによる抵抗（$W_{\mathrm{e}}$: entrance resistance）の和と考える解析が行われている（FAO, 2005）．吸水管中心から半径方向に $r$ 離れた円周上から吸水管の外殻までの間の水頭損失は，

$$h_{\mathrm{r}} = \frac{qL}{2\pi K} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \tag{7}$$

と表される．ここで，$qL$ は単位距離の吸水管当たりの集水量（$\mathrm{m^2 d^{-1}}$），$K$ は被覆材（被覆がない場合には下層土）の透水係数（$\mathrm{m\ d^{-1}}$），$r_0$ は吸水管の半径である．この区間での抵抗 $W_{\mathrm{r}}$ は，

$$h_{\mathrm{r}} = qLW_{\mathrm{r}} \tag{8}$$

で定義されるので，

$$W_{\mathrm{r}} = \frac{1}{2\pi K} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \tag{9}$$

で与えられる．右辺の透水係数を除いた部分を $\alpha_{\mathrm{r}}$ と置いて，

$$W_{\mathrm{r}} = \frac{\alpha_{\mathrm{r}}}{K} \tag{10}$$

のように表すと，$\alpha_{\mathrm{r}}$ は，流れの「幾何的条件」（この場合には radial flow）が抵抗に及ぼす影響を表す無次元のパラメータとなる．吸水管への浸入に関わる追加の抵抗がある場合には，$r$ 離れた円周上から吸水管内部までの全抵抗 $W_{\mathrm{ap}}$（ap は approach の略）は，

$$W_{\mathrm{ap}} = W_{\mathrm{r}} + W_{\mathrm{e}} \tag{11}$$

のように $W_{\mathrm{r}}$ に浸入抵抗 $W_{\mathrm{e}}$ を加算することで考慮できるが，この効果を，通水距離の増大によるものと考え，幾何的条件を表すパラメータ $\alpha_{\mathrm{e}}$ により次のように表す．

$$W_{\mathrm{ap}} = W_{\mathrm{r}} + W_{\mathrm{e}} = \frac{\alpha_{\mathrm{r}} + \alpha_{\mathrm{e}}}{K} \tag{12}$$

このように定義された $\alpha_{\mathrm{e}}$ の値は，各種吸水管素材に対して実験的に求められており，土管およびコンクリート管で 1.0 ～ 3.0，プラスチックコルゲート管では 0.3 ～ 0.6 との報告がある（Dierickx, 1993）．本研究において観測された最大暗渠排水量は，10 分間で 2 $\mathrm{m^3}$ であり，これを暗渠の全長で除して，単位吸水管当たりの流入量 $qL$ を求めると，0.5 $\mathrm{m^2 d^{-1}}$ となる．吸水管の外径が 8 cm あり，その外側を 8 cm 厚の疎水材が円筒状に覆っていたとした場合，$\alpha_{\mathrm{r}}$ は（9），（10）式より 0.11 と計算される．もみがら疎水材の透水係数は，測定時の圧縮強度の影響を受けるが，0.5 ～ 1.0 kPa で圧縮された疎水材もみがらの透水係数の最低値は，新品で 100 $\mathrm{m\ d^{-1}}$，施工後年数が経過したものでは，0.1 ～ 10 $\mathrm{m\ d^{-1}}$ のオーダーである（永石, 1977b; 永石, 1980; 橋本ら, 1985; 清野ら, 1994）．例えば，疎水材の透水係数を，1 $\mathrm{m\ d^{-1}}$（泥土の堆積が進んでいる場合）と仮定すると，吸水管の周囲 4 cm 厚部分の通過による水頭損失 $h_{\mathrm{r}}$ は 5 cm にしかならない．しかし，ここに浸入抵抗の $\alpha_{\mathrm{e}}$ を 1.0（土管の場合の最小値）として加えると，$h_{\mathrm{r}}$ は 55 cm となり，圃場 A の排水路側での吸水管浸入部での水頭損失に近い値となる．本研究で対象としている水田の暗渠では，FAO（2005）で前提としているような下層の透水が良い場合に比べ，吸水管周囲の通水可能部が一層制約されていることを考える

と，疎水材の透水係数が低下している場合には，この部分の水頭損失が，暗渠全体の排水性に影響することは十分に起こりうる．しかし，管周辺部の疎水材の劣化が進んでいるときには，その他の部分の通水性も全体的に低下していることが多いと考えられる．そのため，システム全体として管浸入部が排水を律速するケースが多いかどうかは，今後の同種の調査の結果により結論付けるべきである．

### 3.5 暗渠の機能診断への応用

暗渠の機能診断は，1）必要な排水能力が今後どのくらいの期間維持されうるか，2）すでに機能が低下しているときに，どのような機能回復措置が可能か，といった点について判断するために行うことが想定される．現況が排水に支障がないかを最初に診断した上で，支障がある場合や機能低下が始まっていると考えられる場合には，その主たる原因を明らかにし，その結果から採りうる対策を提示するのが基本的な機能診断の流れとなる．暗渠の排水機能の現況は，作土に滞水が生じるくらいの比較的大きな降雨イベント後の暗渠排水量の計測による方法が最も直接的である．暗渠の計画排水量は，20 ～ 30 mm $d^{-1}$ が標準とされており（農林水産省, 2017），ピーク排水量で見たときには，施工後年数が経過している場合でも 2 ～ 3 mm $h^{-1}$ 程度が期待される．大きな降雨の際には，雨量の全てを暗渠から速やかに排出する能力は必要ではなく，地表排水が終了したときに作土に残った過剰な水を排除することが暗渠の主要な役割であるので，その容水量が 1 日程度で排除できれば，圃場全体の平均的な排水能力には問題がないと考えるべきであろう．

最大暗渠排水量が，この条件を満たしていない場合には，全体的に暗渠の排水機能の低下が進んでいると考えられるので，圃場内の排水路側 · 用水路側に複数点を選んで，圧力水頭分布の計測を行い，主要な通水阻害箇所がどの部分なのかを明らかにすることが対策を講じる上で有効と考えられる．

最大暗渠排水量が，この条件を満たしていても，圃場内に局所的に排水が不良な場所が認められる場合には，暗渠が機能していない何らかの原因がその付近にはあるので，追加の調査が必要となる．例えば，今回調査した圃場Ｂでは，圃場全体で 2 mm $h^{-1}$ くらいの最大排水量を観測している．しかし，圧力計測を行った地点近傍は，作土が非常に高水分で，明らかに他の場所と比べ排水性が劣っていた．このような場合には，本論で提示した圧力水頭の計測が原因の特定に有効である．

全水頭分布や通水抵抗による通水不良個所の診断には，全層が飽和するような条件となる降雨イベントのデータが望ましいが，一方で排水路の水位が上昇して排水が抑制されているときのデータは解析に向かない．水頭分布の計測で原因箇所が特定されたら，試掘調査を行うことにより，結果の妥当性を検証することが可能であるが，診断目的であれば，試掘調査をすべての測点で行うのは効率的ではないと考えられる．

圧力水頭計測や試掘調査の結果，耕盤の通水抵抗が大きいと判断された場合には，渠溝上端の深さをコーンペネトロメータなどで確認した上で，十分な深さに補助暗渠を施工することが有効と考えられる．また，疎水材層の通水抵抗が大きい場合には，補助暗渠を浅い深度に施工するのでは排水能力が改善されない可能性があるため，補助暗渠（サブソイラ）をできるだけ深く施工するなどの対策を試してみる必要がある．吸水管への水の浸入が，圃場全体で滞り，それが排水性の低下をもたらしていると考えられる場合には，吸水管周囲の疎水材の交換などのより抜本的な対策が必要となる．吸水管内の動水勾配が，流量から予測される値より著しく大きい場合には，管内への泥土や鉄の酸化物の堆積もしくは著しい不陸などが考えられるので，管の洗浄などを試す必要がある．それでも改善されない場合には，再施工などの抜本的な対策が必要となる．

## 4. まとめと今後の課題 — 水頭分布計測の意義と限界 —

暗渠吸水管の直上での水頭分布の計測により，その位置での吸水管へ向かう水の通水性を左右している層の特定が可能であることがわかった．一方で，この層の位置は，同じもしくは隣接する圃場でも測定点間で大きく異なることも明らかになった．作土から疎水材上端までの区間の通水性は，疎水材の沈下状況に左右され，疎水材上端深さは圃場内で大きく上下することが明らかにされている（吉田 · 足立, 2005）．疎水材層の沈下は，直上部分の土層の通水性だけではなく，補助暗渠との接続の可否に影響する．疎水材の内部の通水性の不良については，泥土の混入が原因と考えられるが，泥土の混入は水が集中的に流れる部分に生じやすい．そのため泥土の混入により通水性が低下すると，通水部分が横に広がり結果的に泥土混入は数十センチの範囲では平均化されると考えられる．しかし，補助暗渠を主体として水が本暗渠に浸入する状況では，補助暗渠と疎水材の接続部近傍に水が集中することは避けられず，泥土の混入も進みやすいと考えられる．測定点が補助暗渠を過去に施工されたことがある位置に近いか離れているかで，測定結果に違いが出ることは避けられないであろう．吸水管近傍の圧力水頭については，土管の場合には測定位置と接手との位置関係で違いが生じる可能性がある．また，管種を問わず，敷設レベルに不陸があると，泥土の沈降堆積に不均一が生じる可能性がある．

以上のように，渠溝の状態や疎水材の深さ，泥土の混入や腐敗などの不均一性については，補助暗渠の設置位置のような人為的な要因や，排水路からの距離などの水理的な条件，さらに必ずしも原因が特定できない確率的な変動などが関係していると考えられる．水頭分布の計測結果により，圃場全体の暗渠機能低下要因を診断する手法を確立するためには，必要な測定点数や測点の配置

方法についてのさらなる知見が求められる．そのためには，吸水管直上部分の通水抵抗の空間変動特性を明らかにしてゆくことが必要である．

## 謝辞

本研究の実施にあたり，耕作者の雲田静男氏には多大なご協力ご支援を賜りました．ここに謝意を表します．

## 引用文献

足立一日出, 吉田修一郎, 高木強治, 伊藤公一 (1998): 重粘土汎用圃場における粗間隙量の変化と暗渠流出水量. 農業土木学会論文集, 198: 169–174.

Dierickx, W. (1993): Research and developments in selecting subsurface drainage materials. Irrigation and Drainage Systems. 6: 291–310.

Ebrahimian, H. and Noory, H. (2015): Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS-2D, Paddy and Water Environment, 13: 477–485.

遠藤健司, 近野雅子, 土開義広, 高橋弘蔵 (1987): 暗渠排水に関する機能低下の実態. 山形県立農業試験場研究報告, 22: 203–222.

FAO (2005): Materials for subsurface land drainage systems, FAO Irrigation and Drainage Paper, 60 Rev. 1., Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ford, H.W. (1979): Characteristics of slimes and ochre in drainage and irrigation systems. Transactions, ASAE 22, 5: 1093–1096.

橋本 均, 木村 清, 大垣昭一 (1985): モミガラ疎水材の耐久性について. 北農, 52(9): 43–51.

Inoue, H. (1993) : Lateral water flow in a clayey agricultural field with cracks. Geoderma, 59: 311–325.

古賀大輔, 甲本達也, 宮本英揮 (2005): HYDRUS 2-D による暗渠排水特性の解析. 平成 17 年度農業土木学会全国大会講演要旨集, pp. 14–143.

丸山利輔 (1966): 暗キョ排水に伴う土壌透水性の変化 — 地下排水に関する研究（1）—. 農業土木学会論文集, 16: 9–13.

村島和男, 荻野芳彦 (1992): 汎用化水田の暗渠排水の機能とその維持管理. 農業土木学会誌, 60(1): 13–18.

長浜謙吾, 手島三二, 冨田正彦, 谷口 浩 (1968): 干拓地水田における暗キョ排水のキ裂発生効果について — 暗キョ排水機能に関する実証的研究（IV）—. 農業土木学会論文集, 26: 23–28.

永石義隆 (1977a): 暗渠疎水材としてのモミガラの利用. 圃場と土壌, 91: 10–13.

永石義隆 (1977b): 暗渠疎水材としてのモミガラの耐用性について. 農業土木学会誌, 45: 387–390.

永石義隆 (1980): 暗渠疎水材としてのモミガラの耐用性について（第 II 報）. 農業土木学会誌, 48: 387–391.

Nishida, K., Harashima, T., Yoshida, S. and Ohno, S. (2020): Water flow resistance along the pathway from the plow layer to the drainage canal via subsurface drainage in a paddy field. Agricultural Water Management, 242: 106391.

農林水産省 (2017): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説, 計画「暗渠排水」.

荻野芳彦, 村島和男 (1985): 暗渠排水計画の理論的検討, 農業土木学会論文集, 119: 1–6.

清野真人, 土開義広, 近野雅子, 瀬野義昭 (1994): 暗渠排水疎水材としてのモミガラの耐久性と暗渠排水機能の維持改善. 山形県農業試験場報告, 28: 99–114.

田渕俊雄 (1966): 粘土質の水田の排水に関する研究（1）粘土質水田の排水に関する問題点と仮説. 18: 7–11.

Tabuchi, T. (1985): Underdrainage of lowland rice fields. Soil Physics and Rice, pp.149–159. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines.

山崎不二夫, 竹中 肇, 田渕俊雄, 安富六郎, 多田 敦 (1966): 児島湾干拓地水田の心土の物理性, 特にそのキ裂について — 心土のキ裂が排水に演ずる役割に関連して —. 農業土木学会論文集, 16: 1–8.

吉田修一郎, 足立一日出 (2005): 水田における暗渠直上の浸透能の空間的変動, 農業土木学会論文集, 235: 35–41.

吉田修一郎, 足立一日出, 関 光夫 (2005):重粘土水田における暗渠疎水材もみがらの劣化と渠溝の空洞化, 農業土木学会論文集, 235: 25–33.

吉田修一郎, 足立一日出, 谷本 岳 (2008): 重粘土水田における暗渠排水能力の季節的・経年的変動. 農業農村工学会論文集, 257: 51–56.

# 要　　旨

施工後年数の経過した水田の暗渠の排水挙動の実相は，未だ十分に解明されておらず，機能診断法も確立されていない．本研究では，吸水管に向かう排水経路上の水頭分布から，通水性を阻害する箇所を特定し，暗渠の排水機能診断に活用する手法の開発を目的とした．粘土質転換畑 2 筆において，本暗渠の吸水渠直上の作土下端，耕盤内，疎水材の上部，疎水材下部（吸水管の外側）において，暗渠排水時の圧力水頭を測定するとともに，暗渠排水量，排水路水位，吸水管内の水圧も同時に測定した．全水頭分布や通水抵抗の算出により，各場所での主要な通水阻害箇所を特定することができた．一方で，その箇所は，一つの圃場内でも大きく異なり，圃場の筆スケールでの診断の在り方には課題を残した．

キーワード：圃場排水，地下排水，機能診断，水頭分布，通水抵抗