

# 流量が湛水流下過程の硝酸性窒素除去機能に及ぼす影響

## —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\*\*・池野辺明子\*\*・平野真弓\*\*

### Influence of Flow Rate on Nitrate Removal in Flow Process

Toshio TABUCHI\*, Hisao KURODA\*\*, Akiko IKENOBE\*\* and Mayumi HIRANO\*\*

\* 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

Influence of flow rate on nitrate removal in the flow process was examined in a paddy field plot. Flow rate was changed for three stages. In the first stage flow rate was controlled at  $0.040 \text{ m d}^{-1}$ , in the second stage at  $0.073 \text{ m d}^{-1}$  and in the third stage at  $0.136 \text{ m d}^{-1}$ . Corresponding to the increase of flow rate, water flows through a plot rapidly. The retention time is 26.3 hours in the first stage, 16.5 hours in the second stage and 9 hours in the third stage. With the increase of flow rate, the nitrate concentrations of outflow water gradually increased. The decrease of nitrate concentration through the flow process also changed. Coefficients of nitrate removal rate (a) changed in a day, but the daily average values (a) in each stage were almost constant.

**Key words** : Paddy field, Coefficient of nitrate removal rate, Temperature, TOC

## 1. はじめに

筆者らは湛水下の土壤面の硝酸性窒素除去機能について室内実験や理論的解析を進めるとともに、試験田で長期流下試験を行って除去速度や除去係数について検討を行ってきた(田淵ら, 1987, 1993, 1996, 2001, 黒田ら, 2000)。またそこでえた濃度比例式を地形連鎖系の窒素流出モデルの中に組み込んでその除去効果を評価した(田淵ら 1998 a, b)。前報では休耕田に設けた試験区で湛水流下過程における窒素濃度の低下と水質変化を3時間間隔で測定し、その除去係数について解析を行った(田淵ら, 2005)。今回は流入水量を変化させて、硝酸性窒素濃度や除去係数に対する流量の影響を調べる。それは流下過程の硝酸性窒素濃度低下式に含まれる要因のひとつである流量 $q$ の適合性の検討であり、それは流下過程の窒素除去理論の構築にとって重要なステップである。また流量増大に伴い流入水の通過時間が短くなるので、そ

れによる時刻変動が生じる可能性がある。流量の変化に伴ってどのような時刻変動が起きるのか検討する。

## 2. 試験方法

試験は13年間永続して流下試験を行っている谷津田の谷頭にある休耕田試験地で行った。試験区は長さ25 m, 幅1.4 m, 面積 $35 \text{ m}^2$ の無植生区である(図-1)。測定期間は2003年8月24日から30日で、その間に流入水量を通常時( $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )の等倍, 2倍, 4倍と3段階に変えた。この流量変化に伴い水深が38, 45, 49 mmと変化した。試験区を水が通過するのに要する時間は26.3, 16.5, 9.0時間になった。これを順に第I, 第II, 第IIIステージと命名する。

試験区の中に流下距離6.25 mの等間隔で5点の測点を設け、そこに自記水温計を設置し10分間隔で水温を測定した。末端の流出点には自動採水器を設置して、3時間間隔の水質測定を行った。測定項目はEC, pH, DO,

\* 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 : 水田, 硝酸性窒素除去係数, 水温, TOC

分析項目は  $\text{NO}_3\text{-N}$ , T-N, COD, TOC, TIC, T-P である。

この流出水の測定とは別に各ステージごとに2回の流下過程の測定を行い、5つの測点で採水や現場測定を行った。測定項目は流出水調査と同じである。その他流入、流出水量と水深測定を流下過程調査の際に行った。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の分析はイオンクロマトグラフで行い、TOCは光触媒  $\text{TiO}_2$ 酸化法で分析した。

### 3. 測定結果

#### 3.1 流下過程の水温

##### 3.1.1 各測点の水温

各測点の水温は時刻変動をしているが、最高で  $39^\circ\text{C}$ 、最低で  $17^\circ\text{C}$  である (図-2)。流入水量を2倍にした第IIステージでは、気温が低下したので全体的に水温も低下した。また8月27日朝に24mmの集中的な降雨があったので、他のステージとは異なった結果になった。

測点の中では測点1の水温が自然の湧水を流入水に使っているために、他の測点よりも常に低くなった。 $10^\circ\text{C}$ 以上の差がある。したがって水温は流下にしたがって上昇し、測点2になると日中の値は他の下流側の測点とほぼ同じになる。このように測点1の水温が他の測点とは異なる状況にあるのが特徴である。

##### 3.1.2 平均水温の変動

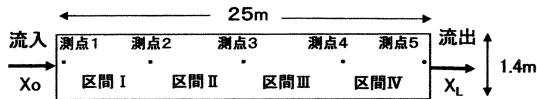


図-1 試験区

Fig. 1 Experimental plot.

5つの測点の水温の平均値は第Iステージでは  $20\sim 35^\circ\text{C}$  と時刻により大きく変動したが、第IIステージでは最高水温が低下して変動は少なくなった (図-3)。第IIIステージでは再び変動が大きくなった。

##### 3.1.3 通過水温

流入水が試験区を流下する過程で各区間で受ける水温の平均値 (通過水温と呼ぶ) を計算した。計算方法は図-4に示した。まず各ステージごとに各区間を通過するのに要する時間  $\Delta t_i$  を流量と区間の距離と幅および水深から求める。そしてある時刻  $t_1$  に流入した水が第2測点を通過する時刻  $t_2$  を  $t_1 + \Delta t_1$  で求め、その  $t_1$  から  $t_2$  までの第I区間水温の平均値を求める。次に第II区間通過時  $t_2\sim t_3$  の平均水温を求める。 $t_3 = t_2 + \Delta t_2$  である。第III区間は  $t_3\sim t_4$ 、第IV区間は  $t_4\sim t_5$  の時刻の平均水温を求める。こうして求めた4区間の平均水温を平均したのが時刻  $t_1$  に流入し  $t_5$  に流出した水の通過水温である。この計算を流入時刻  $t_1$  を変えて繰り返し、各時刻に流出した水の通過水温を求めた。なお各区間  $i$  の水温  $T_{i,t}$  は上下両測点の単純平均値とした。図-3は流入時刻でなく流出時刻で表示したもので、ある時刻に流出した水の流下過程で受けた通過水温を示している。

第Iステージでは26時間で水は通過したので、通過水温は流出時刻によりそれほど変動しない。ほぼ  $26^\circ\text{C}$  である。しかし第IIステージに入ると、16.5時間で通過したので、昼間通過する水と夜間に通過する水の差が生じた。26日には最低で  $22^\circ\text{C}$ 、最高で  $27^\circ\text{C}$  で、 $5^\circ\text{C}$ の差がある。第IIIステージでは9時間通過になったので、その変動はさらに大きくなった。15~18時前後に流出する水の水温が高く、最低水温との差は  $10^\circ\text{C}$ 以上ある。このように流入水量が通過時の水温の時刻変動を生じるので、

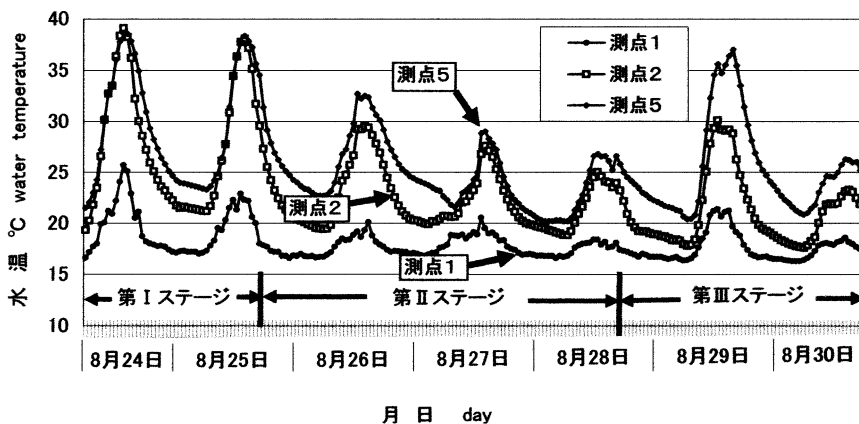


図-2 各測点の水温の変動

Fig. 2 Changes of water temperature.

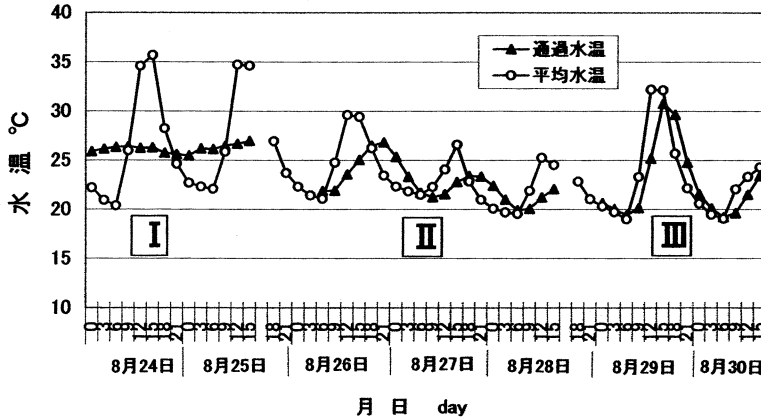


図-3 平均水温と通過水温

Fig. 3 Changes of mean water temperature.

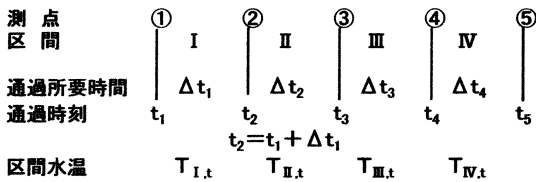


図-4 通過水温の説明

Fig. 4 Explanation for water temperature in flow process.

これが窒素除去に影響を与えることが想定される。

### 3.2 流出水の水質

#### 3.2.1 NO<sub>3</sub>-N 濃度と T-N 濃度の変動

流出水の NO<sub>3</sub>-N 濃度は第 I ステージから第 II, 第 III と流入水量が増えるにつれて上昇した (図-5)。第 II ステージの 27 日の降雨の際には濃度は約 60% に低下したが、これは雨水による希釈である。それで今回の試験としては、この降雨直後の値は対象にしないこととする。朝 9 時から翌朝 6 時までの 1 日分の測定値を平均した各ステージの日平均 NO<sub>3</sub>-N 濃度は第 I ステージでは 6.8 mg L<sup>-1</sup>、流量が 2 倍になった第 II ステージでは 11.6 mg L<sup>-1</sup> に、流量が 4 倍になった第 III ステージでは 13.1 mg L<sup>-1</sup> に上昇した (表-1, 図-6)。通過時間が短いと、それだけ流入水が受ける窒素除去時間が短くなるので濃度低下量は少なくなり流出水濃度は上昇する。

T-N 濃度は NO<sub>3</sub>-N 濃度と同じような変動をしている。NO<sub>3</sub>-N 濃度は T-N 濃度の約 90% を占めた。降雨のあった時の T-N 濃度も特別に高くはなっておらず、むしろ希釈されて低くなっている。

#### 3.2.2 COD, TOC, TIC 濃度の変動

COD 濃度は流入水量の増大にともなって窒素濃度とは逆に低下した (図-5, 6)。これは通過時間が短くなって、藻類による有機物生産が少なくなったためとみられる。流入水の COD 濃度は 1~2 mg L<sup>-1</sup> と低く、それが流下過程で藻類の増殖などによって上昇する。したがって流量が増えて通過時間が短くなるから濃度としては低下する。時刻変動は大きくはない。

TOC 濃度も同様の变化をするが、COD の約 53% である。日中に高くなる傾向がある。

TIC 濃度は COD の 2 倍程度大きい。やはり流量の増大にともなって低下するが、その時刻変動が際だっている。夜間に上昇する傾向があり、日中に低下する。TOC 濃度と逆の傾向がある。藻類が日中に CO<sub>2</sub> を吸収し、夜間に放出するためとみられる。

#### 3.2.3 T-P 濃度

T-P 濃度は常に 0.1 mg L<sup>-1</sup> 以下の低濃度で流量に対応した特別な変化はしていないように見える。しかし第 I, 第 II ステージでは夜中に T-P 濃度は低下しているが、第 III ステージは逆に夜間に上昇している。また 27 日の降雨の後にはさほどの上昇がないのに、翌 28 日にかなりの上昇がある。この原因はわからないが、何らかの生物活動であろうか。

#### 3.2.4 Cl 濃度と EC

Cl 濃度は第 I, 第 II ステージで約 35 mg L<sup>-1</sup> 程度、第 III ステージで 30 mg L<sup>-1</sup> 程度と、降雨の後を除くとほぼ一定の値を示している。流下過程で生産も除去もないということであろうか。

EC はほぼ Cl 濃度と同じような傾向を示している。降雨の後を除けば、250~300 μS cm<sup>-1</sup> で安定している。

### 3.3 流下過程の水質変化

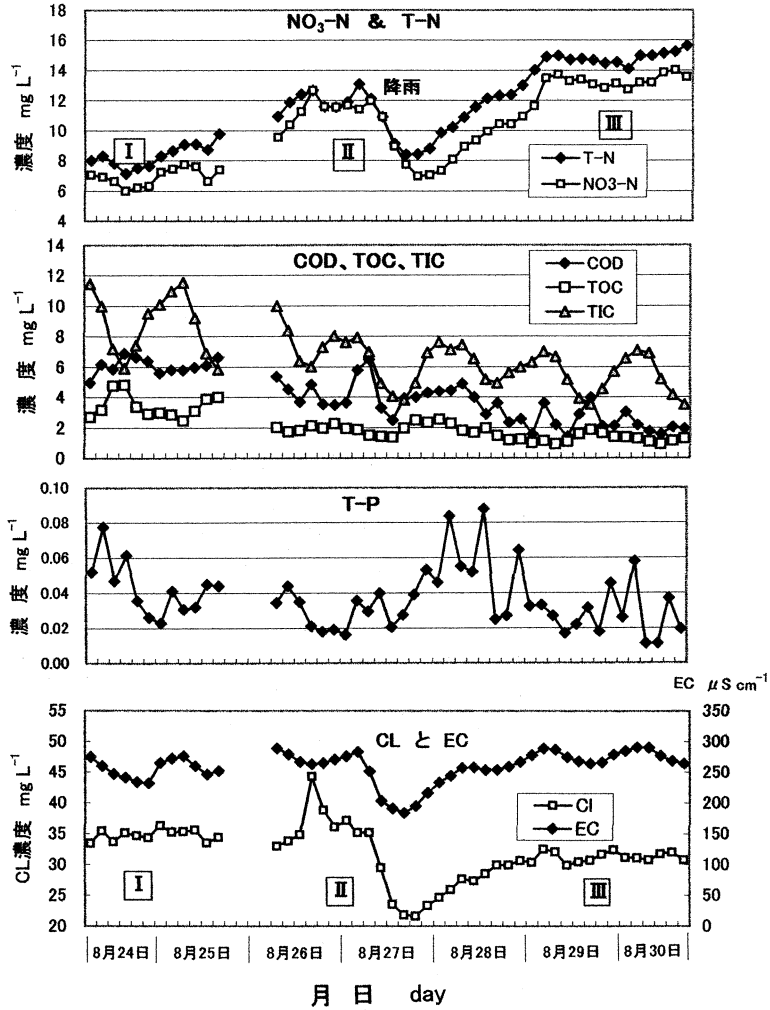


図-5 流出水の水質変動

Fig. 5 Changes of water qualities of outflow water.

表-1 流出水濃度の日平均値 (mg L<sup>-1</sup>, μS cm<sup>-1</sup>)

Table 1 Daily mean values of concentrations of outflow water

ステージ	T-N	NO <sub>3</sub> -N	COD	TOC	TIC	Cl	EC	T-P
I	8.1	6.8	6.1	3.4	9.1	35.0	253	0.04
II	12.2	11.6	4.5	1.9	7.3	36.9	269	0.04
III	14.7	13.1	2.4	1.4	5.4	31.0	277	0.03
平均	11.6	10.5	4.4	2.2	7.3	34.3	267	0.04

流入点から流出点までの流下過程での水質変化を各ステージの9時と15時の2回測定した。しかし第IIステージは降雨のために良い結果が得られなかったため、第Iと第IIIの両ステージの結果を報告する。

### 3.3.1 NO<sub>3</sub>-N 濃度

流下過程のNO<sub>3</sub>-N濃度の変化は前報と同じくほぼ直線状の低下を示している(図-7)。流下過程での窒素除去が機能した結果である。

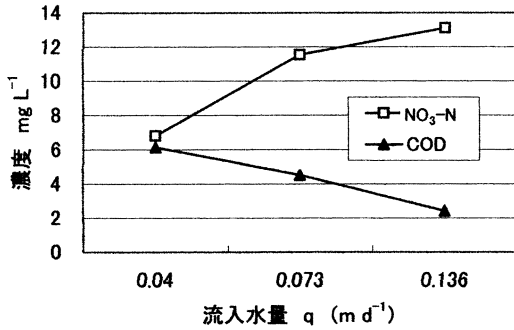


図-6 流入水量と流出水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度及び COD 濃度の関係

Fig. 6 Relationship between flow rate and the concentration of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and COD of outflow water.

両ステージの2本の線は明瞭に区別される。第Iステージの方が濃度低下が大きい。その流出水濃度は  $8 \text{ mg L}^{-1}$  程度であるが、流量が4倍の第IIIステージの流出水濃度は約  $14 \text{ mg L}^{-1}$  と高くなっている。流量による差は大きい。

9時と15時の時刻による濃度差は少ない。

### 3.3.2 COD, TOC, TIC 濃度

COD 濃度は流下過程で上昇している。流下過程での藻類による有機物生産が存在する結果である。流量が少ない第Iステージの方の上昇が大きい。

TOC 濃度も同様に流下過程で上昇しており、有機物生産が行われていることを示している。濃度は流量が少ない第Iステージの方が高く、また午後15時の濃度が午前9時の濃度よりも高い。

TIC 濃度も流下過程で上昇しているが、それほど高くはない。また TOC と逆に午後の濃度が午前の濃度よりも低い。

### 3.3.3 T-P 濃度

T-P 濃度の流下過程での変化には特別な傾向はないようにみえる。上昇も低下もしていない。ただ午後15時の濃度の方が9時の濃度よりも高い。

### 3.3.4 pH

pH は流下過程で上昇している。特に15時の値が8以上に高く上昇しており、日中の藻類の活動による炭酸の消費が関係している。

### 3.3.5 DO

DO 濃度も流下過程で上昇している。末端では朝の9時でも  $14 \text{ mg L}^{-1}$  以上で過飽和の状態である。

### 3.3.6 EC, Cl

EC は流下過程で減少している。 $\text{NO}_3\text{-N}$  が除去される

ためと思われるが、9時よりも15時の値が低くなっている。

Cl は第Iステージでは流下過程で上昇しているが、第IIIステージではほとんど変わっていない。

以上、流下過程における水質変化は上昇する COD, TOC, pH, DO と逆に低下する  $\text{NO}_3\text{-N}$ , EC と、それぞれ特徴的な形を示した。

## 4. 湛水流下過程の硝酸性窒素除去解析

### 4.1 末端流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度による解析

#### 4.1.1 湛水流下過程の硝酸性窒素除去式

湛水土壤面での硝酸性窒素除去を表す式として濃度比例式が室内実験結果から提起され(田淵ら, 1987), その式から湛水流下過程での  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の低下式が導かれ検討されてきた(田淵ら, 1996, 1998a, 2000, 2001, Tabuchi, 2001)。

$$X_L = X_o \cdot \exp(-a/q) \quad (1)$$

ここで、 $X_L$ ; 末端流出水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $X_o$ ; 流入水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $a$ ; 除去係数 ( $\text{m d}^{-1}$ ),  $q$ ; 流量(流量を湛水面積で除した値で単位面積当たりの流量 ( $\text{m d}^{-1}$ ) で、水深表示の流量。污水处理の分野では流量負荷という)。(1)式を流下距離  $x$  の地点の濃度を示すように変えると次のようになる。この式は濃度が流下とともに指数関数的に低下することを示す。

$$Xx = X_o \cdot \exp(-ax/qL) \quad (2)$$

$Xx$ ; 流下距離  $x$  の濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $x$ ; 流下距離 (m),  $L$ ; 試験区の長さ (m)。

(1)式は流出水の濃度  $X_L$  が流入水濃度  $X_o$  と除去係数  $a$  および流量負荷  $q$  の3要因で決まることを示す流下過程の基本式である。現在硝酸性窒素の除去のためにウエットランド、湿地、水田、河畔林などの活用が世界的な課題になっており、2001年には釧路市で河畔緩衝帯の国際ワークショップが波野野北大教授を運営委員長として開かれた(同 Proc. 2001)。このような緩衝帯における窒素除去にとってはこの式のもつ意味は大きく、その信頼性を圃場レベルで検討することが重要である。

次に流下過程での硝酸性窒素除去速度  $R$  ( $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) は流入水量を  $q_o$ , 流出水量を  $q_L$  とおくと

$$R = q_o \cdot X_o - q_L \cdot X_L \quad (3)$$

(3)式に(1)式を代入すると

$$R = q_o X_o - q_L X_o \cdot \exp(-a/q) \quad (4)$$

流量が流下過程で変化しない場合には、 $q = q_o = q_L$  なの

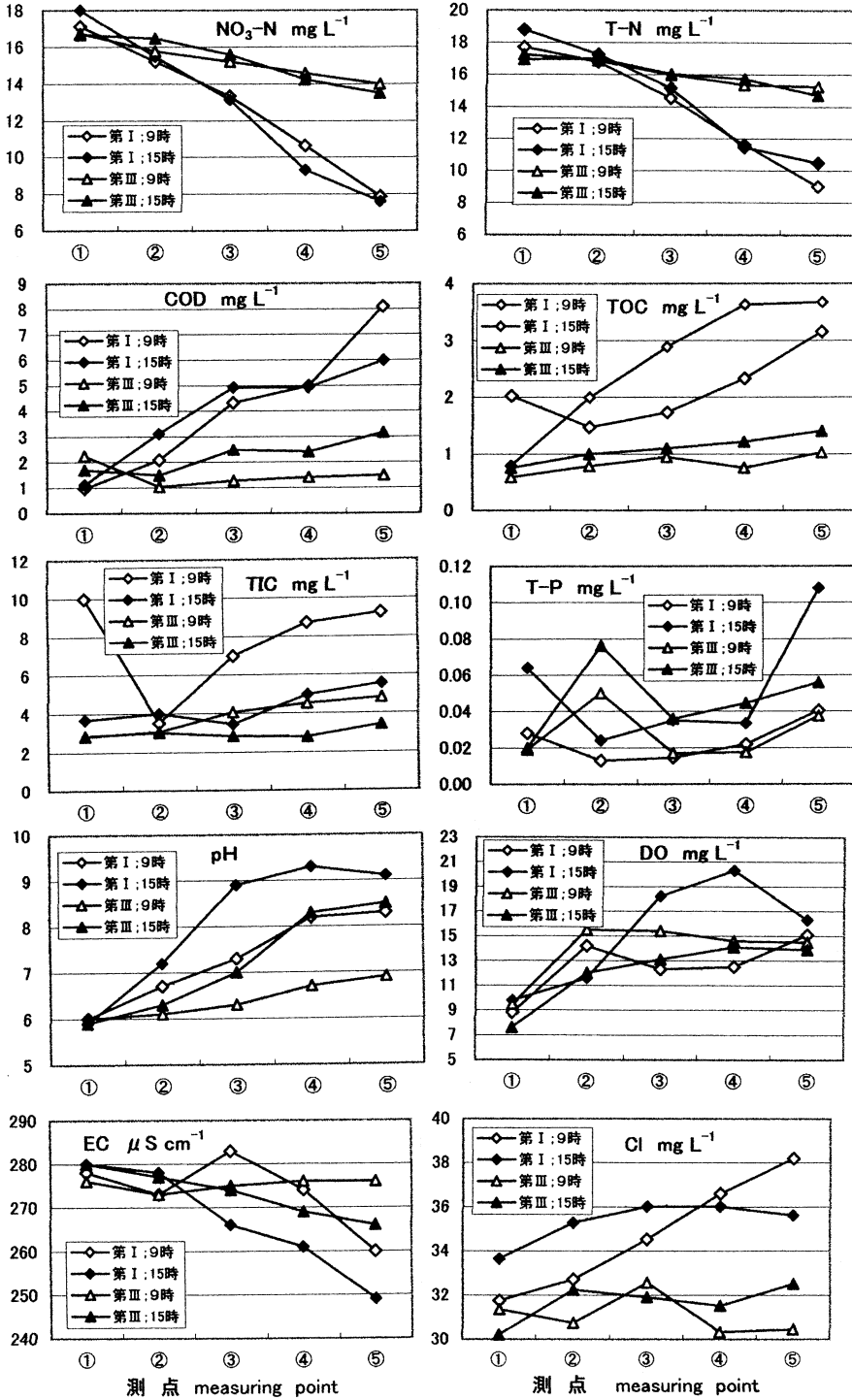


図-7 流下過程の水質変化  
 Fig. 7 Changes of water qualities in flow process.

で、

$$R=qX_o(1-\exp(-a/q)) \tag{5}$$

この式で  $X_o$  と  $a$  が一定の条件下では除去速度  $R$  は  $q$  の増大とともに上昇する。すなわち流量負荷が増えると除去速度は増大することを示す。

**4.1.2 流出水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度  $X_L$  と濃度低下比 ( $X_L/X_o$ ) への流量の影響**

$X_L$  は(1)式で与えられるが、流量  $q$  が大きくなると上昇する。すでに図-5 で見たように第 I ステージから第 III ステージへと流量が増大するにつれて  $X_L$  は上昇した。時刻によって変動しているのは除去係数  $a$  が変動しているためとみられる。

各ステージの  $X_L$  と  $X_o$  および ( $X_L/X_o$ ) の日平均値を表-2 に示した。濃度低下比 ( $X_L/X_o$ ) は(1)式を変形すれば  $a/q$  の指数関数で表される。

$$X_L/X_o=\exp(-a/q) \tag{6}$$

この式で  $a$  が  $q$  によって変化するのが問題になる。そこで  $q$  を 3 段階に変えた場合に  $a$  が変化したのかを調べる。

(6)式を変形して

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

この式に表-2 に示した各ステージの  $q$  と  $X_L/X_o$  の日平均値を代入して、各ステージの日平均除去係数  $a$  を求めた。その値は 0.033, 0.032, 0.032 (平均は 0.032) となりほぼ一定で、 $q$  によって大きくは変化しなかった。しかし次項で述べるように各時刻で求めた  $a$  は時刻変動をしている。

**4.1.3 圃場窒素除去係数  $a$  の時刻変動**

上述の (7) 式を使って各時刻の除去係数  $a$  を求めた。この際流量が蒸発によって流下過程で減少するので、流入水量と流出水量の平均値を  $q$  とした。

この圃場除去係数  $a$  の時刻変動を図-8 に示した。第 I, 第 II, 第 III ステージとも、ほぼ  $0.03 \text{ m d}^{-1}$  を中心に

変動しており、平均値にはステージによる大きな差はない。ただし第 III ステージだけでなく、第 I ステージでも時刻変動がある。その変動幅は  $0.01 \text{ m d}^{-1}$  程度となっている。この変動を起こした要因は何なのか。水温との関連を中心に次項の室内除去係数  $a_o$  との比較で検討する。

**4.1.4 室内暗所除去係数  $a_o$  の算出と圃場除去係数  $a$  との比較**

各区分各時刻の測定水温 ( $T$ ) に対応する室内暗所の硝酸性窒素除去係数  $a_o$  を前報で紹介した式で計算した。そしてある時刻に流入した水が各区分を通過する時刻を求め、その時刻の各区分の  $a_o$  を累計してその平均値を求めた。先に述べた通過水温の計算と同じ方法である。その値を流出時刻に対して図-8 にプロットして、圃場除去係数  $a$  と比較できるようにした。その比較から水温の影響度をみることができる。

$a_o$  は  $a$  の値よりも小さく、 $0.010 \sim 0.015 \text{ m d}^{-1}$  の範囲にある。各ステージの日平均値は  $0.012 \sim 0.013 \text{ m d}^{-1}$  で大差ない (表-2)。この  $a_o$  よりも  $a$  の値が大きいということは、圃場では室内暗所での除去機能よりも大きな除去機能が生じていることになる。また両者の変動パターンが必ずしも一致していないことは、窒素除去が水温だけの要因で変化するものではないことを示唆している。

第 I ステージでは 26 時間通過なので  $a_o$  の時刻変動は少ない。しかし圃場除去係数  $a$  は 12 時~21 時に流出した水の値が高いという時刻変動をしている。これは通過過程の水温以外の要因があることを示唆している。

第 III ステージでは  $a_o$ ,  $a$  とともに時刻変動が生じている。これは通過時刻が 9 時間と短くなったためである。図-9 に詳しい時刻変動を示したが、 $a_o$  は流出時刻 15 時~21 時で大きい。18 時の値が最高を示しているが、これは日中の水温が高い時刻に通過した水だからである。 $a$  も日中のこの時間帯で大きな値を示すが、その前後の時間帯にも大きな値を示している。特に 0 時以降の夜間にも大きな値が継続している特徴がある。 $a_o$  の方は 0 時以降に低くなり、 $a$  とは対応しない。水質では TOC 濃度が除去係数と似た変動をしている。TOC 濃度は日中の 12 時~

表-2 各ステージの日平均値 (流出時刻 9 時~6 時)

Table 2 Mean values of each stage

ステージ	流入水量 $q_o$ $\text{m d}^{-1}$	流入水濃度 $X_o$ $\text{mg L}^{-1}$	流出水濃度 $X_L$ $\text{mg L}^{-1}$	濃度低下比 $X_L/X_o$	窒素除去速度 $R$ $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	除去係数 $a$ $\text{m d}^{-1}$	室内除去係数 $a_o$ $\text{m d}^{-1}$	圃場倍数 $f$
I	0.040	17.6	6.8	0.39	0.49	0.033	0.013	2.5
II	0.073	18.8	11.6	0.62	0.68	0.032	0.012	2.7
III	0.136	16.7	13.1	0.79	0.60	0.032	0.012	2.7

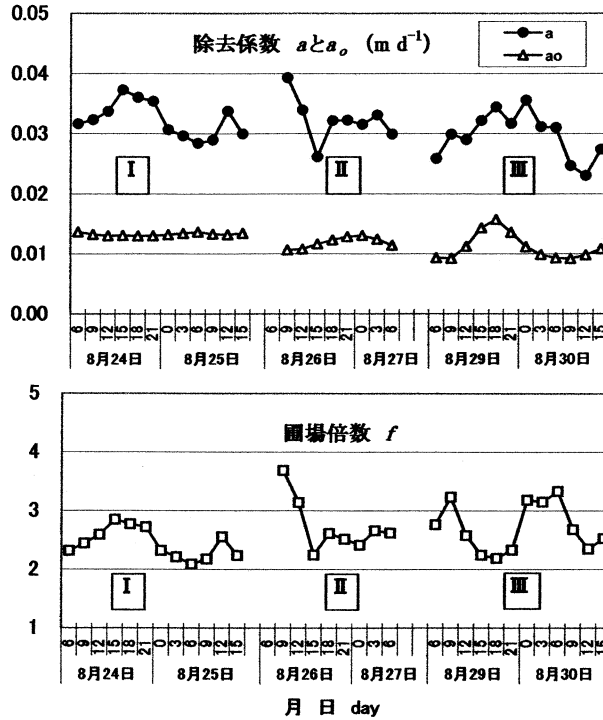


図-8 硝酸性窒素除去係数  $a$ , 室内除去係数  $a_o$  と圃場倍数  $f$  の変化

Fig. 8 Changes of coefficient of nitrate removal rate ( $a$ ), coefficients of nitrate removal rate in laboratory ( $a_o$ ) and field coefficient for nitrate removal ( $f$ ).

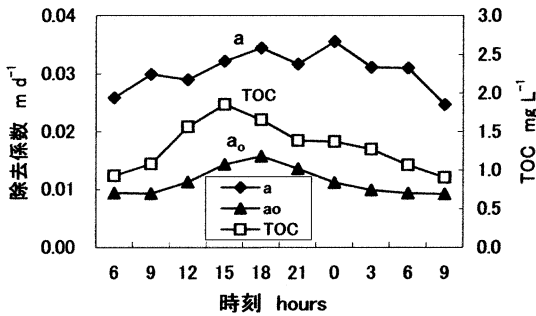


図-9 硝酸性窒素除去係数  $a$  と  $a_o$  及び TOC 濃度の時刻変動 (第三ステージ)

Fig. 9 Changes of the values of  $a$ ,  $a_o$  and TOC concentration (III stage).

18時に流出した水が  $1.6 \sim 1.9 \text{ mg L}^{-1}$  の高い値を示したが、夜間の3時にもまだ  $1.3 \text{ mg L}^{-1}$  以上の高い濃度を示している。この TOC 濃度が高いことが  $a$  に影響しているのではないかと考える。

本試験田の土壌を用いた室内実験ではグルコース添加

により除去機能が增大したことが報告されている (黒田, 2001)。試験区では藻類による有機物生産があるが、それが何故夜中の3時まで影響しているのかよくわからない。この水の試験区通過時刻は18時~3時の筈だからである。水だけでなく土壤中での変化要因やそこに生息する生物の影響などがある可能性がある。

農業用水路の底泥の不攪乱試料を使った室内暗所恒温条件でのアセチレン阻害法による脱窒測定でも、水中の脱窒基質濃度 (硝酸性窒素および亜硝酸性窒素濃度) が脱窒速度の大きな要因になっていることと、底泥の酸化層の厚さやイトミミズのような底生動物の活動 (バイオターベーション) が要因になっている可能性があることが報告されている (駒田・竹内, 1998)。

試験田にはタニシ, ドジョウなどが多く住みついているので、このようなバイオターベーションは当然起きている。生物要因があればその生活リズムによる時刻変動があるであろう。光条件や土壌条件とともにこれらの生物的要因についての研究が今後必要である。

4.1.5 圃場倍数  $f$

この  $a_o$  と  $a$  の違いは、室内暗所と圃場の差にある。日



光の当たる条件下で藻類やその他の生物活動が生じる複雑な系での窒素除去が反映している。従来の測定でも圃場では室内暗所よりも2~3倍の除去機能があることがわかっている(田淵ら, 1995, 1996, 2001)。それで  $a$  と  $a_0$  の比、圃場倍数を求める。

$$f = a/a_0 \quad (8)$$

得られた圃場倍数  $f$  は図-8 に示した。圃場倍数は均一な値ではなく、時刻変動をしている。第Iステージでは12時から21時の値が高くなっている。一方第IIIステージでは逆に日中の  $f$  値が低くなり、その変動は単純ではない。日中の  $a_0$  は通過水温が高いので大きくなるが、その変化ほどは  $a$  の値が上昇しないということである。となると(8)式で示したような単純な形で  $a$  と  $a_0$  の関係を表すことに無理があるのかもしれない。圃場での窒素除去には生態系に係わる複雑な要因が絡み合っているように思える。

しかし各ステージの日平均値は2.5~2.7で差が少なく、流量による影響は小さい。前に述べたように除去係数も時刻変動はあったが、日平均値はほぼ一定であった。いずれも流量の変化により時刻変動は起きるが、日平均値はそれほど変わらないという結果になる。このことは実用上重要なことである。

#### 4.2 流量負荷の窒素濃度や除去速度への影響

除去係数については未だ多くの問題が残っているのに、確定的なことが言える段階ではないが、若干の試算を行って流量負荷  $q$  の影響を検討する。

##### 4.2.1 流量負荷 $q$ の流下過程の濃度への影響試算

流下過程の濃度低下は(2)式で示されるが、それを変

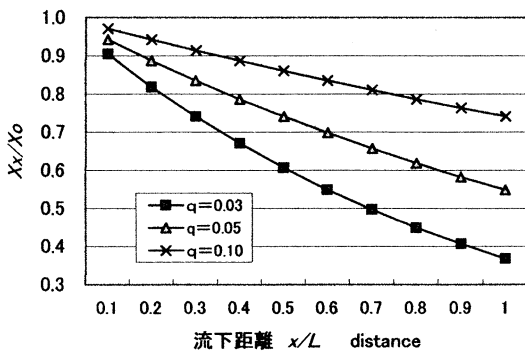


図-10 流量の流下過程硝酸性窒素濃度への影響計算 ( $a=0.03 \text{ m d}^{-1}$  の場合)

Fig. 10 The influence of flow rate ( $q$ ) on  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in flow process ( $a=0.03 \text{ m d}^{-1}$ ).

形すると

$$Xx/Xo = \exp(-ax/qL) \quad (9)$$

除去係数  $a=0.03$  として、 $q$  を変えて計算し、横軸を  $x/L$  で表示すると図-10 のようになる。直線に近い形で濃度は低下しているが、 $q$  が小さいほど濃度低下の勾配は急である。 $q$  の濃度低下比への影響は大きい。 $q=0.03 \text{ m d}^{-1}$  の場合では流下距離が0.7、すなわち全長の70%まで流下すると濃度は50%にまで低下するという結果がえられた。

##### 4.2.2 流量負荷 $q$ の除去速度 $R$ への影響試算

(5)式を変形して

$$R/Xo = q(1 - \exp(-a/q)) \quad (10)$$

$a$  を一定として  $R/Xo$  と  $q$  の関係を求めると図-11 のようになる。 $R/Xo$  は  $q$  が増大すると大きくなるが、 $a$  が小さい場合には早く収斂する。例えば  $a$  が0.01 の場合には  $R/Xo$  は  $q$  が0.1程度で0.01に収斂しており  $q$  の影響は少ない。

$$\text{すなわち } R/Xo \approx 0.01 \quad (a=0.01, q>0.1)$$

$$\text{ゆえに } R \approx 0.01Xo \quad (11)$$

この場合には除去速度  $R$  は流入水濃度  $Xo$  に流量負荷に関わりなく近似的に比例し、比例定数は0.01になる。(11)式は流入水濃度から除去速度を求める実用的な近似式として各地の測定結果を整理する際に使ったことがあるが(田淵・高村, 1985, 田淵, 2000, Tabuchi, 2001)、それは  $a$  が0.01でかつ  $q$  がある程度大きい場合の(10)式の近似式に相当していることがわかる。

しかし  $a$  が大きくなると、図-11にみるように  $R/Xo$  は  $a$  の値になかなか収斂せず誤差が大きくなる。

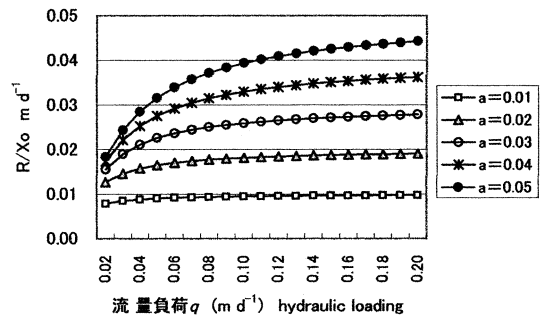


図-11 流量の硝酸性窒素除去速度  $R$  への影響計算

Fig. 11 The influence of flow rate ( $q$ ) on nitrate removal rate  $R$ .

$$R < a \cdot X_0 \quad (12)$$

今回の試験で得た  $a$  の値 0.03 程度の場合には  $q$  の影響は無視できるほど小さくはない。また本試験では  $a$  の値が  $\pm 0.01$  程度は時刻変動をしていたが、それもこの図で見ると除去速度にかなりの影響を与えることが予想される。流量負荷  $q$  の影響については注意が必要である。

このような湛水土壤系での窒素除去については各地で試験が行われているが(田淵, 1998c, 2000), 流量負荷との関係を理論的に論じたものは少ない。国内では植生浄化施設における流量負荷と窒素除去率の関係を検討したものがあ(宮下ら, 2000)。国外ではアメリカの下水処理施設の一部として使われている多数のウェットランドのデータから統計的手法によって流量負荷と処理前後の濃度との関係式が求められている(Knightら, 1993)。その式から流量負荷  $q$  と除去速度との関係式を導くと  $R = 0.67qX_0 - 28q^2$  となった(田淵, 2000)。筆者が導いた(5)式と比べると  $q$  による変化が大きい。植生や水流の状況などの違いによるものと思われる。

## 5. おわりに

流量を変化した場合、流出水の窒素濃度  $X_L$  や除去速度  $R$  は大きく変化したが、除去係数  $a$  や圃場倍数  $f$  の日平均値の変化は少なかった。したがって日平均値で扱った場合には本試験区では除去係数  $a = 0.032$  で(1)式が成り立った。しかし各時刻の除去係数には時刻変動が生じた。濃度低下式の色々な面からの検証が必要であるが、時刻変動が生じる圃場条件下での検証は難しい。条件を一定に設定できる室内実験を重ねて要因を調べていく必要がある。

時刻変動については水温ばかりでなく、炭素量や日照、生物相などの多くの要因が複雑に関連しているものと思われる。例えば日照があれば藻類が増殖し、窒素吸収を促すかわら脱窒に必要な有機物生産を行う。さらにそれが生物相を育み、それがまた窒素除去に影響を与える。圃場でも遮光した場合には除去速度は激減した(田淵ら, 2001)ことは、日照の影響が大きいことを示している。生態系が係わることは時間だけでなく時刻が関与することを意味する。また脱窒菌が主役の機能なのだから土壌の種類や状態も大きな要因になると思われるが、未だ研究は進んでいない。これらの要因と除去係数との関係についてのより詳細な研究が必要である。

従来数多くの湛水土壤系での硝酸性窒素除去試験が国内外で行われてきたが、その理論的解析は遅れている。湛水土壤面での硝酸性窒素除去の理論構築は未だ始まったばかりといえよう。本論文が今後の発展への一助にな

ればと願うものである。

終わりに今回の試験でご協力していただいた茨城大学の曽根英雄教授と加藤亮助手や伊藤久美子さんをはじめとする院生、学生諸君に厚くお礼を申し上げます。

## 引用文献

- 黒田久雄・田淵俊雄・高阪快児・曽根英雄(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研究. 農業土木学会誌, **68** (9): 59-65.
- 黒田久雄(2001): 水田土壌の窒素除去持続性について. 応用水文, **14**: 92-101.
- 駒田充生・竹内 誠(1998): 農業域の小水路における脱窒速度の測定と窒素浄化機能の評価. 日本土壌肥料学雑誌, **69** (2): 162-169.
- 田淵俊雄・高村義親(1985): 集水域からの窒素・リンの流出. 東大出版会, p178.
- 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, 土壌の物理性, **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(1998a): 水田除去機能付き窒素流出モデル. 土壌の物理性, **78**: 11-18.
- 田淵俊雄・黒田久雄・志村もと子・黒田清一郎(1998b): 窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点. 土壌の物理性, **78**: 19-24.
- 田淵俊雄(1998c): 水田の浄化機能を中心とした地形連鎖システム, 農業・農村と環境, 養賢堂, 84-88.
- 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. 土壌の物理性, **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.

田淵俊雄・黒田久雄・篠田鎮嗣（2005）：湛水流下過程における硝酸性窒素濃度の低下，土壤の物理性，99：65-72.

宮下明雄・涌井 仁・田仲成男（2000）：植生浄化の事例と浄化効果について，河川環境総合研究所報告，6：11-26.

Knight, R.L., Ruble, R.W., Kadlec, R.H. and Reed, S. (1993): Wetland for Wastewater Treatment :

Performance Database, Moshiri, G.A. edited Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, Lewis Publishers, 35-58.

Proceedings of the International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones, edited by The Organizing Committee, published by National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. 2001.

## 要 旨

流入水量を3段階に変えて流下過程の硝酸性窒素除去への影響を調べた。第Ⅰステージでは流入水量を  $0.040 \text{ m d}^{-1}$  として、第Ⅱステージではその2倍の  $0.073 \text{ m d}^{-1}$ 、第Ⅲステージでは4倍の  $0.136 \text{ m d}^{-1}$  に増やした。この流量増大によって流入水が試験区を通過する時間は第Ⅰステージの26.3時間から第Ⅱ16.5時間、第Ⅲ9.0時間へと短くなった。流入水量の増大とともに流出水の硝酸性窒素濃度は増大した。流下過程の硝酸性窒素濃度の低下量も流量の変化に応じて変化した。除去係数  $a$  は時刻変動をしたが、その日平均値は  $0.032 \text{ m d}^{-1}$  でほぼ一定であった。

受稿年月日：2004年8月17日

受理年月日：2005年2月1日