

地質の異なる2つの山地森林流域における 大雨時の NO_3^- -N流出機構の比較検討

NO_3^- -N RUNOFF MECHANISM AT A FLOOD EVENT IN TWO MOUNTAINOUS
FORESTED BASINS WHERE GEOLOGICAL FEATURES ARE DIFFERENT

田村隆雄¹・岡部健士²・星川豪³・末永慶寛⁴・渡辺康之⁵

Takao TAMURA, Takeshi OKABE, Go HOSHIKAWA,
Yoshihiro SUENAGA and Yasuyuki WATANABE

¹正会員 博(工) 徳島大学准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 修(工) サイン技術コンサルタント株式会社 環境調査部 (〒683-0037 米子市昭和町25-1)

⁴正会員 博(工) 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町2217-20)

⁵学生会員 徳島大学 大学院先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

This study applied the solute runoff tank model to the hydrology and water quality observational data obtained from two mountainous forested basins where geological features were different in the rainfall event of the total precipitation 200mm. The Nishitani basin has sandstone and mudstone qualities, and the Nagaotani basin has the weathering granite qualities. The parameters of the model and NO_3^- -N runoff load from the basins were examined, and the following findings were obtained. (1) The difference of geological features was greatly reflected in the rainfall runoff parameters. There was a difference of the parameter in 3-5 times. (2) The difference of NO_3^- -N runoff parameter was only 5%. (3) It was estimated that NO_3^- -N runoff load almost became equal in two basins, when the same rainfall wave was given.

Key Words : NO_3^- -N, Surficial geology, forested basin, solute runoff tank model, model parameter

1. はじめに

植生, 土壌, 地質, 土地利用形態などが異なる小流域が多数混在する大規模流域の物質循環や, 流域から流出する物質量が海域生態系や水産業等に与える影響を評価するためには, 分布型流出モデルが有用である. しかし各小流域のモデルパラメータの設定や, その妥当性の検証は難しく, これまでに様々な小流域で行われた物質流出に関する研究事例が重要な情報源となる.

山地森林流域に注目すると, 各地の試験流域等で水質観測や, シミュレーションモデルを用いた渓流水質の再現, 負荷量の算定などを行った研究・報告事例が多数ある. 例えば, 著者等も徳島県白川谷試験流域を対象にした水質観測や, 数値モデルを用いた渓流水質の再現, パラメータの考察を実施してきた^(例えば1), 2).

しかしながら多くの研究は単一の小流域を対象に, 異なる気象条件下, 異なる解析手法で実施されてきた. 例えば森林域からの流出負荷量が下流域や沿岸域の水質環

境にとって大きなインパクトになりうる, 一雨降水量が100mmを超えるような大雨時の研究^(例えば1), 3)もそうである.

したがって四国の吉野川流域のように, 表層地質の差異が特徴的な複数の山地森林流域からなる大流域を対象にした分布型物質流出モデルで, モデルパラメータを具体的にどのように分布させれば良いか, というような要望に具体的に応えることは難しいと考える.

そこで著者等は, 四国阿讃山系に属する, 表層地質が異なる2つの山地森林流域を対象に, 大雨時(総雨量約200mm)の渓流水質観測を同時に実施した. そして観測資料に物質流出モデルを適用して, 両流域の雨水流量と渓流水質の再現を行うと共に, 一方の流域で観測された降雨を他方に適用した水質シミュレーション(同じ降雨条件下での水質シミュレーション)を実施し, 両流域の地質の差異がモデルパラメータに及ぼす影響や流出負荷量に及ぼす影響について考察した. 本論文では, 河川の富栄養化の原因ばかりでなく, その不足は沿岸域の養殖ノリの色落ちの原因ともなる⁴⁾と指摘されている硝酸態窒素(NO_3^- -N)を対象に議論する.

2. 対象流域と水文・水質観測の概要

本研究で対象とする2つの流域は、阿讃山系東北部に位置する、西谷流域（二級河川・馬宿川水系）と長尾谷流域（二級河川・鴨部川流域）であり、図-1に位置を、表-1に諸量を示す。両流域の直線距離は約18kmで、年間降水量はほぼ等しく、植生、土壌、平均斜面勾配等の条件も類似している。しかし表層地質については、西谷が和泉層群（砂岩勝ち頁岩の互層）であるのに対し、長尾谷は領家帯（中粒ないし粗粒花崗岩）と異なる。表層土壌は共に褐色森林土であるが、せいぜい10～20cm程度で、西谷では砂岩・泥岩質のレキが、長尾谷では風化花崗岩（マサ土）が表層土壌に混入している。

本研究で観測した大雨イベントは、2007年台風4号に伴う降雨で、7月12日から21日の観測期間10日間の総降雨量は、西谷で201mm（最大降雨強度15mm/hr）、長尾谷で203mm（最大降雨強度28mm/hr）であった。

この期間の雨量・流量データは、それぞれの両流域の直下流にある多目的ダム管理用に設けられた雨量計や水位計から1時間で得た。水質については、渓流水と樹冠通過雨の観測を行った。まず渓流水については両流域末端部の溪岸に、自動採水器（ISCO社製 3700C型ウォーターサンプラー）をそれぞれ設置して、降雨イベント開始時から終了時まで1時間間隔、降雨終了後は2時間～6時間間隔で採水した。サンプル数は西谷が105個、長尾谷が90個である。次に雨水は西谷流域内の2箇所（スギ林、コナラ・アベマキ林）の林内に大型漏斗を取り付けたポリタンクを設置して、樹冠通過雨を一降雨イベント分採水した。採取した試料水は、回収後、直ちに濾過処理をし、イオンクロマトグラフ（東亜DKK社製、ICA-2000）を用いて $\text{NO}_3\text{-N}$ 等の濃度を測定した。長尾谷では雨水水質観測を行わなかったが、両流域の位置関係、植生状態、台風性降雨という条件から判断して降雨水質に大差はないと判断した。

3. 物質流出タンクモデルの概要

(1) モデルの概要

本研究で使用した物質流出タンクモデルを図-2に示す。本モデルは、端野らが開発した地表面流分離直列2段タンクモデル³⁾（図-3）を基礎にしたもので、森林土壌で発生するいくつかの $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出素過程をサブモデルとして組み込んだものである。具体的には雨水の浸透過程と流出過程に $\text{NO}_3\text{-N}$ の移流過程、溶出交換過程（微生物によって生産され、土粒子構造に取り込まれている成分と間隙水に含まれ浸透・流出する成分との交換）をリンクさせたモデルであり、降雨によって地表に到達した $\text{NO}_3\text{-N}$ は、A層を想定した上部タンクで溶出交換作用を受け

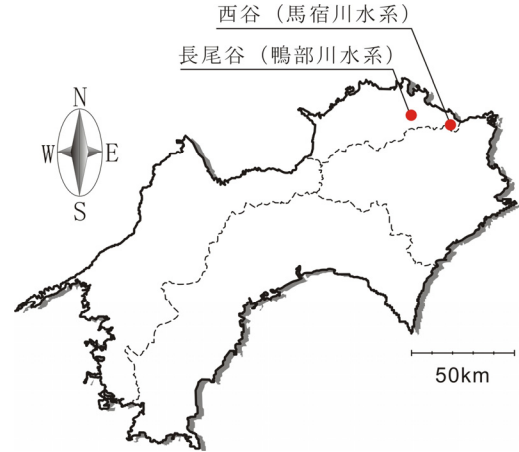


図-1 対象流域の位置

表-1 流域諸元

	西谷 (馬宿川水系)	長尾谷 (鴨部川水系)
流域面積(km ²)	2.3	4.8
平均斜面勾配	0.68 (34°)	0.63 (32°)
植生	広葉樹 40% 針葉樹 60%	広葉樹 30% 針葉樹 70%
土壌	褐色森林土	褐色森林土
地質	砂岩勝ち頁岩互層	粗粒・中粒花崗岩
年間降水量	1200mm	1150mm

つつ浸透降下し、最終的に地表面流出成分、早い中間流出成分、遅い中間流出成分、および地下水流出成分の4つの流出成分に含まれて流出すると仮定している。なお $\text{NO}_3\text{-N}$ は有機物由来の物質であることを考慮して、溶出交換過程は最上層の上部タンクのみに組み込んでいる。

物質流出タンクモデルは土壌中の微生物活動や植生の吸収を表現するサブモデルも有した構造になっている⁹⁾が、短期の大雨イベントでは、移流量や溶出交換量と比較して微小であると考えられることや、検証材料がないことから、今回の解析ではモデルから外している。

雨水の収支式やパラメータは、参考文献5), 7)を参照されたい。以下に短期洪水イベントを対象とした $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出タンクモデルの物質収支式を示す。検討する物質流出に関わる主なパラメータは、溶質交換強度係数 ν_s 、各タンクの可動態物質濃度の初期値 C_{sini} 、 C_{xini} 、 C_{gini} 、非可動態濃度の初期値 S_{asini} の5つである。

(2) 上部タンク（A層）の物質収支式

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

$$\frac{d\{S_{as}(1-\gamma)D\}}{dt} = -(S_{as} - C_s) S_s^{\nu_s} \quad (2)$$

$$q_{o2} = q_o \cdot \omega \quad (0 \leq \omega \leq 1) \quad (3)$$

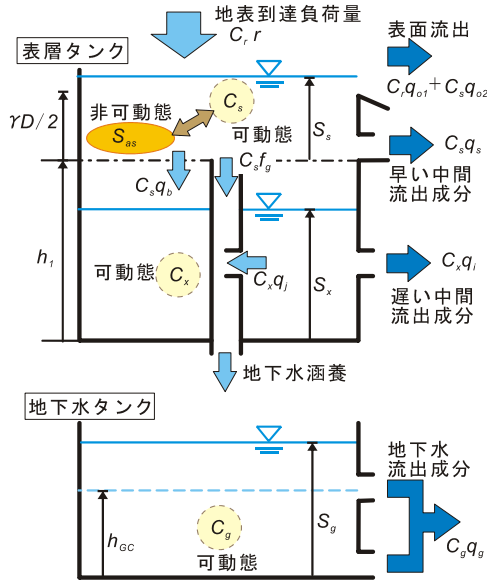


図-2 物質流出タンクモデル
(短期洪水イベントの硝酸態窒素流出モデル)

ここで、 C_s :上部タンク可動態濃度、 S_{as} :上部タンク非可動態濃度、 C_r :降雨中の物質濃度、 S_s :上部タンクの貯留水深、 r :雨量、 q_{o1} 、 q_{o2} 、 q_s 、 f_b 、 f_g :上部タンクから発生する浸透・流出成分量、 v_s :溶質交換強度、 ω :表面流出量 q_o のうち、比較的表層土壌との接触時間が長い成分量 q_{o2} の割合、 γ :表層土壌の間隙率、 D :表層土壌厚さである。

(3) 土壌水分タンク（B、C層）の物質収支式

$$\frac{d(C_x S_x)}{dt} = C_s f_b - C_x (q_i + q_j) \quad (4)$$

ここで、 C_x :土壌水分タンク可動態濃度、 C_s :上部タンク可動態濃度、 S_x :土壌水分タンク貯留水深、 f_b :上部タンクからの浸透量、 q_i 、 q_j :土壌水分タンクから発生する浸透・流出成分量である。

(4) 地下水タンク（地下水層）の物質収支式

$$\frac{d(C_g S_g)}{dt} = C_s f_g + C_x q_j - C_g q_g \quad (5)$$

ここで、 C_g :地下水タンク可動態濃度、 C_s :上部タンク可動態濃度、 C_x :土壌水分タンク可動態濃度、 S_g :地下水タンク貯留水深、 f_g :上部タンクからの涵養量、 q_j :土壌水分タンクからの涵養量、 q_g :地下水タンクから発生する流出成分量である。

4. 物質流出タンクモデルを用いた計算と結果

(1) 雨水流量・溪流 NO_3^- -N濃度の再現および降雨波形を入れ替えたシミュレーションの概要

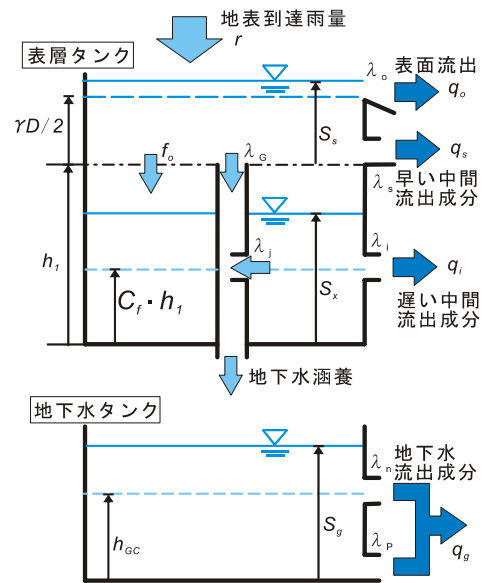


図-3 地表面流分離直列2段タンクモデル

水質観測期間は2007年台風4号が近づいた7月13日から7月21日にかけての9日間であるが、台風に刺激された梅雨前線による先行降雨が7月12日に観測されていたので、雨水・物質流出解析は7月12日から21日の10日間とした。計算時間間隔は1時間である。

再現計算の手順は以下のようである。まず観測雨量に降雨遮断モデル⁷⁾を適用して地表面到達雨量を求め、物質流出タンクモデルに入力して、観測流量ハイドログラフを再現できるように雨水流動に関わるパラメータ同定を行う。この際のパラメータ最適化はシンプレックス法を用い、誤差評価基準としては χ^2 基準⁸⁾を用いる。

次に水質観測データを用いて、各流域の渓流水 NO_3^- -N濃度を再現できるような物質流出に関わるパラメータ組を観測濃度と計算濃度の絶対誤差二乗和が最小になるように探索する。

モデルに入力する降雨濃度は、西谷で観測した広葉樹林の樹冠通過雨濃度(0.497mg/L)と針葉樹林の樹冠通過雨濃度(0.489mg/L)に各流域の広葉樹面積率と針葉樹面積率を重みとした平均値をそれぞれに与えた。なおイベント中の林外雨濃度は0.362mg/Lで、樹冠を通過することで濃度は約1.4倍になる。

次にシミュレーションについて述べると、両流域は総降水量こそほぼ同じであるが、最大降雨強度には約2倍の開きがあり、これが両流域の雨水・物質流出量に大きな影響を及ぼしていることが考えられる。そこで各流域のモデルパラメータを決定した後、互いの降雨波形を交換して、雨水流量と渓流水 NO_3^- -N濃度のシミュレーションを行って、同一降雨波形のもとで雨水流量と NO_3^- -N流出量の検討を行った。

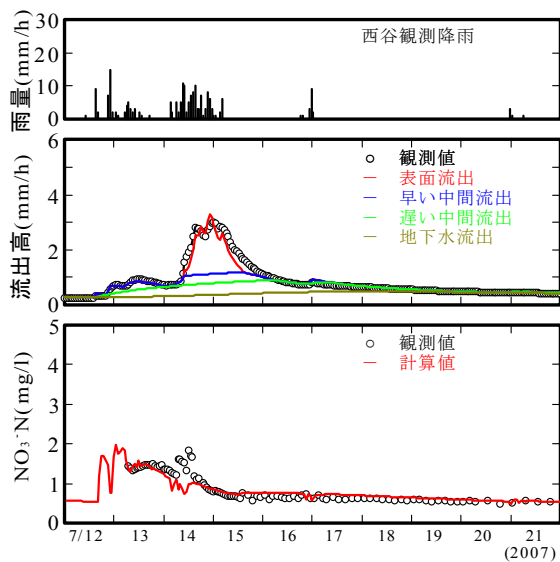


図-4 再現結果（西谷モデル）

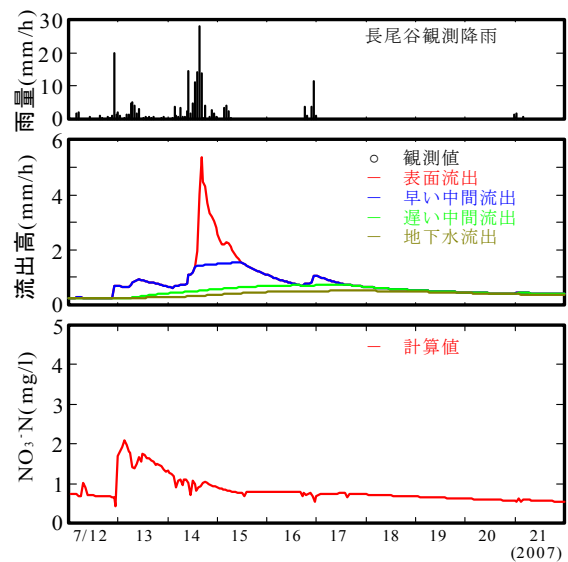


図-5 シミュレーション結果（西谷モデル）
（長尾谷降雨波形を与えた場合）

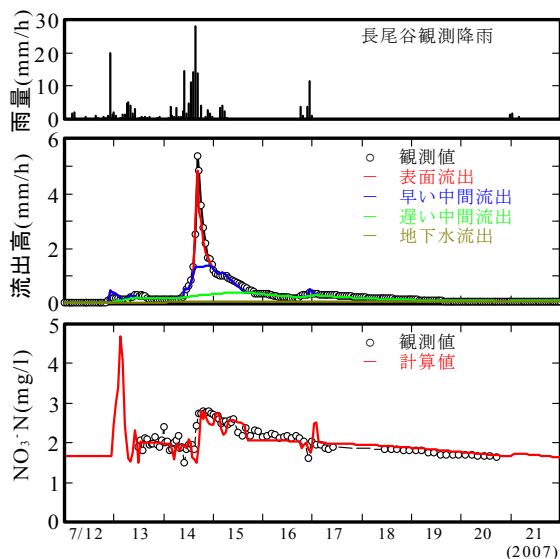


図-6 再現結果（長尾谷モデル）

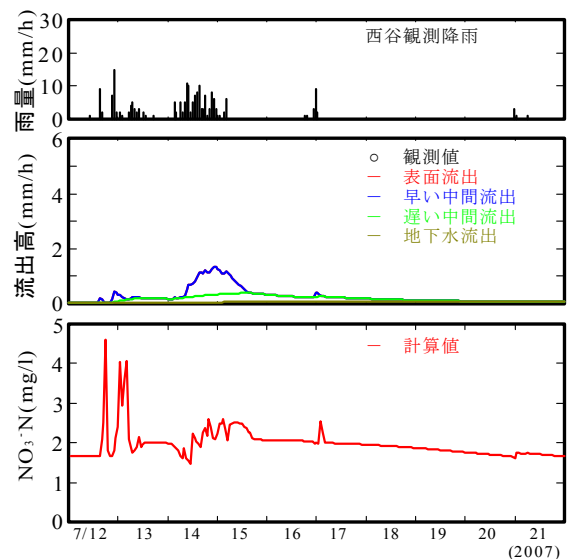


図-7 シミュレーション結果（長尾谷モデル）
（西谷降雨波形を与えた場合）

(2)再現結果とシミュレーションの検討

図-4と図-6は、それぞれ西谷と長尾谷の観測期間中の流出成分量の推定結果、ならびに渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 観測濃度の再現結果である。これらを見ると、西谷において表面流出成分が発生したと考えられる直後の一時的な $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇（図-4の7月14日正午頃）については再現できなかったものの、それ以外の雨水流量や渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の再現性は良好である。これより同定パラメータはそれぞれの流域の雨水流出、物質流出特性を表現できるものであり、流出成分の分離も妥当であると判断して議論する。

図-5と図-7は互いの降雨波形を入れ替えた場合のシミュレーション結果である。例えば図-5は西谷を表現した物質流出タンクモデル（パラメータ）に長尾谷で観測された降雨波形を入力したものである。降雨波形を入れ

替えると雨水流出量は大きく変化するものの、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に大きな変化は生じないと推定された。具体的に雨水流出量について検討すると、長尾谷モデルに西谷の降雨波形を適用した場合（図-7）には、モデル上、表面流出成分が発生しない。西谷モデルに長尾谷降雨波形を適用した場合（図-5）では、ピーク流出量は長尾谷と同程度であるが、表面流出の継続時間が約2倍になり、早い中間流出も加えた直接流出量が増加すると推定された。これらのモデル計算から、降雨波形、特に最大降雨強度の違いが雨水流出量の変化をもたらしていると考えられる。

次に渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度について検討する。例えば長尾谷モデルに西谷降雨波形を適用した場合（図-7）と図-4の西谷再現結果とを比べると、台風本体通過時（7月14日～15日）の渓流水濃度の増減幅は若干であるが長尾谷の方が小さくなると推定された。興味深いのは、例えば

表-2 雨水流出と物質流出に関わる主な同定パラメータ

記号	説明	西谷（砂岩勝ち泥岩互層）	長尾谷（花崗岩質）
νD	表層の貯留層厚(mm)	76.8	79.6
h_1	土壌水分飽和容量(mm)	80.75	50.75
$C_{f\ ini}$	土壌水分飽和度の初期値	0.45	0.44
C_f	圃場容水量に相当する土壌水分飽和度	0.48	0.47
f^*	$S_x/h_1 = C_f$ のときの f の値(mm/hr)	0.68	3.23
λ_G	上部タンクからの地下水補給低減係数(hr)	0.0100	0.0001
λ_j	土壌水分タンクからの地下水補給低減係数(hr)	0.0279	0.0163
λ_o	斜面粗度に関する定数	0.0002	0.0498
λ_s	早い中間流出低減係数(hr)	0.0237	0.0260
λ_t	遅い中間流出低減係数(hr)	0.0159	0.0109
λ_n	不被圧地下水流出低減係数(hr)	0.0026	0.0101
λ_p	被圧地下水流出低減係数(hr)	0.0080	0.0061
$C_{s\ ini}$	上部タンク可動態濃度初期値(mg/mm)	6.008	12.061
$S_{as\ ini}$	上部タンク非可動態濃度初期値(mg/mm)	23.462	21.423
$C_{x\ ini}$	土壌水分タンク可動態濃度初期値(mg/mm)	3.542	10.141
$C_{g\ ini}$	地下水タンク可動態濃度初期値(mg/mm)	3.267	7.426
ν_s	上部タンク溶質交換強度係数	0.839	0.801
ω	土壌との接触時間が長い表面流出成分の割合	0.600	0.600
Cr	降雨中の溶質濃度(mg/mm)	0.492	0.491

表-3 各流域の雨水流出量、流出負荷量等の計算結果

項目	西谷	長尾谷
観測降雨量(mm)	196	202
雨水流出量(mm)	165.6	73.9
雨水流出率	0.845	0.365
渓流水 NO_3^- -N平均濃度(mg/L)	0.856	2.033
NO_3^- -N流出負荷量(kg/km ²)	130.0	162.6

図-6と図-5を比較した場合、西谷の渓流水 NO_3^- -N濃度は、流量がピークに達する以前に最大となり、以後は減少すると推定された点である。これは後述するように西谷の雨水流出率が長尾谷より大きいことが原因と考えられ、土壌中の NO_3^- -Nが速やかに流出してしまうためと考えることができる。

(3)同定パラメータの比較検討

表-2に雨水流出と NO_3^- -N流出に関わる主な同定パラメータを示す。雨水流出に関わるパラメータでは、表層土壌の有効層厚 $\nu D/2$ や土壌水分飽和容量 h_1 、土壌水分飽和度 C_f は、ほぼ同じ値であるが、例えば、上部タンクから土壌水分タンクへの浸透量 f^* は長尾谷の方が5倍程度大きいなど、西谷と長尾谷の表層地質の差異がパラメータの差異となって現れたと考えられる。

表-4 降雨波形を入れ替えた場合の各流域の雨水流出量、流出負荷量等のシミュレーション結果

項目	西谷	長尾谷
降雨量(mm)	202 長尾谷降雨波形	196 西谷降雨波形
雨水流出量(mm)	177.6	60.0
雨水流出率	0.878	0.306
渓流水 NO_3^- -N平均濃度(mg/L)	0.875	2.046
NO_3^- -N流出負荷量(kg/km ²)	159.8	129.3

次に NO_3^- -N流出に関わるパラメータについて検討すると、両流域の渓流水 NO_3^- -N濃度レベルの差を反映して、可動態の濃度初期値は、どのタンクの成分も長尾谷の方が2倍から3倍大きくなった。非可動態から可動態への溶出に関わる溶質交換強度 ν_s は、西谷の方が5%大きくなったにすぎない。可動態濃度や非可動態濃度の初期値（例えば $C_{s\ ini}$ 、 $C_{x\ ini}$ ）については、降雨イベント前の気象条件や生物活性度などの影響を強く受けていると考えられるため、今回使用したモデルや、今回の事例だけを元に厳密な議論はできないが、上部タンクから地下水タンクの可動態濃度の勾配から土壌鉛直方向の NO_3^- -N分布状態を推察すると、西谷の NO_3^- -Nは、長尾谷と比較して、より土壌の表層部分に集中している可能性がある。

(4) 雨水流出量、流出率、流出負荷量の比較検討

表-3と表-4に示した諸量は、最初の降雨が観測された7月12日08:00から、モデル計算で推定された遅い中間流出成分が両流域共に消失する7月19日23:00までの183時間の値である。まず、両流域で実際に観測された降雨波形を元にした計算結果(表-3)を比較してみると、西谷の雨水流出量は長尾谷のそれより2.3倍(流出率で2.5倍)大きいものの、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値は長尾谷の方が2.4倍大きいので、 1km^2 あたりの流出負荷量は、長尾谷の方が1.2倍程度大きいことが分かる。

次に両流域に長尾谷で観測された降雨波形を適用した結果(表-3の長尾谷と表-4の西谷)を比較すると、雨水流出量は西谷が長尾谷の2.4倍となるが、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値は逆に長尾谷が2.3倍大きいので、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量はほぼ同じになる。これは両流域に西谷で観測された降雨波形を適用した結果(表-3の西谷と表-4の長尾谷)を比較した場合でも同じである。本論文で比較対象とした西谷と長尾谷は、雨水流出率の大小関係と渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の大小関係が綺麗に逆転していたため、同じ降雨波形を与えた場合の洪水期間の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量はほぼ等しくなるという結果を得た。

5. まとめ

本論文では、阿讃山系に位置する表層地質の異なる2つの山地森林流域、西谷流域(砂岩勝ち泥岩互層)と長尾谷流域(粗粒および中粒花崗岩)を対象に、大雨イベントにおける同時水質観測を行った。そして $\text{NO}_3\text{-N}$ の移流過程と溶出交換過程を組み込んだ物質流出タンクモデルを適用し、表層地質の差異が大雨時の雨水流出と $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出に与える影響について検討した。その結果、次のような知見を得ることができた。

- (1) 雨水流出機構について、物質流出タンクモデルの浸透強度や流出成分の低減に関わる係数は大きく異なった。例えば土壌水分タンクが飽和した場合の上部タンクから土壌水分タンクへの浸透強度 f^* は、長尾谷の方が、西谷より5倍大きく見積もられた。これより表層地質の差異は雨水流出機構に大きな影響を及ぼすと考えられる。
- (2) $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出機構について、物質流出タンクモデルに設けた表層タンクの溶出交換強度係数 ν_s は5%程度の違いにとどまった。このことから西谷と長尾谷の表層地質の差異は、物質流出に関わるモデルパラメータには、雨水流出に関わるモデルパラメータほど大きく現れないと考える。また可動態物質濃度($C_{s\text{ ini}}$, $C_{x\text{ ini}}$ など)の検討から、西谷の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、長尾谷と比較して、より土壌表層部に集中して存在している可能性が示唆された。

- (3) 今回の観測では、長尾谷では流量増加にともなう渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も増加したが、西谷では雨水流出量がピークに達する遙か以前に濃度が減少した。この違いをもたらした最も大きな要因は、両者の雨水流出率の差であると考えられる。西谷の流出率は長尾谷より2.5倍も大きく、大雨によって土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ も速やかに流出したと考えられる。

- (4) 西谷と長尾谷の大雨イベントにおける $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量はほぼ等しくなると見積もられた。これは、雨水流出率は西谷の方が2.5倍程度高いが、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は長尾谷の方が逆に2.4倍程度高いためである。降雨波形が同じで、平常の渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度レベルが同じである場合には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量は、雨水流出率の高い砂岩・泥岩の互層からなる西谷の方が大きくなるのが容易に推察される。

今後は両流域で土壌鉛直方向の濃度分布の観測なども行って資料を蓄積し、土壌中の微生物活動や、前降雨イベントの影響なども考慮した物質流出機構の詳細な考察、モデルパラメータの検証等を行いたい。

謝辞 貴重な水文観測資料の提供を頂いた香川県長尾土木事務所の関係各位に心よりお礼申し上げます。また本研究は、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号18360238:代表 端野道夫)の研究助成を受けました。

参考文献

- 1) 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過程に関する基礎的検討, 水工学論文集, 38, pp.271-276, 1994.
- 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理モデル化に関する基礎的検討, 水工学論文集, 39, pp.1-6, 1995.
- 3) 篠宮佳樹, 山田毅, 吉永秀一郎, 鳥居厚志: 四万十源流部の森林における渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変動, 水文・水資源学会誌, Vol.19, No.1, pp.55-60, 2006.
- 4) 星野高士, 松岡聡, 末永慶寛ら: 数値モデルを用いた備瀬瀬戸東部海域のノリ色落ちに関する研究, Eco-Engineering, Vol.18, No.4, pp.173-180, 2006.
- 5) 端野道夫, 田村隆雄, 田淵昌之, 富士川洋一: 森林流域における遮断蒸発・蒸散量と流域地中保水量の分離・評価法, 水工学論文集, 48, pp.31-36, 2004.
- 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, 市原秀樹: 降雨遮断およびSPACを考慮したタンクモデルによる長期流出解析, 水工学論文集, 35, pp.93-98, 1991.
- 8) 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, 京都大学防災研究所年次報告書, 23, B-2, 1980.

(2008.9.30受付)