

硝化モデルを組み込んだ森林流域からの硝酸態窒素流出モデルに関する検討

MATHEMATICAL MODELING OF NITRATE NITROGEN RUNOFF PROCESS FROM A FORESTED BASIN WITH NITRIFICATION SUB MODEL

田村隆雄¹・端野道夫²・小西敏雄³

Takao TAMURA, Michio HASHINO and Toshio KONISHI

¹正会員 工修 高松工業高等専門学校助手 建設環境工学科 (〒761-8058 高松市勅使町355番地)

²正会員 工博 徳島大学工学部教授 建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

³学生員 徳島大学大学院工学研究科建設工学専攻 (〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

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 soil water storage systems, and a ground water tank. The model takes account of three elementary processes of NO_3^- -N in the forested mountain soil. They are infiltration and advection, solute exchange between mobile water and immobile regions, and nitrification by microorganisms in the soil. The process of former two are modeled as a function of the rainwater movement and soil moisture saturation calculated by the tank model. The latter process is modeled as a function of soil temperature calculated by a soil temperature model.

The 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 well, through a year.

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

1. はじめに

森林流域が持つ大きな機能の一つとして、水質浄化・調節機能がある。これは酸性雨に含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物などの汚染物質を貯留・浄化する機能と、雨水には不足しがちのミネラル分を適度に供給して、清澄な渓流水を形成する機能である。

この水質浄化・調節機能の中心的な役割を担っているのが森林土壌中で生じている物質流動に関する化学的・生物学的素過程である。例えば、酸性雨や河川の富栄養化に深く関連している硝酸態窒素は、溶質交換、硝化・脱窒、植生による吸収作用などの影響を受けて渓流水質を形成している。

これらの各素過程に関する研究は農林学の分野を中心として進んでおり、豊富な知見が蓄積されているが、森林流域をマクロに捉えて水質浄化・調節機能の定量評価を行うモデルの確立には至っていない。その大きな理由の一つとして、森林流域において、これら素過程を有機

的に結びつけるマクロ的な雨水流動モデルが存在しなかったことが挙げられる。

著者らは、植生や土壌構造の特徴を反映させ、森林流域内の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「物質流出モデル」の構築を進めてきた。具体的には、モデル内で計算される土壌水分量や様々な流出成分量を介して、森林土壌内における物質流動や化学的・生物学的素過程を表現しようと試みるもので、森林流域の水質浄化・調節機能の定量評価を行うことを最終目標としている。

そして、これまで水質環境問題で大きな位置を占める硝酸態窒素 (NO_3^- -N) を対象にした流出モデルを構築し、その渓流水濃度の季節変化、特に夏季の気温の上昇とともに見られる明瞭な濃度上昇の再現を試みてきた。なぜならこの夏季の濃度変化こそ、土壌中微生物や植生などが関与する硝酸態窒素に見られる特徴的な現象であり、これを再現することができれば、硝酸態窒素流出機構を正しく表現できるモデルとなると考えたからである。そこで、まず流出素過程の中でも土壌中の硝酸態窒素の増

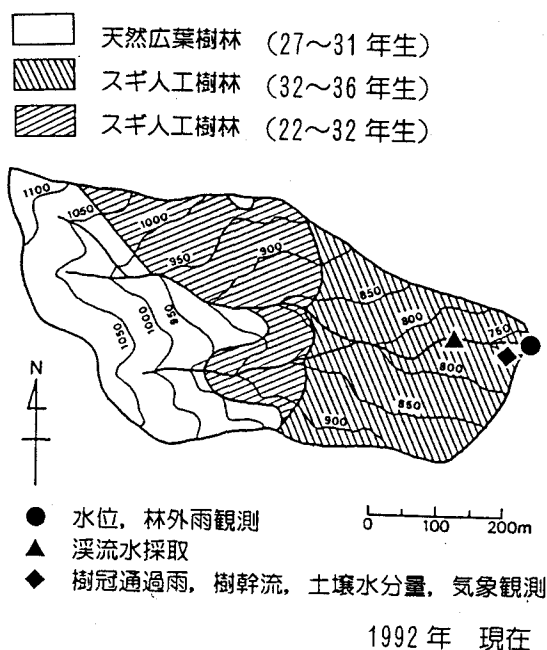


図-1 徳島県白川谷森林試験流域の概要

加に寄与する硝化過程に焦点を絞り、物質流出モデルの構築を行った²⁾。しかし、硝化量計算に必要な不可欠な地温データが不足していたため、その代用として日平均気温を利用したことや、温度ほどではないが、微生物活動に影響する土壌水分を無視していたため、地温変化や土壌水分量変化など森林流域の特徴を十分に反映させたものとは言えなかった。したがってモデルは全般的な季節変化を表すことはできたものの、梅雨期から初夏の渓流水濃度の再現性に問題を残した。

そこで本論文では、別途構築した地温モデルを利用して、欠如していた地温を推定するとともに、森林水循環モデルで計算された土壌水分飽和度も組み込んだ発展型の硝化サブモデルを構築して、より森林流域の特徴を物質流出機構に反映できるように改良して、夏季における渓流水硝酸態窒素濃度変化の再現性向上を試み、その検討を行った。なお本論文では便宜上、これまでの硝化サブモデルを硝化モデルA、これを組み込んだ物質流出タンクモデルを物質流出タンクモデルA、本論文で新たに構築する硝化サブモデルと物質流出タンクモデルを硝化モデルB、物質流出タンクモデルBと呼ぶことにする。

2. 白川谷森林試験流域の概要

対象流域は、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。流域は四国のほぼ中央に位置し、面積23ha、標高約740～1140m、流路平均勾配21.5°の小流域である。地質は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。大部分の土壌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で、浅層地下水は認められない。林層は上流

側2/5が天然広葉樹林で、下流側3/5がスギの人工樹林である。現地では雨量（林外雨、樹冠通過雨、樹幹流）、流量、土壌水分、及び風向風速、気温などを自動観測するとともに、月2～3回程度、各雨水成分の水質分析を行っている。水質分析項目は、pH、EC、および無機イオン成分である。

3. 物質流出モデルの概要

(1) 物質流出タンクモデルの構造

本研究では、物質流動は雨水流動の上に成り立っているという基本仮定の上に「直列二段タンクモデル」¹⁾を基礎として物質流出タンクモデルを構築している。本論文の物質流出タンクモデルBの基本的な構造は、従来の物質流出タンクモデルAと同じなので、その構造図については参考文献 2)を参照されたい。

(2) 物質収支式

物質流出タンクモデルは表層タンクと地下水タンクの2つのタンクから構成される。表層タンクは土壌A層を表現する上部タンクと土壌B層を表現する土壌水分タンクからなっている。更に土壌水分タンクは間隙が大きく、比較的雨水流動が大きく短期的な雨水流出現象を表現する一次土壌水分タンクと土壌間隙が小さく、雨水流動が穏やかで長期的な雨水流出現象を表現する二次土壌水分タンクで構成されている。これら各タンクにおいて、移流、溶質交換、硝化の素過程を考慮した物質収支式を設けている。

本論文で構築した物質流出タンクモデルBの各タンクにおける溶存態物質と吸着態物質の収支式を式(1)～(8)に示す。式中の添字は、sが上部タンク、xが一次土壌水分タンク、yが二次土壌水分タンク、そしてgが地下水タンクのものであることを示す。各タンクに設けた物質収支式は、雨水流動に対する反応や様々な化学的・生物学的素過程の生じる場の違いを考慮した2つの物質態の収支式からなる。一つは土壌間隙水に含まれ自由に移動すると考えた溶存態物質（濃度： C_s, C_x, C_y, C_g ）であり、渓流水濃度の形成に直接影響する。もう一つは土粒子構造が密な部分（吸着水）に含まれているため、短期間の流出にはほとんど関係しないが、硝化など長期に渡って土壌の水質形成に影響する素過程が生じる場と考えた吸着態物質（濃度： $S_{as}, S_{ax}, S_{ay}, S_{ag}$ ）である。

溶存態物質の収支式（式(1), (3), (5), (7)）は、移流項と溶質交換項、吸着態物質の収支式（式(2), (4), (6)）は、溶質交換項と硝酸態窒素の生産を受け持つ硝化項からなる。物質移流量は、その成分が発生するタンクの溶存態物質濃度に雨水移流成分量を乗じて算出する。溶質交換量は、溶存態物質と吸着態物質の間で一定の濃度バランスが保たれると考え、タンクの貯留水深（ S_s 、

S_x, S_y の関数として交換量を算出する。硝化量は硝化の対象となる有機態窒素が無尽蔵に森林土壌中に存在すると仮定した上で算定を行う。これまでの硝化モデルAは、単純に日平均気温の指数関数としたものであったが、本論文で構築した硝化モデルB（式(2)、(4)、(6)で二重下線を施した箇所）は、別途計算された日平均地温（ θ ）と各タンクで計算される土壤水分飽和度（ $S_y/(\gamma D/2)$, S_x/h_x , S_y/h_y ）の指数関数となっている。この硝化項については、微生物活動が活発な場である表層土壌を想定した表層タンクの収支式に設け、地下水タンクには設けていない。

上部タンク

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

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

一次土壤水分タンク

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

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

二次土壤水分タンク

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

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

地下水タンク

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

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

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 ($\text{mg} \cdot \text{mm}^{-1}$), $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_i, q_k, q_g, q_h, q_j, q_l, f_b, f_g$: 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 ($^{\circ}\text{C}$), $\theta_s, \theta_x, \theta_y$: 硝化に関わる地温閾値 ($^{\circ}\text{C}$), $\gamma_s, \gamma_x, \gamma_y$: 土壤水分係数, ϕ_s, ϕ_x, ϕ_y : 硝化に関わる土壤水分飽和度閾値である。 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。なお濃度単位は、タンクモデルの特性上（流域面積を1と考える）、 $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-1}$ である。

(3) 地温の推定方法

硝化モデルBで利用する地温値（20cm程度の深さを想定）は、式(9)に示す地温モデル³⁾によって気温観測値から推定する。このモデルは谷らの地熱伝播式⁴⁾を基本にしたもので、地温の大きな年変動を再現する項と、短周期の変動を再現する自己回帰式からなる。パラメータの同定には、気温と地温の観測値が最も豊富な1993年のデータを利用し、得られたパラメータを流域変化がないものと仮定して、物質流出タンクモデルによる水質解析年に適用する。自己回帰式には当日から5日前まで、6項の気温残差を用いている。

$$\theta_g = \bar{\theta}_g + A_a \cdot \exp(-\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}i + P_a - \alpha\right) + \beta_\varepsilon \sum_{n=0}^5 \varepsilon_a(i-n \cdot \Delta T) \quad (9)$$

ここに、 θ_g : 日平均地温 ($^{\circ}\text{C}$), $\bar{\theta}_g$: 年平均地温 ($^{\circ}\text{C}$), A_a : 気温の振幅 (deg), P_a : 気温の位相 (rad), T : 周期 (1/rad), $\varepsilon_a(t)$: 気温残差 ($^{\circ}\text{C}$), α : 温度伝播率, β_ε : 残差補正係数, i : 1月1日を第1日としたときの日数 (日), n : 次数, ΔT : 計算時間単位 (1日) である。

4. 解析手順の概要

物質流出タンクモデルを用いて渓流水硝酸態窒素濃度の季節変化を再現するための手順は二段階からなる。第一段階は本研究で物質流動の基本と仮定している雨水流動の算定であり、これは観測で得られた雨量、流量などを森林水循環モデルに適用して行う。この過程で、図-1に示した雨水浸透量や雨水流出成分量などが定量的に評価されて、雨水流動パラメータが次の物質流出解析に引き渡される。

第二段階が物質流出タンクモデルを用いた物質流出解

析である。具体的には式(1)～式(8)中に設けた各パラメータ ($v_s, v_x, v_y, v_g, k_s, k_x, k_y, k_g, \alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \beta_s, \beta_x, \beta_y, \theta_s, \theta_x, \theta_y, \gamma_s, \gamma_x, \gamma_y, \phi_s, \phi_x, \phi_y$) の同定作業で、硝酸態窒素に関する土壌水濃度、樹冠通過雨濃度、渓流水濃度の観測値と、第一段階で得た雨水移流量をモデルに適用して行う。求める最適パラメータ組は、1年を通じて得られた渓流水濃度の観測値と、それに対応する時刻のモデル計算値(式(10)、計算時間間隔:60分)の誤差二乗和(式(11))が最小となるようにシンプレックス法によって探索する。

$$C_{est} = \frac{C_r \cdot q_{o1} + C_s \cdot q_{o2} + C_x \cdot q_s + C_y \cdot q_k + C_g \cdot q_g}{q_{o1} + q_{o2} + q_s + q_k + q_g} \quad (10)$$

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($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、 $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_k, q_g$: 各流出成分量($\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$)である。

$$F = \sum_{j=1}^N (C_{\text{obs},j} - C_{\text{est},j})^2 \quad (11)$$

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。

本論文では、雨量・流量、水質データの豊富な1992年の観測値($N=43$)を物質流出タンクモデルに適用して、渓流水硝酸態窒素濃度の季節変化の再現を試みる。

5. 解析結果

(1) 雨水流動の再現性

図-2(a)～(f)に1992年の観測値を物質流出タンクモデルに適用した結果を示す。まず本研究の物質流動の基礎としている雨水流動の再現性について述べる。図-2(a)と図-2(f)が、それぞれ雨水流出解析に使用した地表到達雨量と物質流出タンクモデルの基礎となっている森林水循環モデルによる流出高の計算値である。1年を通じて、洪水ピーク時には、ほぼ良好に観測値を再現しているものの、低減期におけるハイドログラフの再現性は悪く、雨水流動を表すパラメータの最適な組み合わせの決定方法に関して問題を残している。

(2) 渓流水硝酸態窒素濃度の再現性

図-2(e)に、渓流水硝酸態窒素濃度の観測値と物質流出タンクモデルによる計算値を示す。計算値については、物質流出タンクモデルAとBの両方を示してある。渓流水濃度の大部分は流量が安定した時の値であるが、9月下旬に測定した3つの値だけは洪水時前後のものである。そのためハイドログラフに対応した急激な濃度変化を示

している。図-2(b)は、土壌への入力量となる樹冠通過雨の濃度観測値である。図-2(c)は硝化モデルAで用いた日平均気温と硝化モデルBで使用した日平均地温、そして図-2(d)はモデル中の土壌水分飽和度を表したものである。

渓流水濃度の計算結果をみると、本論文で構築した物質流出タンクモデルBは、モデルAと比較して、6月以降の渓流水濃度の変化をよりの確に再現できていることが分かる。特に温度が上昇し始める梅雨期における濃度上昇の再現性が向上している。この理由として次の2つを挙げることができる。まず第一に硝化量算定式で用いた温度の違いである。モデルAでは変化幅が大きく、最高温度も高い気温を用いているが、モデルBでは、変化幅が小さく、最高温度も低い地温モデルの計算値を用いた。その結果、共に指数関数型の硝化量算定式であるが、モデルBでは温度が上昇しはじめる初夏の硝化量と十分上昇した盛夏の硝化量の双方をより正確に算定でき、良好な渓流水濃度の再現性を得た。第二の理由は、モデルBの硝化量算定式は梅雨期に増加する土壌水分飽和度をも考慮している点である。土壌中の微生物の活性度は温度だけではなく水分量にも影響されているため、モデルBの硝化量算定式は実際の現象をより正しく表現できたと考える。

流出高の変化に対する応答についても考察を加えると、硝酸態窒素は土壌表層付近に高濃度で存在するため、洪水時に急激な濃度上昇、渇水時に濃度低下を示す傾向がある。このことについても9月下旬の洪水時における短期間の急激な変化や、7月下旬の渇水時における濃度低下の様子を再現できていることから、本論文で構築した物質流出タンクモデルBは、生物学的な影響が強く現れる夏季の濃度変化だけでなく、ハイドログラフの変化に対応した濃度変化についても良好な再現性を持つと考えることができる。

しかしながら、3月～6月を中心として再現性の劣る箇所がいくつか見られる。この主な原因は物質流出タンクモデルにあるのではなく、図-2(f)から分かるように流出高計算値の誤差に拠るものと考えるのが妥当である。なぜなら、本モデルは物質流出を雨水流動とリンクさせて表現していること、そして渓流水濃度の再現性が悪い箇所がハイドログラフの再現性が悪い箇所とほぼ一致しているからである。これまで物質収支式の改良を中心として、物質流出機構のモデル化を進める手法を採ってきたが、この問題を解決するためには、森林水循環モデルで得た雨水流動パラメータを一方的に物質流出タンクモデルに受け渡す方法ではなく、物質流出タンクモデルで得た結果を森林水循環モデルにフィードバックして、繰り返し雨水流動と物質流出の算定をするような処理方法を探る必要がある。このような処理は、物質流出機構の定量評価に有益なばかりでなく、物質を雨水流出のトレーサとして使って雨水流動を検証することであるか

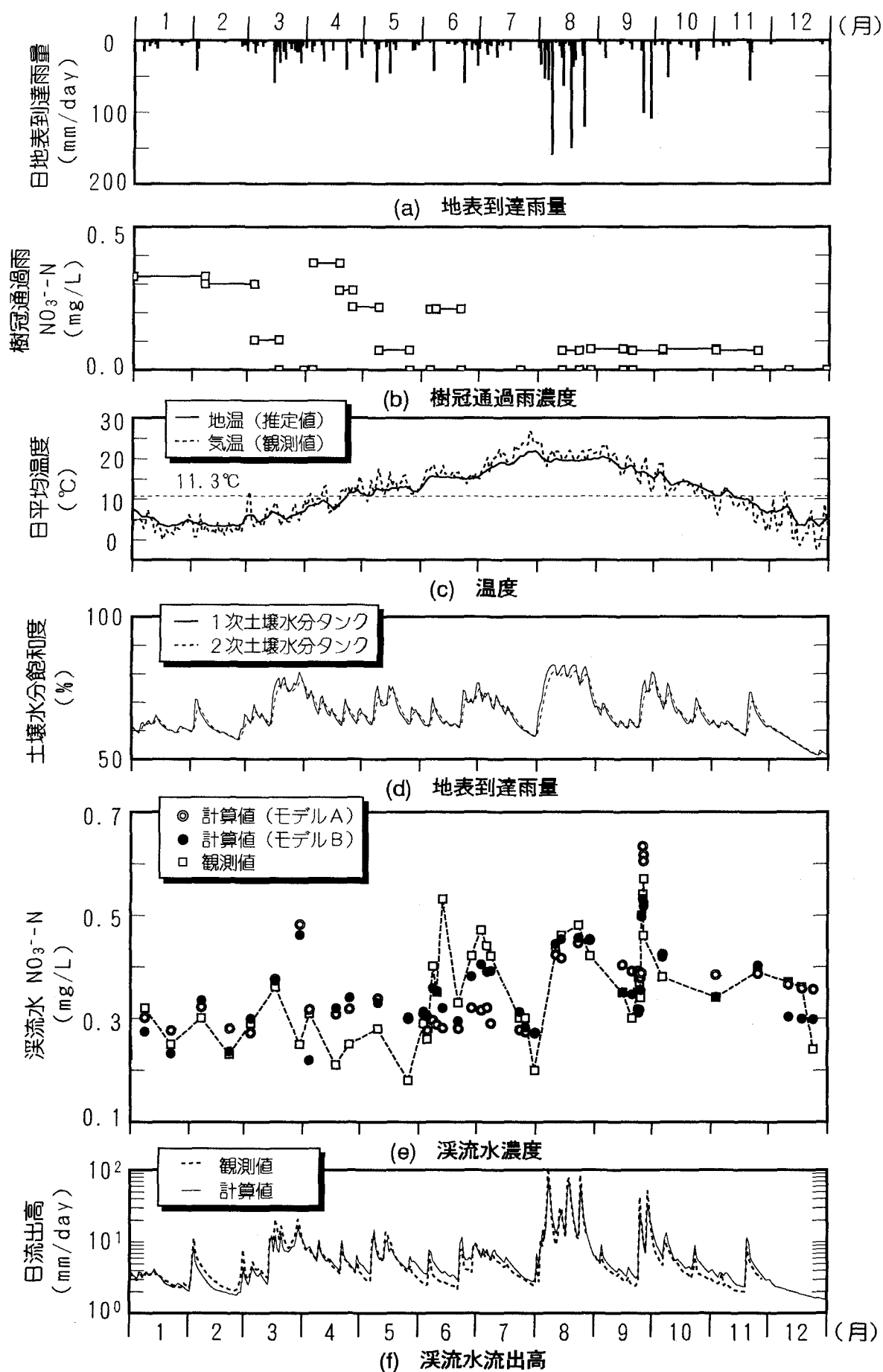


図-2 物質流出タンクモデルによる計算結果 (1992年 徳島県白川谷森林試験流域)

表-1 地温モデルのパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
A_a	9.4350	α	0.1550
P_a	-2.059	β	0.6163

表-2 物質流出タンクモデルBのパラメータと初期値

パラメータ	値	パラメータ	値
v_s	0.5000	γ_s	0.0000
v_x	0.0995	γ_x	1.0527
v_y	0.0005	γ_y	0.0026
v_g	0.0002	ϕ_s	0.0107
k_s	0.0253	ϕ_x	0.0286
k_x	0.0141	ϕ_y	0.0013
k_y	0.3202	初期値	値
k_g	0.0422	C_{sl}	0.6000
α_s	0.5452	C_{xl}	0.340
α_x	0.0151	C_{yl}	0.150
α_y	0.0001	C_{gl}	0.300
β_s	0.0053	S_{asl}	34.000
β_x	0.0023	S_{axl}	28.000
β_y	0.0023	S_{ayl}	23.000
θ_s	11.3	S_{agl}	3.000
θ_x	11.3	評価関数	
θ_y	11.3	F	0.0091

ら、今までは情報不足で不可能であった森林水循環モデルを用いて算出した表面流出量や中間流出量など成分量の検証も可能となり、結果として双方のモデルの精度向上に繋がると考える。その具体的な手法については今後の検討事項としたい。

以上、物質流出タンクモデルBは、ハイドログラフの再現性に左右されるものの、夏季の濃度上昇の再現性が良くなったこと、パラメータ同定に使用した誤差評価関数(式(11))から得られた観測値と計算値の平均誤差が9.5%程度であったことから判断すると、基本的に森林土壌からの硝酸態窒素流出機構を十分に表現しうるものだと考える。

(3) モデルパラメータ

表-1に地温モデル、表-2に物質流出タンクモデルのパラメータおよび溶存態物質と吸着態物質濃度の初期値(例えば、上部タンクの C_{sl} や S_{asl})を示す。

本論文は、一流域、しかも1年のみの観測値を用いた解析であるため、数理モデルである本モデルのパラメータについて定量的な評価を行うことはできない。ただし、パラメータを概観すると、上のタンクのパラメータ値が下のタンクのパラメータよりも大きいという傾向が、既往の研究で得られている知見、例えば土壌表層付近ほど硝酸態窒素が多く存在していること、表層土壌の硝酸態窒素ほど雨水流動に対して敏感に応答し流出すること、

そして表層土壌ほど硝化によって多くの硝酸態窒素が生産されていることなどと一致することから、妥当な値であると判断できる。

6. 終わりに

本論文では、森林流域における渓流水硝酸態窒素濃度の季節変化(夏季の濃度上昇)に大きな影響を及ぼす森林土壌中の硝化に着目して、その素過程に対して地温と土壌水分量を考慮したモデルを提案した。そして硝酸態窒素の流出過程全体をタンクモデルを基礎として表現した。このモデルを実森林流域で得られた観測値データに適用して、渓流水硝酸態窒素濃度の季節変化の再現を試みた結果、梅雨期から秋季にかけての濃度変化を良好に再現することができた。

本研究で対象としている白川谷森林試験流域における渓流水濃度の季節変化の再現や流出負荷量の算定には、このモデルで十分だと考える。しかし本研究の最終目標である「森林流域における物質循環量を定量評価できるモデル」とするためには、植生による吸収や、脱窒などの素過程のサブモデル化が必要である。更に森林伐採による水質変化などをシミュレートするには、本モデルのパラメータと実際の物理量の関係を評価する必要がある。そのために今後は他流域の観測データに本モデルを積極的に適用して研究を進めていく予定である。また、物質流出タンクモデルの基礎となっている森林水循環モデルによるハイドログラフの再現性向上も今後の大きな課題となった。

本研究の一部は平成11年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号:11750464)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, 36, pp.521-528, 1993.
- 2) 田村隆雄・吉田弘・端野道夫: 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, 水工学論文集, 42, pp.229-234, 1998.
- 3) 小西敏雄, 田村隆雄, 端野道夫: 硝化過程を考慮に入れた森林流域からの硝酸態窒素流出モデルに関する基礎的検討, 平成11年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp.98-99, 1999.
- 4) 谷誠・福島義宏・鈴木雅一: 山地小流域内の地温年変化について, 京大農学部演習林報告, 51, pp.138-151, 1979.

(1999.9.30受付)