



# 多雪重粘土地帯の水田転換畑における 懸濁物質およびリンの暗渠流出

鈴木克拓<sup>1</sup>

Suspended substance and phosphorus discharge via subsurface drains  
from converted ex-paddy fields with clayey soil in a heavy snowfall region

Katsuhiko SUZUKI<sup>1</sup>

## 1. はじめに

農耕地からのリンの流出は、閉鎖系水域における富栄養化の主因の一つに挙げられている（例えば、海老瀬, 1984）。我が国では、リンは一般に土壤粒子に吸着されやすく、比較的溶解度が低いため、農耕地からの浸透流出は極めて少ないと見られてきた（竹内, 1997）。しかし、リンを含む難溶性物質が土壤粒子などに吸着されたまま懸濁態として土層内を輸送される現象（コロイド担体輸送；Colloid-facilitated transport）が報告されている。野外においてコロイドが環境負荷物質の輸送に果たす役割が初めて指摘されたのは35年ほど前とされている（Coles and Ramspott, 1982）が、21世紀に入り、これをテーマにしたワークショップが開催されるなど、重要性が広く認識されつつある（McCarthy and McKay, 2004）。

北陸地方では水田の3分の1が重粘土壤であり、この地方の強グライ土壤水田は全国平均の17%を大きく上回る48%に達する（野田, 1979）。重粘土壤の水田を畑転換すると、乾燥により下層に収縮亀裂等の粗孔隙が発達する。このような状況では、水は透水性の低い土壤マトリクスを迂回し、バイパス流として粗孔隙を流れやすい（Beven and Germann, 1982）。そのため、懸濁物質が土層によってろ過されずに下方に移動し、それに伴いリンもコロイド担体輸送によって移動し、暗渠に流出する可能性がある。ここでは、北陸地方の多雪重粘土地帯の水田転換畑に特有の懸濁物質およびリンの暗渠流出の実態を紹介する。

## 2. 転換畑からの懸濁物質・リンの暗渠流出

わが国の粘土質転換畑では、排水性を改善するために亀裂を生成させることが推奨されてきた（例えば、吉田ら, 1997）ことから、亀裂を通じた懸濁態リンの下方移動と暗渠への流出が懸念される。しかしながら、転換畑からの懸濁態を含むリンの流出実態はほとんど明らかにされていなかった。そこで、亀裂の発達した転換畑において、降雨時の暗渠および表面流出水量を測定するとともに、流出水中の懸濁物質濃度および溶存態・懸濁態リン濃度の測定を行い、リンの暗渠流出の実態を調査した（鈴木ら, 2005）。

測定は、新潟県上越市の農研機構中央農業研究センター北陸研究拠点の転換畑圃場（100 m × 30 m, 1996年に畑転換）において2003年7月1日から11月30日まで行った。同拠点の圃場の土壤は細粒質斑鉄型グライ低地土に分類され、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）。調査圃場では深さ65 cmに暗渠が5 m間隔で施工されている。5月下旬に大豆（品種エンレイ）を播種し、10月中旬に収穫した。リン施用量は16 kg-P ha<sup>-1</sup>で、大豆残渣以外の有機資材は施用しなかった。作土-耕盤層境界の土壤水のポテンシャルを、測定位置および大気圧を基準として測定した。さらに、作土-耕盤層境界付近および耕盤層以深の土壤水分状態をTDR式土壤水分計で測定した。暗渠流出流量を電磁流量計で、表面流出水量を三角堰で測定するとともに、降雨時に数時間間隔で流出水を採取した。流出水の一部を孔径0.1 μmのメンブレンフィルタでろ過し、ろ液を溶存態試料とした。懸濁物質濃度は原液とろ液の蒸発乾固物濃度の差とした。原液とろ液の全リン濃度を測定し、懸濁態リン濃度は全リン濃度から溶存態試料の全リン濃度を差し引いて求めた。

<sup>1</sup>Central Region Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 1-2-1 Inada, Joetsu 943-0193, Japan. Corresponding author: 鈴木克拓, 農研機構 中央農業研究センター.

2019年12月23日受稿 2020年1月27日受理

降雨により作土 - 耕盤層境界の圧力ポテンシャルが上昇し、土壌水のポテンシャルが0または正の値になると暗渠から急激な水の流出が始まった (Fig. 1). このとき、耕盤層以深の土壌の体積含水率には暗渠流出の開始前後でほとんど変化が見られなかった。これは、浸透水が耕盤層・下層土中の亀裂などを通じてバイパス流として流下し、暗渠に流出したことを強く示唆する。

暗渠流出流量は表面流出流量を終始上回った (Fig. 2). 流出水中の懸濁物質濃度は表面流出および暗渠への急激な流出の開始時期に高く、その後、流量が時間的に漸減するにつれて懸濁物質濃度も徐々に減少する傾向があった。暗渠流出水中の懸濁物質濃度は表面流出水より高いことが多く、最高  $0.37 \text{ g L}^{-1}$  であった。全リン濃度は懸濁物質濃度が高いときに概して高い傾向を示した。

暗渠流出水中の全リン濃度は表面流出水中の濃度を大きく上回ることがあり、最高で  $0.59 \text{ mg L}^{-1}$  に達した (Fig. 3). 表面流出水試料中のリンのうち懸濁態の割合はさまざまであったが、暗渠流出水試料の大部分では、リンの80%以上が懸濁態として存在した。

測定期間の積算流出水量は、暗渠からは462 mm、表面からは269 mmで、暗渠流出が優勢であった。懸濁物質流出量は、全流出量  $0.79 \text{ Mg ha}^{-1}$  の67%にあたる  $0.53 \text{ Mg ha}^{-1}$  が暗渠を通じて流出したと見積もられた。また、全リンは  $0.82 \text{ kg ha}^{-1}$  が圃場から流出し、このうち60%の  $0.49 \text{ kg ha}^{-1}$  は暗渠を通じた流出であった。さらに、暗渠から流出したリンの9割にあたる  $0.45 \text{ kg ha}^{-1}$  が懸濁態であったと推定された。

我が国の畑圃場では、リンは浸透流出しにくいとされてきたが、亀裂の発達した転換畑では、リンがコロイド担体輸送で下層の粗孔隙を移動することによる懸濁態での暗渠流出が表面流出を上回る流出経路であることが明らかになった。

### 3. 懸濁物質濃度と 導電率・イオン濃度との関係

暗渠流出水中の懸濁物質濃度を決定する要因は多岐にわたる。その中で、粘土粒子の分散・凝集に関連する界面電気現象は要因として寄与しているのであろうか。これに関連して、圃場スケールでも電解質濃度が懸濁物質濃度に影響を与えることが知られており、水田における代かき時の濁水をカルシウム資材で凝集させ、流出を低減する技術が開発されている (赤江, 1998)。一方、畑条件において、電解質濃度が懸濁物質の暗渠流出に及ぼす影響については、著者の知る限り、ほとんど検討されていない。そこで、暗渠流出水の懸濁物質濃度と導電率およびイオン濃度との関係から、流出水中懸濁物質濃度を決定する要因を明らかにしようとした (鈴木, 2016)。

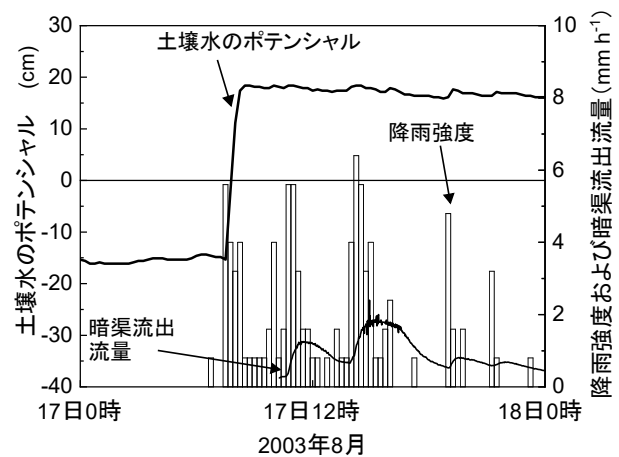


Fig. 1 降雨時における作土 - 耕盤層境界付近の土壌水のポテンシャル (左軸) と暗渠流出流量 (右軸). 鈴木ら (2005) 図1を一部改変の上、転載。

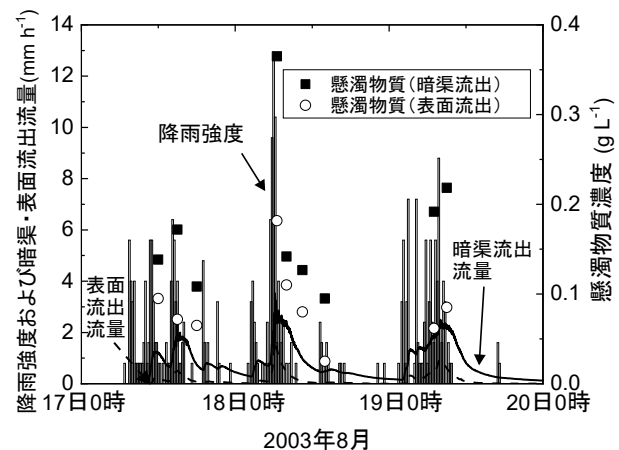


Fig. 2 降雨時における暗渠および表面流出流量 (左軸) と流出水の懸濁物質濃度 (右軸). 鈴木ら (2005) 図2を一部改変の上、転載。

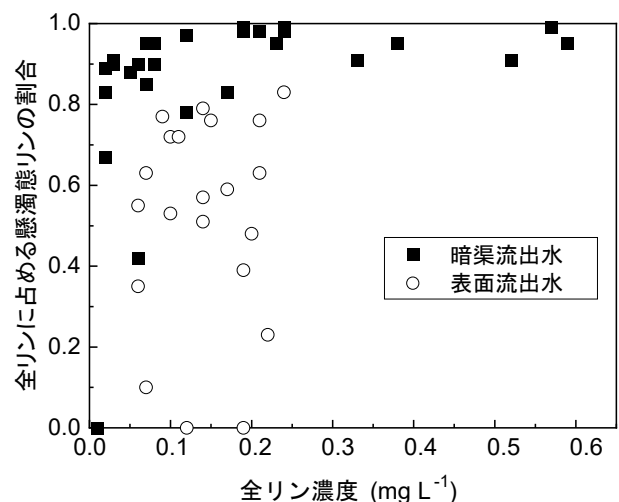


Fig. 3 暗渠および表面流出水の全リン濃度および懸濁態リンの占める割合. 鈴木ら (2005) 図3を転載。

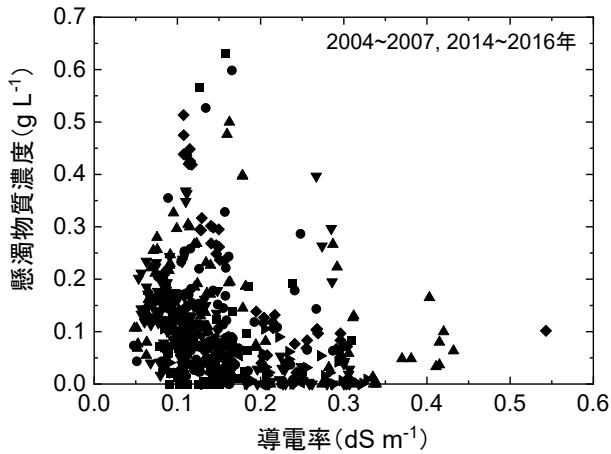


Fig. 4 大豆単作圃場における暗渠流出水中懸濁物質濃度と導電率の関係. 点の形状の違いは年次が異なることを示す.

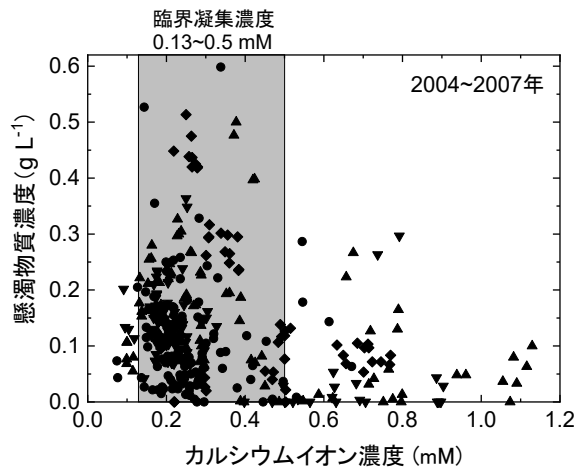


Fig. 5 大豆単作圃場における暗渠流出水中懸濁物質濃度とカルシウムイオン濃度との関係. 点の形状の違いは年次が異なることを示す.

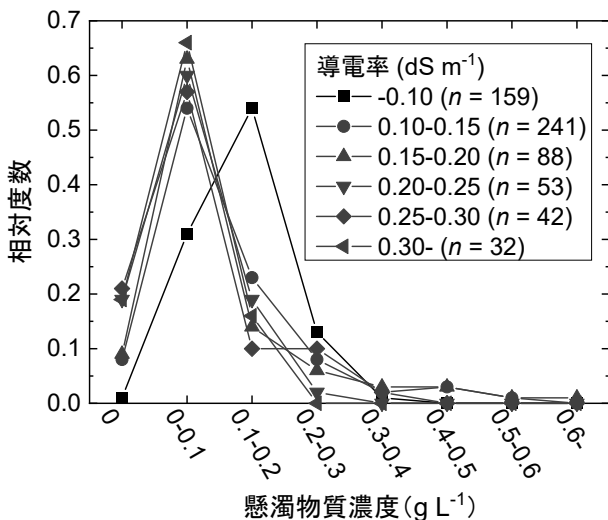


Fig. 6 大豆単作圃場における暗渠流出水の導電率ごとの懸濁物質濃度の相対度数分布.

測定は、前項と同じく、大豆を2002年から同じ肥培管理で継続的に栽培している農研機構中央農業研究センター北陸研究拠点の転換畑圃場で行った。この圃場において大豆作付期間に暗渠流出流量を測定するとともに、降雨時に暗渠流出水を経時的に採取し、懸濁物質濃度および導電率を測定した。一部の試料についてはイオン濃度も測定した。測定は2004～2007年と2014～2016年に行った。

約  $0.2 \text{ dS m}^{-1}$  の導電率を閾値として、高い懸濁物質濃度の暗渠流出水が現れる傾向があった (Fig. 4)。DLVO 理論 (Derjaguin and Landau, 1941; Verwey and Overbeek, 1948) によると、負に帯電した粒子の凝集には、溶液中に存在する価数の高い陽イオンが大きな役割を果たす。測定圃場の土壌において優勢な粘土鉱物であるモンモリロナイトについては、塩化カルシウムの臨界凝集濃度は  $0.13 \sim 0.5 \text{ mM}$  であるとされている (取出・西村, 2003)。暗渠流出水では、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) 濃度  $0.4 \text{ mM}$  付近を閾値として、濃度が高い懸濁物質の流出が生じる傾向にあり (Fig. 5)、取出・西村 (2003) の結果と大きくは乖離していなかった。暗渠流出水中の  $\text{Ca}^{2+}$  濃度と導電率の間には有意な正の相関関係があり、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度  $0.13 \sim 0.5 \text{ mM}$  は導電率  $0.1 \sim 0.2 \text{ dS m}^{-1}$  に対応する。導電率で区分した懸濁物質濃度の相対度数分布においても、臨界凝集濃度を下回る導電率では、懸濁物質濃度の最頻値が他と比べて高かった (Fig. 6)。このように、粘土質転換畑圃場における懸濁物質の暗渠流出では、懸濁物質濃度が高くなる条件に界面電気現象が関わっている、すなわち、暗渠流出水に含まれる土壌粒子の分散が DLVO 理論に従っている可能性のあることが明らかになった。そして、導電率は高濃度の懸濁物質の暗渠流出の有無を決定付ける、ある程度の指標となり得ると考えられる。

#### 4. 積雪期における流出

北陸地方は世界有数の豪雪地帯である (菅谷, 1990)。新潟県上越市の高田特別地域気象観測所における平年の12～3月の降水量は  $1298.4 \text{ mm}$  と多く、最深積雪量は  $122 \text{ cm}$  に達する (気象庁, 2019)。積雪地における水系への懸濁物質およびリンの流出については、北陸地方に比べ寒冷な地域における測定例が多く、これらでは融雪期の流出が重要であるとの指摘がされている (Lapp et al., 1998; 大村・黒川, 1991 など)。これに対し、北陸地方平野部は、12～3月の平年の月平均気温が  $2 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$  と高く、降水量が非常に多いなど、既存の報告地域とは気象条件が大きく異なる。このような特徴のある北陸地方平野部の積雪期における農耕地からの栄養塩類の流出実態はほとんど明らかにされていなかった。そこで、積雪期における懸濁物質およびリンの流出実態を明らかにするために、暗渠および表面流出を調査した (鈴木ら, 2012)。

**Table 1** 測定期間（2003年8月～2006年11月）の積雪期および非積雪期における暗渠および表面流出水中の懸濁物質およびリンの平均濃度と標準偏差．鈴木ら（2012）表1を一部改変の上，転載．

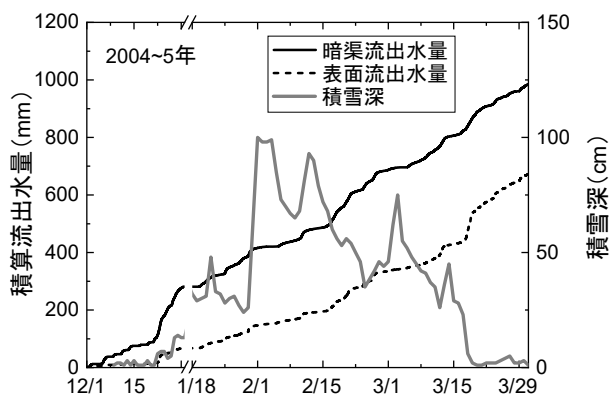
	懸濁物質 ( $\text{g L}^{-1}$ )	全リン ( $\text{mg-P L}^{-1}$ )	懸濁態リン ( $\text{mg-P L}^{-1}$ )
積雪期			
暗渠流出 ( $n = 102$ )	$0.022 \pm 0.020$	$0.055 \pm 0.026^{***}$	$0.052 \pm 0.026^{***}$
表面流出 ( $n = 39$ )	$0.032 \pm 0.050$	$0.024 \pm 0.008$	$0.014 \pm 0.007$
非積雪期			
暗渠流出 ( $n = 261$ )	$0.118 \pm 0.092^{**}$	$0.247 \pm 0.295^{**}$	$0.235 \pm 0.294^{***}$
表面流出 ( $n = 112$ )	$0.158 \pm 0.142$	$0.152 \pm 0.091$	$0.098 \pm 0.089$

表面流出水の採取および測定は2005年3月まで行った．\*\*は1%，\*\*\*は0.1%水準で暗渠流出水と表面流出水の間有意差があることを示す．積雪期と非積雪期の間には，いずれの成分・流出経路においても0.1%水準で有意差があった．

**Table 2** 2003年9月～2005年3月における粘土質転換畑からの水，懸濁物質およびリン流出量．鈴木ら（2012）表2を一部改変の上，転載．

	流出水量 (mm)	懸濁物質 ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	全リン ( $\text{kg-P ha}^{-1}$ )	懸濁態リン ( $\text{kg-P ha}^{-1}$ )	
04～05年積雪期（91日） （降水量954mm）	暗渠	983	0.21	0.54	0.51
	表面	606	0.19	0.14	0.08
04年夏作期（146日） （降水量828mm）	暗渠	300	0.33	0.57	0.51
	表面	163	0.24	0.27	0.21

積雪期の欠測期間（2004年12月29日～2005年1月19日）は計算から除外した．



**Fig. 7** 積雪期における暗渠および表面流出水量（左軸）ならびに積雪深（右軸）．鈴木ら（2012）図1を一部改変の上，転載．

測定は，前項までと同じ中央農研北陸研究拠点の大豆単作の転換畑圃場において行った．5月下旬から10月中旬まで大豆を栽培し，冬季は休閑とした．この圃場において積雪期の暗渠および表面流出水の流量を測定するとともに，2週間間隔を目途に採水し，懸濁物質濃度，全リン濃度および懸濁態リン濃度を測定した．測定期間は2003年8月から2006年11月までとした．

積雪期には，暗渠および表面からは水がほぼ連続的に流出し，暗渠流出流量は，表面流出に比べて積雪深および時期の違いによる変化が小さかった（Fig. 7）．

積雪期における成分の平均濃度は非積雪期の3分の1から6分の1で，積雪期と非積雪期の間にはいずれの成分・流出経路においても0.1%水準で有意差があった（Table 1）．また，積雪期の懸濁物質を除き，表面流出水と暗渠流出水との間に有意差があった．一方，積雪期間内の濃度には時期の違いによる大きな変動は認められなかった．

4ヶ月近くわたって積雪が継続し，高田特別地域気象観測所における最深積雪が126 cm（気象庁，2019）と，平年値に近かった2004～2005年の積雪期では，22日間の欠測期間を計算に入れていないにもかかわらず，暗渠と表面からの合計流出量が，懸濁物質では2004年夏作期の70%，リンでは81%に相当した（Table 2）．積雪期における全流出量に占める暗渠流出の割合は，懸濁物質は49%と，表面流出とほぼ同じであったが，リンは77%と，暗渠が主要な流出経路であった．また，暗渠流出では95%，表面流出では55%のリンが懸濁態であった．

以上から，北陸地方平野部の粘土質転換畑では，積雪期には降水量が多く，積雪地の割に気温が高いため，大量の水が継続的に浸入し，流出することにより，積雪期における懸濁物質およびリンの流出は，濃度は低いものの，その量は，懸濁物質では夏作期の7割，リンでは8割以上と，休閑であっても夏作期に匹敵する場合のあることが明らかになった．

### 5. 稲－大麦－大豆 2年3作における地下水水位制御が流出に与える影響

わが国では、自給率向上のために麦・大豆等の作付け拡大や生産性向上の取り組みが行われている（農林水産省, 2019a）。これに対応するため、北陸地方でも水田に稲－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きた。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。しかし、大麦は小麦に比べて湿害に弱いとされている（石居, 1987）ため、十分な排水対策が求められる。同時に、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）。日本海側特有の事情として、フェーン現象により極端に乾燥する場合がある。これらのことから、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、圃場に暗渠およびそれに直交する1 m 間隔の弾丸暗渠を施工し、排水性を向上させるとともに、暗渠内の水位を自動的に制御するもので、圃場内の地下水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。稲－麦－大豆2年3作体系のような土地利用型農業では、作業競合を軽減するための省力化技術の導入が必要である。水稲不耕起V溝直播栽培（濱田ら, 2007；以下V直水稲）は、作業速度が高い、倒伏が少ないなどの利点があり、北陸地方にも導入が進みつつある。そこで、北陸地方の粘土質土壌の地下水水位制御システム圃場においてV直水稲－大麦－大豆の2年3作を実施し、リンおよび懸濁物質の流出実態および地下水水位制御が流出に及ぼす影響を検討した（鈴木ら, 2014）。

測定は、農研機構中央農業研究センター北陸研究拠点に設けた隣接する2筆の地下水水位制御システム圃場（それぞれ100 m × 20 m）で行った。2009年に代かき移植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。翌年2010年の夏作にシステム施工後の初作として大豆を栽培した。翌2011年からのV直水稲、冬作の大麦および2012年の大豆の2年3作を測定期間とした。地下水水位制御システム圃場2筆のうち、一方では水稲入水期間以外は暗渠を開放し（以下、開放区）、他方では灌漑による増収効果が認められるとされる、大麦の節間伸長期以降や大豆の開花期以降に当たる時期を中心に地下水水位を深さ12～30 cmに制御した（以下、制御区）。これらの圃場において、土壌水分状態、流出水量、流出水中の懸濁物質およびリン濃度を測定した。

システム施工後初作の2010年大豆期には、開放区と制御区のいずれも約500 mmの流出水の99%以上が暗渠から流出し、高い暗渠排水性を示した。地下水水位制御に関連して、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推移した。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、乾燥時には作土下部まで水位制御の効果があることが分かった。

2年3作期間の流出水量をFig. 8に示す。2011年の水稲播種から入水前までの期間は、水の流出経路が開放区では99%が暗渠であったのに対し、制御区では55%にとどまるとともに、鋤床上に長時間にわたって水が停滞するなど、初作大豆期に比べて制御区の暗渠排水性が低下した。その後の大麦期では、2年3作期間の全流出量の約7割が流出し、その大部分が積雪前と積雪期に流出した。積雪期のうち融雪の進んだ時期には、開放区の暗渠流出流量は上昇したが、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、制御区では暗渠排水性が低下し、融雪水を暗渠だけでは排水し切れなくなったことがうかがえる。その後的大豆期は、2010年の施工後初作の大豆期と同様に、両区とも水のほとんどが暗渠から流出した。2年3作の全期間では、暗渠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%が暗渠流出であったのに対し、制御区では68%にとどまった。これについて、水稲期の前後における土層内の粗孔隙率は、システム施工直後では、深さ20 cmから弾丸暗渠の深さにあたる30 cmまでは両区間の違いは小さかった（Fig. 9）。しかし、制御区ではV直水稲前には、深さ20～30 cmの粗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割の粗孔隙が残存した。開放区では乾燥した時期に湿潤状態を経ても安定な粗孔隙が形成した

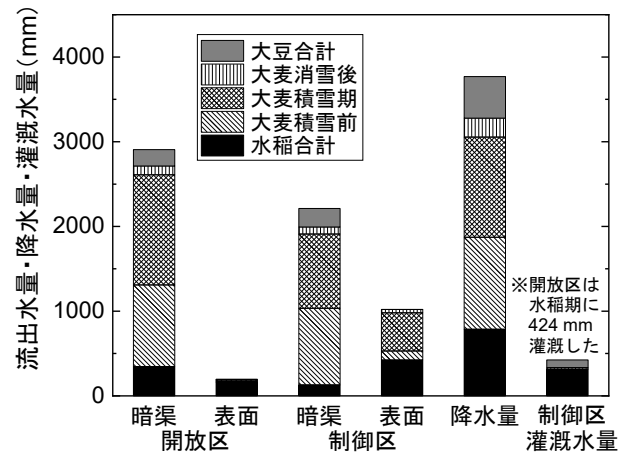


Fig. 8 2年3作期間における流出水量、灌漑水量および降水量。鈴木ら（2014）Table 1 および Fig. 5 から作成。

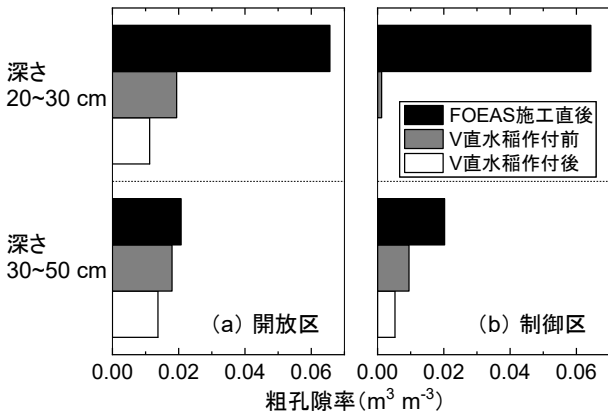


Fig. 9 土層内の粗孔隙率の推移. 鈴木ら (2014) Fig. 7 を転載.

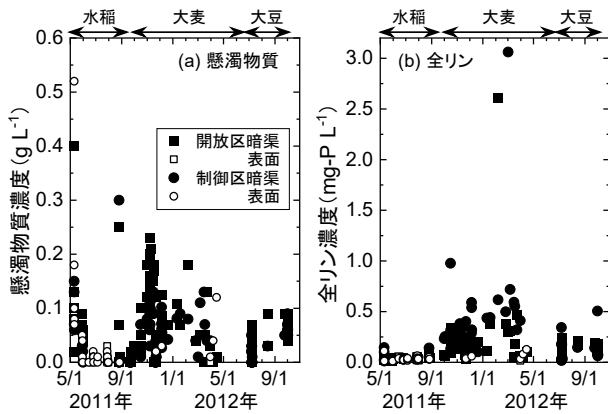


Fig. 10 2年3作期間における流出水中懸濁物質およびリン濃度. 鈴木ら (2014) Fig. 8 を一部改変の上, 転載.

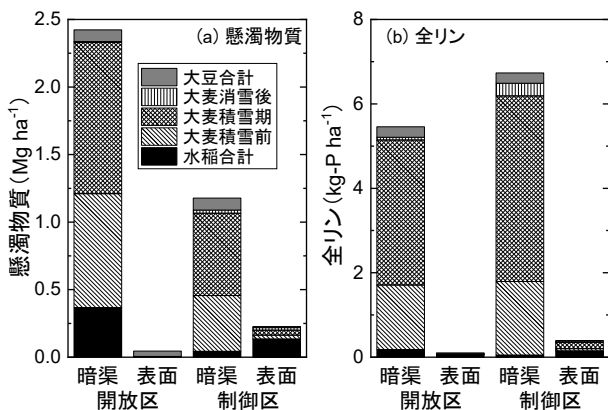


Fig. 11 2年3作期間における懸濁物質およびリン流出量. 鈴木ら (2014) Fig. 10 を一部改変の上, 転載.

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, 湿潤時の暗渠排水性が低下したと推察される.

2年3作期間における流出水中の懸濁物質および全

Table 3 2年3作期間の同時刻に採取した開放区と制御区からの暗渠流出水中懸濁物質およびリン濃度の差. 鈴木ら (2014) Table 2 を一部改変の上, 転載.

	V 直水稲	大麦	大豆	大麦積雪前
試料対の数	13	49	23	39
懸濁物質 (g L <sup>-1</sup> )	-0.04 <sup>·</sup>	-0.05 <sup>**</sup>	-0.01	-0.06 <sup>***</sup>
全リン (mg-P L <sup>-1</sup> )	-0.00	+0.13 <sup>·</sup>	-0.02	+0.09 <sup>***</sup>

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<sup>·</sup>は10%, <sup>\*\*</sup>は1%, <sup>\*\*\*</sup>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.

リン濃度 (Fig. 10) について, 同時刻に開放区と制御区で採取した暗渠流出水中の懸濁物質濃度は, 大麦期は危険率1%, 水稲期は危険率10%で開放区に比べて制御区の方が有意に低かった (Table 3). これらの時期は, 制御区の暗渠排水性が低下した時期でもあった. 一方, 制御区の暗渠排水性が改善した2012年大豆期に有意な差がなかったことから, 大麦期とV直水稲期には水や懸濁物質が暗渠まで移動する経路となり得る粗孔隙が減少したことが影響したと推定される. その後, 2012年大豆期には制御区でも鋤床が乾燥することにより粗孔隙が形成し, それを通じて懸濁物質も流出したことが示唆される. これに対し, 全リン濃度は, 大麦期は10%, このうち積雪前は0.1%の危険率で, 懸濁物質濃度とは逆に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, 地下水位制御を行うと, 暗渠流出水中の全溶存態リン濃度が有意に高くなり, これを還元状態になることにより土壌のリン吸着容量が低下し, リンの溶解性が上がったためと考察した. 制御区では, 大麦期に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, 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.

2年3作期間における懸濁物質および全リンの流出量は, いずれも大麦期の流出が2年3作期間の全流出量の8~9割を占めた (Fig. 11). また, 開放区は両成分とも全流出量の95%以上が暗渠流出であったのに対し, 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懸濁物質の17%が表面流出した. 成分流出量は流出水量の大小関係とおおよそ対応した. 流出水量が多い大麦期における処理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.

多雪重粘土地帯の地下水位制御圃場における2年3作では, 地下水位制御によって暗渠排水性が低下するとともに, 懸濁物質流出量は減少, 全リン流出量は増加した. これは, 水位制御による下層の粗孔隙の減少およびそれに伴う還元状態の発達が生じたことに加え, 成分濃度にも影響を与えたためと考えられる.

## 6. おわりに

ここでは、北陸地方の多雪重粘土地帯の大豆転換畑圃場および稲-大麦-大豆2年3作体系の地下水水位制御システム圃場における懸濁物質およびリンの暗渠流出の実態を紹介した。大豆圃場では、リンの流出はコロイド担体輸送による懸濁態での暗渠流出が優勢であり、懸濁物質濃度が電解質濃度の影響を受けており、暗渠流出水中で優勢な陽イオンであるカルシウムイオンについてのDLVO理論に符合している可能性が示された。積雪期には、積雪地の割に気温が高く、降水量が多いため、休閑であっても夏作期に匹敵する量の流出があることが明らかになった。水稻-大麦-大豆2年3作圃場では、冬作の大麦期の流出量が大部分を占めることが明らかになった。すなわち、転換畑からの養分流出がこの地方特有の土壤および気象条件に影響されていることが分かった。

政府は、畑作物の栽培に水田を利用する施策を継続して進めており、2017年の夏には我が国の田の18%には水稻以外の作物が作付けされている（農林水産省、2019b）。さらに、近年は水田における野菜作を推奨している（農林水産省、2019a）。野菜作の導入により、土づくり資材や肥料の投入量が稲-麦-大豆体系に比べて多くなると予想されることから、これに伴う土壤溶液のイオン組成や孔隙特性の変化の影響で、懸濁物質の流出特性が変化する可能性がある。また、地下水水位制御システムにおける水位制御の影響の知見から、野菜作における灌漑などに因る土壤水分状態の変化も養分流出特性に影響を与える可能性がある。変貌するこの地方の水田農業における懸濁物質・リンを含む養分流出実態に引き続き注目する必要がある。

## 謝辞

粘土質転換畑における研究の実施にあたっては、農研機構中央農研北陸研究拠点および農研機構農業環境変動研究センター各位からご助言、ご支援をいただいている。

内容の一部は、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「土壤養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発」および科学研究費補助金基盤A(25252042, 土粒子界面電気現象を応用した土壤・水・大気環境保全技術の確立)により行われた。ここに記して謝意を表す。

## 引用文献

- 赤江剛夫 (1998): 石膏による代掻き濁水の浄化と水田土壤の分散凝集構造. 土壤の物理性, 79: 49-55.
- Beven, K. and Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 18: 1311-1325.
- Coles, D.G. and Ramspott L.D. (1982): Migration of Ruthenium-106 in a Nevada test site aquifer: discrepancy between field and laboratory results. *Science*, 215: 1235-1237.
- Derjaguin, B.V., and Landau, L. (1941): Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solution of electrolytes. *Acta Physicochim. U.R.S.S.*, 14: 633-662.
- 土壤物理学会編 (2002): 新編土壤物理用語事典, p. 154. 養賢堂, 東京.
- 海老瀬潜一 (1984): 流域内土地利用形態別流出負荷量原単位の解析. 国立公害研究所研究報告, 50: 89-102.
- 濱田千裕, 中嶋泰則, 林元樹, 釋一郎 (2007): 水稻における不耕起V溝直播栽培の開発. 日本作物学会紀事, 76: 508-518.
- 石居企救男 (1987): オオムギの施肥. 植物栄養・土壤・肥料大事典編集委員会編 植物栄養・土壤・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.
- 気象庁 (2019): 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (2019.12.23)
- Lapp, P., Madramootoo, C.A., Enright, P., Papineau, F. and Perrone, J. (1998): Water quality of an intensive agricultural watershed in Quebec. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34: 427-437.
- McCarthy, J.F. and McKay, L.D. (2004): Colloid transport in the subsurface: past, present, and future challenges. *Vadose Zone J.*, 3: 326-337.
- 中野啓三 (1978): 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壤物理性の推移. 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.
- 農林水産省 (2019a): 令和元年度食料・農業・農村施策. [http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_maff/h30/attach/pdf/zenbun-37.pdf](http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h30/attach/pdf/zenbun-37.pdf). (2019.12.23)
- 農林水産省 (2019b): 面積調査. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html>. (2019.12.23)
- 小野寺恒雄, 藤森新作 (2005): 地下灌漑システム. 特許第3671373号.
- 大村邦男, 黒川春一 (1991): 融雪期の表面流去水が河川の水質に及ぼす影響. 北海道立農試集報, 62: 35-45.
- Stämpfli, N. and Madramootoo, C.A. (2006): Dissolved phosphorus losses in tile drainage under subirrigation. *Water Qual. Res. J. Canada*, 41: 63-71.
- 菅谷博 (1990): 暖地積雪面の微細気象的特性とそれに基づく積雪質量推定モデル. 北陸農業試験場報告, 32: 43-64.
- 鈴木克拓 (2016): 暗渠流出水中懸濁物質濃度を定める要因 — 界面電気現象の寄与. 2016年度土壤物理学会講演要旨集, 20-21.
- 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. 日本土壤肥料学雑誌, 76: 43-47.
- 鈴木克拓, 大野智史, 谷本岳 (2014): 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. 土壌の物理性, 127: 19-29.
- 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. 日本土壌肥科学雑誌, 83: 47-51.
- 竹内 誠 (1997): 農耕地からの窒素・リンの流出. 日本土壌肥科学雑誌, 68: 708-715.
- 取出伸夫, 西村 拓 (2003): コロイドの凝集分散と土の透水性. 足立泰久・岩田進午編著 土のコロイド現象, pp. 279-281. 学会出版センター, 東京.
- Verwey, E.J.W. and Overbeek, J.Th.G. (1948): Theory of the stability of lyophobic colloids: the interaction of sol particles having an electric double layer. Elsevier, New York.
- 吉田修一郎, 伊藤公一, 足立一日出 (1997): 重粘土転換畑への冬作物の導入による圃場の排水性の改善. 土壌の物理性, 76: 3-12.

## 要 旨

北陸地方の多雪重粘土地帯の水田転換畑における懸濁物質・リンの流出実態を調査した。大豆単作圃場では、懸濁物質は67%、全リンは60%が暗渠から流出し、暗渠流出したリンの9割が懸濁態で、コロイド担体輸送の重要性が明らかになった。暗渠流出水中懸濁物質はカルシウムイオンの臨界凝集濃度相当の導電率を閾値として高濃度の流出が生じ、DLVO理論に従う可能性が示された。積雪期の休閑圃場からは、濃度は低いものの、懸濁物質は夏作期の7割、リンは8割相当量が流出した。地下水位制御システムでの稲-大麦-大豆2年3作では、大麦期に全期間の7~9割相当量の水、懸濁物質、リンが流出した。水位制御により暗渠流出水量、懸濁物質流出量は減少、リン流出量は増加し、水位制御が水の流出経路と成分濃度に影響を与えたと考えられた。

キーワード：粘土質土壌，多雪地帯，水田転換畑，コロイド担体輸送，暗渠