

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H02294

研究課題名（和文）水理特性の実相解明に基づく水田の地下排水機能診断手法群の提示

研究課題名（英文）Proposing methods for diagnosing subsurface drainage functions in paddy fields based on the elucidation of the actual conditions of hydraulic characteristics

研究代表者

吉田 修一郎（Yoshida, Shuichiro）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：90355595

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円

研究成果の概要（和文）：水田において、降雨が地表面から地中に侵入し、暗渠の出口から排水されるまでの一連の経路上での全水頭の分布を追跡することにより、現実の地下排水システムが、どのような水理特性の下で機能しているのか、そしてどこで通水阻害を起こしているのかを解明・診断すること目的とした研究を展開した。具体的には、暗渠排水量と吸水渠直上の水圧分布から、暗渠の機能診断を行う一連の手法を提示した。また、暗渠の流量計測を安価に実現する手法や、吸水管への浸入抵抗の評価手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水田への地下排水設備（暗渠）の施工は、わが国に特徴的な技術であり、耕盤上に形成される水位を低下させ、水田の機械化や汎用化を可能とすることを目的に広く設置が進められてきた。近年は、気候変動による豪雨のリスクが懸念され、このような農地の排水技術に関する関心は非常に高くなっている。しかし、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、診断方法や機能回復工法とその科学的な裏付けが必要とされている。本研究は、暗渠の機能診断法に関わる基礎的な知見や具体的な技術を提供することで、社会的ニーズにこたえつつ、技術の理論的側面についても深化を図る内容となっている。

研究成果の概要（英文）：In paddy fields, we conducted research aimed at elucidating and making diagnoses how the actual underground drainage system functions and where the flow inhibition occurs by tracking the distribution of total water heads along the pathway of rainwater from ground surface to the outlet of the subsurface drainage. Based on the measured discharge of subsurface drainage and vertical distribution of the total hydraulic head above the drainage pipe, a series of methods for diagnosing function of subsurface drainage were presented. In addition, we have developed a method for inexpensively measuring the discharge of subsurface drainage and an evaluation method for the percolation resistance from the envelope to the drainpipes.

研究分野：農地環境工学

キーワード：農地排水 機能診断

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

農地への暗渠の施工は、排水性を改善し地下水位の上昇を抑えるために世界的に広く行われている技術である。しかし、耕盤を有する水田への暗渠の施工は、わが国に特徴的な技術であり、耕盤上に形成される水位を低下させ、水田の機械化や汎用化を可能とすることを目的に設置が進められてきた。しかし近年では、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、診断方法やその科学的な裏付けが必要とされている。水田の暗渠排水への理論的なアプローチとしては、暗渠を新設する際の吸水渠や補助暗渠の設置間隔などに物理的な根拠を与えることを目的とした研究が精力的に行われ、重要な成果が得られている。しかし、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。特に、疎水材上部の縮小・沈下・劣化や吸水渠周囲の疎水材の目詰まりが暗渠の排水能力に影響を及ぼすことは複数の研究により確認されているが、これらを考慮しうる暗渠排水の理論的な研究は進んでいない。

地下排水が必要とされるような土の透水性が低い水田では、地表から吸水渠への水の経路は、①作土における水平方向の移動、②耕盤もしくは補助暗渠を経由する疎水材への移動、③疎水材内の移動に分けられる。これらの区間での水移動特性を容易に定量できれば、経路全体での暗渠の排水能力を適切に推定することができる。ところが、ここに挙げた3つの経路は、いずれも不均一かつ時間変化が著しいため、適切な代表スケールの設定や主要な流れの実相をとらえなければ、個々の過程やそれらが一体となった流下経路全体の挙動を評価しきれない。

### 2. 研究の目的

本研究では、降雨が地表面から地中に侵入し暗渠の出口から排水されるまでの一連の経路上での全水頭の分布を追跡することにより、現実の地下排水システムが、どのような水理特性の下で機能しているのか、そしてどこで通水障害を起こしているのかを解明・診断することを第一の目的としている。また、この観測と並行して、従来行われてきたような断面掘削による調査や吸水渠内の観察なども実施し、暗渠の排水機能診断における「侵襲的（圃場を掘削する）調査」の必要性や有効性の有無を提示する。これらを総合して、暗渠の機能診断法の提案を行う。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 圃場における暗渠機能の実態解明と診断技術の開発

土層条件に違いがあり、施工後の年数が異なる地下排水システムが設置された新潟県上越市の水田転換畑において、水圧や排水量の連続観測と、定期的な断面調査を実施した。栽培下の圃場を用いた測定であるため、営農作業に合わせて設置・撤去を繰り返す必要があることと、年次や時季による土層の乾燥条件の違いが関係することを考慮し、観測や調査は調査期間中、断続的に実施した。

##### 3.1.1 新潟県上越市のエダマメ作付け圃場（粘土質水田転換畑）

新潟県上越市三和区の水田転換畑2筆において、暗渠吸水渠直上での各土層（疎水材部分含む）の鉛直水圧分布の連続観測、暗渠排水量の計測（研究協力者からのデータ提供）、排水路水位の計測、暗渠管内（用水路側立ち上がり部）の水位計測、降水量の計測を2019年から2021年にかけて断続的に実施し

た。

各層の水位については、作土層下端での水位、疎水材上部および吸水渠周囲部の水圧、吸水渠内の水圧、排水路水位については、圧力式水位計とテンシオメータを組み合わせて連続的に計測し、大きな流出が見られた降雨イベント時の各層間での全水頭勾配を算定した。

また、疎水材の経年劣化や泥土混入が疎水材層の通水性に及ぼす影響について、2019年と2020年度に採取試料を用いて分析した。2021年4月の補助暗渠施工時に、補助暗渠の渠溝と本暗渠の連絡状況について、複数地点で観察を行った。

### 3.1.2 流下経路全体の水理特性の分析

流下経路上の全水頭勾配から、各区間の水の流れ（特に飽和・不飽和・動水勾配）や滞水の実態を、降雨強度や各区間の通水能力に応じて整理することにより、施工後年数の経過した地下排水システムの水理特性を推定した。

## 3.2 室内モデル大型土層を用いた吸水管への浸入抵抗の定量

観測が容易な実物大の吸水渠模型を製作し、その模型を用いて疎水材層全体の流況を把握し、吸水管近傍における流入抵抗を実測することを試みた。

塩化ビニル版を接着して貼り合わせた大型の容器をL型鋼で補強することにより大型土層を自作した。内部の大きさは180cm×75cm×15cmである。そこに未使用の素焼き土管(75φ×45cm)4本を接続(フランジに差し込んだ状態)して設置・配管し、もみ殻を充填した吸水渠の模型とした。ポンプを用いて、土層の上部から灌水し、定常流を発生させたときの2次元水圧分布を、水圧センサおよびマノメータで計測し、その流況を観測した。

## 3.3 フラップゲートの開口角を用いた暗渠流量の簡易計測装置の開発

市販の管路出口用の逆流防止弁(フラップゲート)と3軸加速度センサ(傾斜センサ)を用いた暗渠流量の簡易計測法を検討した。

逆流防止弁は、中部美化社製FU型、呼び径75mmのフラップゲートを用いた。このゲートは、塩化ビニル管の先端に、可動ヒンジでつながれた弁体(蓋)がついた構造となっており、出口側の水圧が管内の水圧より高い場合には、弁体が閉じて管内への流れを止める働きを持っている。この弁体は、流出量に応じて開口角が変化し、開口角と流量には一定の関係があると考えられる。そこで、この開口角を測定するために、フラップゲートの弁体に3軸加速度センサモジュール(KXR94-2050)を貼り付け、出力をデータロガー(CR1000, Campbell)で記録した。

実験は、実験室内に流量の調整が可能なパイプライン水路を製作して行った。水路は、ポンプによって上部タンクに汲み上げられ、自然圧でパイプ内を流下するようにした。途中で分岐を設け、一部を下部水槽に直接バイパスすることにより、フラップゲートを通過する流量を調整した。フラップゲート側に向かう管路には、電磁流量計を設置し、流量を正確に計測した。また、フラップゲートの弁体の開口部を真横からビデオカメラ(Sony社製)により撮影し、画像解析ソフト(Image J)により解析することにより開口角を求め、傾斜センサの出力と比較した。

## 4. 研究成果

### 4.1 圃場における暗渠機能の実態解明と診断技術の開発

2019年度は、通常の降雨時と台風の際の大雨時の挙動について、以下のような分析を行った。図2の調査地点 DA と IB における通常降雨の際の水頭分布を比較すると（図）、DA では吸水管上部の土層、疎水材層とも全水頭勾配は1より小さく、水頭損失は吸水管に浸入する部分（3→4間）で生じている。一方、IB では、疎水材内（2→3間）での勾配が1を超えており、疎水材内に通水が不良な個所があることを示唆している。

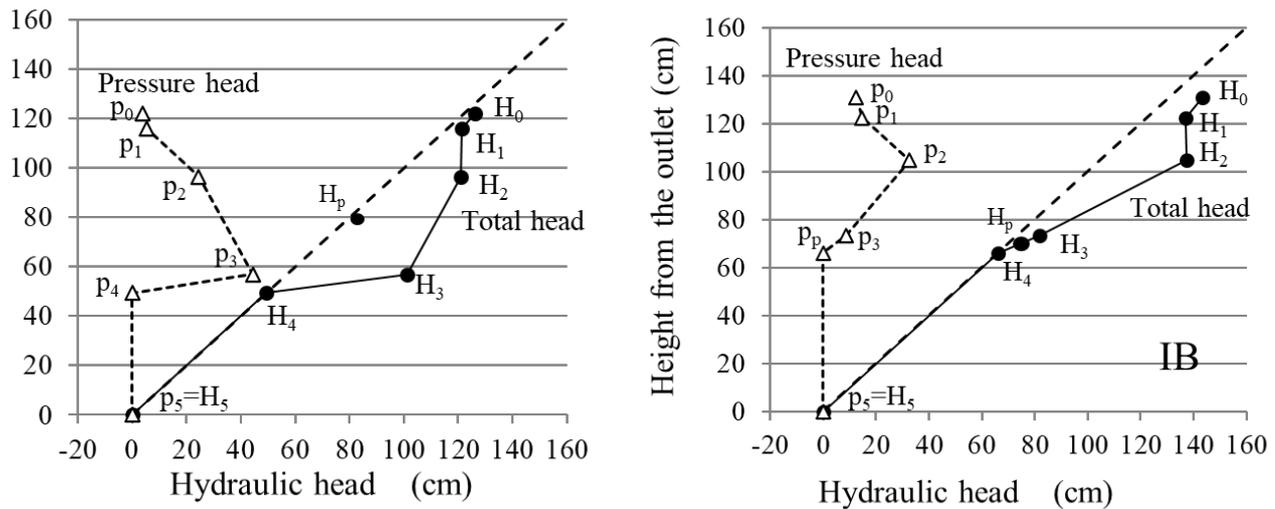


図1 通常降雨時の吸水渠直上の圧力水頭・全水頭分布の例（左：DA, 右:IB）

0 は作土内、1 は耕盤内、2 は疎水材上端、3 は吸水管直上の疎水材、4 は吸水管内

これらの点の断面を観察すると、DA では、吸水管の部分まで掘った時に、湧水が生じたが、その湧水は、吸水管の上部に留まり、速やかに管に流れ込まないことが観察された（図-左）。また、IB では、補助暗渠かと交差する本暗渠の疎水材の上の方に大量のペースト状の粘質土がたまっており、疎水材の下部への水の浸入を妨げている様子が観察された（図-右）。このように、全水頭分布から推定される通水不良個所は、断面調査の結果と整合していた。

2021年度は近接する点で、吸水管直上の圧力水頭値の経時変化を比較した（図7）。その結果、1m 離れているだけで、圧力水頭値には 20 cm 程度の違いがみられた。つまり、疎水材の透水性が悪化している場合には、吸水管の接手の位置に近いかどうかなどにより、吸水管に沿った圧力水頭値には違いがある可能性が示唆された。

### 4.2 室内モデル大型土層を用いた吸水管への浸入抵抗の定量

新品のもみ殻を用いた実験のみ実施したが、管内外の全水頭差は、地表に湛水を維持できる程度の大きな流量とした時には、31.5 cm となり、それより上部の水頭差 6 cm と比べ大きな水頭損失が起こっていることが確認できた。水頭損失が相対的に大きくなる位置は、疎水材の劣化や泥土の混入がどこで進むかにより、変わってくると考えられるが、吸水管周囲に泥土が堆積した場合には、吸水管に浸入する際の抵抗が、暗渠の排水量を規定する箇所になる可能性がある。

今後は劣化したもみ殻を用い、水位を様々に変えたときの通水抵抗を定量して、吸水管への浸入抵抗

についてのデータをさらに蓄積する必要がある。

#### 4.3 フラップゲートの開口角を用いた暗渠流量の簡易計測装置の開発

実験水路の流下距離が短いこともあり、流量の時間変化が大きかった、そのため、フラップゲートの弁体の開口角は大きく増減した。しかし、観測回数を十分に確保すれば、平均値の相対誤差は、小さくなった。例えば、10枚の画像を用いた解析による相対誤差は、流量によらず4%以内に収まった。一方、3軸加速度センサの出力では、流量が小さい場合に、異常値が多く発生し、利用可能な観測データ数が少なくなり相対誤差は大きくなった。流量との関係は、画像でも3軸加速度センサでも、 $0.05\sim 0.4\text{m}^3\text{min}^{-1}$ の範囲で対応が見られたが、3軸加速度センサの出力は、 $0.10\text{m}^3\text{min}^{-1}$ 以下の領域では画像による値より小さく評価された。なお、弁体の開口角は、弁体が円形をしていることから、側面からの撮影により正確に測定することはできない。そのため、3軸加速度センサの計測値の方が、弁体の開口角を表していると考えられた。この点については、ヒンジの回転角の直接測定などによる検証が必要である。また、 $0.4\text{m}^3\text{min}^{-1}$ を超える大流量では、弁体の開口と流量の関係不明確になる。この流量は、管内平均流速にすると、 $4.5\text{cm s}^{-1}$ である。計測の対象となる暗渠の集水面積から想定される最大流速を考え、それが上記の値を超えないサイズのフラップゲートを用いれば、測定の精度が十分確保できると考えられる。さらに現場において、開発した手法の有効性や防水性能、最適な観測時間間隔等を検証する必要がある。

#### 4.4 想定される暗渠の機能診断方法と課題

以上の結果から、施工後年数が経過した暗渠の機能診断については、下記のようなフローが考えられる。1)暗渠排水量の計測による判別： $2\sim 3\text{mm h}^{-1}$ 以上あれば圃場全体では排水機能を果たしていると評価する。この測定は、開発した簡易な流量計測装置で十分に判別可能である。2)暗渠直上部での全水頭分布の測定：分布形状と通水抵抗により通水経路上の通水障害箇所を特定する。局所的な不良の場合はその場所、排水量が小さい場合は、複数点での測定が必要である。3)断面調査：疎水材層の通水性が問題と考えられたときには、各点での疎水材の状態や渠溝幅、疎水材上端深さなどをオーガーによる試料採取や断面掘削により調べる。

なお、水頭分布から推定される通水障害箇所は、同一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が明らかになった。さらに、吸水管への浸入抵抗は、近傍でも場所により違いがみられ、圧力水頭値は、ばらつくことが明らかとなった。また、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。

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必要で、データの蓄積は必要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 樽屋啓之, 吉田修一郎	4. 巻 86(1)
2. 論文標題 圃場内外水利システムの水管理を結ぶ水理ユニットの概念	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 水土の知	6. 最初と最後の頁 3-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishida Kazuhiro, Harashima Takaaki, Yoshida Shuichiro, Ohno Satoshi	4. 巻 242
2. 論文標題 Water flow resistance along the pathway from the plow layer to the drainage canal via subsurface drainage in a paddy field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agricultural Water Management	6. 最初と最後の頁 106391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agwat.2020.106391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉田修一郎, 本多阿&#21911;, 松本宜大, 佐藤太郎, 関川力, 千葉克己	4. 巻 148
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 3-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34467/jssoilphysics.148.0_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉田修一郎
2. 発表標題 暗渠への水の流れの実相とその機能診断法の提案
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshida, S., Tanaka, S., Nishida, K
2. 発表標題 Effect of iron reduction on swelling of submerged paddy soil
3. 学会等名 EGU2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉田修一郎 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 文永堂出版	5. 総ページ数 344
3. 書名 農業水利学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	西田 和弘  (Nishida Kazuhiro)  (90554494)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工 学研究部門・研究員   (82111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------