

休耕田を活用した長期窒素除去試験

田淵俊雄*・黒田久雄**・志村もと子***

Experiment on the Nitrate Removal in the Flooded Paddy Field

Toshio TABUCHI*, Hisao KURODA** and Motoko SHIMURA***

* Former professor of The University of Tokyo

** Faculty of Agriculture, Ibaraki University

*** Chugoku National Agricultural Experimental Station

Abstract

Recently nitrate outflow from the agricultural area became one of big problems in Japan. We continue the long term experiment on nitrate removal in the flooded paddy field from 1991. Experimental plots consist of four plots; weed plant, rice, non-plant and covered plot. In the non-plant plot any plant does not grow, but some of algae grow. In the covered plot, no algae grows due to the shield of the light. Natural water with high nitrate concentration about 20 mg L⁻¹ are supplied to each plot continuously. Nitrate is removed through the flow process in the plots by denitrification and the uptake by the plant. Average values of nitrate removal rate for 8 years are 0.30 gm⁻²d⁻¹ in a weed plot and 0.27 gm⁻²d⁻¹ in a rice and a non-plant plots. Nitrate removal rates gradually decreased in the first few years, but now they keep the ability of nitrate removal after 9 years. In order to clarify the influence of plant growth and algae on nitrate removal these data are examined by the nitrate removal equation as shown in eq. (2), which indicates the relation between the nitrate removal by denitrification (Ro) and nitrate concentration of water (X) and temperature (T).

Key words : Nitrate removal, Denitrification, Plant growth, Paddy field

1. はじめに

近年農業地帯で硝酸態窒素濃度の高い水が検出されて大きな問題になっており、1999年には硝酸態窒素は環境基準の健康項目にも加えられた。その濃度が高いことは地下水や河川水の汚染になり、飲用水や農業用水などの利用に障害を与える。さらに流出先の湖沼や内湾の過栄養化の原因にもなる(田淵ら1998a)。

そのため流域からの窒素の排出を防ぐことが大きな課題になり、各地域とくに湖沼の流域で窒素負荷を減少させる努力が払われている。その中で生活系での下水道整備とともに農業地域での化学肥料や家畜ふん尿に起因する窒素の流出を抑制することが求められている。しかし

これらの排出は面積的にも広く、水量も膨大なのでその抑制は容易ではない。水田などの湛水土壌系を活用した窒素除去試験が各地で試みられ、かなりの除去能力があることが報告されている(田淵1998a)。

筆者らは水田での実態調査や室内実験から窒素除去量と濃度、水温、植生との関係を検討し(田淵ら1987, 1993)、さらに集水域でのモデル解析を試みて本誌に報告した(田淵1998b)。また1991年から休耕田に設けた試験区で窒素除去量の長期測定を行い、その持続性を追求してきた(田淵ら1993, 1996, 黒田ら2000)。本報ではその9年間におよぶ試験の長期的傾向について報告し、湛水土壌系での窒素除去について考察したい。

* 元東京大学農学部教授

** 茨城大学農学部 〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1

*** 農林水産省中国農業試験場 〒721-8514 広島県福山市西深津 6-12-1

キーワード: 窒素除去, 脱窒, 植生, 水田

2. 試験の概要

2.1 試験区

図-1のような長辺25m, 短辺1.4mの面積35m²の長方形の試験区を谷津田の谷頭部にある休耕田の中に5つ設けた。隣接する台地からの自然の湧水をパイプで各試験区に通年連続的に給水し湛水流下させている。1991年の試験開始以来、水をきらしたことはない。供給水量は15mLs⁻¹で一定にしている。この水量は37mmd⁻¹に相当する。谷津田なので地下水位が高く浸透は少ないが、試験区の外側にも湛水を保ち横浸透が少なくなるようにしている。1999年稲作期の平均減水深は7.7mmd⁻¹であった。湧水の硝酸態窒素濃度は台地上に野菜畑があるために高く、約20mgL⁻¹である。

試験区はⅠ雑草区、Ⅱ水稲区、Ⅲ予備区、Ⅳ遮光区、Ⅴ無植生区(藻類区)で構成されている。「雑草区」は雑草を生えるがままに放置した区で、夏には雑草は旺盛に生育し冬にはそのまま立ち枯れする。雑草の種類はアシ、セリ、ミソソバなどである。「水稲区」は稲を無肥料無農薬で移植栽培し、収穫する。刈った後の根株はそのまま残す。「無植生区」は植生を生育させないように雑草はすぐに除去して水面だけに保った区である。しかし藻が発生していて、その影響が大きいため「藻類区」ともいえる。それで比較のために無植生の状態であったⅣ区に1997年7月より遮光ネット(遮光率80%)をかぶせて藻類の発生を抑制し、「遮光区」とした。

以上5試験区の中で雑草区、水稲区、無植生区の3区が基本的な試験区であるので、本報ではその試験結果を比較対照して検討を行う。湛水土壤系での窒素除去は脱窒と植生吸収、土壤残留の3要素によって行われるとみられるが、上記3試験区は異なった特色をもつ(表-1)。すなわち「雑草区」は脱窒もあるが植生吸収も大きい。雑草は収穫されないで一部は分解されるが、かなりの分は残留するとみられる。分解により生じた窒素は再び水中に戻り、その後脱窒したり流出する。その特徴は植生吸収による残留にあり、残留型といえる。「水稲区」は脱窒のほかに水稲による吸収があり、それは収穫によって根株以外は系外に持ち出される。根株は残留するがほとんどが分解するとみられる。その特徴は収穫による持ち出しである。「無植生区」では脱窒のほかに藻類の吸収があるが、それは系内ですみやかに分解されて水中に戻り、脱窒や流出をする。残存は少ないとみられる。特徴は分解にある。「遮光区」は植生もなく、藻類の発生も抑制されているので脱窒だけによる除去である。したがって脱窒は各区で共通するものの、植生との関連の仕方は異なり、それぞれ「残留型」、「持出型」、「分解脱窒型」、

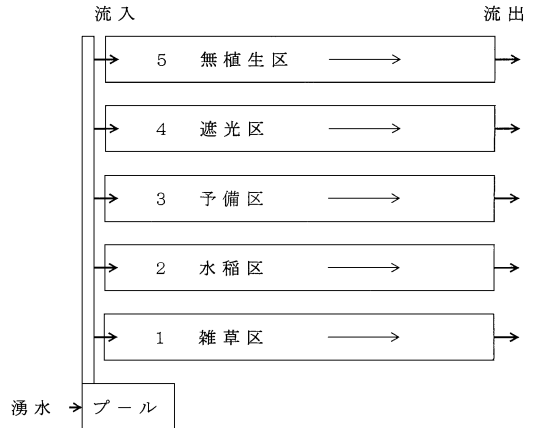


図-1 試験区平面図

Fig. 1 Experimental plots

表-1 試験区の特徴

Table 1 The features of each plot

区	窒素除去ルート	タイプ
雑草区	脱窒 + 植生吸収 (分解と残留)	残留型
水稲区	脱窒 + 水稲吸収 (収穫と分解・残留)	持出型
無植生区 (藻類区)	脱窒 + 藻類吸収 (分解と残留)	分解型
遮光区	脱窒	脱窒型

「脱窒型」といった特色をあげることができよう。そのことがトータルの窒素除去性能にどう関連するのか興味あるところである。

2.2 試験方法

各年の試験期間を稲作期と非稲作期に分けて除去量を求めた。「稲作期」は水稲区で田植えをする5月上旬から刈取りの9月中旬までの約130日間であるが、毎週1回の定期測定を行った。「非稲作期」は刈取りから翌年の田植えまでの期間で、隔週1回の測定である。9年間の定期測定回数は約300回になる。

流下過程での窒素除去量は各区の流入・流出水の水量、硝酸態窒素濃度を測定し、その積で流入・流出硝酸態窒素量を求め、その差から算出した。流入水中の硝酸態窒素量は常に全窒素量の90%以上を占め、流出水中では80%以上を占めた。したがって今回の調査では硝酸態窒素で窒素の除去量を計算した。また各区の流入点、中間点、流出点の3点で水温と電気伝導度(EC)、流入点と流出点でpHとDO濃度を測定した。

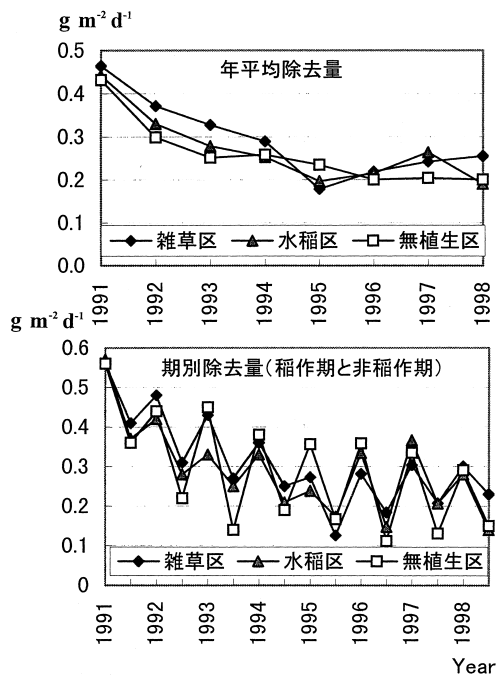


図-2 窒素除去量の年変動

Fig. 2 Changes of nitrate removal in each plot

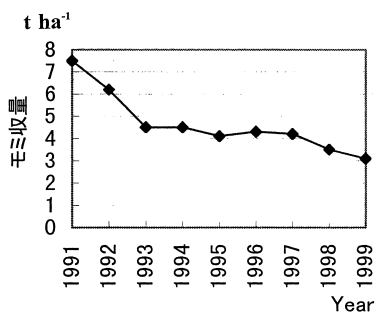


図-3 水稻区もみ収量の変化

Fig. 3 Change of the yield of rice

2.3 窒素除去量の推移

年平均窒素除去量は当初 $0.45 \text{ gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度であったが、次第に低下し、現在は $0.20 \sim 0.25 \text{ gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の近傍で変動している (図-2)。稲作期と非稲作期では除去量は大きく異なり、どの区においても水温が高く、植生の生育が盛んな稲作期の値が非稲作期の値よりも大きい。とくに無植生区の値が期により大きく変動する。大勢としては3試験区の窒素除去量には余り差がなく、同じような変動で推移している。8年間の平均値は雑草区が $0.30 \text{ gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、水稻区と無植生区が $0.27 \text{ gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった

表-2 9年間平均値 (1991,5~1999,12)

Table 2 Average values during 9 years

	単位	雑草区	水稻区	無植生区
日中中央水温	°C	18.3	22.7	23.9
窒素除去量	$\text{gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$	0.30	0.27	0.27
濃度低下率	%	49.7	43.4	44.4

窒素除去量は1991-1998年間の平均値

(表-2)。

水稻区のモミ収量は当初減少したが3年目から 4 tha^{-1} 程度で安定し、最近やや低下気味である (図-3)。しかし施肥をしていないにもかかわらず収穫は続いている。

3. 試験結果

3.1 水温変化

図-4は9年間の定期測定日の午後2時の各区の中央部の水温変化を示したものである。各区とも夏に高く冬に低い季節変化を示している。また初年度の1991年の暖冬や1993年の冷夏が図に現れている。

「雑草区」の水温は草で日陰になるために他の区よりも低く、夏には 30°C 前後の値を示す。夏の「無植生区」の水温は 40°C にも達し、他の区よりも高い。これは日陰がないためである。「水稻区」は両者の中間の値を示すが、稲の繁茂していない時期は無植生区の値に近い。9年間の全測定値の平均は無植生区で 23.9°C 、水稻区で 22.7°C 、雑草区で 18.3°C と大きな差が生じた (表-2)。「遮光区」では遮光を始めた1997年7月から水温の低下が著しい。なお図-4の中で初期の1992~1994年のデータが少ないのは、水管理が不十分でパイプの目詰まりや漏水による水量調整が適格でない測定が生じたためである。

夏に自記測定した1時間間隔の水温変化をみると (図-5)、「水稻区」や「無植生区」では最高水温と最低水温との差は約 10°C 程度であった。したがって日平均水温は上記の定期測定時の水温よりも 5°C 程度低いことになる。それで各月ごとの日平均水温と定期測定時の水温の比を求めておき、後述する解析に用いる日平均水温はこの比を使って測定時水温から換算して求めた。

3.2 硝酸態窒素濃度の変化

「水稻区」の流入水と流出水の硝酸態窒素濃度の変化を図-6に示した。流入水の濃度は 20 mgL^{-1} 前後でほぼ一定で、高い時で 25 mgL^{-1} 、低い時で 15 mgL^{-1} である。

流出水の硝酸態窒素濃度は季節によって大きく変化する

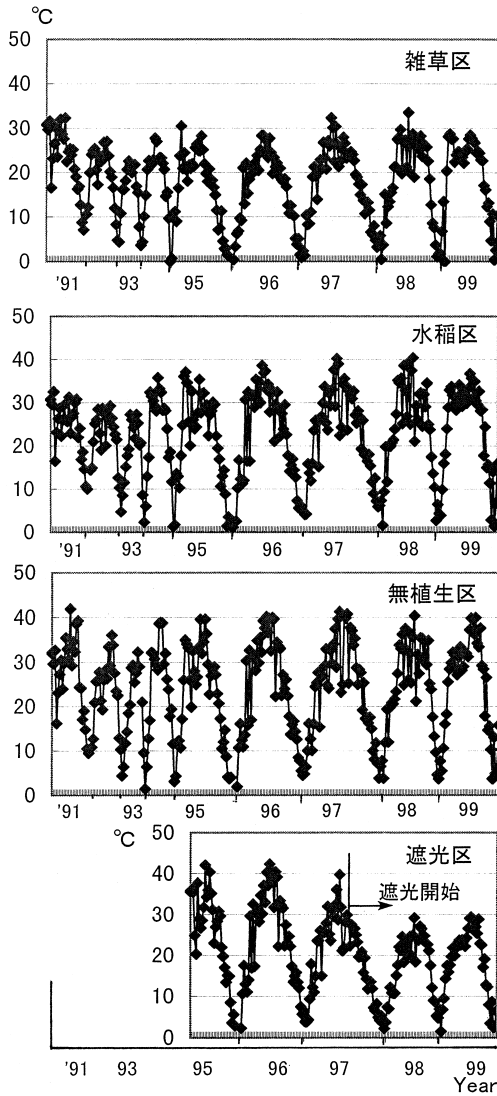


図-4 水温変動 (中央部, 午後 2 時)

Fig. 4 Changes of water temperature in center parts

る。夏に低く、冬に高い。夏の濃度は流入水の濃度よりもかなり低下し、冬の濃度は流入水の濃度にほぼ等しくなるという変動を繰り返している。

3.3 硝酸態窒素濃度低下率の動向

流入水の硝酸態窒素濃度が時期により若干変化するので、流出水の濃度そのまま年変動を検討するのは不適當である。そこで次式で定義する硝酸態窒素濃度低下率で各区の年変動を検討する。

濃度低下率 β は次式で定義される。

$$\beta = \{(X_o - X) / X_o\} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

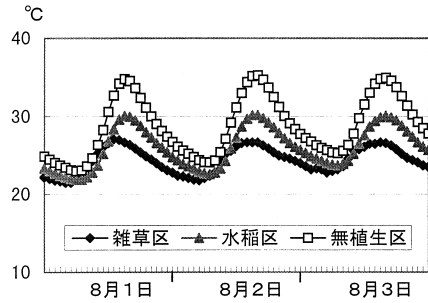


図-5 水温の時刻変動 (中央部, 1997 年 8 月)

Fig. 5 Hourly changes of water temperature in summer

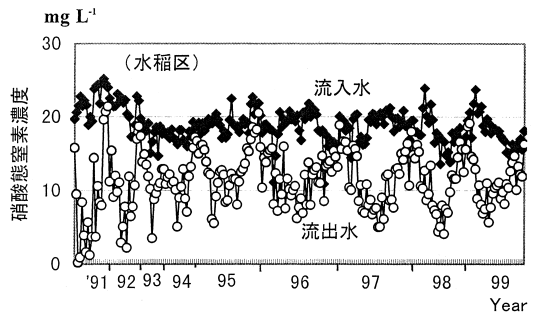


図-6 硝酸態窒素濃度の変化 (水稻区; 流入水と流出水)

Fig. 6 Changes of NO_3-N concentration in a rice plot

ここで X_o は流入水濃度, X は流出水濃度である。各区とも濃度低下率は夏に高く、冬に低いという水温と同じような変動を示す (図-7)。

「雑草区」では初年度の 1991 年には濃度低下率は夏に 100% 近くになったが、その後は 80% どまりである。冬の間も 1995 年以降は初期に比べて小さくなり 0% 近くになった。

「水稻区」では「雑草区」とほぼ同じ傾向を示すが、冬の 0% 近くになる回数が「雑草区」よりも増えている。「無植生区」でもほぼ同様の傾向を示すが、1995 年および 1996 年の夏の値が高い。また 1995 年以降では冬期の値が低くなり、0% になることが増えた。このようにいずれの区でも濃度低下率は初期に比べて低下しているが、現在はほぼ横ばいの状況が続いており、窒素除去能力は持続している。「遮光区」では遮光を始めた 1997 年秋から低下し、夏にも 40% 以下で、冬には 0% になった。

3.4 pH

遮光区を設けた 1997 年 7 月から 1998 年 3 月までの流

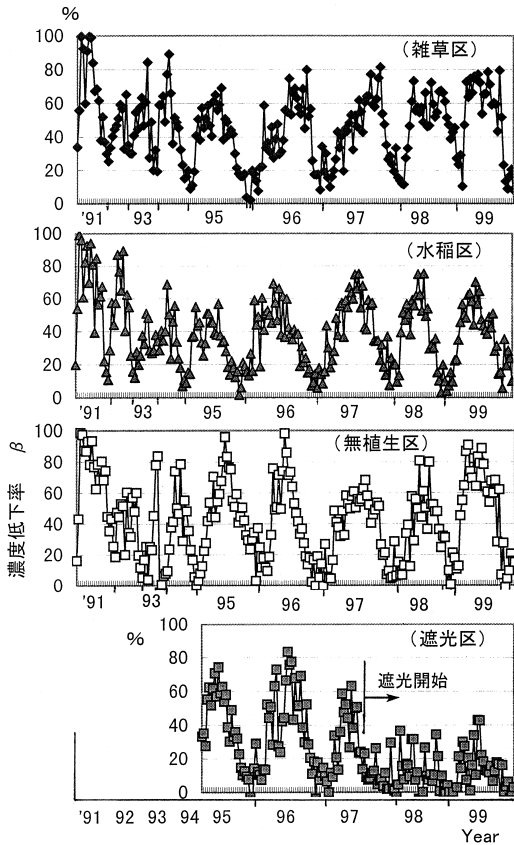


図-7 硝酸態窒素濃度低下率 β の変動

Fig. 7 Decreased ratio β of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration

入水と流出水の pH の値を図-8 に示した。各試験区とも流入水の値よりも流出水の値の方が高くなっているが、もっとも高い値を示したのは「無植生区」である。夏には 9 を超える値を示し他の区とかけ離れている。これは藻類の発生により、水中の炭酸が消費されるためとみられる。冬には 7 に近い値を示して、他の区の値と大きな差はなくなるが、依然として一番高い。「遮光区」は同じ無植生状態でありながら藻の発生が少ないために「無植生区」よりも低く、「水稻区」と同じ程度の 7 前後の値を示す。このように藻類の pH への影響が現れている。

「雑草区」は 7 よりも低く、試験区の中で一番低い値を示している。このように区による差は明瞭で、藻類の発生が大きく影響している。

3.5 DO 濃度

図-8 には同時期の DO 濃度の値を示した。「無植生区」の値が 10 mg L^{-1} を超え、過飽和状態である。これも藻類の発生によるためとみられる。「水稻区」の値も 10

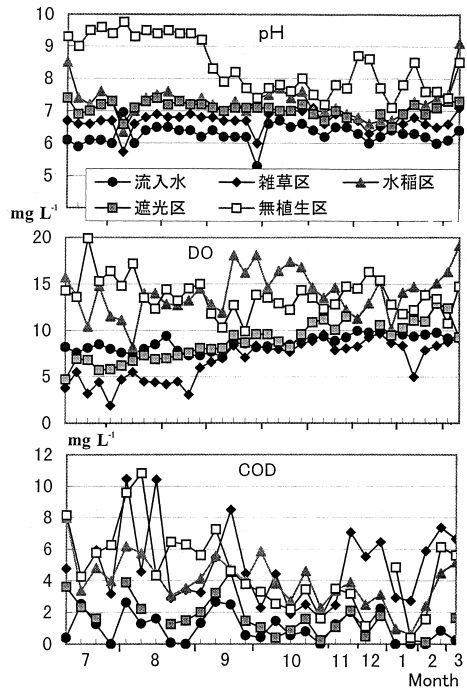


図-8 pH, DO, COD の変動
(流出水 1997, 7~1998, 3)

Fig. 8 Changes of the values of pH, DO and COD

mg L^{-1} を超えている。とくに 10, 11 月と 3 月に高い値が現れている。「遮光区」の DO 値は「無植生区」の値よりもかなり低い。とくに遮光にした初期の値が低く、 5 mg L^{-1} 程度である。遮光前に発生していた藻類の分解のために酸素が消費されたものとみられる。「雑草区」の値はそれよりもさらに低く、 5 mg L^{-1} 以下のこともある。雑草の枯死体の分解によるものとみられる。

このように DO の値は有機物分解と藻類による供給のバランスで区によって異なる値を示す。

3.6 COD 濃度

図-8 には COD 濃度の変化を示した。各区とも流入水の濃度よりも高いが、とくに無植生区の値が夏期に高くなっている。藻による有機物生産が行われていることを示す。また雑草区の値が他区に比べて冬期に高く、枯死体の分解によるものと考えられる。

4. 考 察

4.1 水温と濃度低下率の関係

図-9 は各試験区ごとの測定日の日平均水温と濃度低下率の関係を示している。バラツキはあるものの各区とも水温が高くなれば濃度低下率は大きくなっている。相

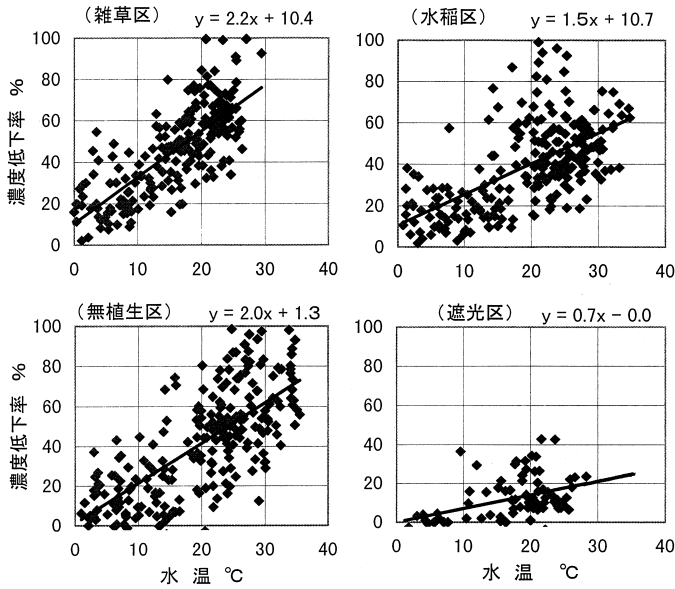


図-9 日平均水温と濃度低下率βの関係

Fig. 9 Relationship between decreased ratio β and water temperature

関係数は「雑草区」0.76, 「水稻区」0.61, 「無植生区」0.72, 「遮光区」0.41であった。

その回帰直線によると、20℃相当の濃度低下率は「雑草区」では58%, 「水稻区」, 「無植生区」では約43%となっている。「遮光区」ではこれらよりも一段と低い濃度低下率になっていて、14%である。明らかに水温だけではない別の要因がある。それは植生や藻類による吸収が区によって異なるからである。それと後述する炭素供給に関連して各区の脱窒能力にも差が生じているとみられる。

図-10は「無植生区」における水温と濃度低下率との回帰直線を初期(1991-93), 中期(1994-96), 後期(1997-99)と3年ごとに分けて求めて描いたものである。初期の直線と中期, さらに後期の直線では差があり, 除去能力が次第に低下してきている。

4.2 脱窒除去式による濃度低下率β₀の計算

屋外での窒素除去は脱窒のほかに植生や藻類による吸収によっても行われている。この植生・藻類の吸収と脱窒量を区別するために脱窒による除去量を計算して, その差で検討を行う。脱窒除去量の計算には田淵が提示した室内の恒温湛水土壤系における下記の脱窒除去式(田淵ら1987, 1993, 1998b)を用いる。

脱窒除去速度 R_o ($gm^{-2}d^{-1}$) は湛水中硝酸態窒素濃度 X (mgL^{-1}) に比例し, 下記の一次式で近似的に表されたとした。

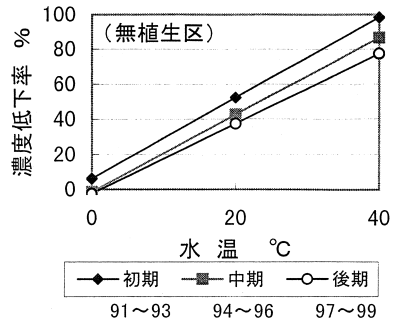


図-10 日平均水温と濃度低下率の回帰直線の変化(無植生区)

Fig. 10 Change of regression lines in a non-plant plot

$$R_o = aX \tag{2}$$

aは土壌や水温により変化する係数で, 筆者らが調べている谷津田の水田土壌では次のように水温 T の2次式によって表された(田淵ら1993)。

$$a = 0.000011 T^2 + 0.005 \quad (T > 10^\circ C) \tag{3}$$

湛水中の窒素濃度は時間とともに低下するが, それは次式で表される。

$$X = X_o \exp(-at/H) \tag{4}$$

ここで X_o は初期濃度, t は時間 (d), H は水深 (m) である。

流下過程では流入水量を Q (m^3d^{-1}), 面積を A (m^2),

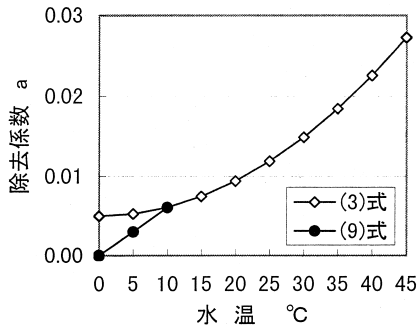


図-11 計算に用いた除去係数 (a) の水温による変化

Fig. 11 Change of removal coefficients (a) with temperature

$q=Q/A$ (md^{-1}) とすれば、試験区を流下するのに要する時間 t は

$$t=AH/Q=H/q \quad (5)$$

(4)式に代入して

$$X=X_0 \exp(-a/q) \quad (6)$$

脱窒除去による濃度低下率 β_0 は

$$\beta_0 = \{(X_0 - X)/X_0\} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

(6)式を代入して

$$\beta_0 = \{1 - \exp(-a/q)\} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

この式と(3)式を使えば水温と q の値だけで β_0 を求めることができる。水温は日平均水温を用いることにし、 q の値は本試験では一定で、 0.037 md^{-1} である。

なお今回の計算で用いる(3)式は $10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ の領域で実験されて求められた式であるが、これをそのまま 10°C 以下の領域にも用いると除去係数 a は 0°C で 0.05 の値になる。しかし脱窒は 5°C 程度が限界であると言われていたので、このままでは過大になる。それで 10°C 以下の領域では次の(9)式を仮定して用いた。この式であると 5°C で除去係数は 0.003 、 0°C で 0 になる(図-11)。 5°C で 0 にならないようにしたのは計算に用いる水温が日平均水温だからで、日平均水温が 5°C でも日中にはそれ以上の水温の時間があるからである。

$$a=0.0006 T \quad (T < 10^\circ\text{C}) \quad (9)$$

また上記の濃度低下率の計算には降雨や蒸発による水量の変化が無視されている。大量の降雨がある場合には水量が増大して希釈され、濃度は低下する。それで大量の降雨があって流出水量が流入水量よりも増大した際のデータは計算から除外した。一方蒸発によって濃縮が生じるが本試験の供給水量は 0.037 md^{-1} で蒸発量よりかなり大きいので今回の計算では配慮しなかった。しかし夏の蒸発散量が大きい際には濃縮は 20% 程度になると

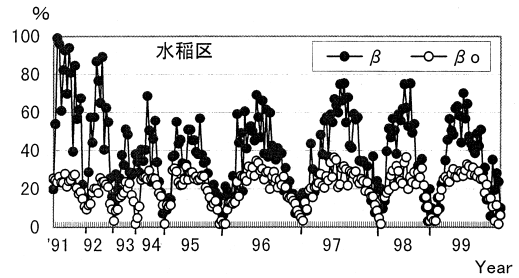


図-12 β と β_0 の比較 (水稻区)

Fig. 12 Comparison of β with β_0 in a rice plot

みられるので誤差が生じる。

4.3 β_0 と β の比較

上記の β_0 は室内の恒温暗所の無植生条件下で窒素が脱窒によって除去されて生じる濃度低下率を示している。これと試験区で実際に測定された濃度低下率 β とを比較して、植生・藻類の影響を調べた。

図-12は「水稻区」の β_0 と β を示している。計算された β_0 は年によって若干の違いはあるものの水温の変化に対応して夏に高く、冬に低い季節変動をしている。夏には最高 40% 程度で冬は 0 になる。一方実測された β は夏には β_0 よりも大きい値を示しており、その差は大きい。この β と β_0 の差は室内と屋外での除去量の差を示すが、その主なものは脱窒以外の除去、すなわち植生や藻類による吸収によるものと考えられる。また各種の実測誤差や理論推定上の誤差も当然含まれている。

それでこの β_0 と β の差を検討するために、両者の差 $\Delta\beta$ を求めた。

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 \quad (10)$$

図-13に各区の $\Delta\beta$ の値を示した。「雑草区」では初年度には夏に 80% 程度の差があり、 1996 年以降にも 60% 近い差があるが、冬には 0% 近くに低下する。「水稻区」でも同様の傾向を示すが、 1996 年以降の夏の値は $40 \sim 50\%$ で「雑草区」よりも低い。また冬の値が 0% になることが多く、マイナスの値になることも現れている。「無植生区」では前述の2区に比べて夏と冬の差が大きい。夏には 60% 程度の大きな値を示すが、冬にはマイナスになることが多い。「遮光区」では遮光を行うようになった 1997 年7月秋以降低下し、マイナスになることが多かった。

次に β と β_0 の比 B を求め、各年の稲作期の平均値でグラフを描いた(図-14)。

$$B = \beta / \beta_0 \quad (11)$$

「雑草区」の B 値が一番高く、 $2 \sim 3$ の間を示しており、年を経るにしたがいやや減少傾向にある。「水稻区」では

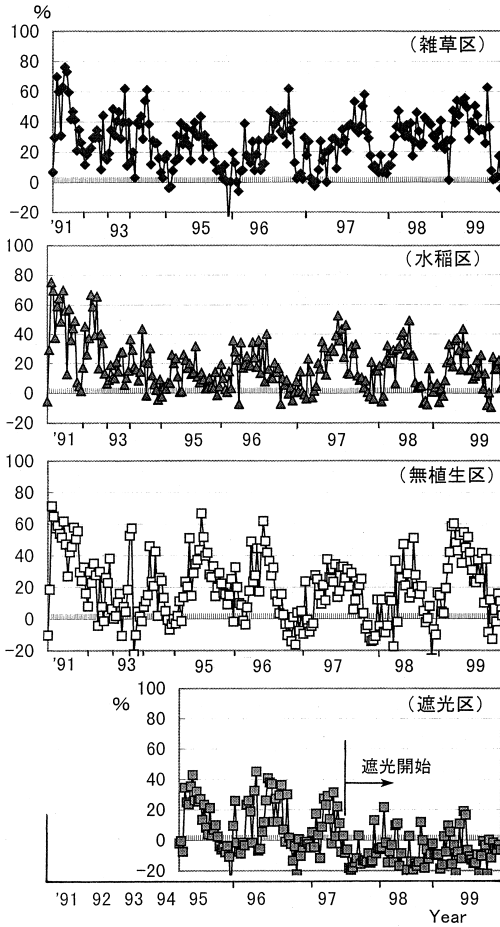


図-13 β と β_0 の差 $\Delta\beta$ の変化
 Fig. 13 Changes of $\Delta\beta$

それよりもやや低い 2 前後の値である。「無植生区」では「水稻区」とほぼ同じである。「遮光区」は遮光後に急激に低下して 1 以下になった。このように稲作期には「遮光区」以外の各区は B 値が 1 以上であった。

以上のように各試験区で B 値に相異が見られたが、単純に解釈すれば植生の多い「雑草区」で大きく、それは植生吸収が多いからだと説明できる。水稻の吸収がある「水稻区」や藻類の吸収がある「無植生区」でも夏期には B 値は 2 まで上昇する。遮光されて藻の発生が抑制された「遮光区」では夏期にも B 値は 1 をこえなくなった。

ここで問題なのは「遮光区」で冬に $\Delta\beta$ がマイナスになったり、B 値が 1 以下にまで低下したことである。窒素除去量が脱窒除去式による推定量よりも小さいということになり矛盾する。その原因としては土壌中有機物の減少が考えられる。「遮光区」では藻類の発生がほとんどないので、脱窒に必要な炭素の供給が少なく、土壌中に

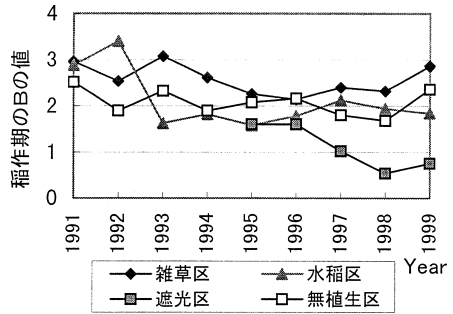


図-14 稲作期の $B = \beta/\beta_0$ の値
 Fig. 14 Changes of the values of B during the rice-growing period

存在していた有機物が消費されて次第に少なくなり、脱窒量が減少したという考えである。その他に脱窒式による算出誤差も考えられる。たとえば低温領域での除去係数の誤差や室内条件と屋外との脱窒の違い、恒温状態と非恒温状態の差など色々と不透明な問題がある。

4.4 窒素除去係数 (a) の変化

もしも土壌中炭素量の変化が起きていれば除去係数 (a) の値も変化しているはずである。試験区の表土 (深さ 0~5 cm) の土壌を採取して、恒温室で湛水条件下で窒素除去試験を行って、除去係数を求めた。1991 年の試験開始時には a の値は 25°C で 0.012 であった。3 年後の 1994 年の測定でも同じく 0.012 であった。また 1996 年から 1997 年にかけて毎月行った測定でも、「水稻区」、「無植生区」とも 0.012 前後の値を示し、初期の値とほとんど変わらなかった。

したがってこれらの区の土壌の脱窒能力には変化がないということになるが、これは土壌の採取方法に問題があったのではないかと考えている。すなわち採土は 5 cm の層としておこなったが、土壌の窒素除去能力の判定にはもっと細かな土層の厚みが関与しているのではないだろうか。脱窒はごく表層で起きているとすればそれに対応した若い厚さの土壌を採取して実験するべきであろう。現在その試験を行っているところであるが、1999 年夏に採土した表層 0~1 cm 層の土壌の除去係数は「遮光区」では大きく低下していた。今後この点について詳しく調べていきたい。

4.5 窒素除去能力への植生・藻類の影響について

「遮光区」では他区に比べて窒素除去量は大きく低下した。水温が低かつ植生吸収がないことが原因であるが、有機物の供給が不足して脱窒能力が低下したことも原因である。炭素が十分にある時は脱窒は水温や硝酸態窒素濃度によって規定されるが、炭素が不足すればそれ

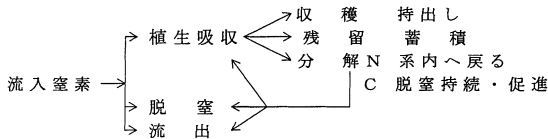


図-15 植生・藻類の窒素除去への影響

Fig. 15 Influence of plant and algae on nitrate removal

が制限因子となる。したがって植生・藻類は窒素の吸収という面だけでなく、炭素の供給源という立場から窒素除去能力の持続性に大きな影響をもつ(図-15)。「無植生区」でも冬には藻類の生育が弱まるので同じことが起きる可能性がある。

一方「雑草区」では植生による十分な有機物の供給がある。また植生による窒素の吸収も大きい。雑草が生育しているかぎり残留型の除去は続くであろう。しかしこの場合脱窒の方が前述した式で示したような形になるのか疑問が残る。植生が窒素を吸収してしまうので、水中の窒素量が減って濃度が低下するので脱窒量が減少するからである。窒素を巡って植生吸収と脱窒は競合関係にもなる。また雑草の枯死体の分解による窒素の放出も無視できないであろう。分解による窒素の放出が大きければ除去量は低下するはずである。今のところ他区よりも除去量が小さいということはないが、このような2次的な脱窒ともいえる分解放出された窒素の脱窒のメカニズムの解明も必要である。

$$\text{除去量} = (\text{植生吸収} - \text{分解放出}) + \text{脱窒}$$

同じことが「無植生区」でもいえる。藻類に吸収された窒素はそのほとんどが試験区内で分解されて、硝酸態窒素になり、結局は脱窒で除去されているとみられる。流出水中の有機態窒素やアンモニア態窒素は微量であったからである。

表-3は1996年5月から1997年4月までの1年間に測定した流入水と流出水中の窒素成分の内訳である。流入水中の硝酸態窒素の全窒素中に占める割合は95.6%，

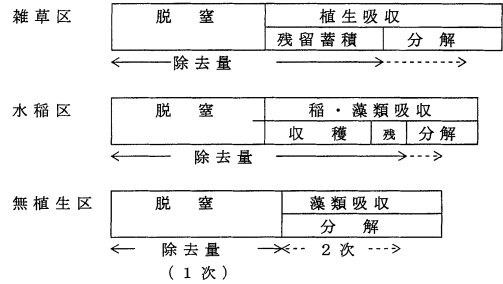


図-16 各試験区の窒素除去の相異

Fig. 16 Difference of the mechanism on nitrate removal

流出水中では「無植生区」87.5%、「雑草区」93.9%、「水稻区」92.2%であった。アンモニア態窒素はいずれの区でも3%以下で、有機態窒素も一番大きい「無植生区」で9.1%であった。「無植生区」ではやや有機態窒素の量が多いが、各区とも窒素のほとんどが硝酸態窒素である。「無植生区」の有機態窒素が他区よりも多いのは藻類の発生によるものとみられる。

4.6 試験区の特徴と課題

3試験区の窒素除去量は大勢としては差が少なく持続性もあるが、その除去のメカニズムはかなり異なっている(図-16)。

「雑草区」では植生の吸収が圧倒的に大きい。初年度の稲作期の測定では76%を占めていた(田淵ら1993)。これが収穫されないで残るので、一部は分解するものの大部分は枯死体として残留する。炭素量は多いので持続性もある。分解で生じた窒素は系内に戻り、2次的な脱窒や植生吸収を受け、一部は系外へ流出する。

「水稻区」では水稻が吸収した窒素は収穫によって持ち出され、根株の部分だけが残留する。しかし収穫された窒素量は18%(田淵ら1993)で、除去量の多くは脱窒である。根株は分解されて、2次的脱窒を受けるが、それは脱窒のための炭素源にもなる。問題はこの根株や藻類による炭素供給が脱窒に必要な炭素量と釣り合うかであ

表-3 流入水と流出水の窒素成分の内訳

Table 3 Components of nitrogen

区	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	Org-N
流入水	19.2	18.4 (95.6)	0.2 (0.8)	0.0	0.7 (3.5)
雑草区	11.6	10.9 (93.9)	0.3 (2.9)	0.0	0.3 (2.0)
水稻区	13.1	12.1 (92.2)	0.3 (2.9)	0.0	0.7 (5.5)
無植生区	12.5	10.9 (87.5)	0.3 (2.8)	0.1	1.1 (9.1)

1996,5-1997,4の期間, mgL⁻¹, ()内は%

り、それが窒素除去能力の持続性を規定する。

「無植生区」では水温が夏には他区よりも高く、藻類による有機物の供給もあるので、脱窒能力は夏には他区と遜色ない。しかし藻類が吸収した窒素は分解して系内に戻り、しかも「持出し」がなく、「残留」も少ないとみられるので、除去量は少なくなると予想した。しかし測定された除去量は他区と大差なく、流出する有機態の窒素も9.1%、濃度にして 1.1mgL^{-1} でそれほど大きくなかった(表-3)。このことは分解で生じた窒素のかなりの部分が2次的な脱窒で除去されたことになる。そこには藻類だけでなくタニシやドジョウなどの水生生物が活動しており、食物連鎖を通じて何らかの影響を与えている可能性もある。

4.7 数式化について

湛水土壤系における窒素の除去量を以前は除去率だけで示すことがあり、それでは他の試験データと比較できなかった。次いで単位時間・単位面積当たりの除去速度で示すようになり、他との比較が可能になった。しかし除去速度は水温や濃度、供給水量によって変化するから、それらの要因を含めて数式化をする必要があった。そこで濃度に比例するという除去式を提案したが、この式によって除去速度と濃度、水温、水量との関係を数式化し、除去係数により比較することができるようになった。この式を使えば色々の濃度や水量、水温の条件下での除去速度や濃度変化の予測が一応可能になる。まだ光の当る明所や非恒温条件下での窒素除去式の適用性など式そのものに不確定の面が多く、今後の検討が必要ではあるが、一步前進したといえよう。

その中で今回指摘した「植生の影響」が最大の課題として残されている。「植生吸収」と「炭素供給」という2つの面から植生は窒素除去に大きく関与している。これらをどう数式化するかが大きな課題である。筆者は便宜的に除去速度 $R=F \times R_o$ と積の形で扱ってきた。Fは植生の影響度で本稿で示したBの値がそれに相当する。 R_o は室内脱窒速度である。しかし窒素除去は「植生吸収」と「脱窒」の2面から行われるのだから、和の形で示す考えもあろう。すなわち $R=F'+R_o$ である。ここでF'は植生吸収速度。しかし前述したように植生は炭素供給の面から脱窒にも影響しており、単純な和の形では表せないようである。

5. ま と め

1. 休耕田に「水稻区」、「雑草区」、「無植生区」、「遮光区」を設けて9年間湛水流出下試験を行い、窒素除去量を測定した。年平均窒素除去量は当初より低下したものの

0.2~0.25 $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 程度の値で持続している。

2. 流入水の硝酸態窒素濃度は 20mgL^{-1} 前後ではほぼ一定であるが、流出水の濃度は夏に低く、冬に高くなる。その濃度低下率は夏に70~80%になるが、冬には20%以下になった。「遮光区」では濃度低下率が他区よりも大きく低下した。

3. 同一水温時の濃度低下率を比べると、「雑草区」の値が「水稻区」や「無植生区」の値よりも大きかった。これは「雑草区」の植生吸収が大きいためとみられる。

4. 植生吸収の影響度を示す $\Delta\beta$ の値は各区とも夏に大きく、冬に小さい。区の中では「雑草区」の夏の値がもっとも大きい。植生や藻類の発生がない「遮光区」では $\Delta\beta$ の値は小さくマイナスになることも多く、これは脱窒に必要な有機物が減少しているためとみられる。

以上長期の試験結果を脱窒除去式を用いて解析を行った。本報が湛水土壤系での窒素除去の研究の進展に役立てば幸いである。この試験を行うに当たっては、水田の所有者である大竹房雄氏にご支援をいただき、茨城大学農学部の中曽根英雄教授、久保田正亜教授、加藤 亮助手、牧山正男助手、それに篠田鎮嗣、高阪快児、本橋浩一、徳田枝里子、北島幸子の院生・学生諸君ならびに東京大学の院生であった黒田清一郎氏と学生の尾野充彦氏など大勢の方に多大のご協力をいただいた。これらの方々に厚く感謝する次第である。本研究は文部省科学研究費と茨城県生活環境部からの委託費を受けて行った。

文 献

- 黒田久雄・田淵俊雄・高阪快児・中曽根英雄 (2000b) : 休耕田を活用した窒素除去の持続性と有機物に関する検討, 農業土木学会誌, 68(9) : 59-65.
- 田淵俊雄・末正奈緒希・高梨めぐみ (1987) : 水田湛水による硝酸態窒素の除去試験, 農業土木学会誌, 55(8) : 53-58.
- 田淵俊雄・篠田鎮嗣・黒田久雄 (1993) : 休耕田を活用した窒素除去の試み, 農業土木学会誌, 61(2) : 19-24.
- 田淵俊雄・志村もと子・尾野充彦 (1996) : 休耕田における窒素除去試験の結果と実用性の検討, 農業土木学会誌, 64(4) : 27-32.
- 田淵俊雄ほか編著 (1998a) : 清らかな水のためのサイエンス, p96~113, および p115, 農業土木学会.
- 田淵俊雄 (1998b) : 水田除去機能付き窒素流出モデル, 土壌の物理性, 78 : 11-18.

受稿年月日: 2000年10月6日
受理年月日: 2001年1月16日