J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 127, p.19～29 (2014)

論　文
Original Paper

多雪重粘土地帯の地下水位制御システム圃場における不耕起 V 溝直播水稲 – 冬作大麦 – 大豆 2 年 3 作体系下での水・窒素・リン・懸濁物質の流出

鈴木克拓[1]・大野智史[1]・谷本　岳[1,2]

Discharge of water, nitrogen, phosphorus and suspended matter from clayey fields with a water table management system in a region with heavy snowfall during a two-year system of the V-furrow no-till direct seeding rice – winter barley – soybean triple cropping

Katsuhiro SUZUKI[1], Satoshi OHNO[1] and Takeshi TANIMOTO[1,2]

Abstract: To improve the grain self-sufficiency ratio in Japan, application of the rice – winter barley – soybean triple-cropping two-year system to clayey paddy fields is required in a Hokuriku region with heavy snowfall in winter. The clayey soils are hardly drained because of the low hydraulic conductivity; besides, the soils have limited amount of available water. The FOEAS (Farm-oriented enhancing aquatic system) water table management system was developed to overcome these problems. We investigated the discharge of water, nitrogen, phosphorus and suspended matter from FOEAS fields with the crop rotation system. We also evaluated effect of the groundwater level control on the discharge of water, nutrients and suspended matter. Rice was cultivated by the V-furrow no-till direct seeding method. The amount of nitrogen, phosphorus, and suspended matter discharge in the V-furrow no-till direct seeding rice period were same or smaller than in fields planted with the conventional methods including puddling and transplantation. During the crop rotation period, 94 % of water was discharged to the subsurface drains in the free drainage plot (FD). In the groundwater level control plot (GC), 32 % of water was discharged via surface runoff, demonstrating insufficient development of shrinkage cracks in the subsoil, which act as a pathway for the water. During the winter barley period, the concentrations of total nitrogen and nitrate in the discharge tended to be high, particularly in the pre-snow period. The concentrations and the amount of discharge of nitrogen and suspended matter were the lower in GC than in FD, suggesting that denitrification was encouraged, and nitrification and shrinkage crack formation were suppressed in GC. In contrast, in the case of phosphorus, the concentration and the amount of discharge from GC was higher than FD, suggesting reduction condition in the subsurface. During the winter barley period, 70 % – 94 % of total water, nitrogen, phosphorus, and suspended matter discharge occurred in the crop rotation system.

Key Words : water table management system (FOEAS), two-year system of the V-furrow no-till direct seeding rice – winter barley – soybean triple cropping, clayey soil, region with heavy snowfall, nutrient discharge

1. はじめに

わが国のこの 10 年間の供給熱量ベースの食料自給率は 40 % 前後で推移しており，自給率向上のために麦・大豆等の作付けを拡大する取り組みが行われている（農林水産省, 2013a）．平成 24 年には，四麦（小麦，皮麦，裸麦，ビール麦）の 62 %，大豆の 85 % が田に作付けされている（農林水産省, 2013b）．そのため，麦・大豆の自給率の向上には，田を有効活用する輪作体系の確立が求められる．

北陸地方では，平成 23 年の田の耕地利用率が 89 % と全国平均の 92 % に比べて低く（農林水産省, 2013b），水稲単作から脱却し，稲 – 麦 – 大豆の 2 年 3 作体系を導入するための研究が行われている（農研機構, 2011）．この 2 年 3 作体系では，冬作の麦の収穫後に夏作の大豆を栽培するため，麦は世界の品種の中で最も早生であるとされている（岩間, 2004）日本の大麦品種を導入する必要がある．このうち，麦飯や麦茶などに用いられる六条大麦は 84 % が田に作付けされており，北陸地方は国内生産量の 64 % を占める主要な生産地である（農林水産省, 2013c）．しかし，大麦は小麦に比べて湿害に弱いとされている（桐山・田谷, 1975; 石居, 1987）．北陸地方では水田の 3 分の 1 が重粘土壌であり，この地方の強グライ土

[1]NARO Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 1-2-1 Inada, Joetsu 943-0847, Japan. Corresponding author: 鈴木克拓，農研機構 中央農業総合研究センター
[2]Present address: National Institute for Rural Engineering, NARO, 2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba 305-8609, Japan.
2014 年 1 月 17 日受稿　2014 年 6 月 27 日受理

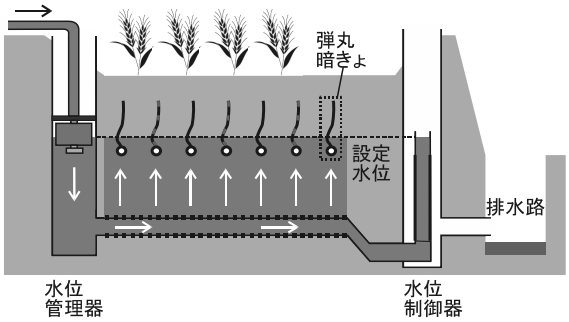


Fig. 1 地下水位制御システム（FOEAS）の概略．矢印は灌漑水の流れる方向を示す．
Outline of the water table management system (FOEAS). The arrows indicate the directions of the irrigation water.

壌水田は全国平均の 17 % を大きく上回る 48 % に達する（野田, 1979）．この土壌はマトリクス部分の不飽和透水係数が低いため，排水不良になりやすい．さらに，冬期には大量の降水がある．営農の点では，麦から大豆，稲から麦への切り替え時期である 6 月中旬や 9 月下旬は梅雨や秋雨に当たるため，排水性の悪い圃場では機械作業が難しい場合がある．このため，十分な排水対策が求められる．同時に，粘土質土壌は易有効水分孔隙が少ないため，乾燥する時期には干ばつになりやすい（土壌物理学会, 2002）．大豆には開花期以降に大量の水が必要であるとされている（有原, 2000）が，この地方では開花期が比較的雨の少ない梅雨明け後の 7 月下旬であることに加え，日本海側特有のフェーン現象により乾燥する場合がある．大麦については，比較的降水の多いわが国であっても，節間伸長期以後の灌水により収量が増加するとされている（長谷川ら, 1956）が，これに相当する 4，5 月の降雨量は少ない．これらのことから，この地域において安定多収の 2 年 3 作体系を確立するためには，圃場は高い排水性と灌漑機能の両方を有することが望ましい．

水田の高度利用を可能にする地下水位制御システム（Farm-oriented enhancing aquatic system, FOEAS）が開発されている（小野寺・藤森, 2005）．これは，圃場に暗きょおよびそれに直交する 1 m 間隔の弾丸暗きょを施工し，排水性を向上させるとともに，給水側には設定水位まで暗きょ管に自動的に給水する水位管理器を，排水側には暗きょ内の水位が設定より高くなったら越流して排水する水位制御器を設けることにより暗きょ内の水位を自動的に制御するもので，弾丸暗きょ等を通じて圃場内の地下水位を作物の生育に好適な状態に保つことが出来るとされている（Fig. 1）．これを導入した圃場において，大豆や小麦が増収する事例が報告されており（若杉・藤森, 2009; 島田, 2011），平成 23 年度末の時点で 17 道県の 7,594 ha に導入されている（農林水産省, 2013a）．

粘土質転換畑では，乾燥が進むことにより，深部まで亀裂が発達する（足立ら, 1997）．このようなマトリクス部分の不飽和透水係数が低い土壌の場合，乾燥にともなう収縮亀裂などの粗大孔隙が土層内の水移動に重要な役割を果たす（Beven and Germann, 1982）．しかし，乾燥する時期の地下水位制御は，下層を湿潤状態にすることにより亀裂の発達を抑制し，水の流出特性を変化させると推察される．これにともない，土壌の酸化還元状態が変わることにより，硝化・脱窒特性や土壌からのリンの溶出特性の変化を介して，窒素やリンの流出に影響を与える可能性がある．また，粘土質転換畑では，懸濁物質の主要な流出経路が下層の亀裂を通じた暗渠流出であることから（鈴木ら, 2005），様々な難溶性環境負荷物質の担体となる懸濁物質（de Jonge et al., 2004）の流出にも影響を与える可能性がある．北陸地方の粘土質転換畑からの養分流出について，鈴木ら（2012）は北陸地方の粘土質転換畑からの養分流出を通年測定し，積雪休閑期における懸濁物質，リンおよび硝酸態窒素の流出量が夏作大豆期に匹敵しうると報告した．しかし，この地方における稲 – 麦 – 大豆 2 年 3 作体系を導入した地下水位制御システム圃場からの水・養分の流出については知見がない．

稲 – 麦 – 大豆 2 年 3 作体系のような土地利用型農業では，経営の安定のために規模拡大が求められるが，そのためには春期の作業競合を回避・軽減するための省力化技術の導入が必要である．愛知県農業総合試験場が開発した水稲不耕起 V 溝直播栽培は，畑状態の作土表面に開口幅 2 cm，深さ 5 cm の V 字型の播種溝を形成し，そこに乾もみを播種するものである（愛知県, 2007; 濱田ら, 2007）．本法は育苗が不要であるため，省力化が図れるだけでなく，作業速度が高く，直播であるが鳥害や倒伏が少ないなどの利点があり，愛知県のみならず，新潟県，石川県，富山県等の北陸地方にも導入が進みつつある．一般に，慣行の水稲栽培における養分流出では，代かき・移植時期の寄与が大きく（高村ら, 1976; 近藤ら, 1993），不耕起もしくは無代かき栽培では懸濁物質や養分の流出が減少するとの報告がされている（太田ら, 2000; 金木ら, 2010）．また，神田ら（2006）は，本栽培法との併用が推奨されている冬季代かきの時期に流域河川水中の全リンおよび懸濁物質濃度が上昇すると報告した．しかし，不耕起 V 溝直播水稲の栽培期間における圃場からの養分流出の実態は明らかになっていない．

本研究は，多雪地帯である北陸地方の粘土質土壌の地下水位制御システム圃場において不耕起 V 溝直播水稲 – 冬作大麦 – 夏作大豆の 2 年 3 作を実施し，窒素，リンおよび懸濁物質の流出実態および地下水位制御がこれらの流出に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

2. 方法

測定は，新潟県上越市の中央農業総合研究センター北陸研究センターに設けた隣接する 2 筆の地下水位制御システム圃場（100 m × 20 m）で行った．土壌は細粒質斑鉄型グライ低地土（clayey, montmorillonitic, mesic typic Epiaquepts）に分類され，作土，下層のいずれも粘土含量が 45 % 以上である．粘土鉱物はスメクタイトを主体とし，イライトおよびカオリナイトを随伴する（中野,

1978）．2009 年の夏作として水稲の均一栽培を行い，稲わら残渣を持ち出した後の 2009 年 10 月にシステムを施工した．圃場の長辺方向に 6.5 m 間隔で深さ 50 cm にポリエチレン製コルゲート管を無勾配で設置し，給水側に水位管理器を，排水側に水位制御器を接続した後，疎水材としてもみ殻を作土直下まで充填した．この暗きょに直交する弾丸暗きょを深さ約 30 cm に 1 m 間隔で施工した．半数の弾丸暗きょのスリット部にはもみ殻を充填し，もみ殻なしと交互に配置した．排水用の周囲明きょは施工せずに表面排水口を設け，水稲入水期間以外は地表面と同じ高さから排水するようにした．隣接圃場との水の流出入を抑えるために，畦畔に遮水シートを埋設した．施工直後の 2009 年から 2010 年にかけての冬は無栽培とした．

2010 年の夏作にシステム施工後の初作として大豆（6 月 9 日 ～ 10 月 12 日）を栽培した．この期間に圃場内 3 か所の鋤床直上の作土（深さ 15 cm）の体積含水率を TDR 式水分計（CS615, Campbell scientific inc.）で測定した．その後，11 月にレーザーレベラーで均平処理した．翌 2011 年夏作の不耕起 V 溝直播水稲（5 月 1 日 ～ 9 月 12 日，以下 V 直水稲），同冬作の大麦（9 月 28 日 ～ 翌年 6 月 18 日）および 2012 年夏作の大豆（6 月 20 日 ～ 10 月 1 日）の 2 年 3 作期間に窒素・リンおよび懸濁物質の流出を測定した．2011 年夏作の V 直水稲期には，早生品種であるハナエチゼン（*Oryza sativa* L.）を栽培した．前作が大豆であったため基肥は施用せず，穂肥として 7 月 20 日に N として 1 ha あたり 30 kg 相当の硫安を施用した．リン，カリウムは施用しなかった．同栽培法の手引き（愛知県, 2007）に従い，本葉 2 葉期に達した 6 月 7 日に入水した．落水は 8 月 25 日で，入水期間は中干しをしなかった．入水期間の余剰水は表面排水口から流出するように水位制御器を設定した．2011 年冬作の大麦期には，北陸地方の主力品種であるファイバースノウ（*Hordeum* L.）を栽培した．基肥を N，P，K としてそれぞれ 1 ha あたり 85 kg，15 kg，29 kg 施用するとともに，追肥として硫安を N として越冬前の 2011 年 11 月 17 日に 50 kg，消雪直後の 2012 年 4 月 9 日に 38 kg，止葉展開期の 5 月 1 日に 19 kg 施用した．2012 年夏作の大豆期には，北陸地方の主力品種であるエンレイ（*Glycine max* (L.) Merr.）を栽培した．施肥は基肥のみで，N，P，K としてそれぞれ 1 ha あたり 16 kg，13 kg，50 kg を播種時に側条施用した．麦および大豆の播種には耕うん同時畝立て播種機（細川, 2008）を用い，播種と同時に前作の稲わらおよび麦わら残渣をすき込んだ．

地下水位制御システム圃場 2 筆のうち，一方では地下水位を制御した．以下，制御区と呼ぶ．制御区では，灌漑による増収効果が認められるとされる時期に地下水位を制御した．すなわち，システム施工後初作の 2010 年の夏作大豆期は 7 月 1 日から 9 月 13 日まで地下水位を 25 cm に設定した．窒素・リンおよび懸濁物質の流出の測定期間である 2011 年の夏作 V 直水稲期は播種後の 5 月 2 日から 6 月 7 日の入水まで鋤床付近の深さ 12 cm に，冬作大麦期は 2012 年 5 月 8 日から収穫まで弾丸暗きょ付近の深さ 30 cm に，2012 年の夏作大豆期は播種から 8 月 30 日までは 30 cm，以後 9 月 14 日までは 20 cm に設定した．他方は，地下水位制御を行わずに，V 直水稲入水期間以外は水位制御器を開放した．すなわち，深さ 50 cm に暗きょを有し，1 m 間隔で弾丸暗きょを施工した圃場と同等になる．以下，開放区と呼ぶ．なお，開放区および制御区における 2011 年夏作 V 直水稲，同冬作大麦および 2012 年夏作大豆の坪刈り収量はそれぞれ 1 m^2 あたり 507 g – 501 g，568 g – 374 g，371 g – 350 g で，このうち冬作大麦は，危険率 5 %（調査点数 3）で制御区の方が有意に低かった．

暗きょ・表面流出水量および V 直水稲期の表面灌漑水量は，電磁流量計（SA50 および SA75，愛知時計電機）を用いて測定した．地下灌漑水量は羽根車式水道メーター（FMDY40V，愛知時計電機）で測定した．水量は圃場面積で割って，ミリメートル単位で表した．また，排水の遅れにともなって鋤床の上に停滞する水の深さ（鋤床上水位）を圃場内の 2 ～ 3 箇所において圧力式水位計（HOBO U20 water level data logger U20-001-04, Onset computer corporation）を用いて測定した．降水量および積雪深は所内の気象観測露場の測定値を用いた．暗きょ排水性に関係する圃場の粗大孔隙率は，2009 年秋のシステム施工直後および圃場を湛水状態にする 2011 年の V 直水稲期の前後に，足立ら（1997）の方法に従い，地下水位を段階的に低下させた時の排水量から，深さ 20 cm から弾丸暗きょの深さ 30 cm までと弾丸暗きょから暗きょまで（深さ 30 ～ 50 cm）の 2 層について求めた．

圃場からの流出水は，降雨流出時には 2 ～ 3 時間，積雪期には 2 週間間隔を目途に採取した．暗きょ流出水は排水側の水位制御器においてポリエチレン製ポンプで吸引し，ポリプロピレン製容器に採取した．表面流出水は表面排水口において採取した．この際，容器内になるべく空気が残らないようにした．採取した流出水試料は直ちに一定量をあらかじめ 105 °C で恒量とした孔径 0.2 μm のメンブレンフィルタでろ過し，後述する方法で懸濁物質濃度を測定するとともに，ろ液（以下「溶存態試料」と呼ぶ）は直ちに凍結した．残りの流出水試料は分析まで 5 °C 以下の暗所で保存した．流出水中の懸濁物質，全窒素，全リンおよび硝酸態窒素濃度を測定した．懸濁物質濃度は，先に述べた，一定量の流出水試料をろ過したメンブレンフィルタを 105 °C で乾燥し，その重量増加をろ過した液量で割って求めた．全窒素および全リン濃度は，流出水試料にアルカリ性ペルオキソ二硫酸カリウム溶液を加えて，オートクレーブで窒素成分を硝酸イオンに，リン成分をリン酸イオンに変換し（細見・須藤, 1983），硝酸イオン濃度を銅・カドミウム還元ナフチルエチレンジアミン法で，リン酸イオン濃度をアスコルビン酸還元モリブデン青法で，オートアナライザー（TRACCS 800，ブランルーベ）を用いて測定した．溶存態試料中の硝酸態窒素濃度もオートアナライザーを用いて測定した．

Table 1 測定期間における流出水量，灌漑水量および降水量．
Amounts of discharged, irrigated and precipitated water during the monitoring period.

水量 (mm)		2011 年 夏作 V 直水稲	2011 年 冬作大麦	2012 年 夏作大豆	測定期間 合計
開放区	暗きょ流出	343	2371	194	2908
	表面流出	160	34	2	195
	表面灌漑	424			424
制御区	暗きょ流出	129	1865	218	2212
	表面流出	423	597	0	1020
	地下灌漑	22	18	90	130
	表面灌漑	294			294
	降水	786	2494	490	3770

V 直水稲期の流出水量には落水等の人為的な流出を含む．

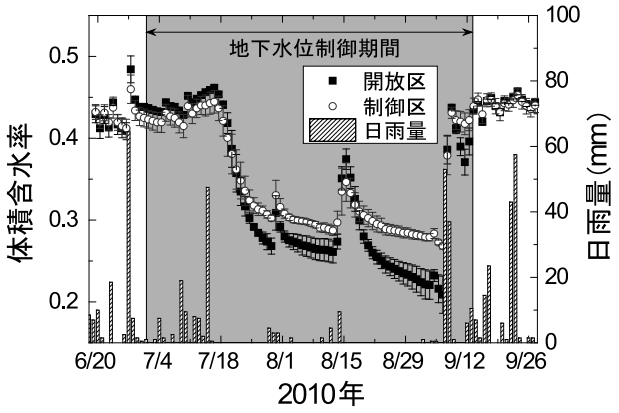


Fig. 2 2010 年夏作大豆期における作土（深さ 15 cm）の体積含水率（左軸）および日雨量（右軸）．エラーバーは標準誤差（$n = 3$）を表す．
Volumetric water contents of the topsoils at 15 cm depth (left axis) and daily rainfall (right axis) during the soybean period in 2010. Error bars indicate the standard error ($n = 3$).

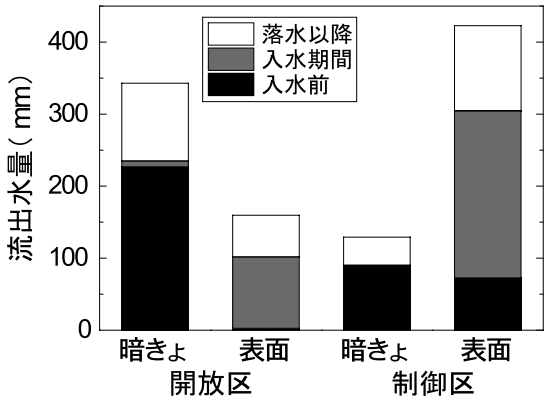


Fig. 3 V 直水稲期における流出水量．
Total discharge of water during the V-furrow no-till direct seeding rice period.

地下水位制御が暗きょ流出水の成分濃度に与える影響については，近接する粘土質転換畑圃場での懸濁物質およびリンの暗きょ流出（鈴木ら, 2005）と同様に，成分濃度が作付け期間だけでなく，個々の降雨イベント内でも大きく変化し，作付け期間や降雨イベントごとの平均値の比較で考察するのは不可能であったため，同じ時刻に両処理区から採取した試料対について，対応のある場合の平均値の差の検定を行った．検定には R 2.15.3（R project core team, 2013）を用いた．暗きょ流出水と表面流出水の比較については，9 試料対での検定が可能であった制御区の乾直水稲期入水前における流出についてのみ行った．表面流出水についての処理区間の濃度差の検定は，開放区における表面流出が少なく，対象となる試料対の数が少なかったため，行わなかった．

成分流出量は，非積雪期については，線形補間した流出水中の成分濃度を流出水量 100 L ごとに割り当てることにより 100 L ごとの成分流出量を算出し，それを積算して求めた．積雪期については，鈴木ら（2012）と同様に各成分の期間平均濃度に流出水量を掛けて求めたが，スミルノフ・グラブス検定において 5 % の危険率で濃度が外れ値とされた試料は平均値の計算から除いた．また，水および成分流出量の計算は作付け期間のみを対象とし，作目切り替え期間は行わなかった．

3. 結果および考察

3.1 水の流出

地下水位制御システム施工後初作の 2010 年夏作大豆期には，開放区と制御区の間で水流出特性に違いはなく，いずれも約 500 mm の流出水の 99 % 以上が暗きょから流出し，鋤床上に停滞水はほとんど生じなかった（鈴木ら, 2011）．測定圃場の南西 3 km に位置する気象庁高田特別地域気象観測所での観測では，この年の 8 月は降水量が平年の 1 割にとどまると同時に，日平均気温は平年を 3 °C 近く上回る少雨・高温の状態であった（気象庁, 2010）．作土下部（深さ約 15 cm）の体積含水率は，制御区が開放区に比べて高く（Fig. 2），特に，乾燥の進んだ 7 月下旬および 8 月下旬から 9 月上旬にかけては 5 % の危険率で有意差があった．このことから，不飽和透水係数が低い粘土質土壌であっても，少なくとも乾燥時には作土下部まで地下水位制御の効果があることが分かった．

Table 1 に窒素，リンおよび懸濁物質の流出を測定した 2011 年夏作 V 直水稲から 2012 年夏作大豆までの各作付け期間における両区の流出水量および灌漑水量を示す．両区とも全流出水量は 3,100 mm 前後で，冬作大麦期にその 4 分の 3 以上が流出した．また，水位制御の有無によって水の流出特性に違いが見られた．以下に，各作付け期間における水流出の特徴を示す．

Fig. 3 に 2011 年夏作 V 直水稲期の時期別流出水量を処理区・経路ごとに示す．2011 年の水稲播種前までには制御区の暗きょ排水性が低下した．入水前の水の流出経路は，開放区では 99 % が暗きょであったのに対し，制御区では 55 % にとどまった．これに対応して，制御区では開放区よりも長時間にわたって鋤床上に水が停滞し

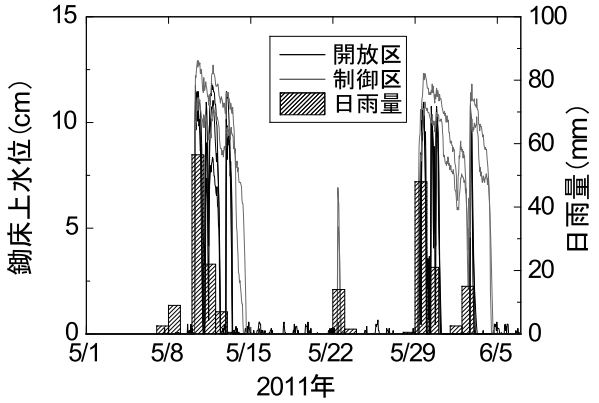


Fig. 4　V 直水稲期入水前における圃場内複数箇所の鋤床上水位（左軸）および日雨量（右軸）.
Perched water depth on the plowsole at each of the measuring points (left axis) and daily rainfall (right axis) during the V-furrow no-till direct seeding rice period before submergence.

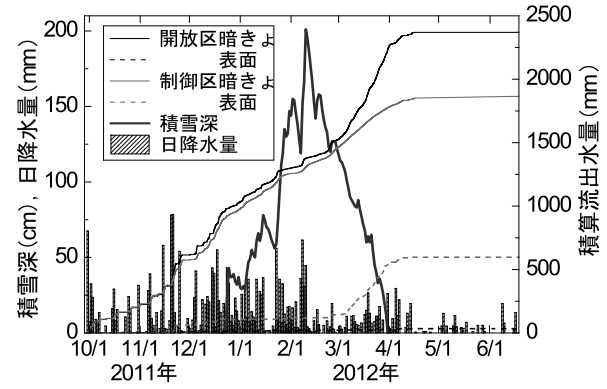


Fig. 5　冬作大麦期における積算流出水量（右軸），積雪深（左軸）および日降水量（左軸）.
Total discharge of water (right axis), snow depth (left axis) and daily precipitation (left axis) during the winter barley period.

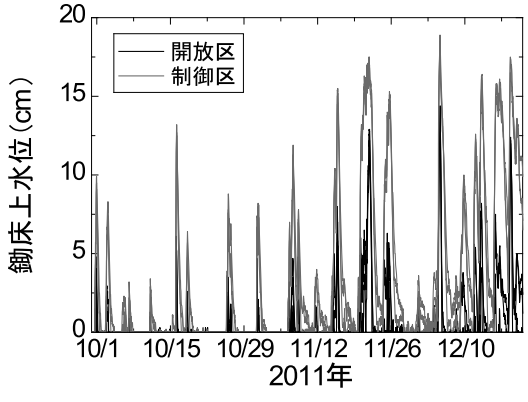


Fig. 6　冬作大麦期積雪前における圃場内複数箇所の鋤床上水位.
Perched water depth on the plowsole at each of the measuring points during the pre-snow winter barley period.

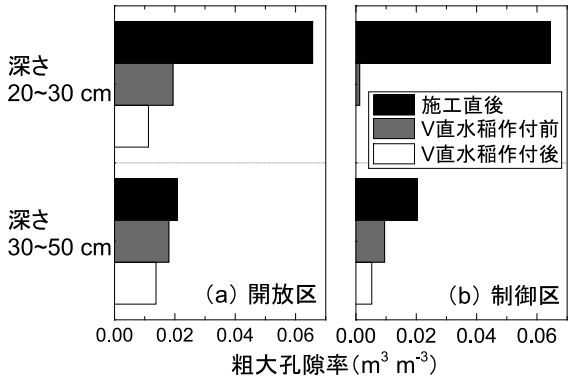


Fig. 7　土層内の粗大孔隙率の推移.
Changes in the macroporosity of the soil layers.

た（Fig. 4）．入水期間における開放区の流出水量は制御区に比べて少なく，開放区の灌漑水量は 424 mm と，制御区の地下灌漑を合わせた 316 mm に比べて多かったことから，開放区では制御区に比べて暗きょ以深への浸透流出が多かったと推測される．落水以降は，制御区では表面流出が卓越したのに対し，開放区では暗きょ流出の方が多く，入水期間を経てもなお制御区に比べて高い暗きょ排水性を維持した．

Fig. 5 に冬作大麦期における両区からの積算流出水量の推移を示す．この期間の流出水量約 2,400 mm の大部分は積雪前と積雪期に流出した．水稲の収穫から麦播種までの間に制御区の暗きょ排水性は改善し，播種から 11 月下旬までは両区とも暗きょ流出がほとんどで，流出水量もほぼ同じであった．しかし，降雨時における制御区のピーク流量は開放区に比べて低く，流出が長時間にわたって継続した．これに対応して，鋤床上水位は制御区の方が高く，継続時間も長かった（Fig. 6）．12 月下旬からの積雪期のうち 2 月までは，処理区間の積算暗きょ流出水量の差は 50 mm 程度のままで推移した．3 月になると，開放区の暗きょ流出流量は融雪量の増加にともない上昇したが，制御区では変化せず，同時期に表面流出が継続的に生じた．このことから，制御区では積雪期に暗きょ排水性が低下し，3 月からの融雪水を暗きょだけでは排水し切れなくなったことがうかがえる．消雪後の 4 月以降は，まとまった降雨が少なく，両区とも流出はほとんど生じなかった．

2012 年の夏作大豆期は，2010 年の施工後初作の夏作大豆期と同様に，両区とも水のほとんどが暗きょから流出した．また，大雨時には両区ともに一時的に鋤床上に停滞水が生じたが，降雨終了後 1 日以内に消失した．

2 年 3 作の全期間では，暗きょ排水性が比較的高く維持された開放区では全流出水量の 94 % が暗きょ流出だったのに対し，制御区では 68 % にとどまった．

Fig. 7 にシステム施工直後および土壌が湿潤状態になる V 直水稲期の前後における土層内の粗大孔隙率を示す．システム施工直後では，深さ 20 cm から弾丸暗きょの深さ 30 cm までは両区ともに 0.06，30 cm から暗きょの深さ 50 cm までは 0.02 であった．しかし，制御区では V 直水稲期前には，深さ 20 ～ 30 cm の粗大孔隙はほとんど消失し，30 ～ 50 cm では半減した．これに対し，開放区では，V 直水稲期後であっても 20 ～ 30 cm では施工直後の 2 割，30 ～ 50 cm では 7 割の粗大孔隙が残存

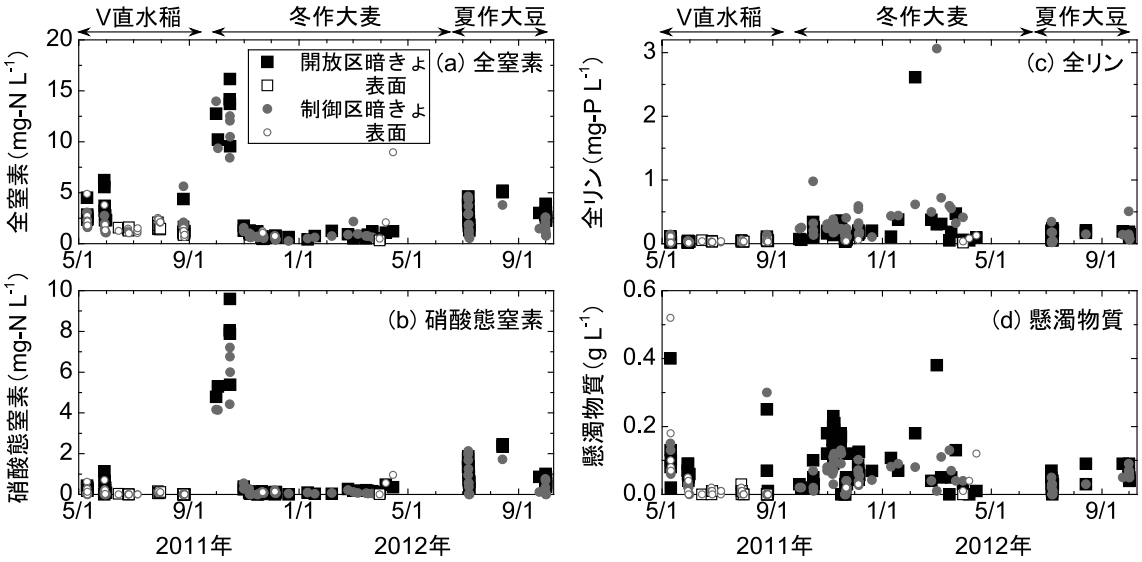


Fig. 8 測定期間における流出水中窒素，リンおよび懸濁物質濃度.
Nitrogen, phosphorus and suspended matter concentrations in the drainage during the monitoring period.

した．足立ら（1997）は，粘土質転換畑では，高温・少雨時に深部まで乾燥が進み，亀裂が生成すると報告しており，丸田（1973）は，グライ土水田の断面内の斑鉄の状態から，作土層より深いところの亀裂は，湛水や代かき作業によって消滅することはないと述べた．また，吉田ら（2008）は，粘土質土壌の水田における暗きょ排水性は暗きょ直上の粗大孔隙と埋め戻し部との導通の状態に大きく左右されると考察した．これらのことから，開放区では夏作大豆期などの乾燥した期間に湿潤状態を経ても安定な粗大孔隙が形成したのに対し，制御区では乾燥した時期に地下水位を設定したため，下層が十分に乾燥せず，安定した構造が発達しなかったために排水経路が限定され，V 直水稲期や冬作大麦期のような湿潤時の暗きょ排水性が低下したと推察される．この影響により，湿害に弱い冬作大麦において，制御区の方が有意に低収になったと考えられる．

3.2 流出水中の成分濃度

Fig. 8 に 2011 年夏作 V 直水稲から 2012 年夏作大豆までの 2 年 3 作期間における流出水中の懸濁物質，全窒素，硝酸態窒素および全リン濃度を示す．硝酸態窒素濃度と全窒素濃度の時期変化は類似し，両者の高い時期はほぼ一致した．V 直水稲期の暗きょ流出水中の全窒素濃度は，入水前は最高 6.2 mg-N L^{-1} であった．入水期間の流出水中濃度は表面で 1.5 ～ 2.5 mg-N L^{-1} と，入水前に比べて低く推移した．8 月 25 日の落水開始直後は暗きょで最高 5.6 mg-N L^{-1} であったものが 2 時間後には 2.1 mg-N L^{-1} まで低下した．硝酸態窒素が流出したが，濃度は入水前の 1.1 mg-N L^{-1} が最高であった．冬作大麦期はこの作付体系の中で最も施肥量が多かった．そのため，全窒素および硝酸態窒素濃度は特に積雪前に高く，10 月中旬の降雨では，試験期間中で最も高い全窒素濃度 16.2 mg-N L^{-1}，硝酸態窒素濃度 9.6 mg-N L^{-1} が開放区の暗きょ流出水において観測された．その後，11 月にかけて濃度は低下し，4 月の消雪まで低く推移した．11 月中旬に行った越冬前追肥の直後の降雨時において，全窒素濃度および硝酸態窒素濃度の顕著な上昇は見られなかった．制御区の表面流出水中の濃度は，その後 4 月中旬にかけて上昇した．夏作大豆期において濃度が高かったのは 8 月中旬の降雨で，暗きょ流出水中の最高濃度は全窒素が 5.2 mg-N L^{-1}，硝酸態窒素が 2.5 mg-N L^{-1} であった．2 年 3 作期間を通じて，暗きょ流出水中の硝酸態窒素濃度は平均で全窒素の 2 割程度であった．

全リン濃度は，暗きょ流出水では開放区の 98 %，制御区の 90 % の試料が 0.5 mg-P L^{-1} 以下であった．リン無施用の V 直水稲期における暗きょ流出水中の濃度は他の作付け期間に比べて低く，高々 0.15 mg-P L^{-1} 程度であった．これは，代かき田植時期の田面水の全リン濃度が 10 ～ 30 mg-P L^{-1} に達する例（田渕ら, 1979; 笹田ら, 2004）に比べて低く，無代かき水稲栽培における田面水中全リン濃度（金木ら, 2010）と同等であった．冬作大麦期および夏作大豆期には基肥としてリンを施用したが，施用後最初の降雨における顕著な濃度の上昇は見られなかった．なお，積雪期において，両区の暗きょ流出水に 2.6，3.1 mg-P L^{-1} と濃度が高い試料があった．当該試料の懸濁物質濃度は必ずしも突出して高いわけではないこと，沈殿が赤褐色を呈していたこと，鉄酸化物はリンを収着・固定しやすいとされていること（Bolt and Bruggenwert, 1976）などから，作土から下方に流出したリンは，必ずしもすぐに暗きょ出口に到達するとは限らず，懸濁物質に収着し，水位制御器内で沈積したものが採水時に巻き上げられたためと考えられる．

懸濁物質濃度は，V 直水稲期では入水前に高く，最高は開放区暗きょでは 0.40 g L^{-1}，制御区表面では 0.52 g L^{-1} であった．V 溝乾田直播では，播種時に回転する金属製の作溝輪を土壌面に押しつけることによって播種溝を形成するため，接触面の土壌が圧密されることにより透水性が低下し，降雨時にその部分の土壌が分散する，クラスト生成と同様の機構（田中, 1995）で懸濁物質が

Table 2　同時刻に採取した開放区と制御区からの暗きょ流出水中窒素，リンおよび懸濁物質濃度の差.
Difference in concentrations of nitrogen, phosphorus and suspended matter in the tile drainage collected from the free drainage and the groundwater level control plots at the same time.

	2011 年 夏作 V 直水稲	2011 年 冬作大麦	2012 年 夏作大豆	冬作大麦 積雪前
試料対の数	13	49	23	39
全窒素（mg-N L^{-1}）	-0.81^{*}	$-0.28\cdot$	-0.99^{***}	-0.37^{*}
硝酸態窒素（mg-N L^{-1}）	-0.31^{**}	$-0.19\cdot$	-0.37^{***}	$-0.21\cdot$
全リン（mg-P L^{-1}）	0.00	$+0.13\cdot$	-0.02	$+0.09^{***}$
懸濁物質（g L^{-1}）	$-0.04\cdot$	-0.05^{**}	-0.01	-0.06^{***}

正は制御区の方が濃度が高く，負は制御区の方が低いことを，数値右側の · は 10 %，* は 5 %，** は 1%，*** は 0.1 % の危険率で同時刻に採取した開放区と制御区の試料の濃度に有意差があることを示す.

生じた可能性がある．入水期間の表面流出水は，0.03 g L^{-1} 以下と低く推移した．落水時には開始直後は暗きょから 0.3 g L^{-1} で流出したが，2 時間後には 0.1 g L^{-1} 未満まで低下した．代かき水稲における流出水または田面水の懸濁物質濃度は 0.3 ～ 5 g L^{-1} などの例（近藤ら, 1993; 山田ら, 2006; 蓮川ら, 2009）が報告されているが，本研究の V 直水稲期の大部分はこれらを下回った．冬作大麦期は，積雪前に高い傾向があったが，積雪期にも 0.4 g L^{-1} 近いものがあった．これについても，採水前の排水口からの流出水には着色や濁りがほとんど認められなかったことから，リンの場合と同様に，採水時に水位制御器内の沈積物が巻き上げられたことが原因と考えられる．また，消雪後の 4 月の制御区では，表面流出水の濃度が上昇した．夏作大豆期は最高で 0.1 g L^{-1} と，冬作大麦期に比べて低く推移した．作付け期間を通じて，懸濁物質濃度と耕起や施肥などの作業および降水量との関係は判然としなかった．非積雪期の大豆栽培粘土質転換畑における流出水中の懸濁物質濃度に時期による一定の傾向が認められなかった（鈴木ら, 2012）ことから，懸濁物質濃度については，土壌侵食量を表すモデルである USLE 式（Wischmeier and Smith, 1978）を個々の降雨イベントに適用できるようにした MUSLE（modified USLE）（Williams and Berndt, 1977）の式にあるように，降雨強度，降雨前土壌水分，作物による土壌面被覆などの各降雨イベント固有の要因の影響が大きいと考えられる．

次に，地下水位制御が流出水中の成分濃度に与える影響を検討した．Table 2 に暗きょ流出水について，開放区と制御区において同時刻に採取した試料対の成分濃度差の平均を作付け期間ごとに示す．各成分濃度が高かった冬作大麦期積雪前についても別に示す.

暗きょ流出水中の硝酸態窒素濃度は，冬作大麦期は 10 %，それ以外は 1 % または 0.1 % の危険率で制御区の方が有意に低かった．カナダのトウモロコシ圃場では，地下水位を深さ 60 cm に設定することにより，水位を設定しない区に比べて土壌中の硝酸態窒素含量が低下し，これを脱窒によるものであると指摘した（Elmi et al., 2002）．また，窒素の形態変化は土壌水分状態に影響され，水分が高いと硝化が抑制されるとされている（Nugroho and Kuwatsuka, 1992）．制御区は開放区に比べて暗きょ排水性が低く，下層および作土下部が湿潤状態にあったことから，脱窒がより生じやすく，硝化が抑制されやすい状態のため，硝酸態窒素濃度が低かったと推定される．全窒素濃度は，冬作大麦期は 10 %，冬作大麦期積雪前およびそれ以外は 5 % または 0.1 % の危険率で制御区の方が有意に低かった.

全リン濃度は，冬作大麦期は 10 %，このうち積雪前は 0.1 % の危険率で制御区の方が有意に高かった．地下水位制御がリンの流出に与える影響について，Stämpfli and Madramootoo（2006）は，砂壌土のトウモロコシ畑において地下水位制御を行うと，行わない場合に比べて暗きょ流出水中の全溶存態リン濃度が有意に高く，これを還元状態になることにより土壌のリン収着容量が低下し，リンの溶解性が上がったためと考察した．制御区では，冬作大麦期の鋤床上水位が開放区に比べて高く，帯水が長時間続いたことから，作土下部においても還元状態が継続したと考えられる．このため，作土で分散した土壌粒子に付いたリンがそのまま移動するほか，制御区は開放区より還元状態であったため，より多くの可溶化したリンが溶存態で土層内を下方移動した可能性がある.

懸濁物質濃度は，冬作大麦期は危険率 1 %，夏作水稲期は危険率 10 % で制御区の方が有意に低かった．これらの時期は，制御区の暗きょ排水性が低下した時期でもあった．一方，制御区の暗きょ排水性が改善した 12 年夏作大豆期に差がなかったことから，冬作大麦期と V 直水稲期には水や懸濁物質が暗きょまで移動する経路となり得る粗大孔隙が減少したことが影響したと推定される．2012 年夏作大豆期には制御区でも鋤床が乾燥することにより粗大孔隙が形成され，それを通じて懸濁物質も流出したことが示唆される.

暗きょ流出と表面流出の濃度差については，制御区の V 直水稲期入水前における 9 試料対について検定を行った．この時期は無施肥であるため，濃度は低かったが，硝酸態窒素は 1 % の危険率で表面が，全リンは 5 % の危険率で暗きょが有意に高かった.

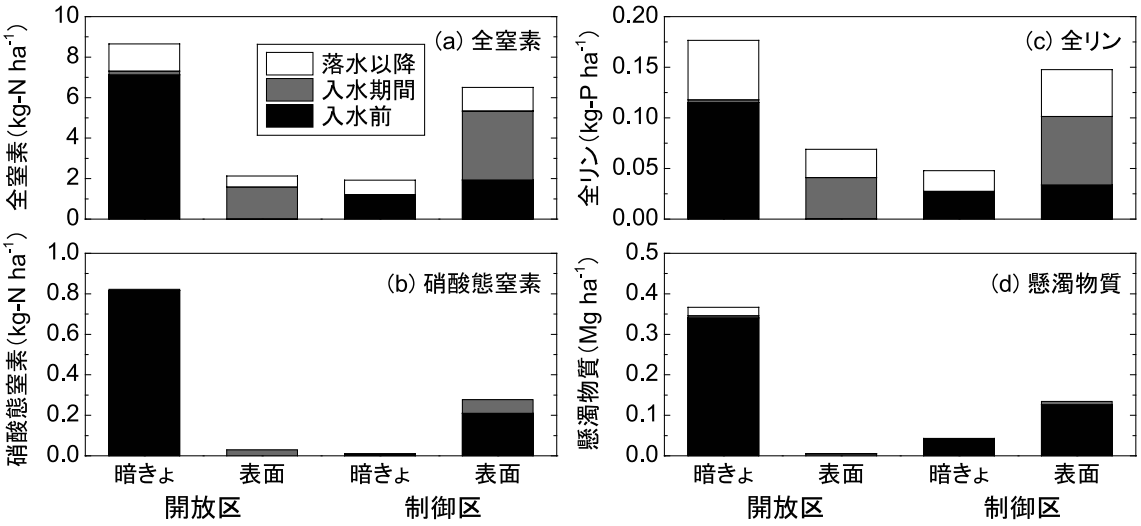


Fig. 9 V 直水稲期における窒素，リンおよび懸濁物質流出量.
Total discharges of nitrogen, phosphorus and suspended matter during the the V-furrow no-till direct seeding rice period.

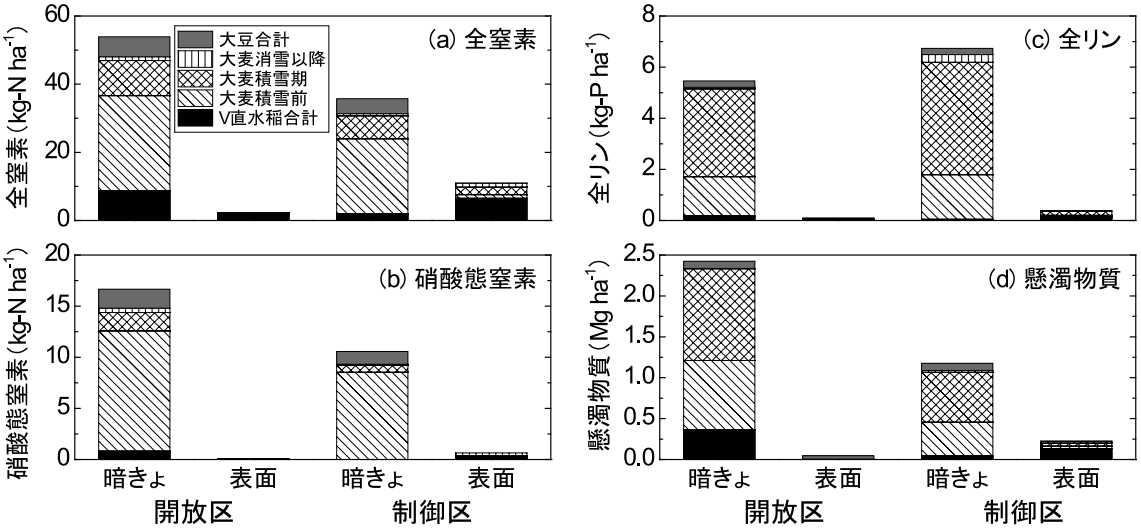


Fig. 10 測定期間における窒素，リンおよび懸濁物質流出量.
Total discharges of nitrogen, phosphorus and suspended matter during the monitoring period.

3.3 成分流出量

Fig. 9 に V 直水稲期における時期別の成分流出量を示す．全窒素は，開放区では濃度が高かった入水前に 66 % が流出したのに対し，制御区では入水期間の流出水量が多かったため 37 % にとどまった．硝酸態窒素も濃度が高かった入水前に大部分が流出し，開放区に比べて濃度が低かった制御区の流出量は開放区の 34 % であった．全リンは低濃度で，時期変化も小さかったため，流出量は流出水量の大小に対応し，開放区では入水前，制御区では入水期間に最も多く流出した．懸濁物質は，全流出量のうち 開放区では 91 %，制御区では 94 % が濃度の高かった入水前に流出した．全国各地の慣行の代かき水稲における懸濁物質流出量 0.05 ～ 4.20 Mg ha^{-1} および全リン流出量 0.3 ～ 13.4 kg-P ha^{-1}（谷山，2002）に比べ，本研究の V 直水稲期における流出量は同等か少なかった．全窒素流出量も田渕ら（1979）の 20 kg-N ha^{-1} や近藤ら（1993）の 25 kg-N ha^{-1} に比べて少なかった．

Fig. 10 に 2 年 3 作期間における全窒素，硝酸態窒素，全リンおよび懸濁物質の時期別の暗きょおよび表面流出量を示す．いずれも冬作大麦期の流出が最も多く，2 年 3 作期間の全流出量の 6 ～ 9 割を占めた．また，開放区は各成分とも全流出量の 95 % 以上が暗きょ流出であったのに対し，冬作大麦期や V 直水稲期入水前の表面流出水量が多かった制御区では，全窒素の 24 %，懸濁物質の 17 % が表面流出した．

硝酸態窒素および全窒素は特に冬作大麦期積雪前の流出量が多かった．この期間は流出水量が多かっただけでなく，濃度も高かったためで，この期間の流出水量は 2 年 3 作全期間の 31 % であったが，硝酸態窒素流出量は開放区では全期間の 70 %，制御区では 77 %，全窒素は開放区では 50 %，制御区では 49 % を占めた．また，制御区の方が低濃度であったことを反映して，制御区の全窒素および硝酸態窒素流出量は開放区に比べて少なかった．

一方，全リンおよび懸濁物質は，時期による濃度の明確な違いや一定の傾向が見られず，成分流出量は流出水量の大小関係とおおよそ対応した．流出水量が多い冬作大麦期における区間の濃度差を反映して，全リンは制御区，懸濁物質は開放区からの流出量が多かった．

4. まとめ

多雪地帯である北陸地方の粘土質土壌の地下水位制御システム圃場において不耕起 V 溝直播水稲 – 冬作大麦 – 夏作大豆の 2 年 3 作体系を実施し，水，窒素，リンおよび懸濁物質の流出実態および地下水位制御がこれらの流出に及ぼす影響を検討した．その結果，地下水位制御により少雨・高温の夏季には作土下部の体積含水率が上昇する一方で，湿潤時における制御区の暗きょ排水性は低下し，これを乾燥にともなう安定した粗大孔隙の発達が抑制されたためと推察した．そのため，粘土質土壌の地下水位制御システム圃場では，地下水位制御は必要最小限にするなど，暗きょ流出に寄与する下層の粗大孔隙を維持する管理方法が適当と考えられる．

不耕起 V 溝乾田直播栽培では，懸濁物質の流出は入水前に多いこと，本栽培法は代かきを行わないため，全窒素，全リンおよび懸濁物質流出量は慣行の代かき水稲栽培に比べて同等か少ないことが明らかになった．また，2 年 3 作期間の水，全窒素，硝酸態窒素，リンおよび懸濁物質流出の 70 ～ 94 % が冬作大麦期に生じた．

2 年 3 作期間を通じた制御区の懸濁物質，全窒素および硝酸態窒素流出量は開放区に比べて少なかった．一方で，全リン流出量は多かった．これは，水位制御による下層の粗大孔隙の減少およびそれにともなう還元状態の発達が水の流出経路だけでなく成分濃度にも影響を与えたためと考えられる．

今後は，地下水位制御と粗大孔隙等の土壌構造の経年変化との関連を明らかにすることにより，地下水位制御システムの諸機能の維持と環境負荷の低減を両立させるための管理法を提示する必要がある．

謝辞

本研究の実施にあたり貴重なご助言およびご協力をいただいた中央農業総合研究センター水田利用研究領域の関　正裕，足立一日出（現在クボタ），小倉　力（現在農村工学研究所），塩谷幸治，細野達夫，吉村亜希子（現在農村工学研究所），中山則和，池永幸子（現在東北農業研究センター）の各氏，気象データを提供いただいた同研究領域農業気象担当の皆様，圃場作業等でお世話になった業務第 4 科の玄蕃徳也，中川広行，小山茂夫，栗崎利幸，矢崎孝司，青田哲也の各氏，分析作業等を補助いただいた大川秀子さん，長瀬茂子さんに御礼申し上げる．本研究は，農林水産省委託プロジェクト「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発」3 系「土壌養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発」により行われた．

引用文献

足立一日出, 吉田修一郎, 増本隆夫, 伊藤公一（1997）：重粘土汎用圃場における暗渠排水に関与する粗間隙量の推定法とその適用. 農業土木学会論文集, 192: 847–855.

愛知県 (2007): 不耕起 V 溝直播栽培の手引き（改訂第 4 版）. http://www.pref.aichi.jp/nososi/seika/singijutu/singijiyutu74-4-7.pdf (2014.1.17)

有原丈二 (2000): ダイズ 安定多収の革新技術. pp. 94–103, 農山漁村文化協会, 東京.

Beven, K. and Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res., 18: 1311–1325.

Bolt, G.H. and Bruggenwert, M.G.M. (1976): Soil chemistry second revised edition. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.（岩田進午, 三輪睿太郎, 井上隆弘, 陽　捷行訳 (1980): 土壌の化学. pp. 103–104, 学会出版センター, 東京.）

de Jonge, L.W., Kjaergaard, C. and Moldrup, P. (2004): Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils: An introduction. Vadose Zone J., 3: 321–325.

土壌物理学会編 (2002): 新編土壌物理用語事典. p. 154, 養賢堂, 東京.

Elmi, A.A., Madramootoo, C., Egeh, M., Liu, A. and Hamel, C. (2002): Environmental and agronomic implications of water table and nitrogen fertilization management. J. Environ. Qual., 31: 1858–1867.

濱田千裕, 中嶋泰則, 林　元樹, 釋　一郎 (2007): 水稲における不耕起 V 溝直播栽培の開発. 日本作物学会紀事, 76: 508–518.

長谷川新一, 森田進平, 中川恭二郎 (1956): 灌漑時期が大麦・小麦の生育収量に及ぼす影響について. 日本作物学会紀事, 24: 307–309.

蓮川博之, 柴原藤善, 駒井佐知子, 水谷　智, 大林博幸, 藤井吉隆, 須戸　幹 (2009): 環境こだわり農業の取り組みによる水稲作付期の流出負荷軽減効果. 滋賀県農業技術振興センター研究報告, 48: 1–21.

細川　寿 (2008): 耕うん同時畝立て播種作業機の汎用利用による麦・そばの湿害軽減技術. 機械化農業, 3080: 17–20.

細見正明・須藤隆一 (1983): 懸濁物を含む試水中の窒素とリンの同時分解定量法. 用水と廃水, 25: 675–680.

石居企救男 (1987): オオムギの施肥. 植物栄養・土壌・肥料大事典編集委員会編　植物栄養・土壌・肥料大事典. p. 682, 養賢堂, 東京.

岩間和人 (2004): 麦類. 堀江　武編著　新版作物栽培の基礎. p. 148, 農山漁村文化協会, 東京.

神田健一, 芝山道郎, 菅原和夫, 坂西研二, 中島泰弘 (2006): 冬季代かきが河川の窒素・リン濃度に及ぼす影響 — 普通期代かきとの比較 —. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 52: 266.

気象庁 (2010): 8 月の天候. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/stat/tenko1008.pdf (2014.1.17)

金木亮一, 古川政行, 山口　淳, 岩間憲治, 小林廣通, 須戸　幹 (2010): 水田の流出負荷および物質収支に及ぼす育苗箱

全量施肥・無代かき栽培の影響. 水文・水資源学会誌, 23: 216–230.

桐山　毅・田谷省三 (1975): 麦類の生育時期と湿害について. 九州農業研究, 37: 77–78.

近藤　正, 三沢真一, 豊田　勝 (1993): 代かき田植時期の N, P 成分の流出特性について. 農業土木学会論文集, 164: 147–155.

丸田　勇 (1973): 暗渠排水が湿田の土壌断面形態と生産力に及ぼす影響に関する研究. 新潟県農業試験場研究報告, 22 別冊: 1–32.

中野啓三 (1978): 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移. 北陸農業試験場報告, 21: 63–94.

野田昌治 (1979): 北陸地域における作物面からみた水田高度利用. 北陸農業研究資料, 6: 16–22.

農研機構 (2011): 新世代水田輪作の基盤技術と低コスト生産システムの構築. http://www.naro.affrc.go.jp/project/challenge/project01/index.html (2014.1.17)

農林水産省 (2013a): 平成 24 年度食料・農業・農村白書. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h24/index.html (2014.1.17)

農林水産省 (2013b): 面積調査. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html (2014.1.17)

農林水産省 (2013c): 作況調査. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html (2014.1.17)

Nugroho, S.G. and Kuwatsuka, S. (1992): Concurrent observation of several processes of nitrogen metabolism in soil amended with organic materials II. Effect of farmyard manure on ammonification, nitrification, denitrification, and N_2 fixation at different levels of soil moisture. Soil Sci. Plant Nutr., 38: 593–600.

小野寺恒雄・藤森新作 (2005): 地下灌漑システム. 特許第 3671373 号.

太田　健, 藤井芳一, 近藤　正, 村上　章, 小林ひとみ (2000): 乾田不耕起直播における環境負荷物質の動態. 東北農業研究, 53: 55–56.

R Development Core Team (2013): R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna. ISBN 3-900051-07-0, http://www.R-project.org. (2014.1.17)

笹田康子, 石原　暁, 岡井　隆 (2004): 水田からの汚濁負荷の流出特性. 香川県環境保健研究センター所報, 3: 49–57.

島田信二 (2011): ダイズの高位安定生産を可能とする地下水位制御技術. 農林水産技術研究ジャーナル, 34 (8): 34–39.

Stämpfli, N. and Madramootoo, C.A. (2006): Dissolved phosphorus losses in tile drainage under subirrigation. Water Qual. Res. J. Canada, 41: 63–71.

鈴木克拓, 足立一日出, 関口哲生, 吉田修一郎, 中野恵子, 加藤英孝 (2005): 亀裂の発達した転換畑における懸濁物質およびリンの暗渠流出. 日本土壌肥料学雑誌, 76: 43–47.

鈴木克拓, 足立一日出, 谷本　岳, 小倉　力, 大野智史 (2011): ダイズ栽培期間における地下水位制御システム圃場からの硝酸態窒素の流出. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 57: 115.

鈴木克拓, 関口哲生, 足立一日出 (2012): 積雪期における北陸地方平野部の粘土質転換畑からの懸濁物質, リンおよび硝酸態窒素の流出. 日本土壌肥料学雑誌, 83: 47–51.

田渕俊雄, 高村義親, 久保田治夫, 鈴木誠治 (1979): 水田における窒素, リン濃度とその流出入. 農業土木学会誌, 47: 859–864.

高村義親, 田渕俊雄, 鈴木誠治, 張替　泰, 上野忠男, 久保田治夫 (1976): 水田の物質収支に関する研究（第 1 報）霞ヶ浦流域の水田における窒素およびリンの動向と収支について. 日本土壌肥料学雑誌, 47: 398–405.

田中　樹 (1995): 土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件. 土壌の物理性, 71: 17–21.

谷山一郎 (2002): 農林地からの土砂流出に伴なうリン流出をモニタリングする. 長谷川周一, 波多野隆介, 岡崎正規編　環境負荷を予測する — モニタリングからモデリングへ. pp. 136–137, 博友社, 東京.

若杉晃介・藤森新作 (2009): 水田の高度利用を可能とする地下水位制御システム FOEAS. 農業農村工学会誌, 77: 705–708.

Williams, J.R. and Berndt, H.D. (1977): Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. ASAE., 20: 1100–1104.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. Agriculture handbook No. 537. U.S. department of agriculture, Washington. D.C.

山田佳裕, 井桁明丈, 中島沙知, 三戸勇吾, 小笠原貴子, 和田彩香, 大野智彦, 上田篤史, 兵藤不二夫, 今田美穂, 谷内茂雄, 陀安一郎, 福原昭一, 田中拓弥, 和田英太郎 (2006): しろかき期の強制落水による懸濁物, 窒素とリンの流出. 陸水学雑誌, 67: 105–112.

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: 459–464.

要　　旨

北陸地方の粘土質土壌の地下水位制御システム圃場において不耕起 V 溝直播水稲 – 冬作大麦 – 夏作大豆の 2 年 3 作期間の水，窒素，リンおよび懸濁物質の流出実態および地下水位制御が流出に及ぼす影響を調査した．地下水位制御により，乾燥時には作土下部の土壌水分が増加する一方，湿潤時の暗きょ排水性は低下した．V 直水稲栽培では代かきを行わないため，全窒素，全リンおよび懸濁物質流出量は代かき栽培に比べて同等か少なかった．2 年 3 作期間の水，全窒素，硝酸態窒素，リンおよび懸濁物質流出の 70 ～ 94 % が大麦期に生じた．制御区の全窒素，硝酸態窒素および懸濁物質流出量は開放区に比べて少なく，全リン流出量は多かった．これは，水位制御による粗大孔隙の減少と還元状態の発達が水の流出経路に加え成分濃度にも影響を与えたためと考えられる．

キーワード：地下水位制御システム（FOEAS），不耕起 V 溝直播水稲 – 冬作大麦 – 大豆 2 年 3 作体系，粘土質土壌，多雪地帯，栄養塩類流出