九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

水田浸透過程における栄養塩類濃度の低減機能評価

阿南，光政
九州大学大学院生物資源環境科学府

弓削，こずえ
九州大学大学院農学研究院

中野，芳輔
九州大学大学院農学研究院

宮崎，真人
水資源機構

https://doi.org/10.15017/8862

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 61 (2), pp.303-310, 2006-10-27. 九州大学大学院農学研究院
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌（Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.）
第61巻　第2号　303-310　(2006)

水田浸透過程における栄養塩類濃度の低減機能評価

阿　南　光　政[1*]・弓　削　こずえ
中　野　芳　輔　・宮　崎　真　人[2]
九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座灌漑利水学研究室

(2006年6月30日受付，2006年7月24日受理)

Evaluation of removal nutrient rich salts with the process of paddy fields percolation

Mitsumasa ANAN[1*], Kozue YUGE, Yoshisuke NAKANO and Masato MIYAZAKI[2]
Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒　　言

水田は，食糧生産の場としての機能のほかに，土壌浸食防止，地下水涵養，生物生息空間の保持といった多面的機能を兼ね備えている．一方で，農村地域における過疎化や高齢化，混住化の進行から，水田を取り巻く営農形態や土地利用状況は急速に変化してきている．その結果，農地の転用，水田の転作化，優良農地の改廃化が増加し，従来水田が持つとされる多面的機能が十分に発揮されなくなってきた現状にある．さらに，このような農村地域の社会構造の変化は，地域用水の維持管理機能の低下を招き，対照的に生活様式の都市化が進行したことから，水田地帯の水質の悪化や富栄養化が引き起こされている．富栄養化は，アオコの発生や悪臭の要因となることから，農村の生態系や景観に与える影響も少なくない．農村地域の地域用水の水質改善は，農業生産及び農村生活に密接な課題であり，早急な対処が求められている．

水田には水質を浄化する効果を多面的機能の一つとして持ち合わせていると言われている．富栄養化の原因である栄養塩類に対する水田の除去機能に関する調査研究は，過去に報告されており（田淵ら，2004，小川ら，1985），筆者らもクリーク地帯を想定した循環灌漑による水質浄化効果の実証結果を報告している（阿南ら，2005）．しかしながら，これらの報告はいわゆる永久水田と呼ばれる通常の水田を対象とした実証例である．昨今の水田は，米の生産調整対策や米価の低迷による輪換耕地化が進行し，2年あるいは3年のローテーションを組み，輪作を実施する水田が増加している．一般に，前年度畑作として利用した還元田は通常の水田と比べて減水深が増加し，還元田2年目，3年目となると通常の水田減水深の値へと漸近していく．輪換耕地化することで，水田土壌の透水性や土性には違いが出てくることから，これらは水質浄化効果にも大きく影響すると考えられる．したがって，水田の水質浄化機能を効果的に発現させるためには，水管理条件や土地利用条件の違いが浄化機能に及ぼす影響を検証する必要がある．

[1]九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座灌漑利水学研究室
[2]水資源機構
[1]Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University
[2]Japan Water Agency
*Corresponding author（E-mail: anan@bpes.kyushu-u.ac.jp）

本研究では，水田を用いた水質浄化手法を実践レベルにすることを目的とし，栄養塩類のひとつである窒素濃度（T-N）について，排水収支型のライシメータを用いた実験を行った．実験はライシメータを仮想水田とし，土地利用条件や水管理条件を変えることで，窒素濃度の動態に与える影響を検証した．さらに，円筒型のポットに水田土壌を敷き詰め，各層での土中水を採水することで，水田土壌の浸透過程における濃度変化についても検証した．

実　験　方　法

水田の利用形態や水管理手法の違いによる水質浄化効果を検証するため，九州大学内の屋外ライシメータと，屋内に設置した円柱ポットを用いたモデルを構築し実験を行った．

ライシメータモデル（図１）は縦4.0m×横1.0m×高さ2.0m のライシメータに底部に砂質土，表層部に壌土を敷き詰めて水田を再現した圃場部と縦1.0m×横1.0m×高さ2.0m の貯水槽からなる水路部で構成されている．圃場部と水路部の境界には壌土を締め固めた畦畔があり，その上端は表土の流出や灌漑用水の落水を防ぐために堰板を設置している．水路部には水中ポンプが設置されており，水路部に貯留された水がポンプアップされ圃場部へ灌漑される．圃場部に灌漑された水は圃場部土壌，畦畔部を浸透して水路部に流出し，再び灌漑用水として用いられる．圃場部の中央部には深さ0.10m，0.35m，0.55m にポーラスカップをつけたチューブを埋設しておき，地表の湛水と同時に土壌浸透水を深さ別に採水する．貯水部は汚染した灌漑用水の代替として，市販の家庭園芸用肥料（窒素５％，リン10％，カリ５％を含む）を高濃度に希釈した溶液を作成し，これを初期状態として実験を開始する．

円柱ポットモデル（図２）は直径0.20m，深さ1.0m の円柱ポットに，水田より採土した土壌を充填した．

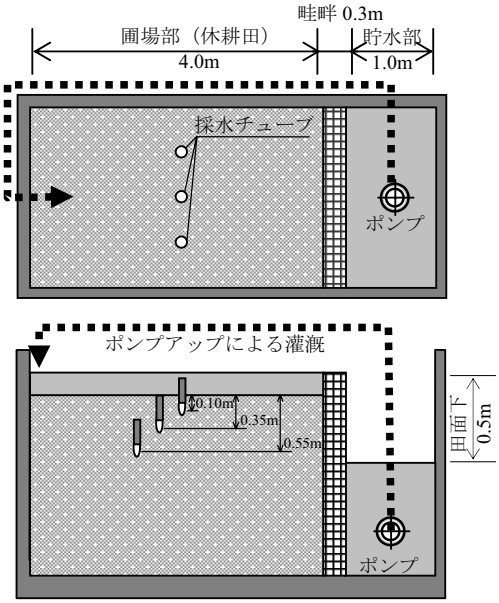


図１　ライシメータモデル模式図

表１　実験１におけるライシメータモデルの条件

ライシメータ	A	B	C
利用履歴	永久水田	還元田２年目	還元田１年目
耕盤層	あり	あり	無し
飽和透水係数（cm/s）	3.54×10^{-4}	1.36×10^{-3}	1.17×10^{-3}

表２　実験２におけるライシメータモデルの条件

ライシメータ	A	B	C
１回の灌漑水量	25mm	25mm	25mm
灌漑回数	1 time/day	3 times/day	5 times/day
総灌漑水量	25mm/day	75mm/day	125mm/day

表３　実験３におけるライシメータモデルの条件

ライシメータ	A	B	C
曝気時間	2hr/day	1hr/day	1hr/day
灌漑回数	2 times/day	1 time/day	1 time/day
総灌漑水量	50mm/day	25mm/day	25mm/day

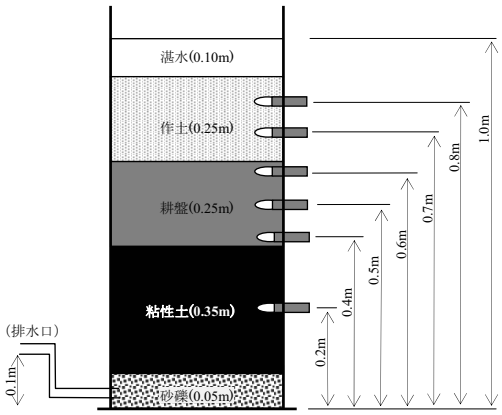


図 2　円柱ポットモデル模式図

水田土壌は表面から作土（壌土），耕盤（壌土締め固め），粘性土，砂礫をそれぞれ0.25m，0.25m，0.35m，0.05m の厚さになるよう層状に敷き詰め，ポット最下部の砂礫層に排水チューブを接続した．土中水を採水するため下端から0.2，0.4，0.5，0.6，0.7，0.8m の高さでポット側面に穴を開けポーラスカップを挿入した．蒸留水でポット内の土壌を飽和させた後，市販の家庭園芸用肥料（窒素５％，リン10％，カリ５％を含む）を希釈した溶液を灌漑用水として湛水させて実験を開始する．

水質分析項目は農業用水の水質基準項目のうち，富栄養化の要因となる栄養塩類の指標である全窒素（T-N）及び全リン（T-P）とした．

１．水田の利用形態による影響実験

水田の利用履歴が水質浄化機能に及ぼす影響を確認するため，表１に示す３タイプのライシメータモデルを準備し，水質変化を追跡する．ライシメータＡは，毎年水田利用している永久水田を想定し，作土層の下には耕盤が形成されており，土壌の透水性はもっとも悪い．ライシメータＢは１昨年度に畑地利用した還元田２年目の水田を想定し，作土層下の耕盤はある程度形成されているものの，土壌の透水性は永久水田タイプに比べて高い状態にした．ライシメータＣは，前年度畑地利用した還元田１年目の水田を想定し，耕盤は形成されてなく，透水性は３タイプのうちもっとも良好な状態にした．

２．灌漑水量による影響実験

水質の浄化に適切な灌漑用水の循環量を検証するため，表２に示す３タイプの循環灌漑パターンについて水質変化を追跡する．モデルライシメータの減水深に相当する水量25mm を，ライシメータＡで１日１回，ライシメータＢで４時間ごとに１日３回，ライシメータＣで２時間ごとに１日５回，貯水部よりポンプアップし灌漑する．灌漑は日中に限り，夜間は精置し，午前中採水する．

３．曝気処理による影響実験

農業用水の曝気処理が水質浄化機能に及ぼす影響を確認するため，表３に示す３タイプのライシメータモデルを準備し，水質変化を追跡する．

４．水田浸透水質の経時変化検証

通常の水田水管理は，日中に日減水深相当に湛水し，夜間は静置する．したがって水田に引き込まれた灌漑用水はおよそ24時間で地下浸透，畦畔浸透していく．この過程における水質浄化作用の詳細を把握するため，１日当たりの浸透水量と水質濃度分布の関係を追跡する．実験は無降雨日において実施し，永久水田，還元田１年，還元田２年モデルに対して，灌漑前，灌漑後１時間，４時間，７時間，22時間について採水調査した．

５．土層別採水による水質浄化検証

水田土層は，一般的に作土，耕盤となる壌土層，還元状態にある粘土層，地下水帯となる礫質層から構成される．これらどの層が水質浄化に有効に作用するのかを検証するため，ポットモデルを用いて実験する．ポット内を蒸留水で飽和させた後，灌漑用水として，液肥を希釈した灌漑用水を湛水深0.1m となるよう注ぎ，１週間後に土中水を採水した．灌漑用水の希釈倍率は，10倍，４倍，２倍について検証した．

実　験　結　果

１．水田の利用形態による影響評価

水田は水稲の生育期間中，土壌面を湛水状態に保つ必要がある．そのため，田植え前に代かき作業を行い，土壌を泥ねい化する．その結果，作土層下に難透水性の耕盤が形成され，水田の貯水性が保たれる．一方で近年の水田利用形態は，輪換耕地化が進み，輪作体系を実施する農家が増えてきている．畑利用することで，水田利用時に形成された難透水性の土層は破断され，保水性が低下する．したがって水田の利用履歴によって，減水深が異なってくることが確認されている（足立，1979）．一旦畑地利用した後，再び水田として利

用する田を還元田と呼ぶが，用水計算上では，通常の減水深に対して1.1倍から1.5倍の減水深を還元田に対して計上することもある（木村，1986）.

水田の利用履歴別による栄養塩類の浄化効果について実験結果を図３に示す．実験の結果，もっとも濃度が低下したのは，永久水田をモデル化したライシメータＡで，続いて還元田２年目をモデル化したライシメータＢであった．還元田１年目のモデルであるライシメータＣでは，確認されなかった．一般に還元田の減水深は２年目から３年目になると永久水田と同等とされる．これは，作土層下の耕盤が発達することにより，水田の保水性が向上，復元するためであるが，この傾向は本実験結果の水質浄化効果と一致する結果となった．従って耕盤層の発達は，浸透水の栄養塩類除去に大きく関与していると，本実験結果より推測される.

２．灌漑水量による影響評価

水田灌漑は通常，生育期別に適切な湛水深を保つように取水量，落水量，灌漑時間を調節することで，多様で詳密な水管理が行われる．しかしながら，昨今の農業従事者の減少や高齢化から，きめ細かな水管理が困難になり，水管理の省力化や合理化が図られ，配水管理用水や栽培管理用水が増加傾向にある（Anan *et al.*，2004）．この傾向は水資源の観点から考えると負の要素と成りかねないが，水質保全上では有効な方策と成り得る．富栄養化が発生しやすいクリークに対する水質改善の方策として，循環灌漑させることが有効であるという報告もある。(阿南ら，2005)．しかしながら，クリーク水を循環させるには動力が必要となるため，費用対効果の側面から浄化効果に対する最適な循環量を検討する必要がある.

灌漑水の循環量別に浄化効果を比較した実験結果を図４に示す．実験の結果，１日１回25mm/day 循環させたライシメータＡにおいて浄化効果が高かった．したがって水田土壌中の滞留時間を長く保ちながら浸透させることが栄養塩類の除去に有効であると考えられる.

３．曝気処理による影響評価

下水処理法として有用である曝気処理は，汚染水に対して空気を吹き込んだり攪拌したりすることで，微生物が有機物を分解するのに必要な酸素を供給し，水質の浄化反応を促進する．農業用水における富栄養化は，灌漑用水，排水が対流しないために起こる貧酸素状態が大きな要因である．したがって，曝気処理は農業用水の水質改善策としても有効性が期待される.

灌漑水に曝気処理を行った場合の栄養塩類の除去効果を比較した実験結果を図５に示す．実験の結果，栄養塩類濃度の低下は確認できたものの，先に検証した循環灌漑による浄化効果と捉えることができる．これらが曝気による効果とは推定し難く，曝気処理時間に対する顕著な違いも確認されなかった.

４．水田浸透水質の経時変化検証

水田に灌漑された用水の浸透過程での浄化状況を確認するために，深さごとにおける日変化を追った結果を図６に示す．いずれのライシメータにおいても，経過時間による変化は確認されなかった．一方，深さ方向の変化には特徴が現れている．永久水田モデルのライシメータＡおよび還元田２年目モデルのライシメータＢにおいては，同時刻の地表地点での全窒素濃度に比べて深さ0.1m 地点での濃度が小さくなる傾向にあり，ライシメータＡはより顕著である．一方，還元田１年目モデルのライシメータＣについては，対して0.1m 地点での濃度が大きくなっている．ライシメータＡおよびＢの深さ0.1m 付近には水田の保水性を高める耕盤が形成されているが，ライシメータＣは還元田１年目モデルであり，前作は畑地利用だったため，耕盤は破壊され，まだ復元されていない状態である．本実験結果より，水田の特徴である作土層下にある難透水性の耕盤層が，窒素濃度の低減に大きく寄与していると考えられる.

５．土層別採水による水質浄化検証

水田土層のうち，栄養塩類の除去にもっとも寄与する土層を確認するために，ポットモデルの実験結果を図７に示す．実験は灌漑用水の濃度を変えて，３パターン実施したが，深さ方向の濃度分布はいずれも同様の傾向を示している．透水性のよい作土層下部にあたる深さ0.2m の地点で濃度が一旦高くなり，難透水性である次層の耕盤にあたる深さ0.3m の地点で急激に低下している．それより下層については大きな濃度変化はなく，地下水帯水層となる砂礫層へと浸透流出している状態である．ポットモデルを用いた本実験より，水田土層のうち作土層と耕盤層の間において，窒素濃度の低減が活発に起こっていることが推測され，この結果は先のライシメータモデルでの実験結果においても共通する特徴である.

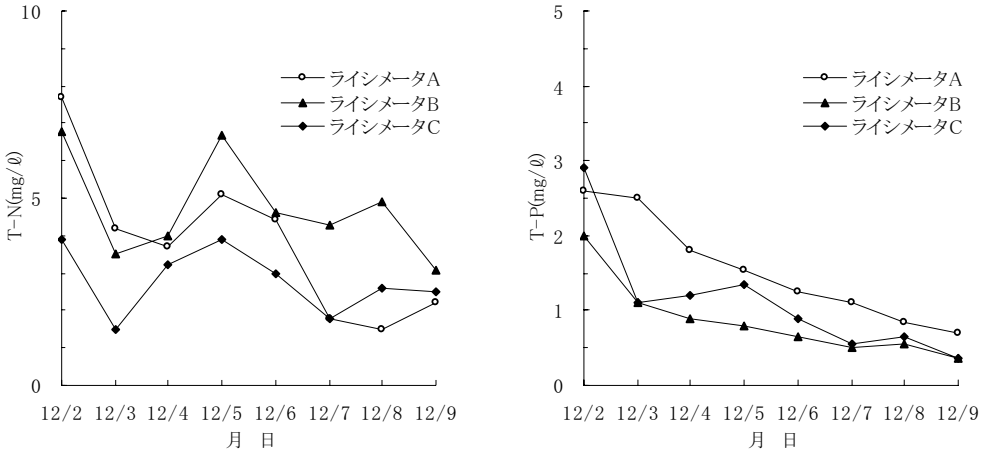


図 3　水田形態別ライシメータモデルにおける栄養塩類濃度測定結果

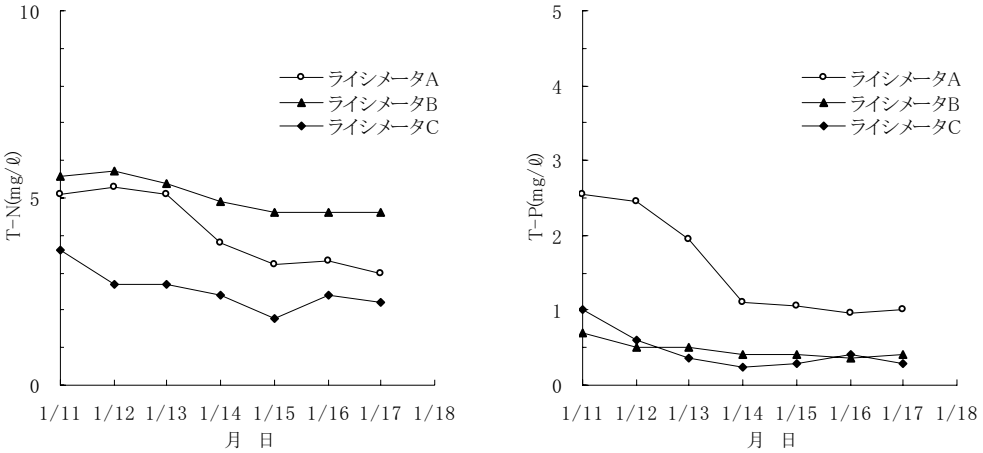


図 4　灌漑水量別ライシメータモデルにおける栄養塩類濃度測定結果

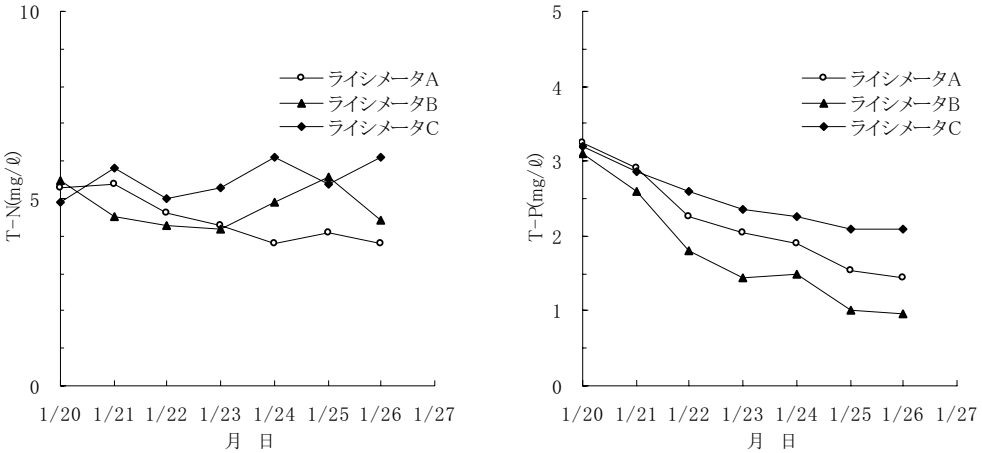
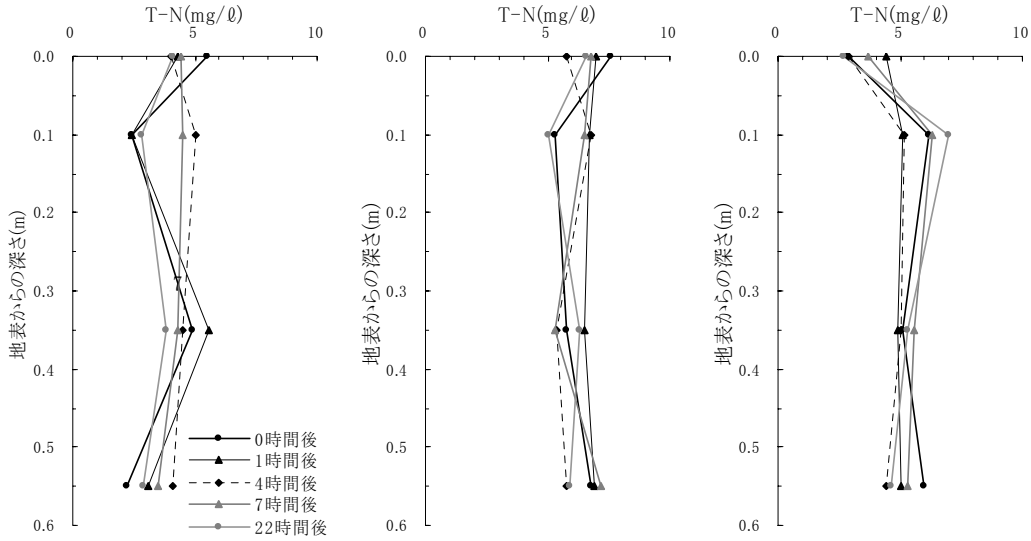


図 5　曝気処理ライシメータモデルにおける栄養塩類濃度測定結果



(A)ライシメータ A　　(B)ライシメータ B　　(C)ライシメータ C

図 6　水田降下浸透過程における全窒素（T-N）濃度測定結果

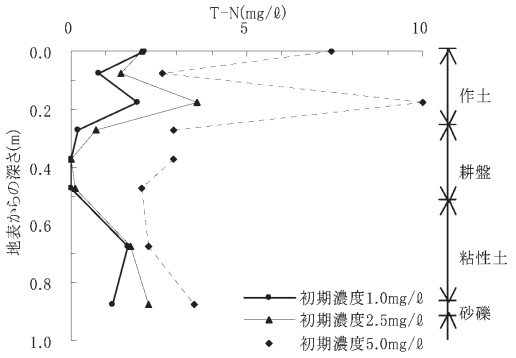


図 7　水田ポットモデルにおける土層別全窒素濃度測定結果

考　　察

農業用水の水質悪化の主な原因は，富栄養化によるプランクトンやアオコなどの大量発生である．このことは農業水利施設に対する通水阻害因子となり，施設の老朽化を促進する原因となりうる．また悪臭や病害虫の発生，景観の悪化といった農村の多面的機能の阻害原因ともなる．農村地域において混住化や維持管理機能の低下が進行している昨今，富栄養化の要因である栄養塩類濃度の低減は，農業用水にとって重要な課題である．

本研究で行った水田の水質浄化効果の検証実験より，水田自体が農業用水中の栄養塩類除去に非常に有効であり，そして作土層下に難透水性の耕盤が形成されていることが効果的であることが確認された．栄養塩類のひとつである窒素成分は，肥料や堆肥，副産物に多く含まれていることから，農業が負荷源となる可能性もある．したがって，水田の持つ窒素除去機能を明らかにし，定量化することは，農地保全上有益なことであり，農業水利の維持管理手段とも成り得る．

水田が窒素を除去する主な過程は稲による吸収，土壌吸着，脱窒作用である．このうち，稲による吸収は，過多になると稲の倒伏を引き起こす．土壌吸着は，将来的に地下水汚染源となりうる．本研究で行った実験では，水稲は作付けせず，土中水の窒素濃度も次第に低下していったことから，窒素濃度低下のほとんどは脱窒作用によるものだったと考えられる．さらに，ポットモデルの実験結果（図 7）より，そのほとんどは耕盤層上部で作用されていると推測される．

本実験の結果より，水田の窒素除去機能を実際の圃区レベルにおいて評価するための手段を検討する．まずポットモデルによる実験結果（図 7）について，耕盤層による窒素除去率を(1)式より算定する．

$$DP_N = (x_s - x_b)/x_s \qquad (1)$$

DP_N は除去率，x_s は灌水濃度（mg/ℓ），x_b は耕盤層下（深さ0.3m 地点）の濃度（mg/ℓ）である．本実験結果について算定すると灌水濃度 5 mg/ℓ において $DP_N = 0.60$ である．

これらの除去率は，耕盤がしっかりと形成されている状態であり，即ち永久水田における値である．ライシメータモデルによる実験から，還元田2年目，1年目の状態は，永久水田よりも耕盤が未発達であることから除去効果は劣る．したがって，還元田2年目，1年目の除去率は永久水田の除去率より割り引かれる．ライシメータモデルを用いた水田の利用形態別実験の結果（図3）より割引係数を算出する．

$$\alpha_2 = \frac{(x_{r21}-x_{r22})/x_{r21}}{(x_{p1}-x_{p2})/x_{p1}} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{(x_{r11}-x_{r12})/x_{r11}}{(x_{p1}-x_{p2})/x_{p1}} \quad (3)$$

α_2，α_1 は還元田2年目，1年目における割引係数，x_{p1}, x_{r21} および x_{r11} は実験におけるライシメータA，BおよびCの初期濃度（mg/ℓ），x_{p2}, x_{r22} および x_{r12} はライシメータA，BおよびCの最終濃度（mg/ℓ）である．本実験結果について算定すると，$\alpha_1 = 0.51$, $\alpha_2 = 0.76$ となる．

輪換耕地から構成される圃区の窒素除去率について，近年主流である3年ローテーションの輪作体系について考慮すれば，(4)式より評価される．

$$D_N = \frac{(1-2C)\cdot\alpha_2\cdot DP_N + C\cdot\alpha_1\cdot DP_N}{(1-C)} \quad (4)$$

D_N は圃区レベルでの水田による窒素除去率，Cは圃区内の稲作転換率である．今，稲作転換率を0.35とすれば，(4)式より圃区レベルでの水田による窒素除去率は $D_N = 0.37$ として算定される．本評価結果は学内ライシメータに関する実験結果から得られたものである．実用レベルで用いるにあたっては，評価対象圃区の水田土壌を持ち帰り，同様のポットモデルを構築し，また現場にて田面水および排水路の水質を測定することで評価可能であると考えられる．

要　　約

本研究では，水田の水質浄化機能を評価する方策として，水田の浸透過程における栄養塩類濃度の動向を，排水収支型のライシメータ及び円筒ポットを用いた実験を行い，水質の動向を分析した．ライシメータモデルの実験は，水田の利用履歴の違い，循環灌漑および曝気処理を想定したモデルを構成し，水質分析を実施した．ポットモデルの実験では，ポット内に水田土層を構成し，層別に土中水を採水して濃度分布を分析した．水田の利用履歴の違いにより比較した結果，永久水田を想定したライシメータがもっとも大きな濃度低下を示した．循環灌漑の頻度により比較した結果，どのモデルも浄化効果が確認されたが，灌漑頻度の多少による浄化効果の違いは現れなかった．また曝気処理による顕著な浄化作用は確認されなかった．ポットモデルを用いた実験の結果，表層の作土層において，濃度が高くなるものの，直下の耕盤層で飛躍的に濃度が低下していることが確認できた．これらの実験結果から，水田による栄養塩類除去には，難透水性の耕盤層が形成されていることが有効であり，浸透水の滞留時間が長くなることでより効果的であることが確認された．

文　　献

足立忠司　1979　田畑輪換と還元田用水量．土壌の物理性，**39**：pp.30-34

阿南光政・弓削こずえ・中野芳輔・舟越　保・丸居篤　2005　低平地クリークにおける水質浄化型水管理手法の検討．九大農学芸誌，**60**：223-231

木村　漕　1986　復元田の土壌環境と水稲生育．土壌の物理性，**53**：pp.20-24

Mitsumasa, Anan., Y. kozue, N. Yoshisuke, F. Tamotsu and H. Tomokazu　2004　The relationship between water intake rates, paddy ponding depth, and farmers' water management techniques. *Paddy Water Environ*, (2004) 2：11-18

中島重旗　1983　土木技術者の陸水環境調査法．森北出版株式会社

小川吉雄・酒井　一　1985　水田における窒素浄化機能の解明．日本土壌肥料学雑誌，**56**(1)：p1-9

西條八束・三田村緒佐武　1995　新編　湖沼調査法．講談社

田渕俊雄　2004　水田の水質浄化機能－窒素除去－．圃場と土壌，**36**(8)：p30-35

山室成一　1985　強粘質半湿田と乾田化水田における施肥および土壌無機化窒素の有機化，脱窒および水稲による吸収．日本土壌肥料学雑誌，**56**(1)：p10-14

Summary

This study was researched on the trends of water quality using lysimeters and cylinder pot to examine utilization of the paddy fields for purifying water quality. Two type of experiments purifying water quality have been executed, the one was the model of using lysimeters supposing about the histories of land use conditions, the frequencies of circulating irrigation water and aeration methods. Another was the model of using cylinder pot consisted four soil layers simulated the part of the paddy fields. The comparison with the histories of land use conditions, the effect of purifying water quality with the model of the general paddy field was better than the restored paddy field. Comparing with the frequencies of circulating water, the effect of purifying water was verified every models, but there weren't any feature with the difference of the frequency. In the case of the aeration method model, nutrient rich salts in the irrigation water haven't changed very much. According to the experiment about cylinder pot, the concentrations of the nutrient rich salts in the soil water have decreased greatly at the layer of plowsole. As a result of these experiments, it was important for removal nutrient rich salts with paddy fields to be formed impermeable layer of plowsole, and more effective to percolate as slowly as possible.