

生態系モデルによるため池の窒素の動態解析と窒素 量低減のためのシナリオ分析

齋藤, 孝
九州大学大学院生物資源環境科学府

原田, 昌佳
九州大学大学院農学研究院

平松, 和昭
九州大学大学院農学研究院

森, 牧人
九州大学大学院農学研究院

<https://doi.org/10.15017/8861>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 61 (2), pp.297-301, 2006-10-27. 九州大学大学院農学
研究院
バージョン：
権利関係：

生態系モデルによるため池の窒素の動態解析と 窒素量低減のためのシナリオ分析

齋 藤 孝¹・原 田 昌 佳*
平 松 和 昭・森 牧 人

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水環境学研究室
(2006年6月30日受付, 2006年7月24日受理)

Numerical Study on Nitrogen Dynamics and Scenario Analysis for Reducing Nitrogen in an Agricultural Pond using an Ecosystem Model

Takashi SAITOH¹, Masayoshi HARADA*, Kazuaki HIRAMATSU
and Makito MORI

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

近年, 海域, 湖沼, 河川などの水域では, 富栄養化に代表されるような有機汚濁による水環境の悪化が問題となっている。水域の富栄養化は, 栄養塩が一定の濃度レベルを超えて豊富に存在するとき, 水中の藻類の光合成作用が刺激され過度の増殖が進行した結果, 透明度の低下, 着色, 異臭, 貧酸素化, 養殖魚の斃死などの二次的被害をもたらす。水域の生態系にも悪影響を及ぼす。湖沼や貯水池などの閉鎖性の強い水域では, 物質が蓄積されやすく, 自浄作用が小さいため, 富栄養化を引き起こしやすい。また, 海域, 河川, 湖沼には水域の利用目的に応じて生活項目に関する環境基準が設けられているが, 湖沼においてはその達成率が40%台と極めて低い。そのため, 全国的に湖沼・貯水池における水環境の保全と改善, とくに富栄養化対策が急務となっている。

水環境の保全・改善を図る上で, 水質動態の内部構造の解明とともに環境アセスメントは重要な位置づけ

にある。水域では生態系を通じてさまざまな物質が循環している。とくに, 富栄養化した水域においては, 植物プランクトンにとっての栄養塩である窒素とリンの循環を把握することは極めて重要である。適切な環境アセスメントを行うには, 生態系を考慮した窒素, リンなどの水環境要素の動態を時間的・空間的に予測できるモデルが求められる。現在, 最も広く用いられるものが生態系モデルと呼ばれる水質予測モデルである。生態系モデルは, 植物プランクトン・動物プランクトンが介する生物学的過程や酸化・還元反応などの化学的反応を考慮した物質循環を数理的に表したもので, 水環境の動態メカニズムの解明や水質改善に向けたシナリオ分析などに用いられ, 水質予測モデルとしての有益性や実用性が報告されている(例えば, 柳ら, 2004)。

本研究では, 数年前から夏季にアオコが発生し, 富栄養化による水環境の悪化が見られる小規模なため池を対象に, 窒素を指標としたワンボックス型の生態系モデルを構築した。まず, 定期的な水質調査を実施し,

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水環境学研究室

¹Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environmental Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

*Corresponding author (E-mail: mharada@bpes.kyushu-u.ac.jp)

同モデルにより観測結果を再現することでその妥当性を検証した。さらに、TNに関わる農業用水水質基準値1mg/Lを大幅に超える窒素化合物が流出されている池内のTNを農業用水水質基準以下にするために、池内の窒素低減に向けたシナリオ分析を行い、現状の窒素の流入負荷量をどの程度削減するべきかを検討した。

データと方法

1. 解析対象池と水質データ

研究対象池は、福岡県糟屋郡篠栗町のといし河原池であり、周囲約140m、水面積約840m²、貯水量約2,200m³、平均水深2.5m、最大水深3.0mの農業用ため池である。流入、流出する水路はそれぞれ1本ずつである。

平成17年9月～11月に週1回の頻度で、ため池内および流入水路の水質調査を実施した (Fig. 1 参照)。ため池内については池南岸に位置する取水塔の先端部 (水深約2.0m) の湖面近傍で、水路については流入口でそれぞれ採水を行い水質分析に供した。また、併せ

て水路からの流入量を測定するとともに、ため池内のサンプリング地点近傍で水位の連続測定を行った。水質分析では、多項目水質測定器 DR/2400 (セントラル科学製) により、全窒素 (TN)、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素を測定した。また、TN から無機態窒素を差し引くことで有機態窒素を算定した。

Fig. 2 に水質の分析結果を示す。観測期間中の池水と流入水の硝酸態窒素はほぼ同程度の値を示した。アンモニア態窒素については、池水と流入水いずれも季節的な変動は見られず、0.1mg/L程度で推移した。池水と流入水の有機態窒素は、調査日によって池水で0.2mg/Lを超える値を示すものの、観測期間を通じて極めて小さな値で推移した。以上から、池水ならびに流入水いずれも窒素化合物のほとんどが無機態窒素で構成され、そのうち硝酸態窒素が大部分を占めていることが分かる。さらに、TNに関わる農業用水水質基準の値が1mg/L以下であることから、これを大幅に超える窒素化合物が同池から流出している。

2. 生態系モデル

(1) モデルの計算式

本研究では、ため池を一つのボックスと考え、水域

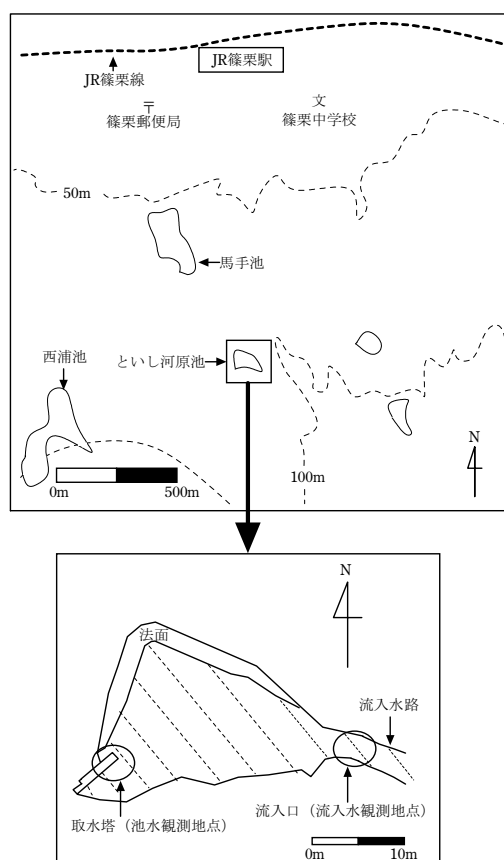


Fig. 1. といし河原池の概要

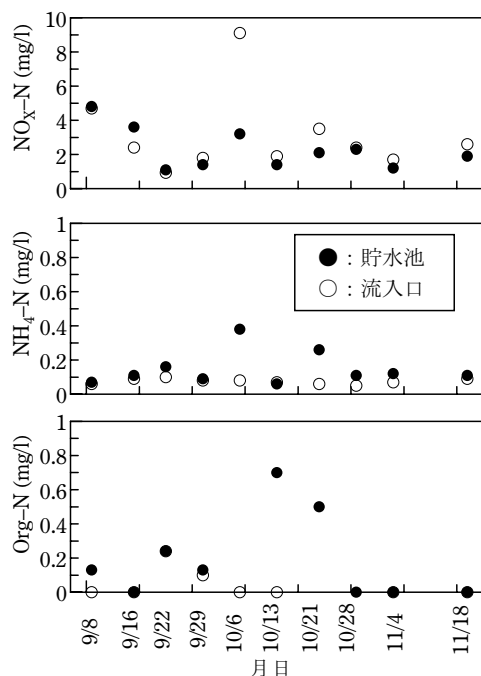


Fig. 2. NOx-N, NH₄-N, Org-N の定期観測の結果

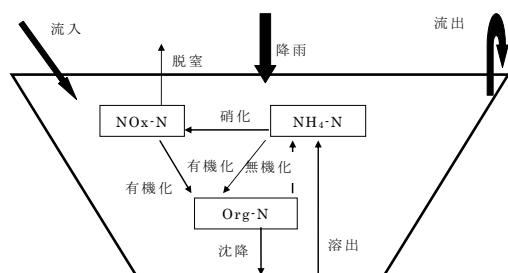


Fig. 3. 溜池内の窒素循環

内の窒素の循環を Fig. 3 のように簡略化する。図中の NOx-N は硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の和（窒素酸化物）、NH₄-N はアンモニア態窒素、Org-N は有機態窒素を表す。なお、有機態窒素の実態は植物プランクトンである。Fig. 3 に基づいて、これら 3 つを指標とした生態系モデルを構築する。NOx-N、NH₄-N、Org-N の濃度をそれぞれ N 、 H 、 O で表し、物質反応は全て 1 次元反応式で表現できるとして、窒素の動態モデルを導出する。以下では、ため池の体積を V 、水と接している底面積を A 、 $h \equiv V/A$ とする。また、下付添字 in, out, R はそれぞれため池への流入、流出、降雨を表し、その水量を q とする。

まず、NOx-N 濃度 N の動態は、①系内への流入、②降雨による直接流入、③系外への流出、④NH₄-N の硝化、⑤有機化、⑥脱窒で構成され、(1) 式で表現される。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{q_{in}}{V} N_{in} + \frac{q_R}{V} N_R - \frac{q_{out}}{V} N + \alpha_N H - r_1 \mu_N O - \alpha_D \frac{N}{h} \quad (1)$$

ここで、 α_N は硝化速度定数、 μ_N は有機化速度定数（植物プランクトンによる吸収速度）、 r_1 は有機態窒素の NOx-N と NH₄-N への分配定数である。また、 α_D は脱窒速度定数であり、脱窒は底質表面で生じるとみなした。

つぎに、NH₄-N 濃度 H の動態は、①系内への流入、②降雨による直接流入、③系外への流出、④硝化、⑤有機化、⑥Org-N の無機化、⑦底泥からの溶出で構成され、(2) 式で表現される。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{q_{in}}{V} H_{in} + \frac{q_R}{V} H_R - \frac{q_{out}}{V} H - \alpha_N H - (1-r_1) \mu_N O + \alpha_M O + \frac{E_H}{h} \quad (2)$$

ここで、 α_M は Org-N の無機化速度定数、 E_H は底泥からの溶出速度である。

さらに、Org-N 濃度 O の動態は、①系内への流入、②降雨による直接流入、③系外への流出、④無機態窒素の有機化、⑤無機化、⑥沈降で構成され、(3) 式で表現される

$$\frac{dO}{dt} = \frac{q_{in}}{V} O_{in} + \frac{q_R}{V} O_R - \frac{q_{out}}{V} O + \mu_N O + \alpha_M O - \alpha_S \frac{O}{h} \quad (3)$$

ここで、 α_S は Org-N（植物プランクトン）の沈降速度である。

以上の 3 式を Runge-Kutta-Gill 法で計算し、計算時間間隔は $\Delta t = 1d$ とした。

(2) モデルパラメータと計算条件

ため池の容積は $V=2,192m^3$ である。水底面積は $840m^2$ であるが、このうち脱窒や底泥からの栄養塩の溶出に貢献する底泥面積を水底面積と考え $A=660m^2$ とし、計算に用いる水深は $h=V/A$ より計算した。

(1)～(3) 式中のモデルパラメータは文献値あるいは試行錯誤的に以下のように設定した。

NH₄-N の硝化速度 α_N は解析対象貯水池の水塊は嫌気の状態であることから、 $\alpha_N = 0.1d^{-1}$ とした（平松ら, 2004）。

無機態窒素の有機化量の NOx-N と NH₄-N への分配係数 r_1 は無機態窒素の有機化の実態が植物プランクトンによる窒素分の吸収であるため、 r_1 に次式を用いた。

$$r_1 = \frac{\bar{N}}{\bar{N} + \bar{H}} \quad (4)$$

ここで、 \bar{N} ($=1.97mg/L$)、 \bar{H} ($=0.161mg/L$) はそれぞれ NOx-N と NH₄-N の観測期間中の平均濃度である。

無機態の有機化速度定数 μ_N は次式の Monod 式で評価した。

$$\mu_N = \mu_{max} \frac{\bar{N} + \bar{H}}{k_N + (\bar{N} + \bar{H})} \quad (5)$$

ここで μ_{max} は最大比増殖速度、 $k_N = 0.1mg/L$ である。

底泥からの NH₄-N の溶出速度 E_H は有明海沿岸低平水田地帯のクリーク堆積土を対象とした溶出試験結果（九州農政局計画部資源課, 1997）を参考に、 $E_H = 0.0218g/(m^2 \cdot d)$ とした。

脱窒速度 α_N 、Org-N の無機化速度定数 α_M 、Org-N の沈降速度 α_S ならびに最大比増殖速度定数 μ_{max} については、計算結果と実測値の誤差が小さくなるような値を試行錯誤的に探索した。その結果、 $\alpha_N = 0.080d^{-1}$ 、

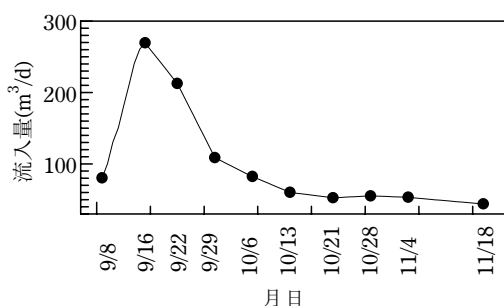


Fig. 4. 観測期間中の流入量データ

$\alpha_M = 0.031d^{-1}$, $\alpha_S = 0.040m/d$, $\mu_{max} = 0.044d^{-1}$ とした。

計算条件は次のように設定した。流入水中の各態窒素の濃度 N_{in} , H_{in} , O_{in} は観測期間中の平均濃度を使用し, $N_{in} = 3.29mg/L$, $H_{in} = 0.07mg/L$, $O_{in} = 0.00mg/L$ とした。 N , H , O の初期条件は, 観測期間開始日である 9 月 8 日のデータ, すなわち $N = 4.8mg/L$, $H = 0.07mg/L$, $O = 0.13mg/L$ とした。流入量として使用したデータを Fig. 4 に示す。水路からの流入量についての調査は水質の定期調査と併せて実施し, 連続的にデータを集積していないため, 流入量 q_{in} は実測データの線形補間により与えた。一方, いし河原池では水位が一定に保つような水管理がなされており, 水域の容積は時間的に変化しないと考えられる。そのため, 流出量 q_{out} は流入量 q_{in} に等しいと見なした。なお, 降雨負荷の影響は無視した。

以上の条件により, 9 月から 11 月までの 3 ヶ月間の N , H , O の動態を再現した。

3. シナリオ分析条件

上述のように, いし河原池内の TN は観測期間中 1 mg/L を超えており, 農業用水水質基準に適合していない。流入水と池水の TN は同程度であることから, 池水の窒素を削減するためには流入負荷量を低減する必要がある。そこで, 現状の窒素負荷量をどの程度削減すれば, 水質基準である $TN < 1 mg/L$ をクリアできるかをシナリオ分析により検討した。分析条件として, 窒素負荷量の削減率を 20%, 40%, 60% の 3 ケースを考え, 計算期間は観測期間と同じ 3 ヶ月間とした。具体的には, 観測期間の流入水中の濃度 N_{in} , H_{in} , O_{in} の平均値に対して 20%, 40%, 60% 削減した場合を考えた。なお, 流入水量は観測データから与えた。また, 池水の N , H , O は観測期間中, TN が最も高い値を示した測定日の濃度を初期値とすることとし, その結果, 観測開始日である 9 月 8 日の値である $N = 4.8mg/L$, $H = 0.07mg/L$, $O = 0.13mg/L$ を使用した。

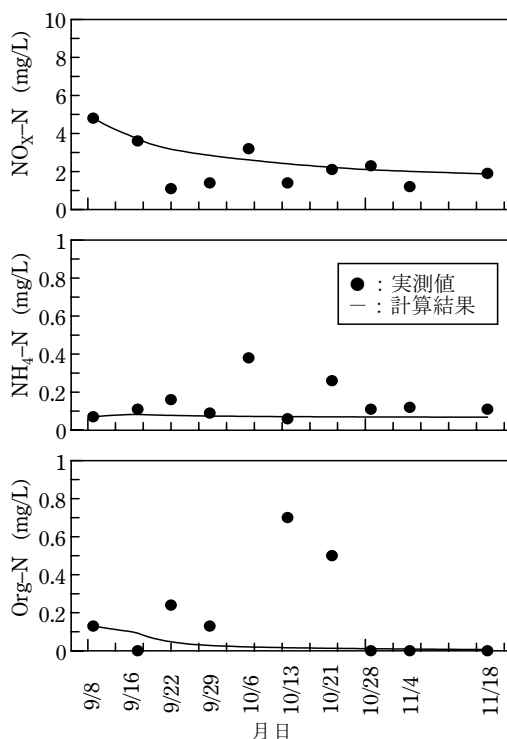
結果と考察

1. 水質動態の現況モデル

$NOx-N$, NH_4-N , $Org-N$ の計算結果を実測値と併せて Fig. 5 に示す。 $NOx-N$ については, 計算結果と実測値に多少の誤差はあるもののその時間的推移は概ね再現されている。また, NH_4-N と $Org-N$ については, 実測値との大きなズレが若干見られるが, 時間的変化は概ね再現されている。流入水中の $NOx-N$, NH_4-N , $Org-N$ を再現期間内の平均値で与えたために, 計算結果と実測値の誤差が生じたが, 本モデルにより, 水域内の窒素化合物の大局的な動態を把握することは可能と考えられる。

2. シナリオ分析結果

シナリオ分析の計算結果を Fig. 6 に示す。流入負荷を 20%, 40%, 60% 削減したいずれの場合も, 計算開始 20 日後で池水の TN は急激に低下し, 40 日後ではほぼ定常状態に達していることが分かる。流入負荷 20%, 40% 削減の場合では, それぞれ 1.7, 1.2mg/L までに低減されたが農業用水水質基準には適合していない。流入負荷 60

Fig. 5. $NOx-N$, NH_4-N , $Org-N$ の実測値と再現結果

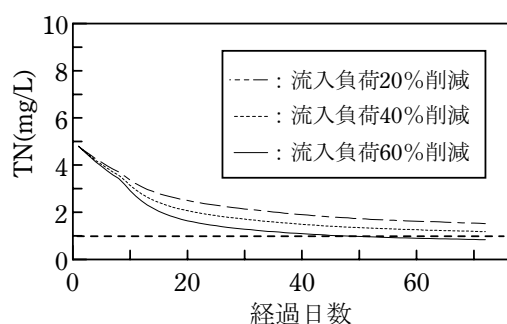


Fig. 6. シナリオ分析結果

%削減では、計算開始後45日で農業用水水質基準を下回る値までに低下している。これから、といし河原池のTNを農業用水水質基準以下にするためには、現状の流入水中の窒素量を60%以上削減する必要があると考えられる。

要 約

本論文では福岡県糟屋郡篠栗町大勢門地区のといし河原池を対象に、硝酸態窒素・亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、有機態窒素を指標とした生態系モデルを用いて、窒素の動態モデルを構築した。本モデルでは、各態窒素の動態をワンボックスモデルによって表し、モデルパ

ラメータは既往の文献値から、あるいは試行錯誤的に設定した。2005年9月～11月に実施した水質観測を本モデルにより再現し、計算結果と実測値を比較した。その結果、両者に若干のズレは生じたものの、計算結果は実測値を概ね再現できたことから、本モデルにより硝酸態窒素・亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、有機態窒素の大局的な挙動を予測することは可能であると考えられた。

解析対象池では、流入水と池水のTNは同程度であり、農業用水水質基準を大きく超える高濃度の窒素が流出していた。そこで、池内の窒素低減のために、流入負荷をどの程度削減すればよいかをシナリオ分析により検討した。その結果、現在の流入水中の窒素量の60%以上を削減することにより、池内のTNは水質基準である1 mg/Lを下回ることが示唆された。

文 献

- 九州農政局計画部資源課 1997 集落内クリークの水質浄化手法. 平成8年度水質浄化技術確立調査報告書 (姉川地区): 80頁
- 平松和昭・白谷栄作・四ヶ所四男美 2004 生態系モデルによる低平地水田地帯のクリーク水質解析. 九大農学芸雑誌, 59(2): 153-164
- 柳哲雄・屋良由美子・松村剛・石丸隆 2004 東京湾のリン・窒素に関する数値生態系モデル解析. 海の研究 (Oceanography in Japan), 13(1): 61-72

Summary

A mathematical model was developed for predicting the daily variation in water quality of Toisigawara-ike, which is a small agricultural pond in Sasaguri Town, Fukuoka Prefecture, Japan. This model took into consideration the ecosystem's processes. In the modeling, the interactions among the three water quality indices of $\text{NO}_x\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, and Org-N were described by first-order kinetics. The model parameters were determined by referring to previous literatures and by conducting trial-and-error optimizations. The results indicated that the ecosystem model could successfully reproduce the daily variation in reservoir water quality despite its relatively simple model structure.

Next, we investigated the issue of total nitrogen concentration because this value in the pond was much higher than the Japanese water quality standard required for paddy irrigation. In order to reduce the total nitrogen level in this pond to the level of paddy irrigation, we examined how much the inflow load should be reduced based on the scenario analyses using the ecosystem model. The results indicated that it was necessary to reduce the current inflow load of nitrogen by 60% or more.