

硝化を考慮した森林土壌からの硝酸態窒素 流出過程の数理モデル化に関する基礎的検討

MATHEMATICAL MODELING OF NITRATE NITROGEN RUNOFF PROCESS FROM
A FORESTED MOUNTAIN BASIN INCORPORATED WITH NITRIFICATION

田村 隆雄¹・吉田 弘²・端野 道夫³
Takao TAMURA, Hiromu YOSHIDA and Michio HASHINO

¹正会員 修 (工) 高松工業高等専門学校助手 建設環境工学科 (〒761香川県高松市勅使町355)

²正会員 博 (工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770徳島県徳島市南常三島町2-1)

³フェロー 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770徳島県徳島市南常三島町2-1)

A mathematical model of NO_3^- -N runoff process from a forested mountain basin is developed, based on a tank model comprising a surface tank with soilwater storage systems, and a groundwater tank. The model takes account of three elementary processes of NO_3^- -N in the forested mountain soil, (a) advection owing to the rainwater movement, (b) solute exchange between mobile and immobile regions, and (c) nitrification by microorganisms in the soil. The nitrification process is modeled using an exponential function of air temperature.

The proposed model is applied to annual observations in 1992 obtained in Shirakawa-tani forested mountain basin (main species Japanese cedar) located on Shikoku island in Japan. The model describes the seasonal change of NO_3^- -N streamwater concentration through a year. But, it is found that the model has underestimates objects at the beginning of summer. The deviation may be caused by not using soil temperature, but using air temperature data.

Key Words : NO_3^- -N, runoff process, forested mountain basin, nitrification, temperature, streamwater concentration, mathematical model

1. はじめに

森林流域は雨水によってもたらされる窒素酸化物や硫酸酸化物などといった大気汚染物質を一時的に貯留して徐々に溪流へ流出させる機能と、雨水中に不足している各種のミネラル分とを適度に溪流水へ供給するという機能を備えている。一般にこの2つの機能は総称して水質浄化・調節機能と呼ばれ、酸性雨問題や森林開発で注目されている。

この機能の核となっているものは、主として森林土壌中での様々な土壌化学的、生物化学的素過程である。窒素を例にとると、土壌中微生物による硝化、脱窒過程や、土粒子吸着水と土壌間隙水の間で生じる溶質交換過程がある。これら個々の素過程に関する研究は農学を中心として活発になされ、知見が豊富に蓄積されてきているが、それらを統合して森林流域全体としての水質浄化・調節機能を定量評価する段階までには至っていない。その大きな理由として森林流域における物質の搬送主体となる雨水の流動過程を的確に表現できるモデルが存在しなかったことが挙げられる。

著者らは、森林流域における雨水流動を的確に表現できる森林水循環モデル¹⁾を基礎に、雨水流動と物質変化の素過程とを結びつけ、森林流域における溪流水質の経時変化を再現することが可能な数理モデルの構築を進めてきた。最終的には植生や土壌特性の変化を溪流水質の変化に反映できるようなモデルを構築して、森林流域の水質浄化・調節機能の定量評価を行うことを目標としている。

これまでに土壌中での物質変化の素過程のうち最も基本となる移流と土粒子吸着水と間隙水との間で生じる溶質交換を考慮した物質流出タンクモデルを構築し、実森林流域で得た水質観測結果に適用してきた。その結果、生物化学的な影響を受けにくい Cl^- , SO_4^{2-} といった無機陰イオンであれば、流出高の変化に伴う溪流水濃度の経時変化を良好に表現できるまでに至っている^{2), 3)}。

本論文では、生物活動の影響を大きく受ける硝酸態窒素(NO_3^- -N)を対象にして、その溪流水濃度の季節変化の再現を試みる。そのため硝化(NO_3^- -N生産)のサブモデルを構築して物質流出タンクモデルに組み入れる。 NO_3^- -N変化と収支を厳密に評価する

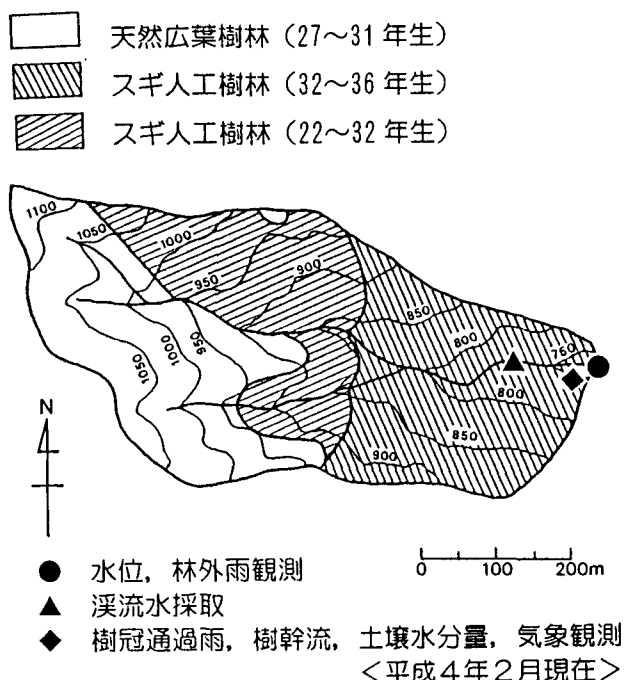


図-1徳島県白川谷森林試験流域の概要

のであれば、有機態窒素から NO_3^- -Nとなる過程や脱窒も考慮する必要がある。しかし本論文の目的は渓流水 NO_3^- -N濃度の季節変化の再現にあるので、渓流水の NO_3^- -N濃度形成に一番大きな影響を及ぼしている硝化量のモデル化のみで充分と判断した。

2. 白川谷森林試験流域の概要

本論文でモデル計算の対象とする流域は、図-1に示す徳島県白川谷森林試験流域（徳島県三好郡山城町栗山）である。流域の諸元は、面積約23ha、標高約740m～1140m、流路平均勾配21.5°となっている。地質は三婆川帯に属し、砂質片岩または砂質片岩と、泥質片岩の互層となっている。流域の大部分の土壤表層は褐色森林土で占められているが、基岩までの厚さはせいぜい50cm程度であり、脱窒に大きな影響を与えるような浅層地下水は認められない。林相は上流側2/5が天然広葉樹林、下流側3/5がスギの人工樹林となっている。観測の概要を述べると、流域末端にある砂防堰堤（●）で水位および林外雨量の観測を行っている。渓流水質測定用の試料採取は流域末端から約100m上流（▲）で月2～3回程度行っている。またスギ林内の南側山腹斜面（◆）では樹冠通過雨量と樹幹流下量の観測と採水を行っている。水質分析はイオンクロマトグラフ法により NO_3^- -N、 SO_4^{2-} など9項目のイオン濃度とpH、ECとを測定している。また土壤水分量や気温等も10分毎に自動計測している。

本解析では、水質データが豊富に揃っている1992年のデータを用いて渓流水 NO_3^- -N濃度の季節変化の再現を試みる。ところで本解析のように土壤中の微生物活動の影響を強く受ける硝酸態窒素を扱う場合、温度データとして最も適しているのは地温であるが、

1992年当時はまだ地温の観測を開始していなかった。そこで地温の季節変動に変わる値として日平均気温を求めて、これを地温の代用として硝化量の算定に用いることにする。

3. 硝化過程を組み込んだ物質流出タンクモデルの概要

(1) 物質流出タンクモデル

NO_3^- -Nを対象とした物質流出タンクモデルを図-2に示す。本研究でのモデリングの基本は、森林土壤中で生じる硝化、土粒子吸着水と間隙水との間で生じる溶質交換、および移流の各素過程を主として雨水流動によって表現して、森林土壤への浸透から溪流への流出に至るまでの流出過程を説明することである。そこで物質流出タンクモデルの構築は、これまでに著者らのグループが開発を進めてきた直列2段タンクモデル¹⁾を基礎として行った。

モデルは、図に示すように表層タンクと地下水タンクから構成される。表層タンクは土壤A層を表現する上部タンクと、土壤B層を表現する土壤水分タンクから構成される。更に土壤水分タンクは、水分移動が比較的激しい場を想定した1次土壤水分タンクと、水分移動が穏やかな場を想定した2次土壤水分タンクで構成される。これら各タンク毎に硝化、溶質交換、および移流の各素過程を取り入れた物質収支式を設けて、渓流水 NO_3^- -N濃度の季節変化の再現を試みる。

(2) 物質収支式

本モデルの NO_3^- -Nは雨水流動に対する振る舞いの違いから2種類に大別される。1つは土壤間隙水に含まれ自由に移動しようとする溶存態物質（濃度： C_s, C_x, C_y, C_g ）であり、もう1つは土粒子表面の吸着水に含まれているために短期間の流出現象にはほとんど関係しないと考えられる吸着態物質（濃度： $S_{as}, S_{ax}, S_{ay}, S_{ag}$ ）である。両者は一定の濃度バランスを保つようにして溶質の交換を行うものとする。

各タンクの物質収支式は、溶存態物質量と吸着態物質量について式(1)～式(8)から成り立ち、雨水流動にともなう移流（浸透、流出）項、土粒子吸着水と間隙水との間で生じる溶質交換項、および硝化菌による NO_3^- -N生産を表した硝化項で構成されている。

物質の移流量は雨水の浸透・流出量とその成分が発生するタンクの溶存態物質濃度との積で表す。例えば上部タンクから1次土壤水分タンクへの物質浸透量は、 $C_s \cdot f_b$ で表現される。次に土粒子吸着水と間隙水との間で生じる溶質交換量は土粒子が接している土壤間隙水量に比例して生じるという仮定の下で、各タンクの貯留水深（ S_s, S_x, S_y, S_g ）の関数として表した。硝化による NO_3^- -N生産量に関しては地温、土壤水分量、及びpH値がそれぞれ影響を与えているが、本論文の主目的が渓流水 NO_3^- -N濃度の季節変化の再現であることから、微生物活動に最も影響を与える地温（ θ ）の指数関数という簡単な定

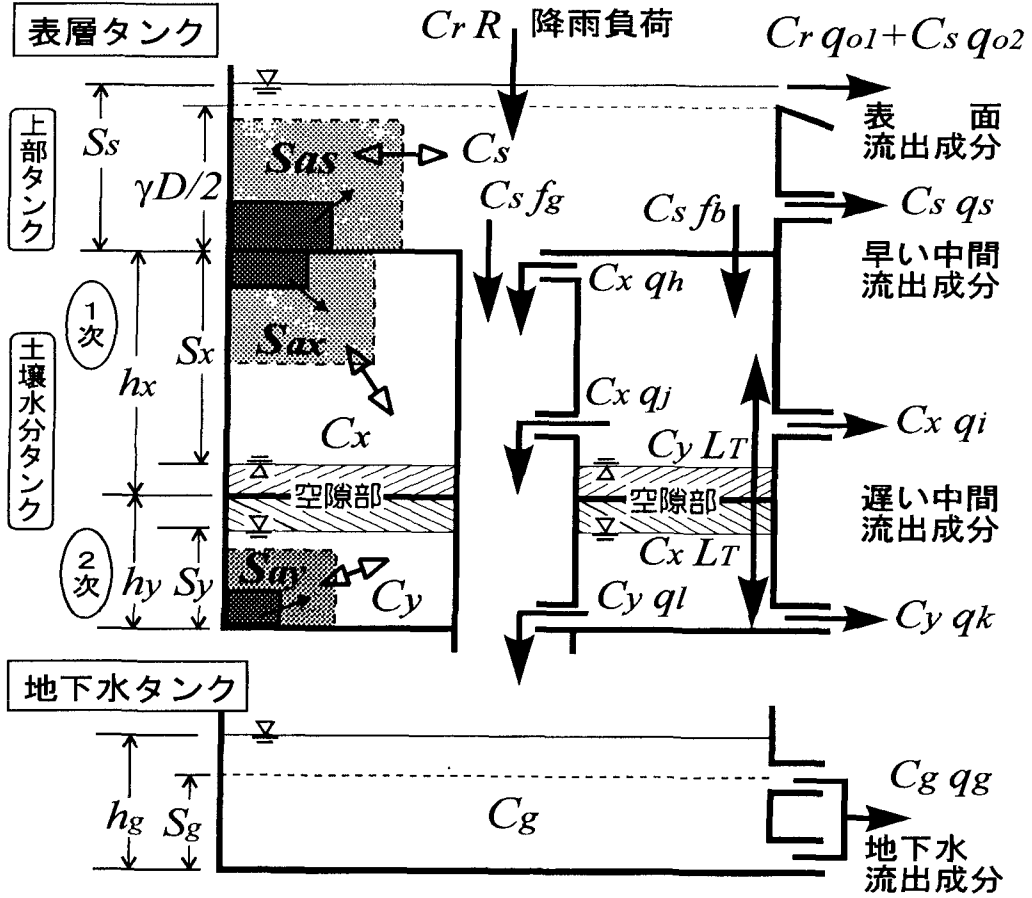
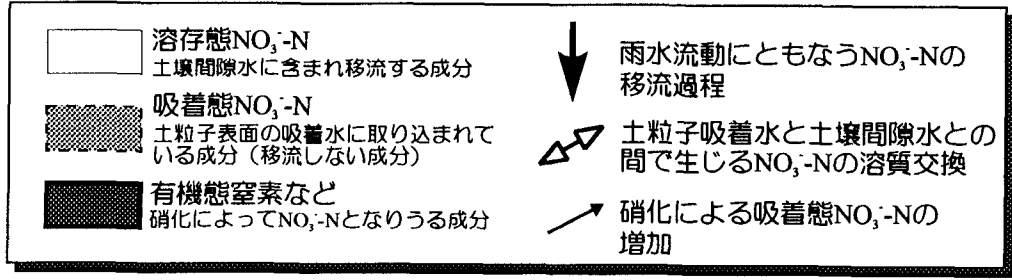


図-2 NO_3^- -Nを対象にした物質流出タンクモデル

式化でも十分であると考えた。この硝化項は硝化菌の活動が活発な表層土壌を想定した表層タンクの収支式に設けた。

$$\begin{aligned} \frac{d(C_s S_s)}{dt} = & C_r R - C_r q_{o1} \\ & - C_s (q_{o2} + q_s + f_b + f_g) \\ & + v_s (k_s S_{as} - C_s) S_s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\{S_{as}(1-\gamma)D\}}{dt} = & -v_s (k_s S_{as} - C_s) S_s \\ & + \alpha_s \exp \beta_s (\theta - \theta_s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(C_x S_x)}{dt} = & C_s f_b - C_x (q_h + q_i + q_l) \\ & \mp C_{xy} L_T + v_x (k_x S_{ax} - C_x) S_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\{S_{ax} h_x (1-f_x)/f_x\}}{dt} = & -v_x (k_x S_{ax} - C_x) S_x \\ & + \alpha_x \exp \beta_x (\theta - \theta_x) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(C_y S_y)}{dt} = & \pm C_{xy} L_T - C_y (q_k + q_l) \\ & + v_y (k_y S_{ay} - C_y) S_y \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\{S_{ay} h_y (1-f_y)/f_y\}}{dt} = & -v_y (k_y S_{ay} - C_y) S_y \\ & + \alpha_y \exp \beta_y (\theta - \theta_y) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(C_g S_g)}{dt} = & C_s f_g + C_x (q_h + q_i) \\ & + C_y q_l - C_g q_g + v_g (k_g S_{ag} - C_g) S_g \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{d(S_{ag}h_g)}{dt} = -v_g(k_g S_{ag} - C_g)S_g \quad (8)$$

ここに、 t ：時間(hr)， R ：降雨強度 ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$)， C_r ：降雨濃度($\text{mg}\cdot\text{mm}^{-1}$)， C_s, C_x, C_y, C_g ：溶存態物質濃度($\text{mg}\cdot\text{mm}^{-1}$)， $S_{as}, S_{ax}, S_{ay}, S_{ag}$ ：吸着態物質濃度($\text{mg}\cdot\text{mm}^{-1}$)， $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_i, q_k, q_g, q_h, q_l, q_f, q_g$ ：流出および地下水かん養強度($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$)， L_T ：1次・2次土壤水分交換強度($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$)， S_s, S_x, S_y, S_g ：貯留水深(mm)， γ, f_x, f_y ：土壤間隙率， D, h_x, h_y ：土壤層厚(mm)， $v_s, v_x, v_y, v_g, k_s, k_x, k_y, k_g$ ：溶質交換係数， $\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y$ ：硝化速度係数($\text{mg}\cdot\text{hr}^{-1}$)， $\beta_s, \beta_x, \beta_y$ ：温度係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)， θ ：温度($^{\circ}\text{C}$)， $\theta_s, \theta_x, \theta_y$ ：硝化に関わる閾値($^{\circ}\text{C}$)である。 C_{xy} は、例えば L_T が1次タンクから2次タンクへ向かう場合には1次土壤水分タンクの収支式で $-C_x$ 、2次土壤水分タンクの収支式で $+C_x$ をとり、逆に L_T が2次土壤水分タンクから1次土壤水分タンクに向かう場合には、それぞれ $+C_y, -C_y$ をとる、なお添字 s, x, y, g はそれぞれ、上部タンク、1次土壤水分タンク、2次土壤水分タンク、ならびに地下水タンクにおける成分であることを示す。

3. 解析手順の概要

(1) 解析手順

解析は2段階で行う。第1段階は物質の搬送主体である雨水の流出解析である。具体的には森林水循環モデルを構成する降雨遮断タンク⁴⁾や直列二段タンクモデル¹⁾を用いて、物質の流出解析に必要な土壤への雨水浸透量や土壤から発生する中間流出成分量や地下水流出成分流出成分量などを算定する。

第2段階は物質の流出解析である。具体的には式(1)～(8)に設けた物質の流出過程に関わるパラメータの同定作業であり、各観測時刻における観測値とモデル計算値との誤差二乗和を逐次算出して、それらの総和を最小にするようなパラメータ組を探すものである。以下にその同定手法について具体的に述べる。

(2) 物質の流出解析に必要なデータ

物質の流出解析に必要なデータは、森林水循環モデルで算出した雨水成分量、地表到達雨の大部分を占める樹冠通過雨濃度、渓流水濃度、および各タンクの初期土壤水濃度（溶存態物質濃度と吸着態物質濃度）の参考値とする土壤水濃度である。また硝化量算定のために原則として地温データを必要とする。

(3) 渓流水濃度の算定式

モデルによる渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の算定は、計算単位時間を1時間として、次式を用いて行う。

$$C_{est} = \frac{C_r \cdot q_{o1} + C_s \cdot q_{o2} + C_v \cdot q_s + C_x \cdot q_i + C_y \cdot q_k + C_g \cdot q_g}{q_{o1} + q_{o2} + q_s + q_i + q_k + q_g} \quad (9)$$

ここで、 C_{est} ：計算渓流水濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)， C_r ：降雨濃

度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)， C_s, C_x, C_y, C_g ：各タンクの溶存態物質濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)， $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_i, q_k, q_g$ ：各流出成分量($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$)である。

(3) パラメータ同定手法

モデル計算値の誤差評価は、式(10)に示すモデル計算値と観測値の誤差2乗和で定義される評価関数 F を用いて行い、式(1)～(8)で用いた物質変化の素過程に関するパラメータ($v_s, v_x, v_y, v_g, k_s, k_x, k_y, k_g, \alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \beta_s, \beta_x, \beta_y, \theta_s, \theta_x, \theta_y$)を最小にする組み合わせをシンプレックス法によって探索する。本論文ではこの同定作業のために1992年1月～12月の定期観測で得られた43個の渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度データを用いる。

$$F = \sum_{j=1}^N (C_{\text{obs},j} - C_{\text{est},j})^2 \quad (10)$$

ここで、 $C_{\text{obs},j}$ ：観測渓流水濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)， $C_{\text{est},j}$ ：計算渓流水濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)， N ：データ数である。

4. 解析結果

(1) 観測値とモデル計算値について

モデル解析結果を図-3、図-4に示す。図-3は上から順に日地表到達雨量($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$)、樹冠通過雨 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)、日平均気温($^{\circ}\text{C}$)、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)の観測値(43個)とモデル計算値、そして渓流水流出高($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$)の観測値とモデル計算値という順番になっている。図-4は解析期間を通じてほぼ常に流出している遅い中間流出成分と地下水流出成分の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変化を示したものである。

樹冠通過雨濃度に関しては、樹冠通過雨を一定期間ポリタンクに貯留してから採取する方法を採っているため、貯留期間の平均濃度を示している。また渓流水濃度計算は1年間(8784時間)にわたって行ったが、本論文の主目的がモデルによる渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化の再現にあることから、観測時刻の計算値のみを図中に示してある。

(2) 雨水流動の再現性について

本モデルにおける $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出過程の再現性の良否は、搬送主体である雨水の流動の再現性に大きく依存する。そこで渓流水流出高の観測値とモデル計算結果を検討すると、冬から初春にかけての降雪・融雪時期は転倒ます式雨量計によって降雪量を正確に観測できないため、流出高を過小評価している。また融雪が終わる3月下旬以降のハイドログラフ逓減期のいくつかは過大評価となっている。しかしながら年間を通じて概観すると流出高の再現性は良好であると言える。

(3) 渓流水濃度の季節変化の再現性について

モデル計算による渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化の再現性について日平均気温の季節変化と照合しながら検討する。

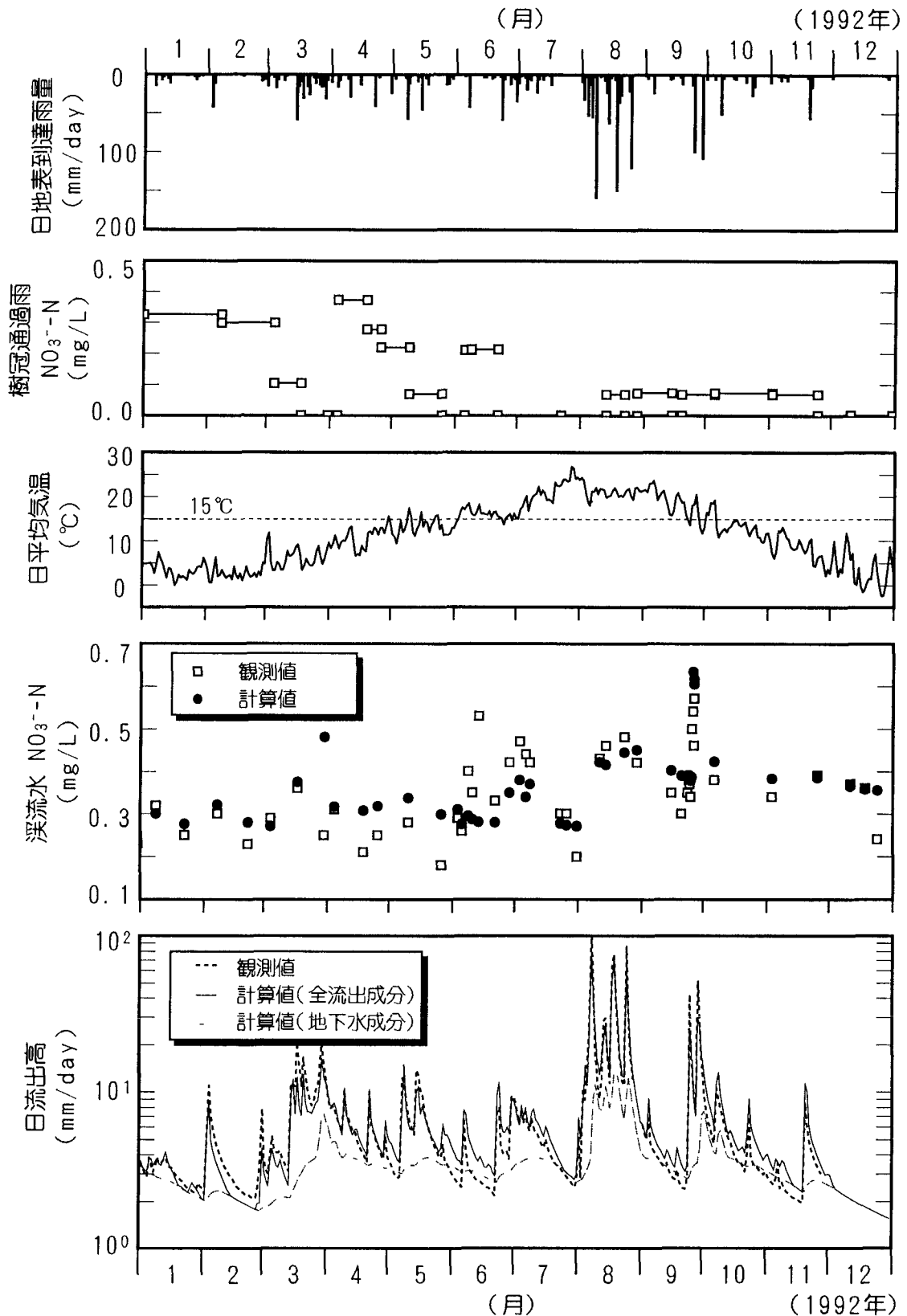


図-3 物質流出タンクモデルによる渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の計算結果（1992年 徳島県白川谷森林試験流域）

まず1月から5月にかけては、日平均気温が 15°C を超える日がほとんどないために生物活性が低く⁵⁾硝化量も少ない。ゆえに渓流水濃度の観測値には大きな変化は見られず、ほぼ一定値を示す。モデル計

算値はこの観測値の傾向とほぼ一致しているため再現性は良いといえる。ここで5月だけ見ると濃度が過大評価されているが、この原因は流出高の計算誤差によるものであり、次のようである。まず図-3の

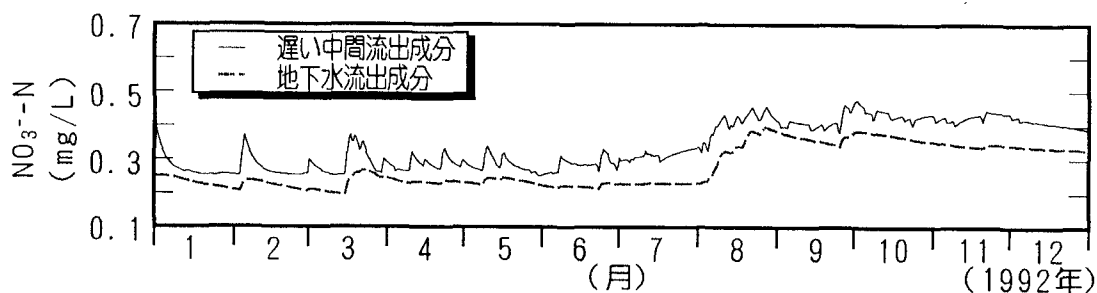


図-4 遅い中間流出成分と地下水流出成分の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化

表-1 硝化に関するパラメータ同定結果

パラメータ	単位	同定値
α_i	$\text{mg}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.1250
α_x	$\text{mg}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.1033
α_y	$\text{mg}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.0050
β_i	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.2500
β_x	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.1466
β_y	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.0100

流出高をみると、通減期で計算値が観測値より大きくなっており、中間流出成分が発生している。次に図-4を見ると遅い中間流出成分濃度の方が地下水流出成分濃度より常に高い状態にある。これらのことから観測時の渓流水は主として $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低い地下水流出成分であると考えることができるが、モデルでは高濃度の遅い中間流出成分の比重が高いために濃度が高くなったと説明できる。

次に6月以降、日平均気温が 15°C を超えて7月下旬には最高 26.5°C を記録するようになると、生物活性度も高まるため、硝化による土壌水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も高くなるため、渓流水濃度の観測値は急激に上昇する。7月下旬に濃度が極端に低くなっているが、これは渇水によるもので渓流水が低濃度の地下水流出成分だけとなるため8月に入り、降雨によって遅い中間流出成分が再び観測されると渓流水濃度も再び高くなっている。8月以降は日平均気温の低下とともに渓流水濃度も徐々に低下することが分かる。

モデル計算値はこの期間の濃度変化の傾向をほぼ良好に再現できている。例えば7月下旬の渇水時における濃度低下の現象はハイドログラフの再現性が良好なこともあってその傾向を良く再現できているし、8月以降の気温低下に伴う渓流水濃度の低下についても良好に再現できている。しかし残念なことに観測値に見られる6～7月中旬の急激な濃度上昇を的確に表現できていない。この理由は本解析で用いた日平均気温にあると考える。つまり初夏のように1日の寒暖差が大きくなる時期には、本解析で用いた日平均気温と地温との差に大きな差が生じるため、日平均気温を用いた本算定方法では、地温に支配される硝化量を的確に算定できないと考えることができる。

(4) 硝化項に関するパラメータ

同定計算の結果、式(1)～(8)で用いた物質の素過

程に関わるパラメータには一意性があることが認められた。表-1に硝化項に関するパラメータ同定結果を示す。表から分かるように上部のタンクほど硝化速度係数(α)と温度係数(β)が大きいという結果が得られた。これは表層土壌ほど微生物活動が活発であるという一般的な事実と一致することから、妥当な結果であると判断できる。ただしパラメータ値が持つ定量的な意味は、本解析で行った一つの計算結果だけからは判断を下すことはできない。

6. 終わりに

本論文では、森林土壌における硝化と $\text{NO}_3\text{-N}$ の移流、溶質交換の各素過程のモデル化を行った。そして実森林流域で得られた1年間の水質観測データに適用し、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化の再現を試みた。その結果、硝化項が気温の指数関数という簡単な型であるにも関わらず、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化を良好に再現することができた。ただし、より精度の高いモデルとするためには現地の地温を用いて硝化量の算定をすることが必要不可欠であることが分かった。今後の課題としたい。

本研究の一部は平成9年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号：09750605)の補助のもとに行われた。記してここに謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 端野道夫・吉田弘・村岡浩爾：森林水循環モデルと水収支の評価，水工学論文集，第36巻，pp.521-528，1993.
- 2) 吉田弘・田村隆雄・端野道夫：森林流域における物質流出機構の数値モデル化に関する基礎的検討，水工学論文集，第39巻，pp.1-6，1995.
- 3) Tamura, T., Yoshida, H., Hashino, M., and Hirata, T. : Seasonal change of streamwater and soilwater chemistries in forested mountain basins concerned with soil moisture and temperature, *Proceedings of International Conference on Water Resources & Environmental Research*, Vol.2, 239-246, 1996.
- 4) 吉田弘・端野道夫・村岡浩爾：樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定法，水文・水資源学会誌，Vol.6, No.1, pp.19-30, 1993.
- 5) 例えば木村真人ら：土壌生化学，朝倉書店，pp.11-12，1994.

(1997.9.30受付)