

既存の暗渠を活用した地下水位制御による 粘土質転換畑からの窒素負荷削減

宮本輝仁* 北川 巖** 塩野隆弘* 亀山幸司*

* 農地基盤工学研究領域畑地工学担当

** 農地基盤工学研究領域水田高度利用担当

キーワード：暗渠排水, 硝酸態窒素, 脱窒, 水質

I 緒言

水田は一般に土壌が還元状態にあるため、脱窒により土壌中の窒素がガスとなって大気に放出され、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の流出負荷は小さいといわれる (田淵ら, 1979; 三沢, 1987; 石川ら, 1992)。しかし、今後、食料自給率の向上に向けた取り組みが推進され、多くの水田を転換畑として積極的に利用するようになると、施肥量の多い野菜作圃場などでは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出負荷の増加が懸念される。低平地水田では、水資源が十分でない場合、農業用水を反復利用するところもあり、地域的に農業用水を保全していくことも重要となる。そのため、転換畑利用する際には、農地から排出される $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出負荷の低減対策を検討する必要がある。低平地水田は既に圃場整備がなされ、暗渠排水が可能な圃場が多いため、既存の暗渠を利用した簡易な対策であれば、農家の負担も小さく、地域的にも取り組みやすくなる。

柴原 (1999) は、既存の暗渠排水口に立ち上がり管を取り付ける簡易な対策技術を提案している。この技術は、畑地からの $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出負荷の低減対策として、明渠や暗渠を使って地下水位制御するものの一つである。地下水位を高く保持し、土層内に還元層をつくることにより、脱窒を促進させて浸透水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を低下させる方法 (Gilliam et al., 1979; Lalonde et al., 1996; 柴原, 1999) や地下水位が高くなることにより、圃場面蒸発を促進して流出水を減少させる方法 (Gambrell et al., 1975; Wesström et al., 2001) がこれまで提案されてきている。既存の暗渠排水口に立ち上がり管を取り付けて排水位を高く保ち、脱窒により水田転換畑の暗渠からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出を抑制する技術は、これまでのところ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出抑制の効果が確認されなかった事例報告もあり (渡部ら, 2007)、更なる事例の蓄積を図ることが技術を確立していく上で重要である。

わが国の粘土質転換畑は、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 (長堀ら, 1977; 吉田ら, 1997)。なぜなら、粘土質土壌水田における暗渠排水の効果が、亀裂の発生による土壌透水性の増加と

暗渠埋戻し部の透水性の増加に起因するからである (山崎ら, 1964; 富士岡・丸山, 1971; 丸山・木俣, 1973; 井上, 1988)。そのため、排水位管理による $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出抑制を検討する場合、粘土質転換畑では主に土層内の亀裂等を通じて暗渠排水が行われることを考慮する必要がある (長谷川, 1986; 井上, 1988)。

そこで本研究では、粘土質転換畑を対象に、既存の暗渠排水口に立ち上がり管を取り付ける簡易な対策により地下水位を制御し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出負荷低減する技術の適用性を評価することを目的とした。そのため、亀裂土層で地下水位制御により $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出が抑制されることを実験室内で確認するとともに、試験圃場で $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出量や亜酸化窒素 (N_2O) 発生量について観測を行った。

II 試験方法

1 試験圃場の概要

試験圃場は農村工学研究所内の精密圃場 (50m × 50m の 25a 区画) である。土壌は重粘土であり、2010年夏までは湿田として管理されていた。2011年3月に暗渠は更新された。暗渠管は排水口が地表面下 80cm になるように埋設されている。2012年4月に土壌断面調査を行うとともに 100 cm³ の土壌サンプラーで採土し、土壌の物理特性を測定した (Table 1)。

2 土槽試験

亀裂等の粗間隙が発達した粘土質転換畑の土壌を対象に、地下水位を高く保つことにより、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の排出が抑制されることを実験室内で確認した。

実験装置を Fig.1 に示した。塩化ビニル製の土槽 (縦 20cm, 横 35cm, 高さ 35cm) に良く練り返したペースト状の粘質土を充填した。試料として用いた土壌は、試験圃場において採取した作土を風乾し、2mm の篩を通したものである。土槽の左隅に暗渠管を模した多孔管を埋設し、埋戻し部に相当する部分には、もみ殻が地表面まで充填されている。約 2 か月間、土槽上部を開放した状態で土槽を乾燥させて亀裂を発達させた。乾燥後の充填

Table 1 圃場の土壌の物理特性
Physical properties of soil in the test field

層名	深さ (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)	硬度	土性	体積含水率 (cm ³ /cm ³)			飽和透水係数 (cm/s)
					飽和	pF 1.5	pF 3.0	
A _p	0 - 16	1.03	7	CL	0.60	0.40	0.37	1.7 × 10 ⁻³
C _{g1}	16 - 37	1.32	21	CL	0.51	0.50	0.50	8.4 × 10 ⁻⁶
C _{g2}	37 - 67	1.24	13	CL	0.54	0.53	0.52	7.6 × 10 ⁻⁶
C _G	67 -	1.17	9	CL	0.56	0.52	0.51	5.4 × 10 ⁻⁶

試料の高さは20cmであった。その後、亀裂等の粗間隙量の3倍以上の量の脱イオン水を人工降雨装置で与えて土槽内の肥料成分を洗い流した。

土槽試験は一度作成した亀裂土槽を繰り返し用いて行った。初期水分条件を一定にするため、排水口を地表面と同じ高さに設定して、湛水が生じるまで人工降雨装置で給水した後、排水口の高さを暗渠口に戻して、24時間排水を行った。暗渠排水口を再び立ち上げて、NO₃-N濃度100mg L⁻¹の硝酸カリウム溶液（以下、NO₃-N溶液）を人工降雨装置で湛水が生じ始めるまで給水し、所定の期間、地下水位を地表面高さに保持した後、排水させて排水中のNO₃-Nの流出量を測定した。暗渠排水口の立ち上げ期間は、1日、3日、7日の3期間とし、対照のため暗渠排水口の立ち上げを行わなかった場合も測定した。

なお、NO₃-N溶液の給水から排水までの一連の操作が終わるごとに、粗間隙量の3倍以上の脱イオン水を与えて、前の実験で与えたNO₃-N溶液が洗い流されたのを確認しながら、次の条件での実験を行った。

3 圃場試験

農村工学研究所内の粘土質転換畑圃場をFig.2のように試験区を区切り、圃場試験を行った。試験区の区切りには90cmの溝を掘り、高さ60cmの波板を埋設した。排水口No.1～No.3は立ち上がり管を取り付けて地表面下50cmに地下水位を設定した（Fig.3）。排水口No.4とNo.5には立ち上がり管を付けず、通常の暗渠排水を行った。立ち上がり管の取り付けは、2011年は4月28日、2012年は6月1日に行った。

2011年は、5月9日に高度化成肥料15-15-15（N-P-K各成分ともに12kg/10a）を散布した後、スイートコーンを播種した。6月16日に追肥として硫酸をN成分で5kg/10a散布し、8月5日に収穫を行った。

2012年は、7月8日に立ち上げ区、対照区ともに半分の面積に高度化成肥料15-15-15（N-P-K各成分ともに20kg/10a）を散布した後、8月8日にキャベツの移植を行った。しかし、移植後の干ばつが酷く、キャベツは根づかなかった。

2011年5月から9月まで、1週間おきに排水口No.1～No.5で採水を行い、排水中のNO₃-N濃度をイオンクロマトグラフ（DIONEX, ICS-1500）で測定した。また、暗渠直上から1m離れた地点で地下水位と水温の観測を行った。更に、排水位制御区と対照区において、それぞれ暗渠直上と暗渠間でN₂O発生量の観測を1ヶ月に1回

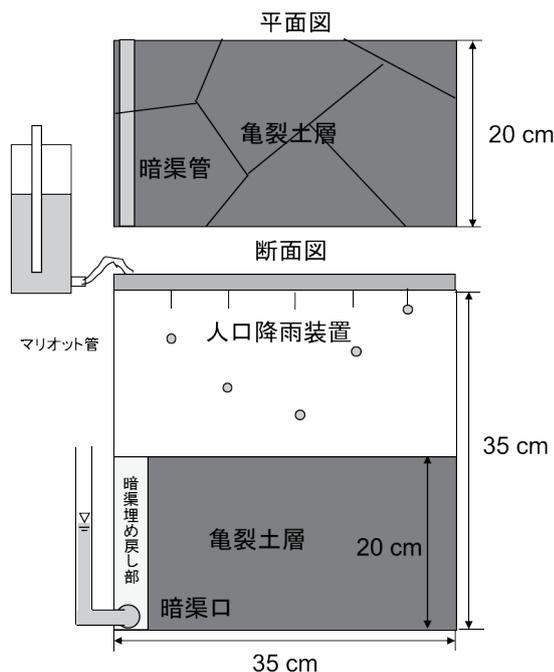


Fig.1 排水実験装置の概要図
Schematic diagram of the drain experiment system

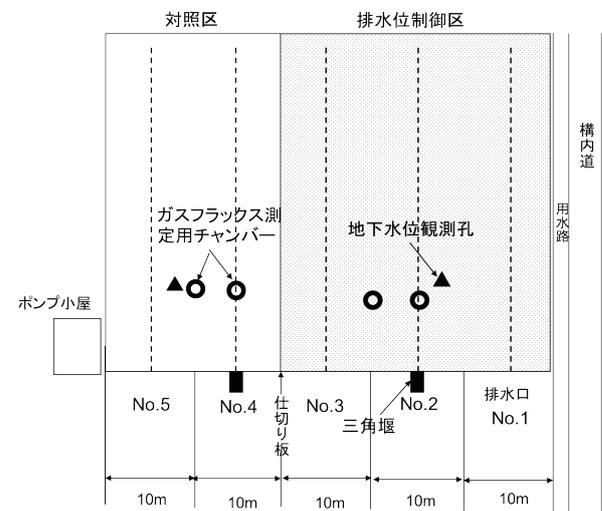


Fig.2 試験区の設定と観測体制の概要
Schematic overview of the monitoring set-up



Fig.3 暗渠排水口に立ち上がり管を設置した様子
Groundwater level control structure

の頻度で実施した。直径25cm、高さ25cm（5cm土中打ち込み）の不透明な塩ビ製のチャンバーを用いてクロードチャンバー法による複数回のガス採取を行い、ガスクロマトグラフ（島津製作所、GC-8A）のECD検出器で N_2O を測定した。

2012年6月から9月まで、2011年と同様の観測を行うとともに暗渠排水量についても測定した。暗渠排水量は三角堰を用いて5分間隔で測定した。

Ⅲ 結果と考察

1 土槽試験

排水位を暗渠口と同じに設定したとき、給水開始後、短時間で排水が始まりピーク排水量に達した（Fig.4）。その後、給水を行っている期間は給水量と排水量がほぼ等しい状態で推移した。給水を停止すると排水量も速やかに低下した。これは乾燥亀裂内の流れが卓越する水移動が起きたことによる。乾燥亀裂が粘土質水田の排水において大きく寄与することが強調されてきた（山崎ら、1964；富士岡・丸山、1971；井上、1988）。本土槽試験でも粘土質水田の排水特性を再現できたものと判断される。

乾燥亀裂等の粗孔隙を主体とした流れが生じているときの排水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経時変化をFig.5に示す。地下水水位制御なしの条件では、時間経過とともに排水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が急激に上昇し、速やかに $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が供給濃度の80%以上に達した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の施用量に対する積算排出量の割合は60%弱であった（Table 2）。24時間排水量を初期土壌水分条件としたため、暗渠埋戻し部および土層内で保持された水分による希釈とわずかではあるが脱窒作用によるものと考えられる。

暗渠排水口を立ち上げて地下水位を地表面の高さに保った後に排水した場合、地下水位を高く保持した期間が長くなるほど $\text{NO}_3\text{-N}$ の削減率が増加した（Table 2）。土層内が還元状態となり、脱窒により暗渠からの $\text{NO}_3\text{-N}$

排出が抑制されたことが確認された。立ち上げを行わなかった時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 削減率を差し引くことにより、主として脱窒によると考えられる $\text{NO}_3\text{-N}$ 削減率を求めると、1日当たりの $\text{NO}_3\text{-N}$ 削減率は7～17%となった。

高村ら（1983）は、水田のように湛水条件下では、田面水を滞留させるだけでも脱窒により $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低下すること、さらに土層内を浸透させることにより $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を田面水の1/3まで低下させることができたことを報告している。石川ら（1992）は、暗渠を通じて水田土層内を浸透させることにより $\text{NO}_3\text{-N}$ の流入水負荷量が63%除去された事例を報告している。水田では土層内を浸透させることにより、より大きな水質浄化機能が発揮されるといえる。そのためには土層内での浸透水の滞留時間を確保する必要がある。乾燥亀裂の発達した粘土質転換畑では粗孔隙を通じた流れが卓越して、浸透水の滞留時間を確保することが困難である。しかし、今回の実験結果は、粘土質転換畑で浸透水の滞留時間を確保するために、粗孔隙を通じた早い流れが生じやすいことを利用し、暗渠排水口を立ち上げて地下水位を高く保つことが有効であることを示している。

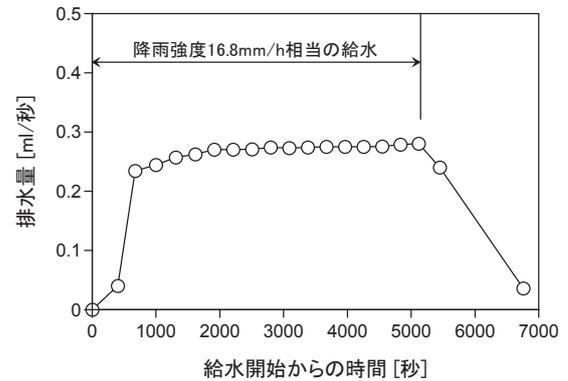


Fig.4 亀裂が発達した土層からの排水量の経時変化
Temporal change in drain flow rate from the experimental soil block with crack

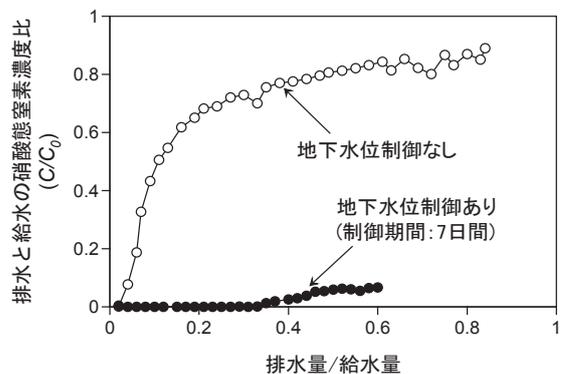


Fig.5 地下水水位制御の有無による水質変化
Effects of controlled drainage on nitrate concentrations

Table 2 排水位の制御の有無による硝酸態窒素排出量の違い
Effects of controlled drainage on drain outflow and nitrate losses

	給水量 (L)	排水量 (L)	排水量/給水量	NO ₃ -N 施用量 (mg)	NO ₃ -N 排出量 (mg)	NO ₃ -N 削減率
排水位制御なし	1.34	1.09	81%	142.9	81.1	43.2%
排水位制御1日間	1.24	1.04	84%	128.8	50.7	60.6%
排水位制御3日間	1.17	0.90	76%	101.7	29.5	71.0%
排水位制御7日間	1.25	0.77	61%	131.2	13.1	90.0%

2 圃場試験

2011年のスイートコーン栽培期間における暗渠排水中のNO₃-N濃度の経時変化をFig.6に示す。立ち上げ区、対照区ともにNO₃-N濃度が播種後から6月中旬にかけて高く、6月下旬以降は急激に低下した。NO₃-N濃度のピーク発生時期は立ち上げ区と対照区ではほぼ同じであったが、NO₃-N濃度は、栽培期間全体を通して、立ち上げ区が対照区より低くなる傾向であった。

2012年の栽培期間における暗渠排水中のNO₃-N濃度の経時変化をFig.7に示す。立ち上げ区、対照区ともに7月上旬の施肥前はNO₃-N濃度が低い状態であった。施肥直後に50mmの降雨があり、NO₃-N濃度のピークが発生した。ピーク時のNO₃-N濃度は立ち上げ区のほうが対照区より低くなった。これ以外の期間においても立ち上げ区のほうが対照区より暗渠排水のNO₃-N濃度が低く推移した。

柴原(1999)の示した排水水位の制御によるキャベツ残渣すき込み圃場からの暗渠排水中の硝酸塩濃度低減効果でも、降水量が少なく暗渠排水量も少ない期間では、対照区に比べて立ち上げ区はNO₃-N濃度が1/10程度まで低下しているが、降水量が多くNO₃-N濃度のピークが生じた期間では、その削減幅は1/2程度に止まっている。今回の圃場試験結果も概ね同様の結果であった。地下水

位を高くしたときNO₃-N濃度が下がる要因は脱窒によると考える。小川ら(2000)は易分解性の有機物が十分確保されれば、地下水面上部において降下浸透水中のNO₃-Nが脱窒されやすいことを示している。

立ち上げ管は設置後1~2日以内で排水により満たされた。その後の地下水位の経時変化を見ると、対照区に比べて常に地下水位が30cm程度高く保たれていたことが分かる(Fig.8上)。2012年度も立ち上げ管を設置後約2か月間は前年度と同様、対照区に比べて常に地下水位が30cm程度高く保たれていた。しかし、8月中旬以降、降雨がほとんどない期間が続いたため、立ち上げ区の地下水位も対照区と同じ水位まで低下した(Fig.9上)。9月2日~6日に総雨量62.5mmの降雨があり、地下水位も徐々に回復した。このように暗渠排水水位制御による地下水位の変動は気象条件に依存する。乾燥亀裂が発達していたため、降雨時に速やかに地下水位が上昇し、降雨終了後も速やかに地下水位が低下している。また、無降雨日が続くと暗渠排水水位制御によって高められた地下水位が低下することも観測された。地下水温は立ち上げ区、対照区ともに同様の値で推移した(Fig.8下, Fig.9下)。立ち上げ管を取り付けることにより、容易に地下水位の制御が可能であることが確認された。また、降雨に対する地下水位変動は両区とも類似しており、立ち上げ管の

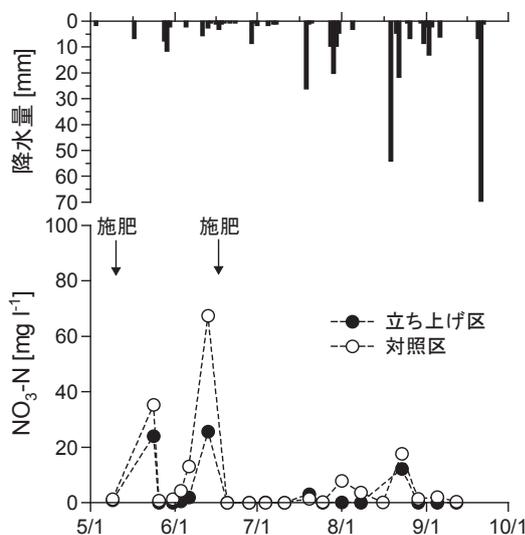


Fig.6 2011年度の降水量(上)とNO₃-N濃度(下)の経時変化
Temporal changes in precipitation and NO₃-N concentration of drain outflow during the field experiment in 2011

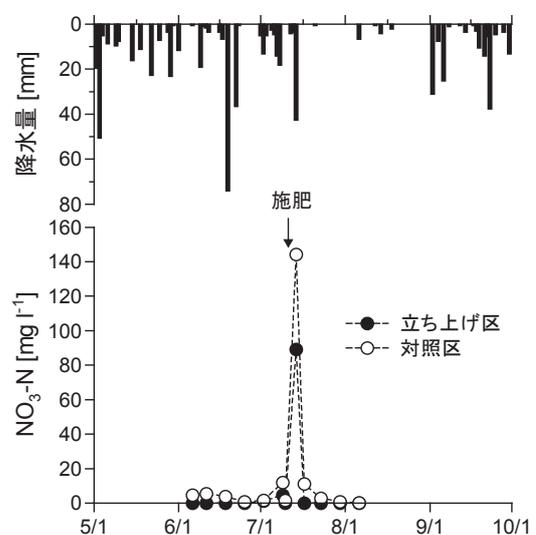


Fig.7 2012年度の降水量(上)とNO₃-N濃度(下)の経時変化
Temporal changes in precipitation and NO₃-N concentration of drain outflow during the field experiment in 2012

取り付けは降雨後の排水にあまり影響を与えず、地下水位を高く保つ効果があると判断される。

立ち上げ区と対照区とも降雨イベントに対する暗渠排水量の経時変化は比較的似ていた (Fig.10)。しかし、時期を区切って詳細に検討すると、常時の暗渠排水量は、6月中旬までは立ち上げ区 (117.3 mm) が対照区 (59.9 mm) より多く観測されたが、その後は対照区 (118.8 mm) のほうが立ち上げ区 (75.6 mm) より多くなった。降雨時の暗渠排水量のピーク値で比較すると、対照区のほうが立ち上げ区に比べて高い値が観測されることが多かった (Table 3)。立ち上げ管の設置により、降雨直前までに蒸発により設定地下水位より地下水位が下がった場合、設定地下水位に達するまで土層内で貯留することが可能となるためピーク流量が下がったと考えられる。Gambrell et al. (1975) や Wesström et al. (2001) は、地下水位制御により圃場面蒸発が促進されて流出水が減少

することを報告している。また、吉田ら (1997) は、干ばつにより圃場内の亀裂や粗間隙が発達すると、地中での水の連絡がよくなり、浸透による系外への水の流出が増加することを示唆する調査結果を報告している。夏場の連続干天により対照区では7月下旬には地下水位が暗渠管より深い位置に観測されたことから (Fig.9), 8月以降で対照区のほうが立ち上げ区より暗渠排水量が多かったことについて、亀裂の発達による浸透性の変化も一要因として考えられる。しかし、本研究では、暗渠排水量の観測が2012年度のみであったことから、今後更なるデータ蓄積を行い、土層内での水分動態も含めた検討が必要である。

7月上旬の施肥後から8月中旬までの約1か月半のNO₃-N排出量の合計は、立ち上げ区で0.4 kg/10aであったのに対して対照区は1.2 kg/10aであった。上述のように、この期間の暗渠排水量が立ち上げ区より対照区が多かったこと、NO₃-N濃度も立ち上げ区より対照区が高かったことの両方の要因による。

Fig.11に脱窒の過程で発生するといわれるN₂O発生量の観測結果を示した。1か月に1回の頻度での測定であったため、降雨に伴って土壌水分量が増加した場合にN₂Oフラックスが増加する (Akiyama and Tsuruta, 2003) 等の短時間での経時的な変化はとらえられていないが、立ち上げ区は土層内に還元層を創出しているため、対照区に比べてN₂Oが発生しやすい環境にあることを示唆する結果となった。今後、土層内での窒素収支を検討する際には、地力窒素の発生量や作物による窒素吸収量と併せ、より高頻度な測定が必要である。

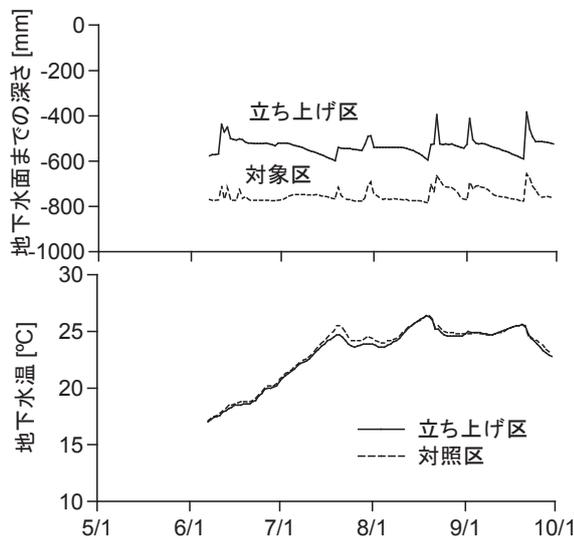


Fig.8 2011年度の地下水水位(上)と地下水水温(下)の経時変化
Ground water levels and their temperatures in 2011

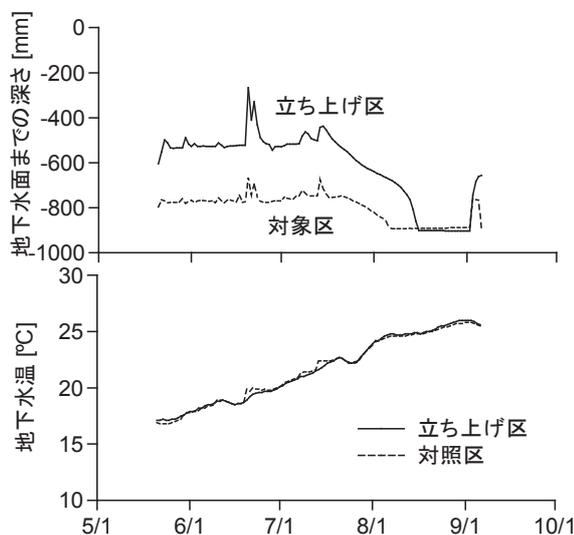


Fig.9 2012年度の地下水水位(上)と地下水水温(下)の経時変化
Ground water levels and their temperatures in 2012

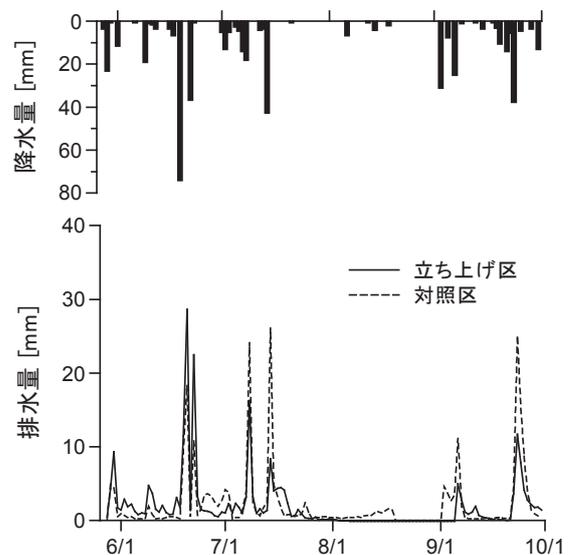


Fig.10 2012年度の立ち上げ区および対照区の暗渠排水量の経時変化
Hydrograph from end of May to September 2012

Table 3 2012年夏季の降水量, 暗渠排水量および暗渠からのNO₃-N排出量
Precipitation, discharges and nitrate losses for the field experiment in 2012

期 間	降水量 [mm]	暗渠排水量 [mm]		NO ₃ -N排出量 [g]	
		立ち上げ区	対照区	立ち上げ区	対照区
5/28 - 6/8	39.0	28.1	13.4	0.0	0.0
6/9 - 6/15	25.0	14.9	4.3	0.1	2.6
6/16 - 6/24	121.0	74.3	42.2	0.6	18.3
6/25 - 6/30	0.0	5.9	17.4	0.0	1.8
7/1 - 7/6	30.0	9.3	10.3	1.3	1.8
7/7 - 7/13	39.5	27.7	36.2	14.6	49.3
7/14 - 7/16	42.5	16.7	34.2	168.7	557.4
7/17 - 7/22	0.5	13.6	5.2	0.1	6.6
7/23 - 7/29	0.0	2.4	5.9	0.0	1.9
7/30 - 8/5	0.0	0.5	2.7	0.0	0.2
8/6 - 8/15	11.0	0.0	6.9	0.0	0.2

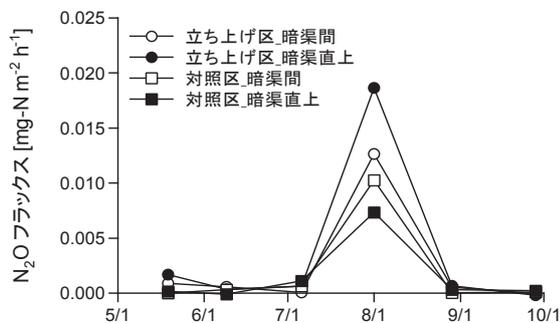


Fig.11 一酸化二窒素 (N₂O) の発生状況 (2011年)
Dinitrogen monoxide emissions from the experimental field

IV 結 言

食料自給率の向上に向けた取り組みが推進されて, 粘土質水田が転換畑として積極的に利用されるようになると, 農地からのNO₃-Nの流出負荷の増加が懸念される。本研究では暗渠排水口に立ち上がり管を取り付ける簡易な対策により地下水位を高く保ち, 脱窒によりNO₃-Nの流出負荷を削減する方法の粘土質転換畑への適用性を検討した。

土槽試験により, 乾燥亀裂が発達した土層内の水の移動特性を把握するとともに水の滞留時間とNO₃-Nの削減率との関係について調べた。乾燥亀裂内の流れが卓越すると, 給水開始から速やかにピーク排水量となり, 排水のNO₃-N濃度も給水のNO₃-N濃度の80%に達した。暗渠排水口を高めて水の滞留時間を確保すると, NO₃-Nの削減率は滞留時間が長くなるにつれて大きくなり, 滞留時間7日間では削減率が90%であった。

2011年に暗渠の更新を行った粘土質転換畑で2011年と2012年に圃場試験を行い, 地下水位制御によるNO₃-Nの流出削減効果を調べた。暗渠排水口に立ち上がり管を取り付けるだけで, 容易に地下水位を高く保つことができることが確認された。観測期間を通して, 立ち

上げ区からの暗渠排水のNO₃-N濃度は対照区に比べて1/2~1/100に低下していた。削減割合の経時的な変化は降雨条件, 営農条件に依存していた。2012年7月上旬の施肥後から8月中旬までの約1か月半のNO₃-N排出量の合計は, 立ち上げ区で0.4kg/10aであったのに対して対照区は1.2kg/10aであった。地下水位を高く保持することにより, 土層内に還元層ができ, 脱窒が促進されて浸透水中のNO₃-N濃度が低下したことや地下水位が高くなることにより, 圃場面蒸発が促進されて流出水が減少したことの二つの要因が考えられた。また, 脱窒により対照区に比べて亜酸化窒素が発生しやすい環境にあることが示唆された。

以上の結果から, 乾燥亀裂が発達した粘土質転換畑では, 暗渠排水口に立ち上がり管を取り付けることにより容易に地下水位制御が可能であること, また, 暗渠からのNO₃-N流出負荷削減にも有効であることが明らかとなった。ただし, 排水特性やNO₃-N流出負荷削減特性は年次変動を踏まえて長期にわたる調査が必要である。また, 地下水位を高くした場合の作物に対する影響については今後の課題である。

参考文献

- 1) Akiyama, H., and H. Tsuruta (2003) : Nitrous oxide, nitric oxide, and nitrogen dioxide fluxes from soils after manure and urea application, *J. Environ. Qual.*, **32**, 423-431.
- 2) 富士岡義一, 丸山利輔 (1971) : 粘質土壌水田における暗渠排水に関する研究 (I) - 暗渠埋戻し部と作土亀裂の役割 -, *農土論集*, **35**, 48-53.
- 3) Gambrell, R. P., J. W. Gilliam, and S. B. Weed (1975) : Denitrification in subsoils of North Carolina Coastal Plain as affected by soil drainage, *J. Environ. Qual.*, **4**, 311-316.
- 4) Gilliam, J. W., R. W. Skaggs, and S. B. Weed (1979) : Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields, *J. Environ. Qual.*, **8**, 137-142.

- 5) 長谷川周一(1986)：転換畑土壌中の水分移動, 土壌の物理性, 53, 13-19.
- 6) 井上久義(1988)：亀裂が発達した粘土質圃場における暗渠排水特性, 農土論集, 137, 25-33.
- 7) 石川雅也, 田淵俊雄, 山路永司, 中島淳(1992)：暗渠浸透による水田の水質浄化試験－水田土層の水質浄化機能に關する研究(I)－, 農土論集, 159, 81-89.
- 8) 小松茂雄, 小林敏正, 北浦裕之, 武久邦彦(2003)：田畑輪換栽培における土壌・施肥管理の総合改善技術, 滋賀農総七農試研報, 43, 33-46.
- 9) Lalonde, V., C. A. Madramootoo, L. Trenholm, and R. S. Broughton(1996)：Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge, *Agric. Water Manage.*, **29**, 187-199.
- 10) 丸山利輔, 木俣勲(1973)：クラック網における水の流動抵抗について, 農土論集, 45, 1-5.
- 11) 三沢真一(1987)：水田における水質変化機構について, 農土論集, 127, 69-78.
- 12) 長堀金造, 高橋強, 池本二郎(1977)：地下水面上の土壌水分分布と水分環境の改善, 農土論集, 67, 1-9.
- 13) 小川吉雄, 加藤英孝, 陽捷之(2000)：地下水面上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能, 土肥誌, 71, 494-501.
- 14) 柴原藤善(1999)：田畑輪換水田におけるキャベツの作条施肥技術と暗渠排水浄化技術, 近畿中国地域における新技術, 33, 114-118.
- 15) 田淵俊雄, 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, 農土誌, 47, 859-864.
- 16) 高村義親, 鈴木誠治, 古賀康夫, 田淵俊雄(1983)：湛水土壌ライシメーターにおける硝酸態窒素および塩素イオンの動向と収支について, 土肥誌, 54, 37-44.
- 17) 山崎不二夫, 竹中肇, 田淵俊雄, 多田敦(1964)：粘土質の水田の暗渠排水における心土亀裂の役割, 農土研究, 32, 151-159.
- 18) 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.
- 19) 吉田修一郎, 高木強治, 足立一日出, 増本隆夫(1997)：気象条件の変化に伴う中山間地耕作放棄田の土壌物理性の変化, 農土論集, 191, 75-83.
- 20) 渡部慧子, 中村公人, 三野徹(2007)：水位保持型暗渠による環境負荷削減効果, 農業農村工学会講要集, 1026-1027.
- 21) Wesström, I., I. Messing, H. Linnér, and J. Lindström(2001)：Controlled drainage – effects on drain outflow and water quality, *Agric. Water Manage.*, **47**, 85-100.

受理年月日 平成24年10月29日

Effects of Controlled Drainage on Nitrogen Losses in a Clayey Agricultural Field with Cracks

MIYAMOTO Teruhito, KITAGAWA Iwao, SHIONO Takahiro and KAMEYAMA Koji

Summary

Paddy fields are often used for upland crop cultivation in intensive agricultural production in Japan. To maintain high crop yields and groundwater and surface water quality in drained agricultural lands, management practices which reduce the leaching of nitrate–nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) into subsurface drainage systems are required. Controlled drainage has been identified as a potential management method to reduce $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching into subsurface drainage systems. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of controlled drainage on $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching in clayey soil with cracks.

The relationship between drain discharge quality and soil-water residence time was investigated using a model soil layer with cracks. For free outlet subsurface drainage, preferential water flow in cracks was predominant. Therefore, the $\text{NO}_3\text{-N}$ drainage concentration quickly reached 80% of the supplied $\text{NO}_3\text{-N}$ solution concentration. In contrast, controlled drainage had a significant effect on the drain discharge quality. The longer the residence time of soil water, the larger was the reduction rate of $\text{NO}_3\text{-N}$. For a residence time of 7 days, the reduction rate was 90% .

In 2011 and 2012, a field experiment was conducted on clayey soil on a field scale to assess the effects of controlled drainage on $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching. Controlled drainage makes it possible to conveniently vary the water table levels by attaching a riser to the drain pipe. There were 1/2–1/100 reductions of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in the drain flow in controlled drainage as compared with free outlet subsurface drainage. The reduction rate was dependent on rainfall and farming conditions. The amounts of $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching from early July 2012 to the middle of August 2012 for the controlled drainage site and free outlet subsurface drainage site were 0.4kg/10a and 1.2kg/10a, respectively. By raising the water table, more soil will be in a saturated state, producing anaerobic conditions which promote denitrification. In addition, evaporation from the soil surface will increase and outflow volume will decrease. These results show that there are significant environmental benefits with controlled drainage.

Keywords : Subsurface drainage, Nitrate–nitrogen, Denitrification, Water quality