

水田除去機能付き窒素流出モデル

—農業集水域の窒素流出解析に関する研究 (1)—

田 淵 俊 雄

Nitrogen Outflow Model with Nitrogen Removal Function by Paddy Fields

—Studies on nitrogen outflow analysis in agricultural watersheds (1)—

Toshio TABUCHI

Science Council of Japan

Abstract

The nitrogen outflow model in agricultural area has been constructed. This model is composed by three land use elements; field, forest and paddy field, and the livestock. Field and forest area, and livestock exist in upland part. Paddy fields exist in lowland part. Water flows naturally from upland to lowland. Then nitrogen caused from the field, forest and livestock in upland area flows into lowland. If the water is irrigated to paddy fields in lowland, nitrogen will be removed in this process by denitrification under anaerobic condition and uptake by rice plants. This kind of nitrogen removal function by paddy fields is investigated by many researchers. The author represented this function by the equation (1) and attached this function to the model of nitrogen outflow in agricultural area.

Calculated results by this model are shown in Table 1, Fig. 3 and Fig. 4. In the case in which 100 kg/ha nitrogen outflows from the field, the concentration of outflow water from this watershed will attain to 10.3 mg/l when the percentage of the field area is 70%. However concentration will be decreased to 5.7 mg/l, if 50% of water is irrigated to paddy. Nitrogen removal by paddy fields has a large effect on the concentration of outflow water. Calculated values will be examined by the measured field data in next paper.

Key words : nitrogen outflow model, paddy field, nitrogen removal, fertilizer outflow, pig's load

1. ま え が き

近年農業集水域において河川や地下水の硝酸態窒素濃度が異常に高い地区が現れるようになり、その下流域に存在する湖沼や貯水池の過栄養化の原因になっている。

窒素の発生源としては主に多肥の畑地・樹園地や高密度の畜産があげられているが、その正確な流出過程や流出水質への影響割合については十分にわかっていない。その流出過程には、表土層での溶脱や吸収、下層土における浸透や吸着、地下水層での流動や脱窒、さらに水

田・湿地・水路での植生吸収や脱窒などが絡んでおり、土壌物理の研究課題と密接に関連している。そして集水域からの窒素の流出抑制の対策を立てる上で、集水域の土地利用や畜産と河川の窒素濃度との関係を数式化し、水質の予測をすることが緊急に求められている。

そこで農業集水域の窒素流出を示す単純なモデルを考案した。それは土地利用と畜産をベースにしたモデルで、そこに水田の窒素除去機能を付加した。本報ではこの水田の窒素除去機能の定量化とそれを組み入れたモデルの紹介を行い、それによる試算結果を報告する。次報

では実際の調査結果との比較を報告する。

2. 流出モデルの基本的構造

流出モデルはできるだけ単純なものにしたが、基本的な考え方は次のようである。

- 1) 土地利用としては林地、畑地、水田の3者とする。
- 2) 台地の上に林地と畑地があり、低地に水田があるという地形連鎖を前提にして、台地からの流出水のすべてが低地を通過して流出する構造にする(図-1)。
- 3) 低地を通過する際に水田に流入すれば窒素が除去される。その除去機能は後述する濃度比例式で計算する。
- 4) 畜産負荷は堆肥などで農地に施用されていれば畑地経由の負荷として計算し、素堀貯留池方式の場合には排出率を用いて別途計算し台地からの浸透流出負荷に加える。
- 5) 家庭排水などの点源負荷はないものとする。
- 6) 計算は年平均負荷量をもとに行うが、水田の窒素除去機能については稲作期、非稲作期など時期によって変化することを配慮する。

3. 水田の窒素除去機能について

最初にモデルで使用する水田での窒素除去機能について述べる。

1) 既存の調査結果

湛水土壤系における窒素除去については、水田での実測(小川1981,1984, 長谷川1992, 尾崎1995, 田淵1983,1987,1993,1996)やライシメーター試験(国松1980, 高村1983), それに湿地や池での調査(古畑1982, 細見1991)など多くの研究が報告されている。その窒素除去量は $0.02\sim 1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ と大きな幅があるが、一般に湛水中の窒素濃度が高い場合に除去量は大きくなる(田淵1985)。

また広い農業集水域での調査結果でも、水田の除去機能により灌漑期に窒素濃度が低下することが報告されている(田淵・黒田1991, 志村・田淵1996a, 日高1995)。

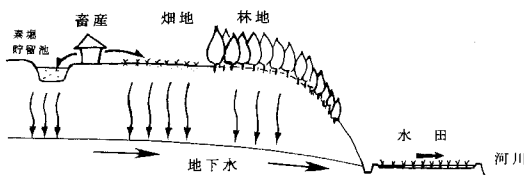


図-1 台地と低地の地形連鎖

Fig. 1 Geographical sequence by upland and lowland.

2) 窒素除去機能の持続性試験

筆者らは休耕田の中に水稲区, 雑草区, 無植生区を設けて試験を行っている。台地から流出する自然の湧水をパイプで試験区に導水し, 一年中連続して一定流量で流下させた。年平均除去量は初年度に $0.43\sim 0.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ の値を示した。次第に低下したものの4年日でも $0.25\sim 0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ の値を示し(田淵ら1993, 1996), 現在7年目を迎えているが除去性能は持続している。稲作期と非稲作期の比較では, 稲作期の値($0.3\sim 0.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)が水温が低下し植生の活動も弱い非稲作期の値($0.2\sim 0.25\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)よりも大きい。

3) 窒素除去機能の定量化の試み

上記のフィールド試験の結果をふまえ, 室内実験やポット試験の結果をもとに窒素除去量を算出する式を求めた(田淵ら1996)。

(1) 窒素除去量を示す濃度比例式

室内実験から窒素除去量を濃度比例式で近似的に表せることがわかり(田淵ら1987), 下記のような経験式を提案した。

$$R = R_0 \cdot F \cdot P \quad (1)$$

ここで

$$R_0 = a_0 X \quad (2)$$

$$a_0 = \alpha T^2 + \beta \quad (3)$$

R : 硝酸態窒素除去量 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

R₀ : 室内脱窒除去量 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

a₀ : 除去係数 (m/d)

X : 湛水中の硝酸態窒素濃度 (g/m^3 または mg/l)

T : 水温 (°C)

α と β ; 土壌により変化する係数で, 谷津田の土壌で水温を変化させて実験をした結果(田淵ら1993), 下記の値をえた。 $\alpha = 0.000011$, $\beta = 0.005$

F : 植生により変化する係数で植生係数と名付ける。1~4

P : 水流の条件により変化する係数で田面効率係数と名付ける。0~1

(3)式より水温20°C で $a_0 = 0.0094$

$$\therefore \text{近似的に } R_0 = 0.01 X \quad (4)$$

ただし一般的には濃度 X が除去にともなって低下するので, 除去量 R₀ は時間とともに低下する。湛水期間中の濃度の平均値がわかれば, それを(2)式や(4)式に代入して R₀ の近似値を求めることができる。しかし R₀ を正確に求めるためには次のような解析で濃度の変化をおさなくてはならない。

(2) 初期濃度と除去後の濃度の関係式

単位面積当たりの水深 H の湛水中の硝酸態窒素量は,

水深 H に濃度 X を乗じれば求まる。その減少量は H に濃度の減少速度 $-dX/dt$ を乗じたもので、それが除去量 R_o に等しいのだから、

$$R_o = -H \, dX/dt \quad (5)$$

H : 水深 (m), t : 時間 (d)

(2) 式を代入して、浸透や蒸発による水量の変化がないとして解くと、時間 t の後の濃度 X は

$$X = X_o \exp(-a_o t/H) \quad (6)$$

ここで、 X_o : 初期濃度、

この式で濃度 X の時間変化が指数関数で示された。

次に、湛水水量は湛水面積を A (m^2) とすれば $A \cdot H$ となり、それを一日あたりの処理水量 Q (m^3/d) で割れば、湛水時間 t (d) が求まる。

$$t = A \, H/Q \quad (7)$$

(7) 式を (6) 式に代入すると

$$X = X_o \exp(-a_o A/Q) = X_o \exp(-a_o/q) \quad (8)$$

$$\text{ここで } q = Q/A \quad (m/d) \quad (9)$$

q は一日当たりの処理水量を水深で表したものである。

この間の窒素除去量は初期濃度 X_o と除去後の濃度 X の差から水量が蒸発などで変化しないとすれば

$$R_o = (X_o - X) Q/A = (X_o - X) q \quad (10)$$

(8) 式を代入して

$$R_o = X_o q (1 - \exp[-a_o/q]) \quad (g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}) \quad (11)$$

この式により q がわかれば除去量 R_o を a_o と X_o から求めることができる。

(3) 土壌による変化

各種の土壌で室内恒温条件下 ($20^\circ C$) で試験を行い (田渕ら 1996)、除去機能は陸田の土壌では一般の水田よりも小さく、ハス田の土壌では機能が大きいという結果をえた。除去係数 a_o は、谷津田ならびに八郎瀧の水田土壌が 0.009、ハス田土壌で 0.014、陸田で 0.001 であった。

(4) 植生との関係 (植生係数 F)

ポット試験により植生の有無による除去量の差を測定した (田渕ら, 1995)。その除去量 R を (2) 式で求めた R_o で除した R/R_o の値は (1) 式から $F \cdot P$ の値を示すことになる。そしてポット試験では全面に水が均等にあるので、 P が 1 であるから R/R_o の値は F (植生係数) の値を示すことになる。上記のポット試験では水稲がある場合には F は約 3、水稲がない場合に 1 であった。

休耕田を使って行った試験では、無植生区では F は 1 に近いが、水稲区では 2 よりも大きくなった。その他の試験で求めた F の値も植生がないと 1、あると 2~4 の範囲にあり、しかも夏の生育が旺盛な時期には 3 以上になった (田渕ら 1995)。

(5) 水田内の効率性 (田面効率係数 P)

実際の水田では水が不均等に流下して除去に関与しない部分が生じるので、係数 P は 1 にはならない。アゼントなどを使って 1 に近づけることが肝要である。実際の水田で測定した P の値は 0.5 程度であった (田渕ら 1993)。したがって F が 2 であれば $F \cdot P = 1$ となり、 R は R_o とほぼ同じ値になる。

4. 水田窒素除去機能付き流出モデル

1) 面源モデルの構成と計算手順

面源として、図-2 のように [林地], [畑地], [水田] の 3 要素を考える。モデルは、台地の上に林地と畑地が存在し、低地に水田が存在する並直列型のフローダイアグラムで構成する。林地と畑地からの日排出負荷量は、それぞれの排出負荷原単位に面積を乗じて求め、両者の合計負荷量が台地からの日流出負荷量 N_u (kg/d) になる。

$$N_u = N_f + N_h = (n_f \times A_f + n_h \times A_h) / 365 \quad (12)$$

N_f : 林地からの日排出負荷量 (kg/d)

n_f : 林地の排出原単位 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)

A_f : 林地の面積 (ha)

N_h : 畑地からの日排出負荷量 (kg/d)

n_h : 畑地の排出原単位 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)

A_h : 畑地の面積 (ha)

この際、畑地の排出原単位は施肥量に排出率を乗じて求める。

$$n_h = F_h \times C_h / 100 \quad (13)$$

F_h : 施肥量 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$),

C_h : 畑地の排出率 (%)

台地からの日流出水量 W_u は降雨量から蒸発散量を差し引いて求める。そして N_u を W_u で除して、台地からの流出水の平均窒素濃度 X_u を求める。

$$W_u = P_w \times (A_f + A_h) \times 10 / 365 \quad (m^3/d) \quad (14)$$

P_w : 流出水量 (mm/y)

ここで水量の単位を m^3/d にするために $10/365$ を乗じた。

$$X_u = 1,000 N_u / W_u \quad (g/m^3 \text{ または } mg/l) \quad (15)$$

N_u の単位が kg なので、1,000 を乗じた。

低地では、台地からの流出水は 2 つのルートで流下する。1 つは水田を通過しない流れ (W_1, N_1) で、もう 1 つは水田を経由する流れ (W_2, N_2) である。後者が水田に灌漑される水に相当するが、灌漑でなく自然に水田に流入する水もある。稲作期には W_2 が多く、非稲作期には W_1 が主体になる。この 2 つのルートに分かれる量的割合を灌漑率 I で表現し、 I が 100% の時全量の水田を通過する。

水田を通過しない流量 W_1 と通過する流量 W_2 は、

$$W_1 = Wu \times (1 - I/100) \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (16)$$

$$W_2 = Wu \times I/100 \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (17)$$

したがって流出負荷量 N_1 と N_2 も、

$$N_1 = Nu \times (1 - I/100) \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (18)$$

$$N_2 = Nu \times I/100, \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (19)$$

水田を通過する際の窒素除去量 R' は後述する式 (20) で与える。そして水田自体からの流出負荷量 N_p を水田の排出原単位 np にその面積 Ap を乗じて 365 で除して求める。この N_p を N_2 に加えて、 R' を差し引いて水田からの日流出窒素量 N_3 とする。この N_3 に水田を経由しない N_1 を加えて集水域からの流出負荷量 N_t とする。

水田からの流出水量 W_3 は W_2 に水田自体からの流出水量 W_p を加えて求める。この W_3 に W_1 を加えて全集水域からの流出水量 W_t を求める。

集水域からの流出水の濃度 X_t は N_t を W_t で除して求める。

$$N_t = N_1 + N_3 = N_f + N_h + N_p - R' \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (20)$$

$$W_t = W_1 + W_3 = P_w (A_f + A_h + A_p) \times 10/365 \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (21)$$

$$X_t = 1000 N_t / W_t = 36500 (N_f + N_h + N_p - R') / P_w A_t \quad (\text{mg}/\text{l}) \quad (22)$$

ここで $A_t = A_f + A_h + A_p$

2) 水田での窒素除去量

除去量 R は、上述した (1), (11) 式より

$$R = F \cdot P \cdot X_o (1 - \exp[-ao/q])q \quad (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (23)$$

ここで、 $X_o = X_u$ とする。

したがって

$$R = F \cdot P \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q])q \quad (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (24)$$

$$Q = W_2 \quad (\text{m}^3/\text{d}), \quad A = A_p \times 10,000 \quad (\text{m}^2) \quad \text{なので} \\ q = Wu \cdot I/100 \quad (10,000 \times A_p) \quad (25)$$

さらに、 R の単位を $(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ に変えるために 10 を乗じる。これに水田面積 Ap を乗じて、

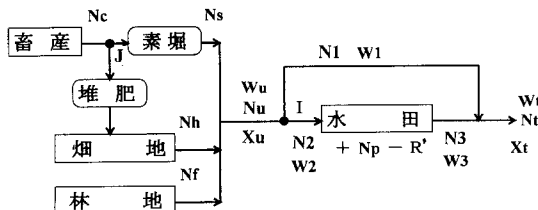


図-2 モデルと記号説明図

Fig. 2 Model explanation.

$$R' = 10 \cdot Ap \cdot R \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (26)$$

$$= 10 \cdot Ap \cdot F \cdot P \cdot q \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q]) \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (27)$$

流出水の濃度はこの R' を (22) 式に代入して求める。

3) 畜産負荷がある場合

上記の面源モデルに畜産負荷を加える。畜産発生負荷量は豚や牛の集水域内の頭数密度に発生原単位を乗じて求める。

$$N_c = (P_i \times A \times P_o) / 365 \quad (28)$$

N_c : 畜産発生負荷量 (kg/d)

P_i : 集水域頭数密度 (頭/ha)

A : 集水域面積 (ha)

P_o : 畜産発生原単位 ($\text{kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)

畜産負荷は堆肥などによって農地へ利用される場合と素堀貯留池などによって地下浸透で流出する場合とがある (図-2)。処理されて放流されることもあるが今回は対象にしない。

農地利用される割合を $J\%$ とすると、農地へ行く負荷は $N_c \times J/100$ 、農地へ行かない負荷は $N_c \times (1 - J/100)$ となる。

素堀などの地下浸透分は

$$N_s = N_c \times (1 - J/100) \times C_s / 100 \quad (29)$$

N_s : 素堀浸透による排出負荷量 (kg/d)

C_s : 素堀による排出率 (%)

農地経由で排出する負荷量は

$$N_h = N_c \times J \times C_n / 10,000 \quad (30)$$

N_h : 畑地経由で排出する畜産負荷量 (kg/d)

J : 農地利用率 (%)

C_n : 畑地での畜産負荷の排出率 (%)

この排出率 C_n は堆肥化過程での揮散率 K と畑地での排出率 C_h を用いて計算する。

$$C_n = (1 - K/100) \times C_h \quad (31)$$

畑地からの日排出負荷量は畑地の化学肥料に起因する負荷に上記の畜産起因の負荷量を加えて求める。

$$N_h = N_{h1} + N_{h2} \quad (32)$$

N_{h1} : 化学肥料に起因する排出負荷量 (kg/d)

N_{h2} : 畜産糞尿に起因する排出負荷量 (kg/d)

以上をまとめて台地からの日排出負荷量を示すと

$$N_u = N_f + N_{h1} + N_{h2} + N_s \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (33)$$

低地での水田の扱いは前と同じにする。

5. モデル試算結果

上記のモデルを用いて計算するが、そこで使用する排

出負荷量や流出水量などの数値はすべて年間の日平均値である。したがってそれらが一年中一定で変化しないことを前提にしており、計算した結果は年間の平均的な値になる。

1) 畜産負荷が無い場合

従来の研究成果(田淵・高村 1985, 田淵 1986 など)から、林地の排出原単位を $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 、水田の排出原単位を $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とした。また霞ヶ浦流域の降雨量から流出水量を 700 mm/y とした。これらの値は地域の水利・施肥・気象などの条件によって変化する。また年間での平均的計算なので前述の試験結果から $F=2$ とし、平均水温を 20°C とみて $a_0=0.01$ とした。P は 0.5 とした。畑地の排出原単位は 50, 100, $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ と変えて計算した。排出原単位が $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とは、施肥量 $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ に対し排出率 30% とした場合に相当する。

表-1 の値は水田面積率が 20% の集水域において、台地上の畑地と林地の面積率が変化した場合の集水域から流出する水の窒素濃度の値を示している。

(1) 水田の窒素除去機能がない場合 (灌漑率 $I=0$)

すべての水が水田を経由しないで流出する場合である。水田での除去量 R が 0 なので、流出水濃度は畑地面積率の一次式で表される。ケース 1 の畑地からの排出負荷量が 50 kg/ha の場合には、畑地面積率が 80% で林地が 0% 場合に濃度は最高で 6.0 mg/l になり、〔畑地面積率 20%, 林地面積率 60%〕では 2.0 mg/l である(表-1)。

ケース 2 の畑地排出負荷量が 100 kg/ha になると、〔畑地面積率 70%〕以上で濃度は 10 mg/l を超えてしまう。〔畑地面積率 10%〕でも 2 mg/l である。

ケース 3 の畑地排出負荷量 150 kg/ha では、〔畑地面積率が 10%〕の場合でも濃度は 2.7 mg/l になり、〔畑地面積率 50%〕で 11.1 mg/l 、〔畑地面積率 80%〕では 17.4

表-1 試算結果 (ao=0.01, FP=1, Pw=700 mm の場合)

Table 1 Calculated results by the model

土地利用 %		畑地面積率	0	10	20	30	40	50	60	70	80
		林地面積率	80	70	60	50	40	30	20	10	0
		水田面積率	20	20	20	20	20	20	20	20	20
畜産負荷がない場合											
畑地排出量 50 kg/ha ケース 1	灌漑率 I%	0	0.6	1.3	2.0	2.6	3.3	4.0	4.7	5.3	6.0
		50	0.5	0.8	1.2	1.6	1.9	2.3	2.6	3.0	3.4
		100	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8
100 kg/ha ケース 2		0	0.6	2.0	3.4	4.8	6.2	7.6	8.9	<u>10.3</u>	<u>11.7</u>
		50	0.5	1.2	2.0	2.7	3.4	4.2	4.9	5.7	6.4
		100	0.4	0.8	1.1	1.5	1.9	2.3	2.6	3.0	3.4
150 kg/ha ケース 3		0	0.6	2.7	4.8	6.9	9.0	<u>11.1</u>	<u>13.2</u>	<u>15.3</u>	<u>17.4</u>
		50	0.5	1.6	2.7	3.9	5.0	6.1	7.2	8.4	9.5
		100	0.4	0.9	1.5	2.1	2.7	3.2	3.8	4.4	4.9
素堀貯留方式 豚 10 頭 /ha, 排出率 35%											
畑地排出量 50 kg/ha ケース 1	灌漑率 %	0	7.9	8.6	9.3	9.9	<u>10.6</u>	<u>11.3</u>	<u>12.0</u>	<u>12.6</u>	<u>13.3</u>
		50	4.4	4.7	5.1	5.5	5.8	6.2	6.6	6.9	7.3
		100	2.4	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.6	3.8
100 kg/ha ケース 2		0	7.9	9.3	<u>10.7</u>	<u>12.1</u>	<u>13.5</u>	<u>14.9</u>	<u>16.2</u>	<u>17.6</u>	<u>19.0</u>
		50	4.4	5.1	5.9	6.6	7.4	8.1	8.9	9.6	<u>10.3</u>
		100	2.4	2.7	3.1	3.5	3.9	4.2	4.6	5.0	5.4
農地利用方式, 豚 10 頭 /ha, 排出率 20%											
畑地排出量 100kg/ha	灌漑率 %	0	4.8	6.2	7.6	9.0	<u>10.3</u>	<u>11.7</u>	<u>13.1</u>	<u>14.5</u>	<u>15.9</u>
		50	2.7	3.5	4.2	4.9	5.7	6.4	7.2	7.9	8.7
		100	1.5	2.1	2.7	3.2	3.8	4.4	4.9	5.5	6.1

mg/lにも達する。

(2) 水田の窒素除去がある場合 (灌漑率 $I > 0$)

水田を経由して流出する水が存在する場合である。すべての水が水田に灌漑されていれば灌漑率は100%である。灌漑率 I が50%の場合には上記の窒素濃度はほぼ半減している (図-3)。

畑地排出負荷量が150 kg/haの多肥地帯の場合でも、灌漑率50%で窒素濃度は10 mg/lを超えるケースはなくなる。畑地面積率が40%で濃度は5.0 mg/lである。夏期には水温が高く植生の生育も旺盛なので、 ao や $F \cdot P$ の値がここで使用した値よりも大きくなるので、濃度はもう少し低下することになる。

以上、水田の窒素除去機能は大変重要であることが試算によって示唆された。

2) 畜産負荷がある場合

(1) 素堀貯留のケース

素堀貯留の排出率を35%とし (志村・田淵 1996 c), 豚の頭数密度を10頭/ha, P_o を $14.6 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ として計算した。その結果、畜産による負荷が大きく上乘せされた形になり、濃度は畜産負荷のない場合に比べて7 mg/l以上も高くなった (表-1, 図-4)。畑地排出負荷量が50 kg/haのケース1でも窒素濃度はかなり高くなり、畑地面積率が40%で10 mg/lを超えてしまう。畑地排出負荷量が100 kg/haでは畑地面積率が20%でも10 mg/lを超える。

これらの場合にも水田除去が機能すれば灌漑率50%で濃度は半分近くまで低下するという試算結果である。しかしこのように高濃度になると水田で水稻の倒伏が生

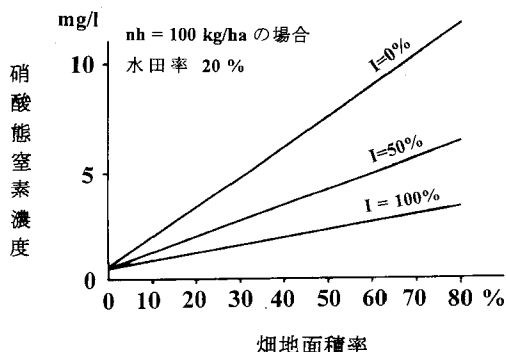


図-3 流出水濃度と畑地面積率及び灌漑率との関係 ($ao=0.01, FP=1, P_w=700 \text{ mm}$ の場合)

Fig. 3 The effect of the area of fields (non-paddy) and irrigation ratio on the nitrogen concentration of outflow water.

じるので、実際に水稻栽培を行っている水田での窒素除去を期待することは無理になる。素堀貯留をなくすことが先決である。

(2) 農地利用のケース

揮散率は30%程度と言われているので、 C_n は C_h の70%程度の値になる。それで今回の計算では農地利用の場合の C_n は20%とした。素堀貯留に比べて排出率が小さくなった分だけ濃度は低下した (表-2, 図-4)。しかしそれでも高い値が現れている。それは畜産負荷が加わっても化学肥料の使用量が減らないとして計算しているからである。畜産負荷が有機質肥料として供給された分だけ化学肥料の量が減れば、このような濃度の上乗せは生じない筈である。理想的に代替えされていれば畜産負荷がない場合と同じになる。

($ao=0.01, FP=1$ の場合)

3) 流出水量が時期により変化する場合

前節では流出水量が年間で一定であるとして計算したが、降雨量が時期によって変わるので流出水量も変わるのが一般的である。ある時期の流出水量が年平均流出水量の C 倍になったとする。その時の排出負荷量がいくらになるかが問題であるが、従来の調査結果 (田淵・黒田 1991) からすると面源の排出負荷量は流出水量にほぼ比例している。それで日流出水量が C 倍になった時、各面源の日排出負荷量が C 倍になるとみなすと、 N_t は 式

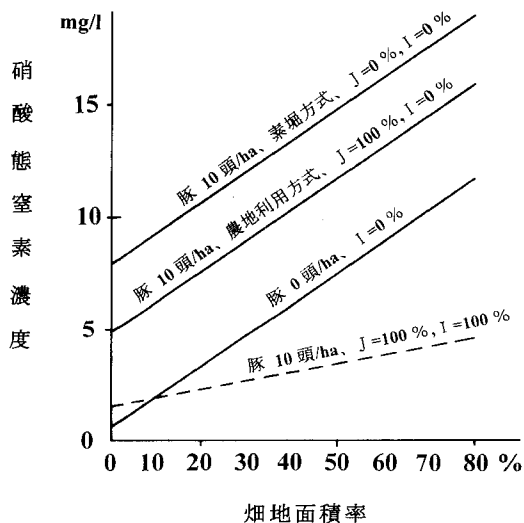


図-4 流出水濃度と畜産負荷との関係 ($ao=0.01, FP=1, P_w=700 \text{ mm}$, 水田面積率20%)

Fig. 4 The effect of the livestock on the nitrogen concentration.

から次のようになる。

$$Nt = C(Nf + Nh + Np) - 10 \cdot R \cdot Ap \quad (34)$$

(kg/d)

RはqがC倍になるので増大するが、その指数関数の中にもqが含まれているので、単純にはCに比例しない。

$$Wt = C \cdot 10 \cdot Pw \cdot At / 365 \quad (35)$$

(m³/d)

したがって

$$Xt = 1,000 \cdot Nt / Wt \\ = 36,500 [(Nf + Nh + Np) - 10 \cdot R \cdot Ap / C] / Pw \cdot At \quad (36)$$

この式によると灌漑率Iが0%でRが0の時は、Xtは第一項のみになり、Cによって変化せず一定である。Rが0でない時はXtはCによって変化する。その値は24式でqの値をC倍してRを求めて、それを36式に代入して計算すればよい。

ao=0.01, FP=1とし、林地、畑地、水田の排出原単位をそれぞれ3, 100, 10 kg/ha, その面積率を50, 30, 20%とした時の計算結果では、流出水濃度は灌漑率Iが小さい場合は流出水量比Cによってほとんど変化しないが、灌漑率が大きくなるとCが大きい場合に上昇する。

たとえば灌漑率が50%の場合、Cが2になると濃度は2.7 mg/lから3.1 mg/lに上昇した。したがって流出水量が大幅に増大し灌漑率が高いような場合には、流出水量を変えて計算する必要がある。

6. モデルの問題点

1) 窒素除去量について

上述した窒素除去量を定量化する式については、まだ色々な問題が残っている。土壌の種類による相異や植生の影響などである。植生の影響を単純にFとして係数化したしたが、これは式の形そのものが根本的に変更される可能性もある。除去係数が土壌の種類によってどう変化するか、また同一土壌でも時期によって変化する可能性もある。今回の式は数量化のための最初の提起であり、今後の検討によって修正されることになる。

2) 流出過程について

畑地の排出率を30%程度にして計算したが、これは畑地の下層土や地下水における脱窒や吸着による除去を見込んでおらず、畑地作土層から溶脱した窒素はそのまま低地へ流出するとしている。さらに低地の水田地帯を流下する過程での地下水流動を無視し、すべての水が地表を流出するとしている。これは茨城県の谷津田地帯を想定しているので、その地下水流動が少ないからである。もしも地下水流動量が大きければ、それはかなりの

除去が脱窒で生じるであろう。

3) 平面分布の問題

台地上の畑地と林地の面積を各々合計して、その和で平均的に扱っている。その結果台地からの流出水濃度は平均化されている。除去量が濃度により大きく変化するから、この扱いは大いに気になるところである。

また灌漑率も集水域の中で一様とはかぎらない。

4) ChやCn, Csの排出率について

これらの排出率は施肥法や施肥量、それに肥料の種類や作物によっても変化する。この点についての今後の研究が必要である。

5) 流出水量について

降雨の変化だけでなく他の水系からの灌漑水の流入や地下水の汲み上げが大量にあると、流出水量が変化するるので注意が必要である。

7. おわりに

水田における窒素除去機能を付けた簡単なフローダイヤグラム型の流出モデルを考案し、その試算結果を紹介した。その試算結果からは流出水濃度に畑地排出負荷量や畑地面積率、それに畜産負荷量と水田の窒素除去機能が大きく関与していることが推定された。次報では農業集水域での調査結果とモデル計算値との比較を行って、本モデルの適合性を検討したい。

引用文献

- 古畑和五郎 (1982) : 水生植物活用によるNO₃-Nの除去, 農村地域水質広域管理計画調査報告書 (諏訪湖地区) 関東農政局計画部資源課
- 長谷川清善 (1992) : 水田における窒素の動態と環境への影響評価に関する研究, 滋賀県農業試験場特別研究報告, 第17号
- 細見正明, 須藤隆一 (1991) : 湿地による生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 14 (10), 674~681
- 日高 伸 (1995) : 環境保全型農業と水田の水質浄化機能 (2), 農業技術, 50 (10), 16~19
- 国松孝男, 中村久郎, 金木亮一 (1980) : 処理水の水田還元, 農業土木学会誌, 48 (1), 11~18
- 小川吉雄, 酒井 一 (1981) : 環境容量調査, 農村地域水質広域管理計画調査報告書, 昭和55年度, 関東農政局計画部資源課
- 小川吉雄, 酒井 一 (1984) : 畑地から水田へ流入した硝酸態窒素の動向, 日土肥誌, 55 (6), 533~538
- 尾崎保夫, 近藤 正 (1995) : 自然浄化機能を活用した農村地域の水質改善, 用水と廃水, 37 (1), 32~38
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996b) : 素堀貯留池を伴う養豚

- 地域の河川窒素濃度・負荷の時期変動, 農業土木学会論文集, **182**, 9~16
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996c): 養豚飼養頭数密度と河川水窒素濃度との関係, 農業土木学会論文集, **182**, 17~23
- 高村義親, 鈴木誠治, 古賀康夫, 田淵俊雄 (1983): 湛水土壤ライシメータにおける硝酸態窒素及び塩素イオンの動向と収支について, 日土肥誌, **54** (1), 37~44
- 田淵俊雄, 鈴木誠治, 高村義親 (1983): 非稲作期の谷津田における畑地流出水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の除去について, 農業土木学会論文集, **104**, 9~15
- 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
- 田淵俊雄編著 (1986): 農業土木技術者のための水質入門, 農業土木学会
- 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, 黒田久雄 (1991): 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造, 農業土木学会論文集, **154**, 65-72
- 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 (1994): 水田窒素除去機能の流出水濃度への影響予測, 平成6年度農業土木学会講演要旨集
- 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態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

受稿年月日: 1997年9月8日

受理年月日: 1998年4月23日