

森林流域からの硝酸態窒素流出量の算定 に関する 3 つの溶質流出モデルの比較検討

THE EXAMINATION OF THREE MODELS ON THE ESTIMATION OF
NO₃⁻-N RUNOFF LOAD FROM A FORESTED WATERSHED

田村隆雄¹・端野道夫²・岡田和³

Takao TAMURA, Michio HASHINO and Kazu OKADA

¹正会員 博士(工学) 徳島大学助手 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²フェロー 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³学生会員 高松工業高等専門学校専攻科(〒761-8058 高松市勅使町355)

Three models were compared on simulating NO₃⁻-N stream water solute concentration and estimating annual NO₃⁻-N load from a forested watershed. These models are (1) tank-model C-Q method, (2) tank-model concentration coefficient method, and (3) solute runoff tank-model. The models based on the same rainfall runoff tank-model developed by authors, have different methods for calculating stream-water NO₃⁻-N concentration.

As a result of applying each model to the data observed in the experimental forested watershed, solute runoff tank-model was most excellent in the reproducibility of the seasonal variation of stream water solute concentration. However, the remarkable difference in calculation result of annual runoff load in each model did not appear. It was cleared that the accuracy of rainfall runoff model is the most important in calculation of runoff load from a forested watershed.

Key Words : NO₃⁻-N, C-Q method, concentration coefficient method, solute runoff tank model, stream-water concentration, runoff load

1. はじめに

森林流域の水質保全機能の定量評価, その基礎となる溶質流出負荷量の算定は, 地域の物質循環機構の解明や適切な森林管理に必要不可欠であり, それを目的としたモデルが数多く提案されてきた。モデルを大別すると, L-Q式法(例えば黒田ら¹⁾), L-Q式法を拡張した濃度係数法(例えば海老瀬ら²⁾), そして水質タンクモデル法(例えば壇野ら³⁾, 伊シャツラヒら⁴⁾)の3つに分類することができる。著者らもこれまで水質タンクモデル法に分類される「物質流出タンクモデル」^{例えは, 5), 6)}の開発を進め, 山地溪流水の溶存イオン濃度の再現と再現精度の向上を試みてきた。

実務においてまず必要とされることは, 森林からの流出負荷量の算定であり, これが必要十分な精度で得られることができるモデルが求められている。このような視点から見た場合, 「物質流出タンクモデル」を含めて, これまで提案されてきた溪流水濃度(負荷量)計算手法

を比較検討して, 濃度や負荷量の再現性の程度と要因を検討することは, 実務において適切な溶質流出計算法の選択を行う際の有益な情報となりうる。また他のモデルと比較することで「物質流出タンクモデル」の特徴や改善点の整理ができ, より実用的な特徴あるモデルにすることも可能である。

そこで本論文では, 流域生態系に大きく関わる硝酸態窒素(NO₃⁻-N)の溪流水濃度と流出負荷量の季節変化, および年間流出負荷量を以下の3つの手法により算定して比較する。第一に直列2段タンクモデル⁷⁾から計算される雨水流出量から溪流水濃度を推定する方法(タンクモデルC-Q法), 第二に直列2段タンクモデルから得られる流出成分量に濃度係数を乗じて溪流水濃度を推定する方法(タンクモデル濃度係数法), および直列2段タンクモデルで溶質収支の計算も行つて溪流水濃度を推定する方法(物質流出タンクモデル)である。溶質流出計算では前段階として雨水流出解析が必要であり, その部分を共通化することで, 溶質流出計算法の違いがもたらす再現性の差異と溶質流出計算における雨水流出モデ

ルの影響について検討する。共通の雨水流出計算法として用いる直列2段タンクモデルは物質流出タンクモデルの基礎となっている雨水流出モデルである。

2. 3つの溶質流出モデルの概要

(1) タンクモデルC-Q法

図-1に概念図を示す。基礎としている直列2段タンクモデルは、土壌表層と地下水層における雨水流動(f_b など)、植生による蒸散量(T)、および土壌から流出する各流出成分量を適切に算定できる構造となっている。なお図中の $\gamma D/2$ 、 h_x 、 h_y は土壌層厚、 s_s 、 s_x 、 s_y 、 s_g は貯留高を表している。

森林土壌中の硝酸態窒素は表層近くに多量に存在しているため、渓流水流出高の増加にともない硝酸態窒素濃度も上昇する傾向にある。したがって計算される流出高と渓流水濃度の間に式(1)のような関係を設けて渓流水濃度を推定する。係数 a 、 b は、直列2段タンクモデルで得た計算流出高と観測濃度を用いて最小二乗法により決定する。

$$C_i = a \cdot Q_i^b \quad (1)$$

ここで、 C_i ：時刻 i の渓流水濃度(mg/l)、 Q_i ：時刻 i の流出高計算値(mm/hr)、であり、 a と b は係数である。

次に各時刻の流出負荷量(L_i)は次式で計算する。

$$L_i = 10 \times C_i \cdot Q_i \quad (2)$$

ここで、 L_i ：時刻 i の流出負荷量(g/ha/hr)、 C_i ：時刻 i の渓流水濃度(mg/l)、 Q_i ：時刻 i の流出高(mm/hr)、である。

(2) タンクモデル濃度係数法

図-2に概念図を示す。森林土壌において NO_3^- -Nは鉛直方向に異なる濃度分布を示す。したがって異なる土壌層から発生する各流出成分(表面流出成分： q_o 、早い中間流出成分： q_s 、遅い中間流出成分： q_i 、地下水流出成分： q_g)の溶質濃度は互いに異なる。流出成分の構成比の経時変化が渓流水濃度の変化をもたらすと考えて、渓流水濃度を次式のように各流出成分量を重みとした濃度係数の平均値として算出する。

$$C_i = \sum_{j=1}^N (c_j \cdot q_{j,i}) / Q_i \quad (3)$$

ここで、 C_i ：時刻 i の渓流水濃度(mg/l)、 c_j ：流出成分 j の濃度係数、 $q_{j,i}$ ：時刻 i の流出成分 j の流出高(mm/hr)、 Q_i ：時刻 i の流出高(mm/hr)、 N ：流出成分の総数(個)。なお c_j は解析期間を通じて一定、 $N=4$ である。

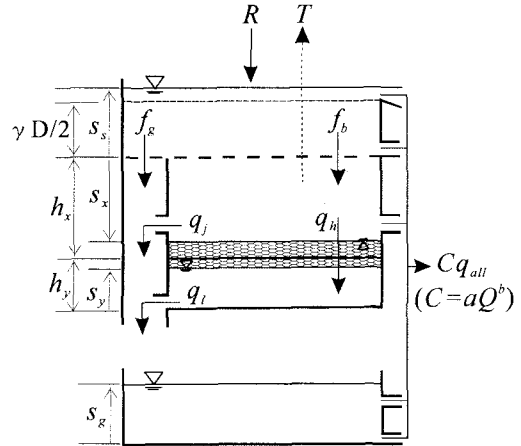


図-1 タンクモデルC-Q法

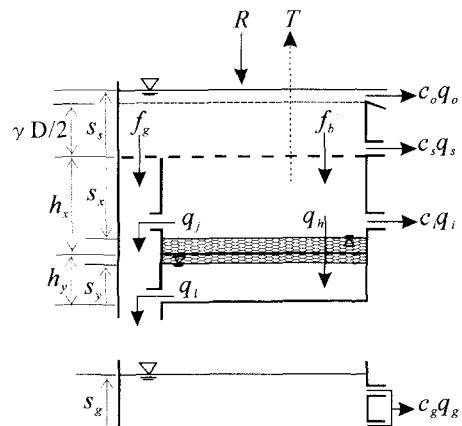


図-2 タンクモデル濃度係数法

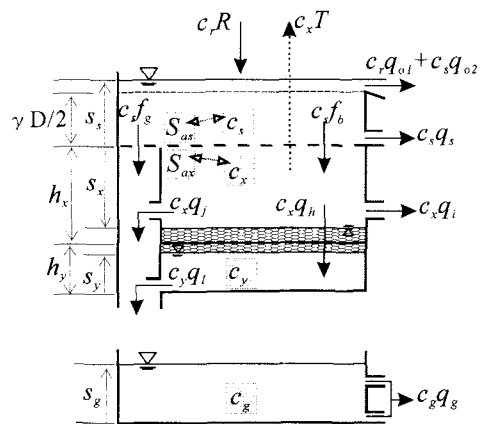


図-3 物質流出タンクモデル

濃度係数は、解析期間を通じて、観測値と計算値の誤差二乗和の総和が最小になるような組み合わせをシンプレックス法⁸⁾で決定する。

各時間の流出負荷量はタンクモデルC-Q法と同じ式(2)を用いて算出する。

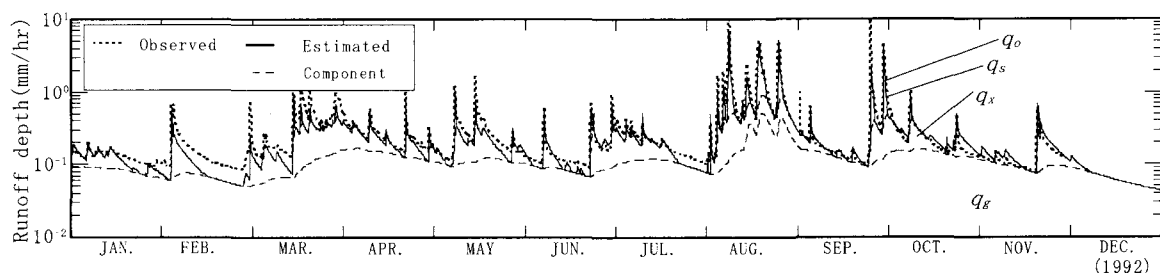


図-4 直列2段タンクモデルによるハイドログラフの再現結果

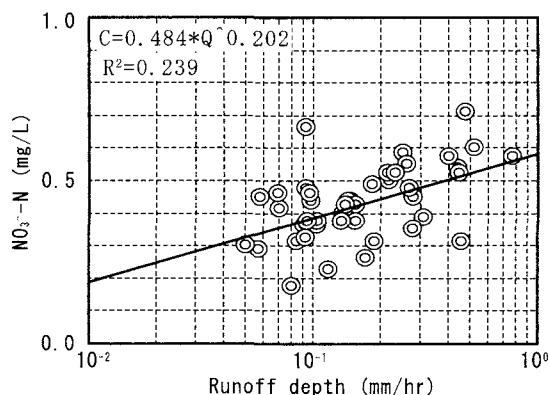


図-5 流出高計算値と硝酸態窒素濃度の相関

表-1 タンクモデル濃度係数法の濃度係数一覧

濃度係数	説明	同定値(mg/l)
c_o	表面流出成分濃度	0.15
c_s	早い中間流出成分濃度	0.62
c_i	遅い中間流出成分濃度	0.50
c_g	地下水流出成分濃度	0.21

て測定し、流量は流域末端に設けた流量堰から得られる水位データを水位－流量曲線に適用して算出している。

(2) 渓流水濃度の再現結果

a) 直列2段タンクモデルによる流出高の再現結果

図-4に直列2段タンクモデルによるハイドログラフ再現結果を示す。渓流水濃度と流出負荷量の算定の基礎となるハイドログラフの計算値は、降雪の影響が考えられる2月と渇水状態になった7月末の低水時の誤差が目立つものの、1年を通じて再現性は良好(χ^2 基準¹⁾)による評価基準値は0.0192)と考える。ただし出水時には最大で6mm/hr程度の誤差が生じている。

b) 流出高と渓流水濃度の相関

図-5に直列2段タンクモデルを用いて得た流出高と渓流水濃度観測値の相関図を示す。一般に硝酸態窒素は、土壤中の微生物活動や植生活動の影響を受けるため、同じ流出高でも渓流水濃度は夏期に高く冬季に低くなる。したがってC-Q関係は他の溶質(例えば基質起源のカルシウム)より弱くなる傾向にある。本論文で使用した白川谷の場合には、 $a=0.484$ 、 $b=0.202$ で、決定係数(R^2)は0.239であった。

c) タンクモデルC-Q法による渓流水濃度の再現結果

渓流水濃度再現結果を図-6に示す。本手法の再現精度は標準偏差で0.095mg/lであった。図を見ると、8月～9月の再現性は比較的良好であるが、1月～5月の再現性は低く、渓流水硝酸態窒素濃度の季節変化を再現できていない。式(1)により濃度を推定するため、濃度変化はハイドログラフの増減と一致するように変化する。解析期間を通じて流量低減時に低濃度、出水時に高濃度となる。後で説明する2つの方法と比較すると濃度の変動幅が大きい結果となった。

(3) 物質流出タンクモデル

図-3に概念図を示す。本モデルでは土壌内における溶質の移流過程、微生物や植生などの生物学的作用(硝化、吸収)、土粒子表面の吸着水(S_{as} 、 S_{ax} 、 S_{ag} :吸着水濃度)と土壌間隙水(c_s 、 c_x 、 c_y 、 c_g :間隙水濃度)との溶質交換過程という溶質流出に関する3つの素過程を気温や貯留高を説明変数として表現し、直列2段タンクモデル内で物質収支を計算して得られる時刻 i のタンク土壌間隙水濃度($c_{s,i}$ 、 $c_{x,i}$ 、 $c_{y,i}$ 、 $c_{g,i}$)を各流出成分の濃度とする。したがって渓流水濃度算定式は、式(3)において c_j を $c_{j,i}$ と置き換えたものとなる。流出負荷量は式(2)から算出する。

3. 対象流域と計算結果の概要

(1) 徳島県白川谷森林試験流域

解析対象流域は、徳島県白川谷森林試験流域(徳島県三好郡山城町栗山)で、四国のほぼ中央にある三傍示山(標高1140m)の東側に位置する。流域面積は23ha、標高は740～1140m、平均斜面勾配21.5度、地質は三波川帯に属し、砂質片岩と泥質片岩が互層をなしている。土壌は褐色森林土であり、植生は天然広葉樹(上流側2/5)、スギ人工樹林(下流側3/5)からなっている。解析対象年である1992年の樹齢は25～40年生である。本研究の水質データは約2週間毎の定期観測⁹⁾と9月23日～9月25日の台風性の洪水イベントにおける集中観測¹⁰⁾で得たものを用いる。なお溶質濃度はイオンクロマトグラフを用い

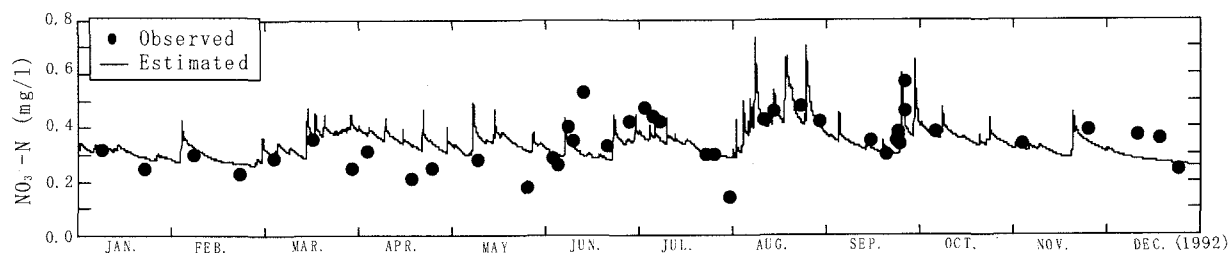


図-6 タンクモデルC-Q法による渓流水濃度の再現結果

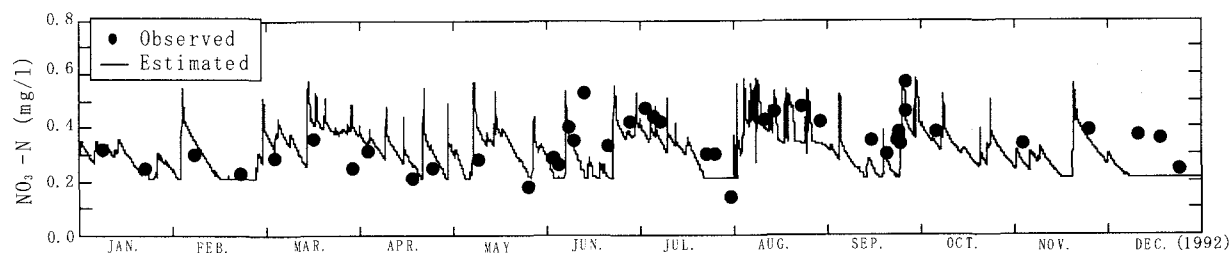


図-7 タンクモデル濃度係数法による渓流水濃度の再現結果

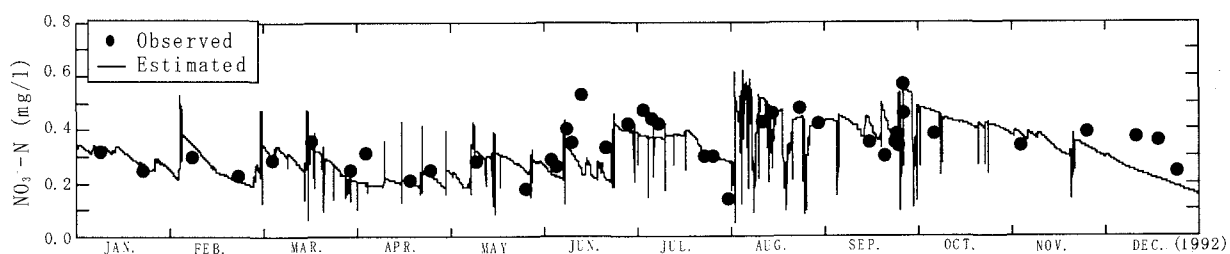


図-8 物質流出タンクモデルによる渓流水濃度の再現結果

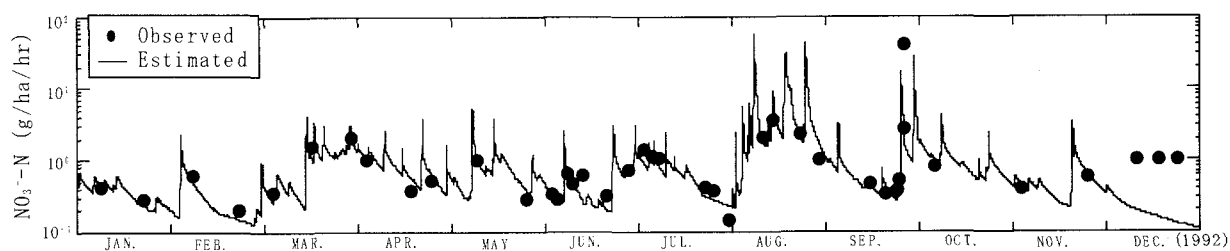


図-9 タンクモデルC-Q法による流出負荷量の再現結果

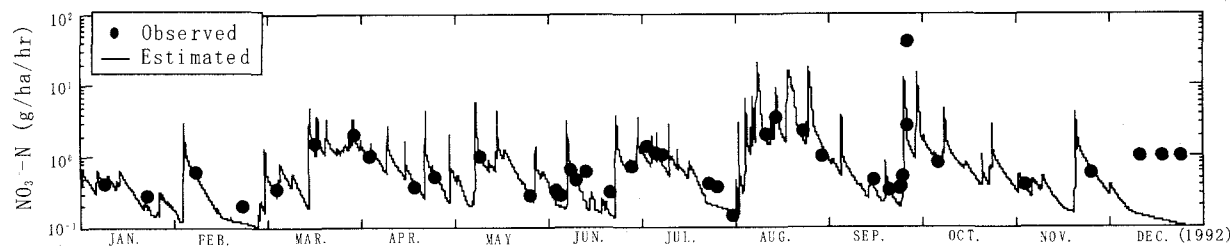


図-10 タンクモデル濃度係数法による流出負荷量の再現結果

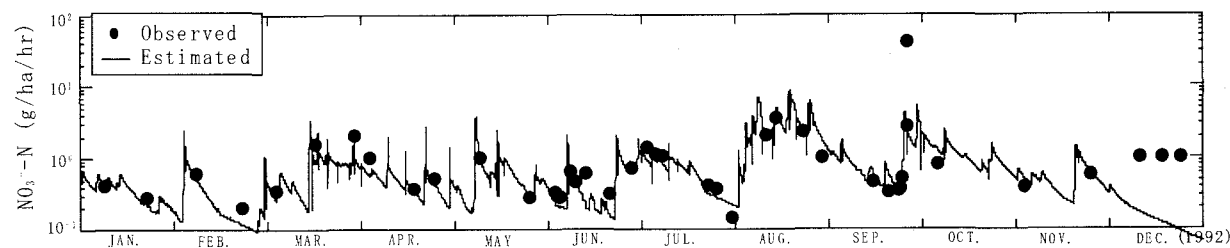


図-11 物質流出タンクモデルによる流出負荷量の再現結果

表-2 流量ピーク時 (9/25 09:00) における流出負荷量

手法の名称	流出高 (mm/hr)	濃度 (mg/l)	負荷量 (g/ha/hr)
観測値	9.2	0.45	41.4
タンクモデルC-Q法	2.8	0.60	16.6
タンクモデル濃度係数法		0.45	12.5
物質流出タンクモデル		0.10	3.0

d) タンクモデル濃度係数法による渓流水濃度の再現結果

表-1に濃度係数の一覧、図-7に渓流水濃度の再現結果を示す。本手法の再現精度は標準偏差で0.092mg/lであった。タンクモデルC-Q法と比較すると、流量低減時でも良い再現性が得られた。ただし各流出成分の濃度係数は解析期間を通じて一定としているので、渓流水が地下水流出成分のみで構成される場合には濃度が一定となる。したがって長期間にわたり渇水状態が続くような場合には、地下水流出成分の濃度がそのまま渓流水濃度となるので、7月後半の渇水時の再現性が不良である。また流出高に応じて渓流水濃度の変化を表現するという点はタンクモデルC-Q法と基本的に同じであるので、硝酸態窒素特有の大きな季節変動の再現も不可能である。

e) 物質流出タンクモデルによる渓流水濃度再現結果

図-8に渓流水濃度の再現結果を示す。本手法の再現精度は標準偏差で0.072mg/lで、最も良好な結果を得た。他の手法と最も異なる点は、6月から10月にかけて観測値に見られる緩やかな季節変化、具体的には3月から6月にかけての濃度の低下、7月から10月にかけての濃度上昇を再現できているという点であり、モデルに組み込んだ流出素過程で季節変化を表現できることが分かる。また7月末の渇水時における濃度低下や9月の集中観測で得た出水時の急激な濃度の上下変化という、雨水流出量の変化にともなって生じる短期的な渓流水濃度の変動も再現できている。

出水前後の渓流水濃度の計算値をみると6月頃を境にして、濃度形成における直接流出成分（表面流出成分、早い中間流出成分）の役割が変化している。具体的には6月くらいまでは直接流出成分が発生すると渓流水濃度は上昇する傾向にあるが、夏以降は逆に直接流出成分が発生すると渓流水濃度が減少しているの、希釈作用を持っていることが分かる。秋の出水時における表面流出成分の希釈作用は観測結果¹⁰⁾と一致するが、モデルは硝酸態窒素が多量に存在すると思われる土壌A層を通過して発生する早い中間流出成分にまで希釈作用を持たせている。初夏までの濃度上昇作用については検証する観測データがない。

f) 3つのモデルによる流出負荷量の再現結果の比較

図-9から図-11に各手法による流出負荷量の経時変化の再現結果を示す。これらを比較してみると、3月と8月から9月の出水時に差がみられるものの、平常時の流出負荷量にはほとんど差がないことが読み取れる。違いが

表-3 年間流出負荷量

手法の名称	流出負荷量 (kg/ha/year)
タンクモデルC-Q法	8.8
タンクモデル濃度係数法	7.9
物質流出タンクモデル	6.8

顕著な流量ピーク時の再現性を比較するために、9月25日09:00における観測データと各手法で求めた渓流水濃度と流出負荷量を示すと表-2のようになる。流出負荷量をみればC-Q法が最も観測値に近いが、それでも観測値の40%の負荷量しか算定できておらず十分とはいえない。物質流出タンクモデルの濃度と負荷量が小さいのは、先に触れたとおり、出水時に卓越する表面流出成分に加えて、本来濃度上昇に寄与すべき早い中間流出成分が希釈作用を果たしているからである。渓流水濃度算定の基礎となる流出高の計算値は2.8mm/hrであり、観測流出高の30%でしかなく、これが観測値との誤差を生んだ最も大きな要因であると考えられる。

表-3に年間流出量の算定結果を示す。出水時には大きな差異が生じたが、図-9から図-11の流出負荷量再現結果から分かるように、低水時の再現性では3つの手法で顕著な差が見られないために、年間流出負荷量は7kg/haから9kg/ha程度の範囲に収まり、図-5や図-6で濃度再現性の低いC-Q法でもタンクモデル係数法や物質流出タンクモデル法と大差ない結果となった。

4. 硝酸態窒素流出負荷量算定手法に関する考察

渓流水濃度と流出負荷量の経時変化、年間流出負荷量の比較を行った結果、タンクモデルC-Q法、タンクモデル濃度係数法といった比較的簡便な濃度計算手法でも、観測値のある時刻に限れば良好な渓流水濃度の再現性を得ることが可能である。しかし硝酸態窒素の特徴でもある渓流水濃度の季節変化を再現するには、森林土壌内において硝酸態窒素が受ける生物学的作用を組み込み、雨水と同じように物質についても収支計算を行う物質流出タンクモデル（水質タンクモデル法）を用いる必要があることを確認できた。このように渓流水濃度の再現性については手法によって硝酸態窒素の流出機構に関わる有意な差が現れることを認めることができた。

次に流出負荷量の再現性という点では、出水時こそ大きな違いが表れたが、低水時の再現性では大きな違いは認められなかった。年間流出量という点では白川谷森林試験流域の例では1~2kg/ha程度の違いであり、どの手法を用いても概算は可能であると考えられる。この理由として次の3つを挙げることができる。第一に本研究では直列2段タンクモデルという共通する雨水流出解析モデルの上に渓流水濃度計算手法が異なる3つの溶質流出モデルを構築して比較している。第二に表-2に記しているように負荷量について観測値と計算値の差が大きい箇所は、流出高の観測値と計算値の差も顕著である。そして第三

に渓流水濃度の変動幅と雨水流出高の変動幅を比較すると、前者はせいぜい2倍程度の変動でしかないが、後者は最大で10³倍程度の差が生じる。以上のことから、流出負荷量の再現性、および年間流出負荷量の算定にもっとも影響を与える要因は、雨水流出算定法にあることを確認することができた。

硝酸態窒素の渓流水濃度の季節変化が問題となるような場合は、水質タンクモデル法が唯一の手法であるが、流出負荷量の算定を行う場合には、物質の搬送主体となる雨水の流出計算が最も重要になるので、精度の良い雨水流出算定法を用意できるのであれば、取り扱いが容易なC-Q法、あるいは流出量から直接負荷量を算定することを目的とするL-Q法でも十分であると考え。

5. まとめ

本研究では、森林流域から発生する渓流水の硝酸態窒素濃度の再現と流出負荷量の算定を精度よく行うためのモデルの要件を検討するために、雨水流出計算法は同じであるが、渓流水濃度算定法を異にする3つのモデル（タンクモデルC-Q法、タンクモデル濃度係数法、および物質流出タンクモデル）を構築し、実森林流域で得られた長期観測データに適用して、渓流水濃度と流出負荷量の再現性について比較した。その結果、以下の2点を明らかにすることができた。

第一に渓流水濃度の再現は、物質流出タンクモデル（水質タンクモデル法）が最も優れる。特に硝酸態窒素の特徴である夏期の濃度上昇という季節変化は、土壌内の生物学的作用を考慮し、物質収支を行って逐次渓流水濃度を算出する水質タンクモデル法でなければ再現できない。

第二に流出負荷量の算定は、濃度計算手法よりも渓流水濃度算定の基礎となる雨水流出計算法が大きな影響を与える。したがって再現精度の良い雨水流出モデルを準備することができれば、簡便なモデルであるL-Q法や濃度係数法といった手法でも十分な精度で求めることが可能であると考え。

本研究では、著者らが開発してきた物質流出タンクモデルの今後の改良に関わる知見の集積も目的であったが、これについては以下の重要な指針を得ることができた。

第一は、物質流出タンクモデルの基礎としている雨水流出モデル（直列2段タンクモデル）は、現状では長期流出解析における洪水ピーク流量の再現性に問題があるので、これを向上させることである。

第二は、硝酸態窒素が多く存在していると考えられる土壌A層から発生する早い中間流出成分は一般的に硝酸態窒素濃度が高いと考えられるが、モデルで表現される早い中間流出成分は渓流水濃度を希釈する傾向にあるのでこれを改善することである。つまり森林土壌において

雨水と溶質の流動現象が最も顕著な表層土壌部のモデル構造の再検討が必要であることが分かった。

近年、山地森林から流出する栄養塩やシリカなどが下流域や沿岸域の生態系、漁業資源の維持に大きな役割を果たしており、森林整備が必要であるという話題を耳にするが、定量的な議論はまだなされていないようである。物質流出タンクモデルには雨水流出と溶質流出の算定に土壌層厚、土壌の間隙率、気温などの森林毎に異なる条件が組み込まれているので、それらの変量と硝酸態窒素の流出負荷量の関係を定量的に評価することが可能である。これはL-Q法や、流出成分濃度が一定と仮定している濃度係数法では不可能である。今後はこのような方面に基礎的な知見を提供していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 黒田久雄, 田淵俊雄: タンクモデルによる流出負荷予測モデルに関する研究, 農業土木学会大会講演要旨集, pp. 384-385, 1991.
- 2) 海老瀬潜一, 宗宮功, 平野良雄: タンクモデルを用いた降雨流出負荷量解析, 排水と用水, 21, pp. 1422-1432, 1979.
- 3) 塩野秀樹, 河原長美, 國松孝男: 森林からの汚濁物質の流出モデル化に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会Ⅱ, pp. 1084-1085, 1991.
- 4) イリシヤットラヒム, 浮田正夫, 関根雅彦, 今井剛: 森林流域におけるTN, TP, およびCODの流出機構のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, No. 601/VII-8, pp. 73-84, 1998.
- 5) 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, 39, pp. 1-6, 1995.
- 6) 田村隆雄, 端野道夫, 小西敏雄: 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, 水工学論文集, 44, pp. 1149-1154, 2000.
- 7) 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, 1992.
- 8) 小谷恒之: 非線形多変数関数の極小化, 大阪大学大型計算機センターニュース, 32, pp. 27-48, 1979.
- 9) 田村隆雄, 吉田弘, 端野道夫: 溶質流出モデルの構築に向けた徳島県白川谷森林試験流域における溶質流出特性の評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 362-370, 2002.
- 10) 吉田弘, 端野道夫, 田村隆雄, 村岡浩爾: 山地小流域での渓流水質形成機構に関する基礎的検討, 水工学論文集, 38, pp. 271-276, 1994.
- 11) 永井明博, 角屋睦: タンクモデルの最適同定法に関する基礎的検討, 京大防災研究所年報, 23, B-2, 1980.

(2004.9.30 受付)