

# 湛水流下過程における硝酸性窒素濃度の低下

—湛水土壤系の硝酸性窒素除去試験と解析—

田淵俊雄\*・黒田久雄\*\*・篠田鎮嗣\*\*

On the Decrease of NO<sub>3</sub>-N Concentration of Flow Water in Paddy Field Plots

Toshio TABUCHI\*, Hisao KURODA\*\* and Yasuji SHINODA\*\*

\* Former professor of The University of Tokyo

\*\* College of Agriculture, Ibaraki University, Chuo 3-21-1, Ami-machi, Inashiki-gun,  
 Ibaraki, 300-0393 Japan

## Abstract

We continue the long term experiment on nitrate removal in the paddy field plots. Natural water with high nitrate concentration of approximately 20 mg L<sup>-1</sup> was supplied to each plot continuously more than ten years. Nitrate removal rates gradually decreased in the first few years, but now they keep the ability of nitrate removal. In this paper, the decrease of nitrate concentration and water temperature in the flow process was measured at 3 hours intervals. Water temperature was lowest in the first block and it gradually increased through flow process (Fig. 2). The values of nitrate concentration decreased linearly and did not change so much by time as shown in Fig. 4. Average nitrate removal rate ( $R$ ) of non-plant plot was 0.61 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The coefficients of nitrate removal rate ( $a$ ) were calculated by the equation (9) and the average coefficient of nitrate removal rate ( $a$ ) was 0.038 m d<sup>-1</sup>. The coefficient of nitrate removal rate of the first block was smaller than the values of other blocks due to low water temperature (Fig. 9).

**Key words** : Nitrate removal, Paddy field, Temperature

## 1. はじめに

筆者らは1991年に休耕田の中に5試験区を設け、硝酸性窒素濃度約20 mg L<sup>-1</sup>の高濃度の湧水を連続的に流下させて、その窒素除去機能を10年以上通年で測定してきた。その成果は既に報告し、窒素除去機能が現在も持続していることを示した(田淵ら, 1993, 1996, 2001, 黒田ら, 2000)。今回は同じ試験区で流下過程中の水温や硝酸性窒素濃度などの変化を3時間おきに測定し、その窒素除去機能の解析を行った。それにより1)流下過程における窒素濃度の低下と各種水質項目の変化を把握し、2)流下区間ごとの硝酸性窒素の除去速度や除去係数および圃場倍数の算出とそれへの影響要因の検討を行った。

本調査は1991年の本試験開始時に第1回を行い、2003年には流量を変えて第2回の調査を行った。本報では第1回の調査結果を報告し、第2回の調査結果は次報で報告する。

## 2. 試験区と試験方法

### 2.1 試験区

試験区は細長い矩形で長辺は25 m, 短辺1.4 m, 面積35 m<sup>2</sup>である(図-1)。図の左側から水は流入して、試験区の中を連続的に流下して右側から流出している。流入水は自然の湧水を導入しており、その流入水量は15 ml s<sup>-1</sup>で一定にしている。この水量は試験区の面積当たりでは0.037 m d<sup>-1</sup>となる。試験区は谷津田にあり、周辺の水位を高く維持しているため、浸透はほぼ0である。そ

\* 元東京大学農学部 〒300-0331 茨城県阿見町阿見 4630-104 (自宅)

\*\* 茨城大学農学部 〒300-0393 茨城県阿見町中央 3-21-1

キーワード: 窒素除去, 水田, 水温

れで流出量は流入量から蒸発量を差し引いた値に近い。今回の流入量と流出量の差は  $0.003 \text{ m d}^{-1}$  で少なかった。試験は無植生区と水稲区で行った。無植生区とは雑草を除去して植生のない状態に保持した区である。水稲区は水稲を無肥料、無農薬で栽培している区である。平均湛水深は無植生区 42 mm, 水稲区 22 mm で、通過時間は無植生区で 27 時間、水稲区で 15 時間になる。

2.2 試験方法

試験区の中に流下方向に四分の一の等間隔 (6.25 m) で 5 カ所の測点を設けた (図-1)。この 5 測点で 8 月 30 日の朝 6 時から 3 時間間隔で 24 時まで 7 回測定した。各測点で水温、DO (溶存酸素), pH, EC を測定し、採水試料で  $\text{NO}_3\text{-N}$  を分析した。その他流入量と流出量、水深、気温を測定した。

3. 流下過程における水温、水質の変化

3.1 水温の変化

無植生区の流下過程ではどの時刻でも流下にともなって水温は上昇している (図-2)。自然の湧水を流入させているので、流入点の水温が一番低いが、第 2 測点に至るまでに上昇し、その後はほぼ一定になる。水稲区も同ような水温上昇をしているが、その上昇の程度は無植生区よりも小さい。区間別平均水温の流下過程変化では、無植生区の水温が水稲区よりも  $3\sim 4^\circ\text{C}$  高くなっている。この差は水稲による日陰が原因である。

流入点から流出点までの 5 カ所の水温を平均した両区の平均水温の時刻変動を図-3 に示したが、無植生区では夜間と日中の水温差は  $10^\circ\text{C}$  程度である。水稲区ではその差は  $7^\circ\text{C}$  程度で小さい。このような水温変動が後述する窒素除去に影響を与える。

3.2 硝酸性窒素濃度の変化

無植生区の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は流下するにつれて、各時刻

ともほぼ直線的に低下したが、その各測点の濃度は各時刻でそれほど大きな差はない (図-4)。水稲区でもほぼ直線的に低下しているが、時刻による差が無植生区よりもやや大きい。両区の平均濃度は測点 2 までは差は少ない

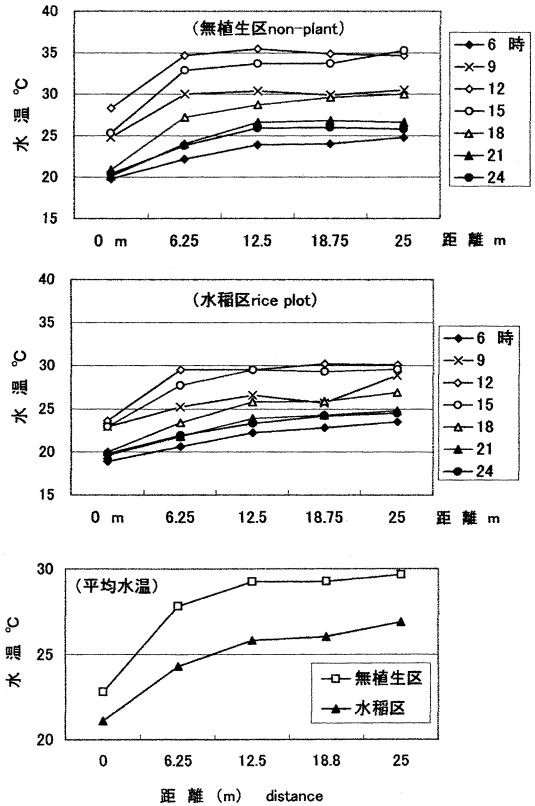


図-2 水温の流下過程変化

Fig. 2 Changes of water temperature in flow process.

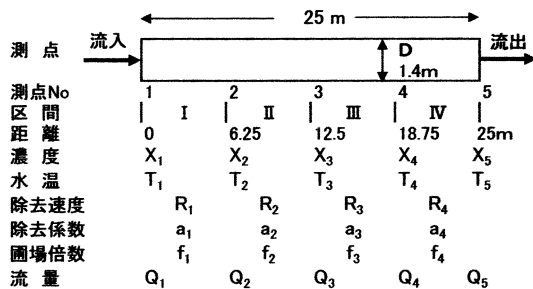


図-1 試験区と記号

Fig. 1 Experimental plot.

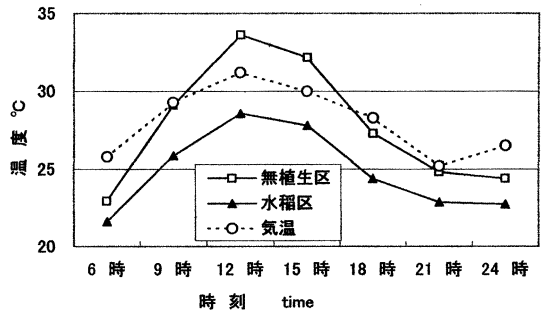


図-3 試験区内平均水温と気温の変動

Fig. 3 Changes of average water temperature.

が、中間点以降で差が生じている。無植生区の方が濃度の低下が  $3\text{ mg L}^{-1}$  程度大きい。

両区の平均  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の時刻変動でも、無植生区の方が水稲区よりも濃度が低く、無植生区の窒素除去機能が水稲区よりも高かった。また両区ともそれほど大きな時刻変動はなかった (図-5)。

### 3.3 pH の変化

pH は流下にしたがい上昇している (図-6)。無植生区では流入点で 6.5 程度であるが、日中の 12 時と 15 時には中間点で 7.5 以上に上昇した。早朝の 6 時や夕方の 18 時以降の上昇は少ない。日中の pH の上昇は藻類の繁殖を示している。水稲区では 12 時の値が飛び離れて高い値を示し、流出点では 8.4 になった。15 時の値はそれほど高くなく、この点は無植生区と異なっている。両区の

平均 pH の流下過程変化を比較すると、無植生区の方が水稲区よりもやや高い値を示した。

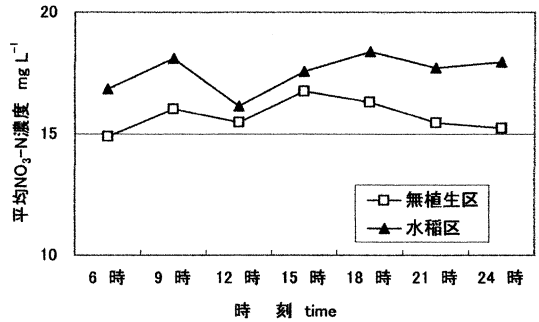


図-5 試験区内平均  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の時刻変動

Fig. 5 Changes of average  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration.

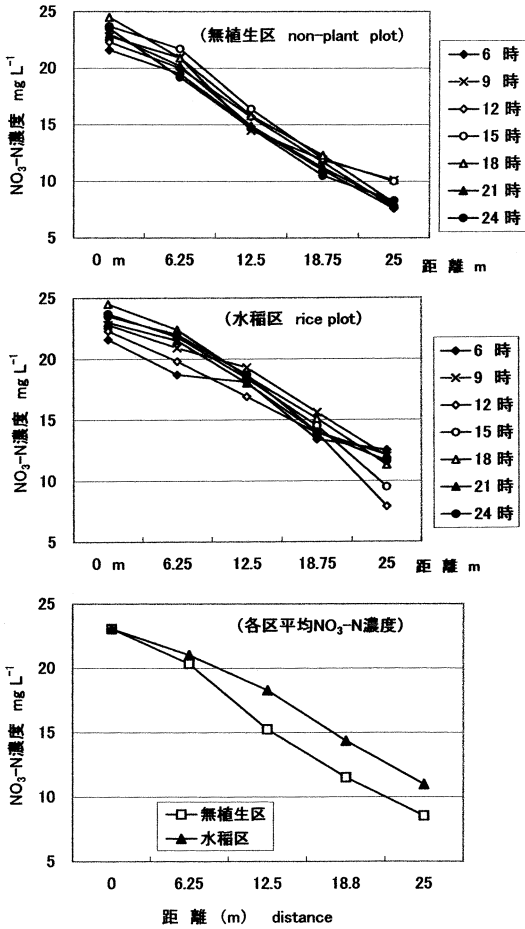


図-4  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の流下過程変化

Fig. 4 Decrease of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in flow process.

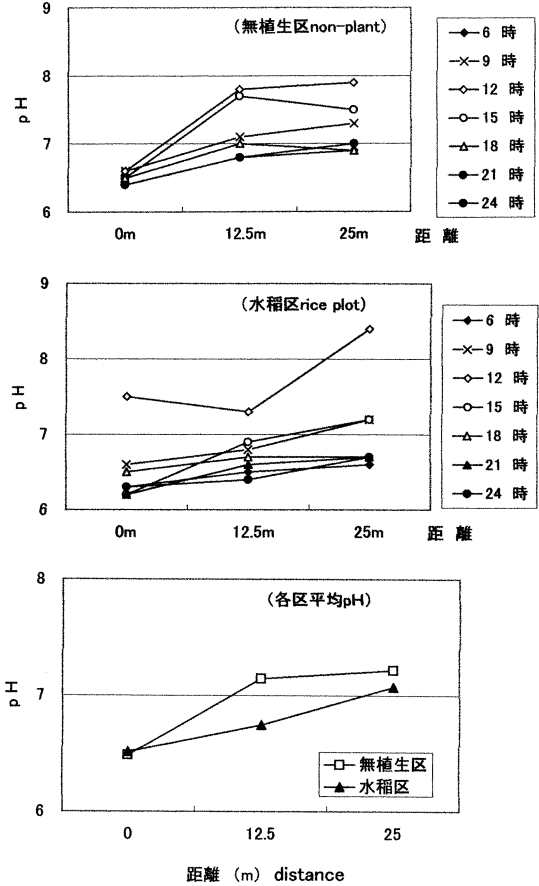


図-6 pH の流下過程変化

Fig. 6 Changes of pH values in flow process.

3.4 DOの変化

DOはpHと違って流下過程で低下したが、時刻によって異なる様相を呈する(図-7)。無植生区では日中の9時、12時、15時には流入点、中間点、流出点でのDO値は8~13mg L<sup>-1</sup>で高いが、朝と夜間には中間点と流出点のDO値が4mg L<sup>-1</sup>以下に低下した。そのためにこれらの時間帯には流入点から中間点にかけてのDO値の低下が現れている。水稻区の値も無植生区とほぼ同じで、日中に中間点と流出点のDO値が高くなる。

図-8は各測点の平均DO値の時刻変動である。両区と

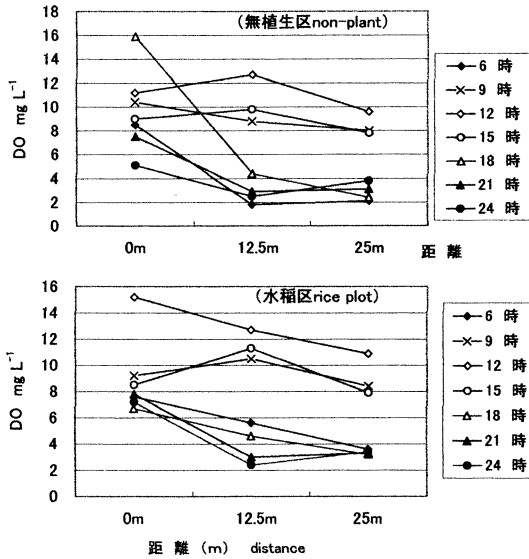


図-7 DOの流下過程変化

Fig. 7 Changes of DO values in flow process.

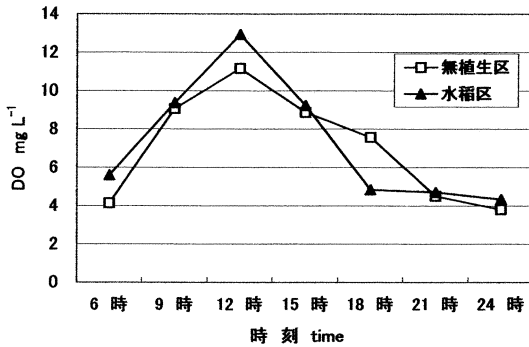


図-8 試験区内平均DO値の時刻変動

Fig. 8 Changes of average DO values of each plot.

も日中にDOが上昇している。このように日中の藻類の活動によるpHとDOの上昇がある。

4. 硝酸性窒素除去理論の適用と解析

4.1 区間別硝酸性窒素の除去速度

流下過程で測定した硝酸性窒素濃度から各区間、各時刻の硝酸性窒素除去速度を計算した。使用した式は下記のようになる。

$$R_i = (Q_i X_i - Q_{i+1} X_{i+1}) / BD \tag{1}$$

$R_i$ ; 区間*i*の除去速度 (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $Q_i, Q_{i+1}$ ; 測点*i*および測点*i+1*の流量 (m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>),  $X_i, X_{i+1}$ ; 測点*i*と測点*i+1*の硝酸性窒素濃度 (mg L<sup>-1</sup>),  $B$ ; 区間の長さ (m),  $D$ ; 試験区の幅 (m), 今回は1.4m。Lを試験区の長さとするれば  $B=L/4, L=25m$  なので  $B=6.25m$ 。試験区の面積を  $A$  とすれば  $A=DL$ 。

$q_i = Q_i / A$  とすれば

$$R_i = 4(q_i X_i - q_{i+1} X_{i+1}) \tag{2}$$

ここで水が各区間を通過するのに要する時間  $\Delta t$  を流量と水深及び  $D$  と  $B$  から求めて、 $X_{i+1}$  の濃度は  $X_i$  に対して  $\Delta t$  時間後の値を計算に使う。例えば区間通過に6時間必要であれば、6時の  $X_i$  に対して  $X_{i+1}$  は12時の濃度とする。その時刻に適合する濃度がない場合には前後の濃度から時間に比例して変化しているものとして計算した。例えば13:30の濃度は12時と15時の濃度の平均値になる。また流量も流下過程で蒸発などにより減少するので、流量が流下距離に比例して減少するものとして各測点ごとに覚えて計算した。

こうして求めた各時刻の除去速度  $R$  を区間別に平均して図示した(図-9の最上図)。無植生区では区間IIが最大の値を示し、次いで区間III、区間IVとなり、区間Iの除去速度がもっとも小さい。全区間平均除去速度は0.61 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった。これは8月の水温の高い時期なので、本試験区の除去速度としては大きい値に相当しよう。なおこの年の通年測定から求めた無植生区の年平均除去速度は0.43 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>、稲作期平均除去速度は0.56 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった。

後述するように硝酸性窒素除去速度は濃度に比例するから、一般には濃度が最高の流入点で最も大きく、流下にともない次第に小さくなる筈である。それなのに第I区間で最小になったのは、水温が流入点で低かったためと考えられる。

水稻区では区間IIの除去速度が無植生区ほどは大きくなっていない。これは稲の存在によって水温の上昇が少なかったためと考えられる。全区間平均除去速度は0.48

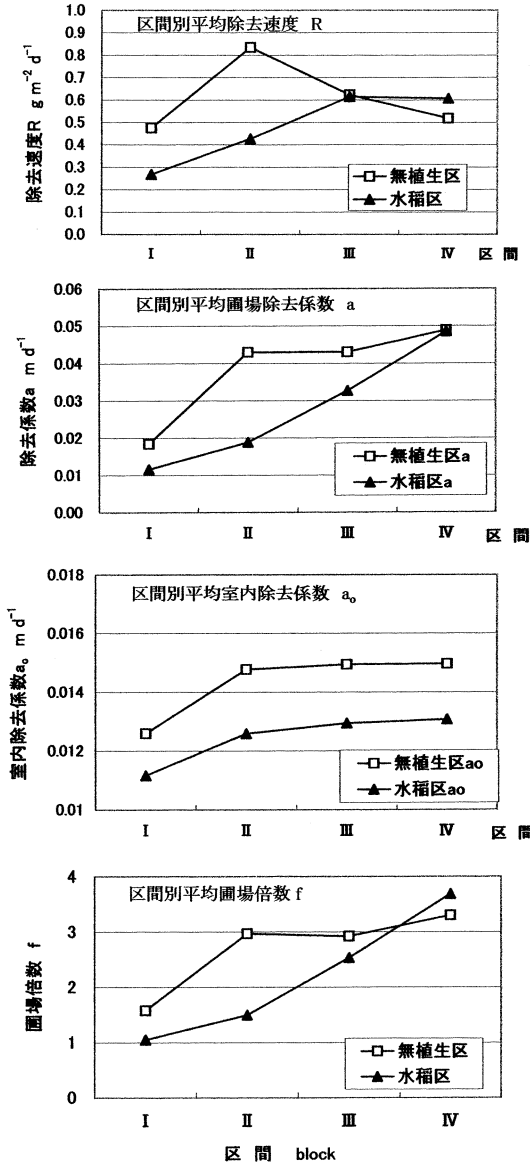


図-9 硝酸性窒素除去速度  $R$ 、圃場除去係数  $a$ 、室内除去係数  $a_o$ 、圃場倍数  $f$  の区間別平均値

Fig. 9 Average values of nitrate removal rate  $R$ , coefficient of nitrate removal ( $a$ ) and ( $a_o$ ), and field coefficient ( $f$ ) of each plot.

$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  になり、無植生区よりも小さかった。

#### 4.2 流下過程の硝酸性窒素濃度低下式

筆者らは湛水土壌面での硝酸性窒素除去について硝酸性窒素濃度を変えて室内実験を行い、濃度と除去速度の間に指数関数の関係があるという結果を得たが、近似的に下記の濃度比例式を使うことを提起した(田淵ら、

1987)。

$$R = aX \tag{3}$$

$R$ ; 除去速度 ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $a$ ; 除去係数 ( $\text{m d}^{-1}$ ),  $X$ ; 湛水中の硝酸性窒素濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ )。

本式を適用して湛水中の硝酸性窒素濃度の時間低下を表す式として式(4)が、そして流下過程の硝酸性窒素濃度の低下を表す式として(5)式が導かれた(田淵ら、1996, 1998, 2000, 2001, Tabuchi, 2001)。

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

$Xt$ ; 時間  $t$  の硝酸性窒素濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $X_o$ ; 初期濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $t$ ; 時間 (day),  $H$ ; 水深 (m)。

流下過程の濃度は  $t$  を  $t = xDH/Q$  で置換して

$$Xx = X_o \cdot \exp(-aD \cdot x/Q) \tag{5}$$

$x$ ; 流入点からの距離 (m),  $Xx$ ; 距離  $x$  の地点の濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $X_o$ ; 流入水濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $D$ ; 試験区の幅 (m),  $Q$ ; 流量 ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )。

ここで  $L$  を試験区の長さ (m),  $A$  を面積 ( $\text{m}^2$ ) として、 $q = Q/A = Q/DL$  とおけば

$$Xx = X_o \cdot \exp(-a \cdot x/q \cdot L) \tag{6}$$

この式で流下過程の濃度  $Xx$  が表される。除去係数  $a$  が一定であれば  $Xx$  は距離  $x$  に対して指数関数的に低下する。しかし除去係数は水温によって変化するので、屋外の圃場では濃度は一般的には時刻変動をとまう。

(6)式で  $x = L$  とおけば試験区から流出する水の濃度  $X_L$  を求める式になる。

$$X_L = X_o \cdot \exp(-a/q) \tag{7}$$

この式は流出水濃度が  $X_o$  と  $a$  と  $q$  の3要因で決まるという流下過程の基本式である。 $q$  を使うことによって水深や水路長、水路幅が含まれない式が導かれた。ただしこの式の成立には前提がある。流下する水がよどんだり混合したりすることなく定常に押しだし型で流下することが条件である。また水中の硝酸性窒素濃度が深さ方向に一定であるという条件も必要で、水深が深いと成り立たなくなるとみられる。また除去係数  $a$  の値は水温や有機物量、藻類、植生などの条件により変化するから圃場では当然時刻変動をすると想定される。これらの除去係数に関与する様々な要因の研究とともに、その時刻変動がどの程度なのかを調べることが(6)式や(7)式の圃場での妥当性を確かめるために必要である。

#### 4.3 各区間の圃場除去係数 $a_i$ の算出

(6)式を測点  $i$  と  $i+1$  の間の濃度として表すと

$$X_{i+1} = X_i \cdot \exp(-a_i \cdot B/q_i \cdot L) \quad (8)$$

$X_i$ ,  $X_{i+1}$ ; 測点  $i$  と測点  $i+1$  の濃度,  $a_i$ ; 区間  $i$  の除去係数,  $q_i$ ; 水深表示の流量,  $B$ ; 区間  $i$  の長さ。

実測した濃度を用いて各区間の圃場除去係数  $a_i$  を算出する。(8)式を変形し,  $B/L=1/4$  なので

$$a_i = -4q_i \cdot \log_e(X_{i+1}/X_i) \quad (9)$$

この場合も除去速度の計算と同様に時間を通過時間  $\Delta t$  だけずらして計算する。

求めた各時間帯の除去係数  $a_i$  の値を平均した区間別圃場除去係数は図-9の2番目の図のようになった。無植生区では区間 I だけが低く, 他の II, III, IV は  $0.04 \sim 0.05 \text{ m d}^{-1}$  でほぼ一定である。水稲区は区間 I から IV にかけて上昇している。

全区間の圃場除去係数の平均値は無植生区で  $0.038 \text{ m d}^{-1}$ , 水稲区で  $0.028 \text{ m d}^{-1}$  で, 無植生区の方が大きかった。

#### 4.4 室内除去係数 $a_o$

室内暗所で測定された除去係数  $a_o$  は次式のように水温により変化することが本試験区の土壌を用いた室内実験で得られている (田淵ら, 1993)。

$$a_o = 0.000011T^2 + 0.005 \quad (10)$$

$a_o$ ; 室内暗所無植生下で測定された除去係数 ( $\text{m d}^{-1}$ ),  $T$ ; 水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。実験は  $10 \sim 40^{\circ}\text{C}$  の範囲で行われた。各区間の実測水温を (10) 式に代入して, その水温に対応する室内除去係数  $a_o$  を求めた。その結果を区間別に平均した値を図-9の3番目の図に示したが, 無植生区の値は水温が高かったため水稲区の値よりも大きい。また区間 I の値が他の区に比べて小さいのも水温が低いためである。全区間平均値は無植生区で  $0.014 \text{ m d}^{-1}$ , 水稲区で  $0.012 \text{ m d}^{-1}$  であった。

#### 4.5 圃場倍数 $f$ による検討

4.4 で求めた室内除去係数  $a_o$  と 4.3 で求めた圃場除去係数  $a$  とを比較すると,  $a$  の方がかなり大きい。室内よりも大きな除去機能が圃場では発揮された。それで  $a$  と  $a_o$  との比  $f$  を求めて, その差を検討する。

$$f = a/a_o \quad (11)$$

$f$  は  $a$  が  $a_o$  の何倍になるかを示す係数で, ここでは圃場倍数と呼ぶことにする。屋外では藻類や植生などによる吸収があり, かつ藻類による有機物補給が行われているので脱窒も盛んになる。それで窒素除去機能が室内よりも大きくなるから,  $f$  は 1 よりも大きくなる。

圃場倍数の区間別の平均値を図-9の最下図に示した。

無植生区では  $f$  の値は区間 I では低いが, 区間 II, III, IV では  $2.9 \sim 3.3$  で大きな差はない。圃場除去係数  $a$  が室内除去係数  $a_o$  の 3 倍程度大きい。水稲区では下流へいくにしたがい徐々に上昇している。全平均値は無植生区が 2.7, 水稲区が 2.2 になった。

$f$  の値が区間によって変わったことは, 除去係数  $a$  が単純に  $a_o$  の何倍というようには表されないことを示している。除去係数は水温だけでなく, 炭素量や植生吸収などによっても影響されるであろう。本調査では測定しなかったため, 次報で報告する調査で測定した無植生区の COD や TOC の濃度を pH とともに図-10 に示した。TOC 濃度は測点 ① では  $1 \text{ mg L}^{-1}$  以下であるが, 流下にとともに上昇して測点 ⑤ では  $3.7 \text{ mg L}^{-1}$  まで上昇した。COD や pH も同様に上昇した。このことは日中に藻類による有機物の補給があることを示している。区間 I では水温が低だけでなく, 水が流入したばかりで藻類の増殖による有機物補給が少ないので除去係数が小さくなったのではないかと考えられる。

#### 4.6 植生係数 $F$ と圃場倍数 $f$ の関係

圃場では植生などの影響により窒素除去速度  $R$  が室内暗所の除去速度  $R_o$  よりも大きくなるので, それを下記のように植生係数  $F$  を使って表示していた (田淵・久保田, 1995, 田淵, 1998)。それでこの植生係数  $F$  と圃場倍数  $f$  との関係式を求める。 $q$  が流下過程で変化しない場合の室内除去速度  $R_o$  は次式で求まる。

$$R_o = q \cdot X_o(1 - \exp(-a_o/q)) \quad (12)$$

植生係数  $F$  を用いた場合の圃場除去速度  $R$  は

$$R = F \cdot R_o = F \cdot q \cdot X_o(1 - \exp(-a_o/q)) \quad (13)$$

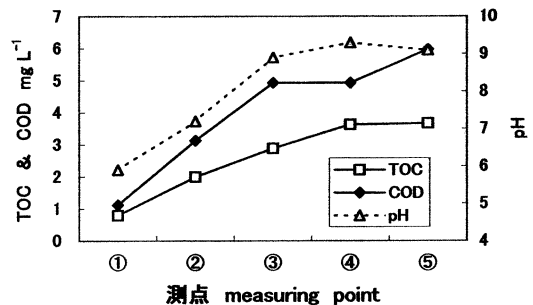


図-10 TOC, COD, pH の流下過程変化 (無植生区 15 時, 2003 年 8 月)

Fig. 10 Changes of TOC, COD and pH values in flow process in non-plant plot measured in 2003.

今回のように除去係数  $a$  を  $f \cdot a_0$  で表し植生係数を使わない場合は

$$R = q \cdot X_0 (1 - \exp(-f \cdot a_0 / q)) \quad (14)$$

(13)式と(14)式を等しいとおけば

$$F = \{1 - \exp(-f \cdot a_0 / q)\} / \{1 - \exp(-a_0 / q)\} \quad (15)$$

これが  $F$  と  $f$  の関係式である。

$a_0 = 0.01$ ,  $q = 0.05$  の場合には,  $f = 2$  の時  $F = 1.8$ ,  $f = 3$  で  $F = 2.4$  となり,  $f$  よりも  $F$  の方が少し小さくなる。

この試験区で9年間の濃度低下率から求めた稲作期の平均植生係数  $F$  は無植生区, 水稲区とも2.0前後で推移した(田淵, 2001)。これは圃場倍数にすれば2.4に相当する。

## 5. おわりに

得られた結果をまとめると, 1) 水温やpHは日中に上昇し下流の区間で高くなった。2) しかし硝酸性窒素濃度の時刻変動は少なく, また流下過程ではほぼ直線的に低下した。3) 平均硝酸性窒素除去速度は無植生区で  $0.61 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , 水稲区で  $0.48 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。4) 平均圃場除去係数は無植生区で  $0.038 \text{ m d}^{-1}$ , 水稲区で  $0.028 \text{ m d}^{-1}$  で, 圃場倍数は無植生区で2.7, 水稲区で2.2になった。いずれも無植生区の値が水稲区よりも大きくなった。5) 除去係数や圃場倍数は流入部のI区で小さく下流で増大するという区間差が生じた。これには水温だけでなく, 有機物などの要因が関与しているものとみられた。

このように圃場では除去係数が水温や有機物量などで変化するので, その要因分析と理論解析は容易ではない。また今回の測定が6時から24時までで短かったことも, 時刻変動の詳しい解析を困難にした。測定期間を1日以上にすることが必要である。圃場除去係数は水温だけでなく有機物などの水質条件, さらに土壤の炭素量などの土壤条件や日照や生物相などによって変化する可能性がある。さらにその時点までの水温や日照などの履歴も関与するかもしれない。まだまだ不確定のことが多

く, 今後のさらなる研究が必要である。ここで用いた圃場倍数は圃場除去係数の要因が明確になるまでに用いられる暫定的な係数といえよう。

終わりに本試験を行うに当たってご協力いただいた茨城大学と東京大学の学生, 院生諸君, ならびに水田所有者の大竹房雄氏に感謝の意を表する。

## 引用文献

- 黒田久雄・田淵俊雄・高坂快児・中曾根英雄 (2000): 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** (12): 19-24.
- 田淵俊雄・久保田健蔵 (1995): 湛水土壤系における窒素除去量に及ぼす硝酸性窒素濃度と植生の影響. 土壤の物理性, **72**: 3-8.
- 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 (1998): 水田除去機能付き窒素流出モデル. 土壤の物理性, **78**: 11-18.
- 田淵俊雄 (2000): 湛水土壤系での窒素除去について. 応用水文, **13**: 35-44.
- 田淵俊雄・黒田久雄・志村もと子 (2001): 休耕田を活用した長期窒素除去試験. 土壤の物理性, **87**: 27-36.
- Tabuchi, T. (2001): Nitrate removal in the flooded paddy field. Proceedings of the International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones, published by National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. 81-90.

## 要 旨

筆者らは休耕田の中に設けた試験区で硝酸性窒素除去の試験を長期的に行っており、約  $20 \text{ mg L}^{-1}$  の高濃度の硝酸性窒素を含む自然の湧水を10年以上流下させている(図1)。硝酸性窒素の除去機能は最初低下したが、現在でも持続している。今回はその試験区で流下過程での水質変化を3時間おきに測定した。水温は時刻変動をしたが、区間Iで最も低く、流下につれて上昇した(図2)。硝酸性窒素濃度は流下過程で直線的に低下し、時刻変動は少なかった(図4)。その平均硝酸性窒素除去速度  $R$  は無植生区で  $0.61 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。圃場除去係数  $a$  を(9)式で求めたが無植生区の平均値は  $0.038 \text{ m d}^{-1}$  であった。区間Iの除去係数は水温が低かったので他の区間よりも小さい値になった(図-9)。

受稿年月日: 2004年8月17日

受理年月日: 2005年2月1日