

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

イリシャット ラヒム¹・浮田正夫²・関根雅彦³・今井 剛⁴

¹学生員 工修 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

³正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

⁴正会員 工博 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

森林流域の植生, 土壌特性, 物質循環等を考慮し, TN, TP および COD_{Mn} (JIS による)の流出モデルを構築した。構築したモデルは植物体の窒素・リンの吸収や成長に伴う固定, リターフォールや林内雨・樹幹流による林床への還元といった森林内の物質循環特性およびリター, 土壌有機物質の分解等を取り入れることにより, 流域内の物質循環を反映させた。リターフォール速度, 呼吸速度を季節によって変化させ, 調査を実施した 3 つの森林流域において, 構築したモデルを用いて流出水質の長期解析を行った。その結果 COD, TN, TP 濃度では計算値と実測値の間の相関係数が 0.72~0.91 となり, シミュレーション結果は実測値を再現することができた。

Key Words: forest basin, water quality, COD, TN, TP, runoff system, litter fall, modeling

1. はじめに

森林流出水の水質特性を明らかにすることは, 森林における物質循環, 地力維持や林業政策を考える上で重要である。森林からの汚濁負荷発生量は農地, 市街地等他の土地利用からのものと比べて小さいが, 土地の被覆, 樹木の種類等によって変化するといわれている^{1), 2)}。また, 森林流域からの流出水質はそれぞれの物質固有の循環特性に強く依存しているが, 安定した生態系を完成するのにきわめて長い時間を必要とする森林の性質からみて, 短期間に物質循環特性やその循環量を調査することは難しいとされている。それゆえに, 比較的短時間で調査が可能な森林流域での降水や渓流水の水質等の物質流出機構の解明についての研究が行われてきた^{3), 4), 5)}。例えば, 平田・村岡ら⁶⁾は森林生態系における物質循環を森林土壌に含まれる物質質量とその鉛直分布の違いをもって評価し, 土壌水質の起源や土壌水の流出が渓流水質に及ぼす影響について報告している。また, 河川の汚濁物質流出モデルとしては, 流量と負荷量・水質の関係に注目した回帰式モデル^{7), 8), 9)}, 限界掃流量を取り入れたタンクモデル¹⁰⁾, 汚濁物質の流出, 流下機構を考慮した堆積掃流モデル^{11), 12)}, 流達率や流域での物質収支を

ある程度考慮したポルトグラフシミュレーションモデル^{13), 14)}等が挙げられる。回帰式モデルは流量と負荷量や濃度の関係を指数式で関連づけた統計モデルであり, 汚濁物質の収支を考慮した構造モデルではない。タンクモデルや堆積掃流モデルは流域内の地表の堆積物や土層の供給物の負荷を考慮したものであるため, 土壌地下水経由負荷の流出の表現が十分とはいえない。ポルトグラフシミュレーションモデルは地表面の掃流, 地中への浸透, 土壌内での蓄積, 溶脱および堆積物, 蓄積物の生産・分解を考慮したものであるが, 流域特性, 流域内の物質循環, 特に森林が流出水に与える影響についての考慮がなされていない。最近, 吉田ら¹⁵⁾は森林土壌内における物質移動を雨水流出にリンクすることで物質流出タンクモデルの基本構造を検討した。しかし, このモデルは季節変化, 栄養塩類流出や生物・化学的作用等を考慮していない。森林生態系では水分や養分が植物や土壌等を介して常に循環しており, 降雨から森林生態系を経て溪流に流出するまでの間に, 水はさまざまな生物的・化学的作用を受けて量・質ともに大きく変化する。したがって, 流域管理を行う上で一般的に通用し, 精度の高い, 森林流域における物質循環, 季節変化を考慮した長期予測モデルが必要となる。

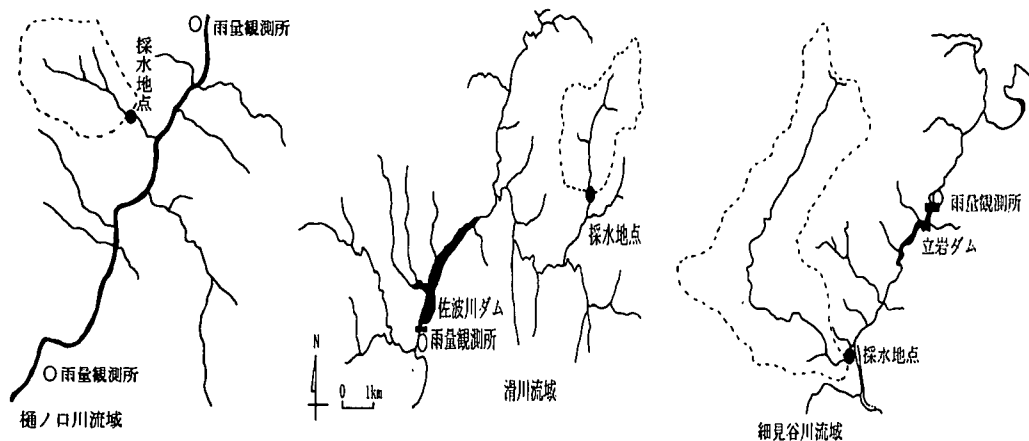


図-1 調査流域および採水地点

表-1 調査流域の面積および樹種割合

調査流域名	流域面積 (km ²)	人工林樹種割合 (%)			天然林樹種割合 (%)			その他 (%)
		スギ・ヒノキ・サワラ	マツ	マツ・スギ	ブナ・ミズナラ	コナラ	ザツ	
樋ノ口川流域	4.8	3.0	13.6	52.4	0.0	0.0	30.8	0.2
滑川流域	4.8	71.5	17.9	1.6	3.2	2.1	0.0	3.7
細見谷川流域	17.3	29.0	0.9	15.6	52.5	2.0	0.0	0.0

表-2 調査流域の主な地質および土壌の種類

調査流域名	主な地質	主な土壌
樋ノ口川流域	花崗岩	褐色森林土壌 (Ba, Bd)
滑川流域	流紋岩	褐色森林土壌 (Ba, Bb, Bd)
細見谷川流域	泥質岩・流紋岩・斑岩	褐色森林土壌 (Bd)

そこで、本研究はこれまでになされた研究を踏まえて、植物によるの窒素・リンの吸収や成長に伴う固定、リターフォールや林内雨・樹幹流による林床への還元等といった森林内の物質循環特性およびリター、土壌有機物質分解等に重点をおき、森林内の物質循環と植生・土壌の種類を考慮したモデルを構築し、森林河川水質の長期解析を行った。なお、モデルの妥当性を評価するための比較データを得るために、広島県および山口県内の3つの森林流域内において調査を行った。

2. 調査方法

(1) 調査流域

調査対象とした流域は山口県内の佐波川支流の樋ノ口川流域、滑川流域および広島県吉和村立野の太田川上

流の細見谷川流域の3流域である。流域図と採水地点を図-1に示す。調査流域の面積は2万5千分の1の地形図上で各流域界を定め、プランメータにより各流域の面積を測定した。各流域の概況について植生は各県林務課の資料および5万分の1の植生図より集計・整理し、地質と土壌については5万分の1の表層地質図および土壌図により整理した。各調査流域面積と植生を表-1に、流域内の主な土壌種類を表-2に示す。

各流域の植生特徴は樋ノ口川流域では自然二次マツ林が52.4%、滑川流域ではスギ、ヒノキ人工林が71.5%、細見谷川流域ではブナ・ミズナラ自然林が52.5%を占めていた。

(2) 調査期間

調査期間は、樋ノ口川流域、滑川流域においては1994年5月から1995年4月まで、無降雨日に月1回の調査

表-3 調査流域のリター物質現存量およびその養分量

流域	データ数	リター現存量乾重 g/m ²	IL %	TOC mg/g·dry	TN mg/g·dry	TP mg/g·dry
樋ノ口川流域	6	763.1	92.2	397.7	12.2	0.45
滑川流域	4	716.5	90.0	370.1	8.2	0.53
細見谷川流域	1	994.8	92.0	420.9	10.8	0.41

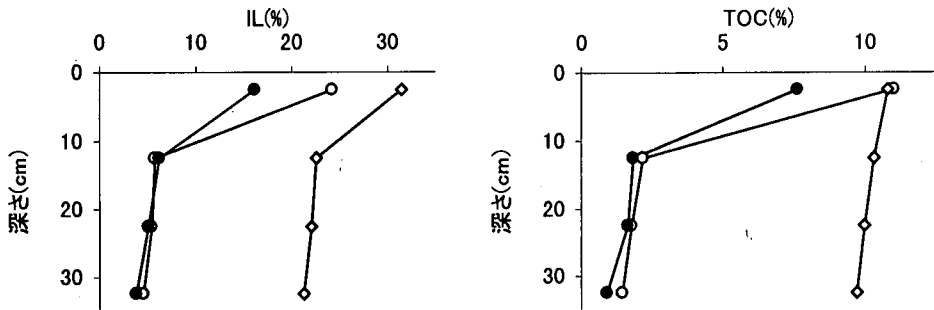


図-2 調査流域土壌のILおよびTOCの鉛直分布 〇—樋ノ口川流域 ●—滑川流域 ◇—細見谷川流域

を行った。1995年5月から1996年4月に上記2流域に細見谷川流域を加えた3流域で、月1回無降雨日の調査、さらに降雨日の調査も各流域2~3回実施した。また、各流域のリターと森林土壌の現存物質量を調べるために、1997年1月9日樋ノ口川、滑川、細見谷川の3流域でリター12地点、土壌8地点でそれぞれ調査を行った。

(3) 調査方法

調査方法はポリビンによる直接採水で、同時に川幅・水深・流速およびpHを測定した。水質分析項目はTOC、COD_{Mn}(JISによる、以下COD)、NO₃-N、NH₄-N、TN、TP等18項目である⁶⁾。

リターについては、流域内で樹種が混在しているので、上流から下流まで流域内の樹種や斜面の傾斜等の違いを考慮しつつ調査を行った。樋ノ口川流域では松林、広葉樹林、混交林の林床で6カ所、滑川流域ではスギ林と混交林の林床で4カ所、細見谷川流域ではブナ林の林床で1カ所のそれぞれ50cm×50cm枠内のリターを採取した。

森林流域の土壌中の物質現存量を調べるため、各流域の土壌種類と樹種の違いを考慮しながら、リター調査と同時に森林土壌調査を実施した。調査は樋ノ口川流域で5カ所、滑川流域で2カ所、細見谷川流域で1カ所で行い、土壌表面、10~15cm、20~25cmおよび30~35cmの森林土壌を採取した。

3. 調査流域におけるTN、TPと有機物の現存量および渓流水の水質特性

(1) 調査流域のリター現存物質量

採取したリターを80°Cで24時間乾燥した後の乾重を求め、次に乾燥したリターを粉碎し、均一に混合した後TOC、TNはC-Nコーダー(SUMITOMO GRAPH CN-80)で、TPはケルダール法で分解して、アスコルビン酸還元後モリブデン青法により分析した。各地点の平均リター乾重、TOC、TN、TPと強熱減量(IL)の値を表-3に示す。

(2) 調査流域の土壌特性とTN、TPおよび有機物現存物質量

土壌採取地点とその周辺のA₀層は樋ノ口川流域では7~10cm、滑川流域では6~7cm、細見谷川流域では9cm程度であった。また、樋ノ口川流域の5点および滑川流域の2点の表層土壌では小石が混ざった黒味を帯びた褐色森林土壌で、樹木の毛根が多く、両流域の7地点ともに15cm深さ程度から色調が黄色に変化し始め、25cm程度の深さで完全に黄色となり、小石、砂混じりの土壌となった。以上のことから地表面から25cm深さのところまでがA層、それ以下がB層であったと考えられる。細見谷川流域は褐色森林土壌で、表層の30cm深さまで樹木の毛根が多く、30cm以下も小石混じりの黒色土壌であった。よってこの流域の土壌においては地表面から

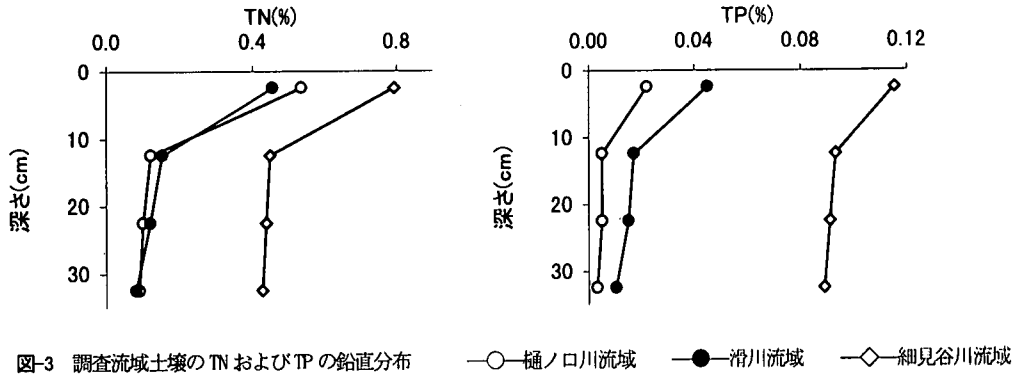


図-3 調査流域土壌のTNおよびTPの鉛直分布 ○—樋ノ口川流域 ●—滑川流域 ◇—細見谷川流域

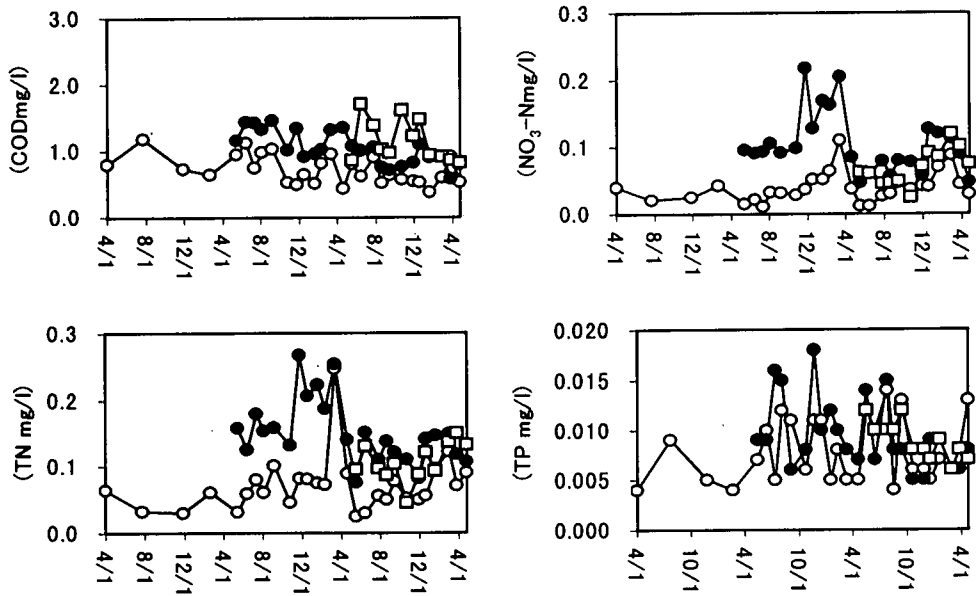


図-4 調査流域流出水のTN, TPおよびCOD成分の濃度変化 ○—樋ノ口川 ●—滑川 □—細見谷川

30cm深さのところまでがA層, それ以下がB層であったと考えられる。

採取した土壌は100°Cで24時間乾燥させ、毛根等を除去し、固まりを粉砕して再度100°Cで24時間乾燥させた。森林土壌のTOC, TNはリター分析と同じC-Nコーダーで分析した。TPは600°Cで2時間加熱した土壌を灼熱法で分解して、アスコルビン酸還元後モリブデン青法により分析した¹⁷⁾。ILおよびTOCを図-2に、TN, TPを図-3に示す。IL, TOCについては、表層土壌で高く、深さとともに減少した。TN, TPも表層土壌で高く、深さとともに減少した。この結果から土壌の表層に多量の有機物質が蓄積されていることがわかる。細見谷川流域ではIL, TOCとTN, TPともに高く、表層の有機物質も他の2流域より高かった。これは細見谷川の植生が自然

林で、なおかつ広葉ブナ林が5割以上を占めており、樹齢も高く、標高も他の流域より高かったことによると考えられる。

(3) 渓流水の水質特性

調査を行った各流域の晴天日COD, TN, NO₃-NとTP濃度の経時変化を図-4に、その平均値を表-4に示す。花崗岩質で土壌層が貧弱であり、アカマツが多くを占める樋ノ口川流域のCOD, TN, NO₃-Nの値は他の流域より低めで、CODは細見谷川, 滑川, 樋ノ口川の順に小さくなっていった。1994年の渇水年においては全般に濃度が高かった。NO₃-Nについては冬季から春先にかけて高くなる傾向を示した。TNの大部分はNO₃-Nであるために、やはり冬季から春先にかけて高くなる傾向を示した。流域間

表-4 調査流域の晴天日および降雨時調査の平均水質

流域名		データ数	COD	TOC	NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P
樋ノ口川	晴天日	28	0.75	1.13	0.039	0.010	0.076	0.004	0.008
	降雨時	10	5.28	2.43	0.029	0.014	0.212	0.005	0.013
滑川	晴天日	25	1.11	1.27	0.142	0.009	0.195	0.005	0.011
	降雨時	9	5.35	2.36	0.130	0.010	0.317	0.006	0.022
細見谷川	晴天日	12	1.16	1.23	0.070	0.006	0.107	0.006	0.009
	降雨時	7	5.03	1.89	0.082	0.009	0.392	0.01	0.03

単位：(mg/l)

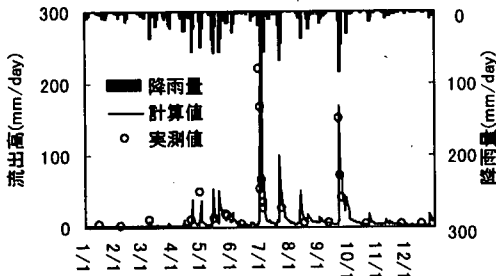


図-5 樋ノ口流量実測値と計算値の比較

のTNとNO₃-Nを比較すると、滑川のTNとNO₃-Nが高く、滑川、細見谷川、樋ノ口川の順に小さくなっていった。滑川流域では伐採跡地が分散して分布しており、この流域のNO₃-Nの濃度が他の流域より高かったのは伐採の影響を受けたもの¹⁸⁾、¹⁹⁾と考えられる。図示していないが、NH₄-NはNO₃-Nと比較すると低濃度であり、NO₃-Nと同様の季節変化の傾向が読み取れた。TPについては夏季において濃度が高くなる傾向があり、流域間の差が認められなかった。表-4には降雨時調査の平均値もあわせて示している。細見谷川流域のTN、TPは降雨時に他の流域よりやや高い。

4. 物質流出モデル

(1) 流量予測

森林からの汚濁物質の流出を解析するために、まず流量予測を行った。対象流域は、調査を行った樋ノ口川、滑川および細見谷川の3流域である。流量予測モデルとして、対象流域を森林植生、土壌種類によって複数のブロックに分割した。文献²⁰⁾を参考にし、水質濃度も合わせることを考慮して、流域ごとの各ブロックにそれぞれ5段直列型のタンクモデルを構築した。上段タンクを樹冠・樹幹タンクとし、樹冠遮断や蒸発散を考慮した。2段目のタンクを森林土壌のA₀層に対応させ、A₀層の厚さは現場調査に基づいて流域内の樹種ブロックごとに設定した。3段目、4段目のタンクで根からの吸い上げ、土

壤の保水性を考慮した。

本研究で用いたタンクモデルにおいては入力データとして、気温、雨量は、対象流域内に観測所が設置されていないため、樋ノ口川では流域周辺のそれぞれ2カ所の観測データの平均値を用い、滑川と細見谷川では流域に近い佐波川ダムと立岩ダムの観測値を用いた。雨量、気温については標高差100m上がるごとに雨量は1.2倍の割増し、気温は0.6℃減少させた。タンクモデルのパラメータは試行錯誤より、ブロックごとに決定し、降雨量データから日単位の流出高を計算した。樋ノ口川の流出高の実測値と計算値の例を図-5に示す。対象3流域の流量については実測データと計算値の相関係数が樋ノ口川では0.94、滑川では0.88、細見谷川では0.93と高かったことよりタンクモデルの計算結果は物質流出モデルに十分適用できると判断した。

(2) TN、TPおよびCODの流出モデルの概要

本モデルは、森林植生、土壌の違いによる影響を考慮したTN、TPおよびCODの流出タンクモデルである。対象流域を植生、土壌の種類によって複数のブロックに分け、ブロックごとにモデルを当てはめ、初期値とパラメータを設定した。モデルの概要図を図-6、基礎式を表-5に示す。

本モデルでは、TN、TP、CODについてパラメータの設定は異なるが、基本的に同じ流出機構を想定している。水質に影響を与える諸量として、降雨による供給、樹冠への堆積、洗脱、流下、地表面への堆積、掃流、地中への浸透、土壌の吸着、溶脱、樹体による吸収、リターフール等を考慮した。また、堆積物質、土壌吸着物質には分解等による減少を考慮した。

樹冠堆積物質は樹冠に付着した雨水中の溶存負荷量が濃縮された形で増加し、その後の降雨により流出する。地表面堆積物質はリターフールにより増加し、分解や掃流によって減少する。土壌吸着物質は貯留水溶存物質の吸着により増加し、溶脱や分解によって減少する。貯留水溶存物質は水の動きとともに流出、浸透すると同時にA、B層では樹体の吸収により減少する。樹体現存物質はA、B層の根からの吸収によって増加し、樹幹流へ

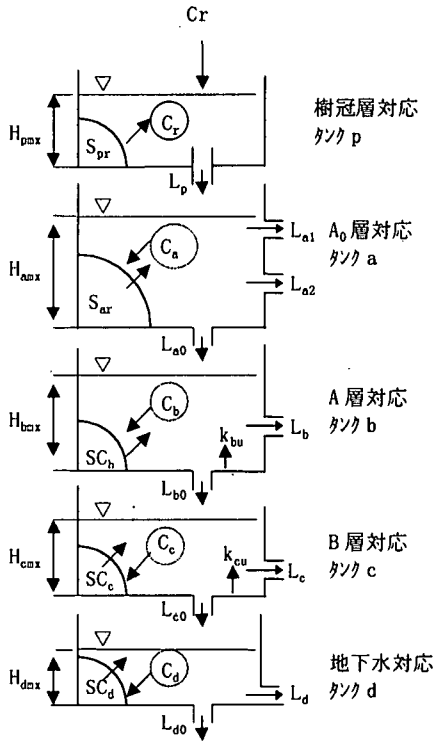


図-6 物質流出モデルの概要

C_r : 降水濃度; C_i : タンク i の貯留水濃度; S_{pr} : 樹冠堆物質;
 S_{ar} : A_0 層堆積物質; SC_i : 土壌吸着物質; k_{iu} : 樹体の吸収速度係数; L_i : 流出負荷量; H_{imx} : タンクの最大貯水深

の溶脱やリターフォールによって減少する。

このようにして植生・土壌種類のブロックごとに速度定数等の諸量を変化させ、タンクモデル内を移動する水および溶存物質の物質収支により、流出水の溶存物質濃度を決定した。

(3) パラメータの設定

a) 土壌の吸着・脱着平衡および吸着・脱着速度実験

森林土壌の吸着・脱着特性を調べるために次のような実験を行った。

遠沈管に 1g の土壌を採取し、0~4mg/l まで 6段階に PO_4 -P 濃度を変えた溶液を 10ml 加え、ガラス棒で攪拌して 2 時間放置した後ガラス棒で攪拌を行い、遠心分離し、さらに、GF/C ろ紙にてろ過して、 PO_4 -P 濃度を測定した。図-7 に実験結果を示す。縦軸に土壌の TP 濃度 SC_e を、横軸に水中の PO_4 -P 濃度 C を示した。結果から 3 流域と

もに表層の吸着性は下層より小さかった。特に、細見谷川流域の土の吸着性が優れている。

森林土壌に吸着した N, P の吸・脱着平衡係数と最大吸着飽和量の関係は次の Langmuir 吸着式²¹⁾で表すことができる。

$$SC_e = \frac{r \cdot C}{1 + r \cdot C} \cdot SC_s \quad (1)$$

ここで、 SC_s : 飽和吸着量 ($mg \cdot g^{-1}$); r : 吸着平衡定数; SC_e : 平衡吸着量 ($mg \cdot g^{-1}$); C : 溶液中の溶質の平衡濃度 ($mg \cdot l^{-1}$)
 式(1)を用い、実験データから最小 2 乗法より飽和吸着量 SC_s と吸着平衡定数 r を求めた。 SC_s , r 値をパラメータ表 (表-6a) にまとめて示す。

吸着速度実験は 500ml の三角フラスコに湿土 1g を入れ、P 濃度が 1mg/l の溶液を 300ml 加え、ガラス棒で攪拌して振とう器にセットし 15 分、30 分、60 分、120 分、180 分、240 分、360 分後にそれぞれ 10ml のサンプルを取り、遠心分離した後、上澄液を分析した。実験結果を図-8 に示す。縦軸に土壌に吸着した TP 濃度 W を、横軸に時間を示した。結果から樋ノ口川および滑川流域の表層土壌の吸着が遅く、下層土壌の方が表層土壌より速かった、細見谷川流域は逆であった。P の吸着速度は次の Langmuir 吸着速度式²¹⁾で表すことができる。

$$\frac{dW}{dt} = k(SC_e - W) \quad (2)$$

ここで、 t は時間 (s); W は吸着量 ($mg \cdot g^{-1}$); k は吸・脱着速度係数である (s^{-1})。

式(2)を積分すると次のようになる。

$$\frac{W}{SC_e} = 1 - e^{-kt} \quad (3)$$

実験データを用いて式(2)と式(3)から吸・脱着係数 $k_b \sim k_d$ を求めた。これらの値をパラメータ表 (表-6a) にまとめて示す。

なお、N についても同様の実験を行った。

b) リターフォールの分解

落葉・落枝等リターフォールとして林床に供給された有機物は、土壌微生物や土壌動物の働きによって次第に分解されるが、一部は腐植物質として土壌中に蓄積される。落葉・落枝の種類によって分解速度と溶出量が違い、分解速度は同一樹種でも異なる。河原²²⁾の研究により

表-5 モデルの基礎式

<p>樹冠・樹幹流下負荷量(kg·day⁻¹) tank p $L_p = A \cdot R(1-f) \cdot (k_1 \cdot C_r + k_{wp} \cdot S_{pr})$ ($H_p < H_{pmax}$, $k_1=0$; $H_p \geq H_{pmax}$, $k_1=1$)</p> <p>流出負荷量(kg·day⁻¹) tank a $L_a = A \cdot (C_a \cdot Y_a + k_{ar} \cdot S_{ar} \cdot Y_a^\beta + k_{al} \cdot SL \cdot Y_a^\beta)$ tank b, c, d $L_i = C_i \cdot Y_i \cdot A$ (i=b, c, d)</p> <p>浸透負荷量(kg·day⁻¹) tank a→b→c→d→e $L_{i0} = C_i \cdot Y_{i0} \cdot A$ (i=a, b, c, d)</p> <p>各層の平衡吸着量 $SC_{ei} = \frac{r \cdot C_i}{1 + r \cdot C_i} \cdot SC_{si}$ (i=b, c, d)</p> <p>樹冠・樹幹の掃流・洗脱・溶脱過程(タンクp) $A \frac{dS_{pr}}{dt} = A(k_p \cdot P_b - (1-f) \cdot R \cdot k_{wp} \cdot S_{pr} + E \cdot C_r)$</p> <p>表層(A層)の堆積・分解・掃流過程(タンクa) $A \frac{d(C_a \cdot H_a)}{dt} = f \cdot A \cdot R \cdot C_r + L_p - L_a - C_a \cdot Y_a \cdot A - k_a \cdot C_a \cdot H_a \cdot A + k_{ar} \cdot S_{ar} \cdot A$ $A \frac{dS_{ar}}{dt} = k_{al} \cdot SL \cdot A + k_a \cdot C_a \cdot H_a \cdot A - k_{ar} \cdot S_{ar} \cdot A - k_{wr} \cdot S_{ar} \cdot Y_a^2 \cdot A$ $A \frac{dSL}{dt} = k_r \cdot P_b \cdot A - k_{al} \cdot SL \cdot A - k_{wl} \cdot SL \cdot Y_a^2 \cdot A$</p> <p>A層の浸透・土壌内蓄積・溶脱・植物体根の吸収過程(タンクb) $A \frac{d(C_b \cdot H_b)}{dt} = L_{a0} - L_{b0} - L_b - k_{bw} \cdot P_b \cdot \frac{H_b C_b}{H_b C_b + K} \cdot A - k_b \cdot (SC_{eb} - SC_b) \cdot H_{bmax} \cdot A$ $A \frac{d(SC_b \cdot H_{bmax})}{dt} = k_b \cdot (SC_{eb} - SC_b) \cdot H_{bmax} \cdot A - k_{db} \cdot SC_b \cdot H_{bmax} \cdot A$</p> <p>B層の浸透・土壌内蓄積・溶脱・植物体根の吸収過程(タンクc) $A \frac{d(C_c \cdot H_c)}{dt} = L_{b0} - L_{c0} - L_c - k_{cw} \cdot P_b \cdot \frac{H_c C_c}{H_c C_c + K} \cdot A - k_c \cdot (SC_{ec} - SC_c) \cdot H_{cmax} \cdot A$ $A \frac{d(SC_c \cdot H_{cmax})}{dt} = k_c \cdot (SC_{ec} - SC_c) \cdot H_{cmax} \cdot A - k_{dc} \cdot SC_c \cdot H_{cmax} \cdot A$</p> <p>C層の吸脱着(タンクd) $A \frac{d(C_d \cdot H_d)}{dt} = L_{c0} - L_{d0} - L_d - k_d \cdot (SC_{ed} - SC_d) \cdot H_{dmax} \cdot A$ $A \frac{d(SC_d \cdot H_{dmax})}{dt} = k_d \cdot (SC_{ed} - SC_d) \cdot H_{dmax} \cdot A - k_{dd} \cdot SC_d \cdot H_{dmax} \cdot A$</p> <p>植物生産 CODの場合 $A \frac{dP_b}{dt} = k_{wp} \cdot P_b \cdot A - k_p \cdot P_b \cdot A - k_r \cdot P_b \cdot A - k_f \cdot P_b \cdot A$</p>	<p>植物生産 TP, TNの場合 $A \frac{dP_b}{dt} = A(k_{bu} \frac{H_b C_b}{H_b C_b + K} P_b + k_{cu} \frac{H_c C_c}{H_c C_c + K} P_b) - k_p \cdot P_b \cdot A - k_r \cdot P_b \cdot A$</p> <p>流達負荷量および濃度 $L = L_a + L_b + L_c + L_d$; $C = L/Q$ $Q = (Y_a + Y_b + Y_c + Y_d)A$</p> <p>記号 L_p, L_a, L_b, L_c, L_d: 流出負荷量[kg·day⁻¹] $L_{a0}, L_{b0}, L_{c0}, L_{d0}$: 浸透負荷量[kg·day⁻¹] A: 流域面積[km²] R: 降雨量[mm·day⁻¹] f: 通過雨割合[-] E: tank pの蒸発量[mm·day⁻¹] C_r: 降雨濃度[mg·l⁻¹] C_i: (i=a, b, c, d)貯留水濃度[mg·l⁻¹] Y_a, Y_i: (i=b, c, d)流出高[mm·day⁻¹] Y_{i0}: (i=b, c, d)浸透高[mm·day⁻¹] S_{pr}: 樹冠・樹幹堆積物質量[g·m⁻²] S_{ar}: 地表堆積物質量[g·m⁻²] SL: リター現存物質量[g·m⁻²] k_{wp}: 樹冠・樹幹の洗脱係数[mm⁻¹] k_{wr}: 地表堆積物質の掃流係数[day·m⁻²] k_{wl}: リターの掃流係数[day·m⁻²] H_p, H_{pmax}: tank pの貯水高, 最大貯水高[mm] SC_{ei}: (i=b, c, d)土壌の平衡吸着量[g·m⁻³] SC_{si}: (i=b, c, d)土壌の飽和吸着量[g·m⁻³] SC_i: (i=b, c, d)土壌吸着物質量[g·m⁻³] r: 吸着平衡定数 P_b: 樹体の現存物質量[g·m⁻²] H_a, H_b, H_c, H_d: tank a, b, c, dの貯水高[mm] $H_{a0}, H_{b0}, H_{c0}, H_{d0}$: tank b, c, dの最大貯水高[mm] K: 樹体の溶存物質吸収に係る半飽和定数[g·m⁻²] k_p: 樹冠・樹幹からの物質溶出係数[day⁻¹] k_r: リターフール速度係数[day⁻¹] k_a: 地表堆積物質の吸着速度係数[day⁻¹] k_{al}: リターの分解速度係数[day⁻¹] k_{ar}: 地表堆積物質の分解速度係数[day⁻¹] k_b, k_c, k_d: 吸・脱着速度係数[day⁻¹] k_{db}, k_{dc}, k_{dd}: 土壌吸着物質減少速度係数[day⁻¹] k_{bw}, k_{cw}: 樹体の吸収速度係数[day⁻¹] k_{wp}: 樹体の総生産速度係数[day⁻¹] k_f: 樹体の呼吸速度係数[day⁻¹] L: 流達負荷量[kg·day⁻¹] C: 流達濃度[mg·l⁻¹] Q: 流量[m³·day⁻¹]</p>
--	---

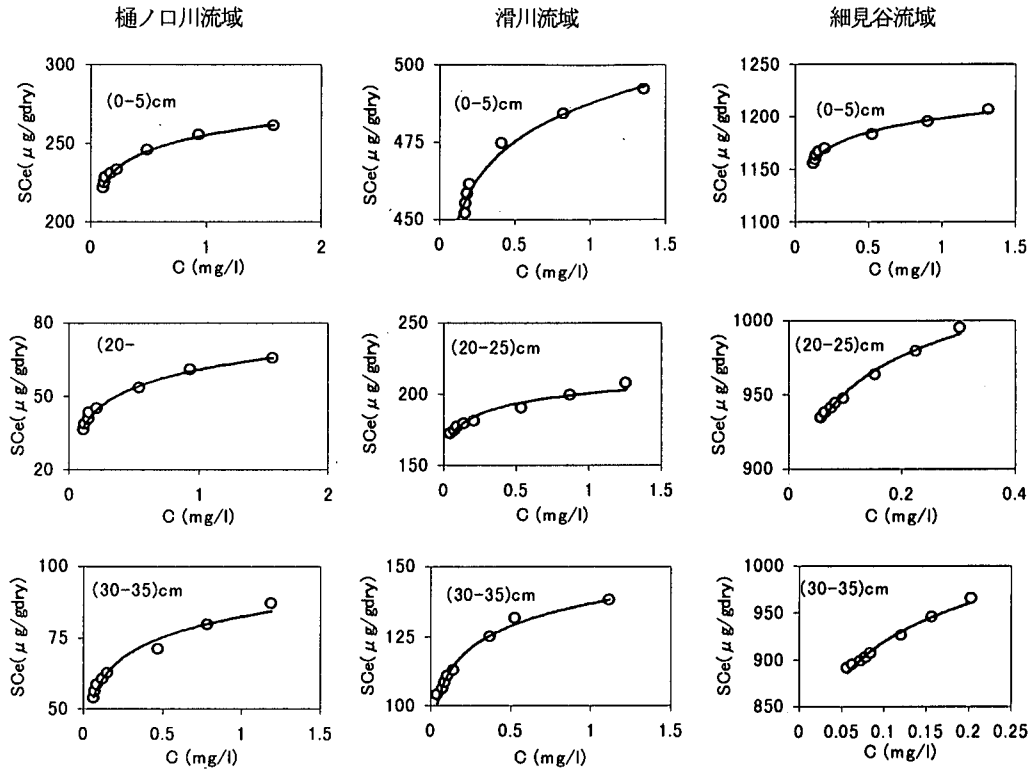


図-7 調査流域の土壌による吸・脱着平衡 (SCe: 平衡吸着量, C: 平衡濃度)

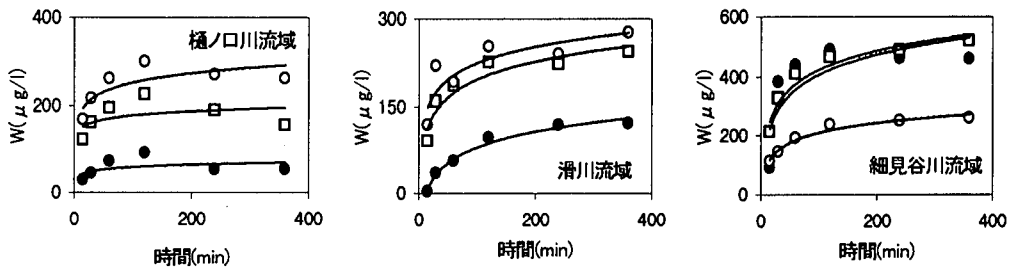


図-8 調査流域の土壌の時間による吸着変化 (W: 吸着量) ● 0-5cm □ 10-15cm ○ 30-35cm

分解速度は針葉樹よりも広葉樹の方が速く、広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑広葉樹林、常緑針葉樹林の順に小さいと報告されている。また、片桐ら²³⁾も分解溶出量は同じ傾向を示すとしている。リター分解による重量の減少率は次の式で求められる。

$$y = e^{-kt} \quad (4)$$

ここで、 y は落葉の分解残存率； k は分解速度(day^{-1})；

t は時間(day)である。

河原の落葉の分解残存率 y に関する文献²²⁾データを用いて、リターの分解速度係数 k を式(6)より求めた。なお t の値として365日を用いた。その結果、ブナでは $0.0010(\text{day}^{-1})$ 、コナラでは $0.0012(\text{day}^{-1})$ 、照葉樹では $0.0016(\text{day}^{-1})$ 、アカマツは $0.0013(\text{day}^{-1})$ であった。また、堤²⁴⁾のデータより計算した落葉の分解速度係数はスギで $0.0001 \sim 0.0007(\text{day}^{-1})$ 、ブナで $0.0011 \sim 0.0015(\text{day}^{-1})$ 、広葉樹で $0.0016 \sim 0.0023(\text{day}^{-1})$ の範囲

であった。

A_0 層の有機物質の分解速度係数 k_{d0} は A_0 層の無機化速度係数の年間値^{24), 25)}を日当りに換算して用いた。 k_{d0} の値の範囲はスギで 0.0003~0.0010 (day^{-1})、広葉樹で 0.0004~0.0022 (day^{-1})、アカマツで 0.0016~0.0021 (day^{-1})であった。

c) その他のパラメータについて

リターフォール速度係数 k_f は広葉樹林の年間平均リターフォール量と針葉樹林の年間平均リターフォール量^{24), 26), 27)}を日平均リターフォール量に換算し、広葉・針葉樹現存物質質量^{25), 26)}で除した値をあてはめた。

リターフォールは、気候・土壌・樹種等と関係がある。リターフォール量は温度の増加とともに多くなる傾向を持つ。同じ気候帯の中でも土壌の性質の違いによってリターフォール量は異なり、湿性土壌の方が乾性土壌よりリターフォール量は大きいことが報告されている^{25), 26)}。また、リターフォール量は樹種の違いによっても異なり、落葉広葉樹林よりも針葉樹林の方が少ないとされ、同じ針葉樹の中でもヒノキ林はスギ林より少ないとされている²⁵⁾。年間平均リターフォール量は河原によれば、スギで $530\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ 、ヒノキで $305\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ 、アカマツで $430\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ 、ブナで $437\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ である。

リターフォール量は季節的に変化する。落葉広葉樹林のリターフォール量は生育期間中には少なく秋に集中する。針葉樹林も秋に成長期が終わると同時に落葉し、ヒノキの落葉は10月から翌年の4月まで多く、アカマツは冬にかけて落葉するが量は少ない。リターフォールの季節変化を表すためにリターフォール速度係数 k_f に月ごと係数を乗じて変化させた。

樹冠・樹幹の洗脱係数 k_w は降雨強度と降雨時間の長短に影響され、測定は難しいので本モデルでは年間洗脱量²³⁾を年間降雨量で除した値を k_w の値として用いた。

樹冠・樹幹からの物質溶出係数 k_e はこれまでの研究によると N や P については溶出が少なく、時には負になることもあり、雨水による循環の占める割合が少なく、林床への経路の多くはリターフォールであるので²⁸⁾ 0~0.00014 の値を用いた。堆積物の掃流係数とリターの掃流係数 k_{s0} 、 k_{s1} については文献¹¹⁾を参考にして流出高の 1.5~2.5 乗に比例するように設定した。

吸収速度係数 k_{a0} 、 k_{a1} は樹種別年間養分吸収量^{25), 26), 27)}の最大値を選んで、日平均吸収量に換算し、樹体の現存物質質量で除した値を用いた。養分の吸収については季節、樹種によって異なるので、樹種についてはアカマツ林、スギ林および広葉樹林に分け、季節変化も考慮して変化させた。

総生産速度係数と呼吸速度係数 k_p 、 k_r については、アカマツ林、スギ林、広葉樹林の年間総生産量と年間呼吸量²⁵⁾から日平均値に換算して、樹体の現存物質質量で除

した値を用いた。総生産速度係数と呼吸速度係数の季節変化を考慮した。b タンク以下の土壌吸着物質の減少速度係数については文献¹⁴⁾を参考に調整した。計算に使用したパラメータの値を表-6a、表-6b にまとめた。

(4) 初期値

降水中の汚濁物質濃度 C_p は現場で測定した降水濃度の平均値を用いた。樹冠・樹幹の堆積物質量 S_{pr} は林内雨の物質質量から林外雨の物質質量を差し引いて求めた²⁴⁾。

A_0 層の蓄積物質量 S_{a0} とリター現存物質質量 SL については、各流域ともに調査値を用いた。樹体の現存物質質量 P_0 は各流域ともに文献値^{23), 24), 25)}から与えた。

各流域の土壌吸着物質質量 SC_0 、 SC_1 、 SC_2 は吸着実験より求めた値を使用した。土壌の飽和吸着量 SC_0 も同様に、吸着実験データから最小 2 乗法より求めた各流域の最大吸着飽和量を用いた。計算で用いた初期値を表-6a、表-6b にまとめた。

(5) シミュレーションの結果

1995 年の調査データを用いて、樋ノ口川、滑川、細見谷川の 3 流域について流出水中の COD、TN、TP 濃度の計算を行った。計算時に、樹種、土壌によって流域を複数のブロックに分け、ブロックごとに初期値、パラメータを与えた。シミュレーションにおいては流域の各樹種、土壌ブロックごとに季節変化を考慮し、季節によって植生のリターフォール速度係数 k_f を落葉・落枝期に最大になるように月によって 0~5 の間の係数を乗して与えた。吸収速度係数 k_{a0} 、 k_{a1} 、総生産速度係数 k_p および呼吸速度係数 k_r については冬はゼロに近い値を用い、秋は平均値の半分、その他は最大値を用いた。リター現存物質と総有機物質の掃流については掃流係数と表面流出高の 1.5~2.5 ($\beta=1.5\sim 2.5$) 乗に比例させた。 $\Delta t=0.1$ 日として、1995 年の 1 年間の計算を行った。実測値はピークを迎えた後急激に減少するが、計算値は 2、3 日間は晴天日より高い値を保持し続け、ピーク後の減少は実測値より遅い傾向があった。小さなピークについては計算値は実測値よりやや大きい傾向を示した。晴天日では実測値と計算値は COD、TN、TP ともによく一致した結果が得られた。また、COD は掃流による由来が比較的大きく、COD、TP の土壌からの溶出は少なかった。

樋ノ口川の COD、TN、TP の実測データと計算値の比較の一例を図-9 に示す。他の 2 流域でも同様の結果が得られている。各流域のモデルによる COD、TN、TP 濃度の計算結果と実測値間の相関係数を表-7 に示す。表の各計算値と実測値の相関係数から、全体的な傾向としては実測値と計算値が良く一致しており、本モデルの計算値は実測値をほぼ再現できたと考えられる。

表-6a モデルのパラメータおよび初期値

樹種 土壌種類	アカマツ林			スギ・ヒノキ			広葉樹林		
	褐色森林土 (Ba, Bb型)			褐色森林土 (Ba, Bb型)			褐色森林土 (Bd型)		
項目	COD	TN	TP	COD	TN	TP	COD	TN	TP
S_{pr}	6	0.65	0	6	0.65	0	6	0.65	0
S_{ar}	138	10.4	0.41	128	8.1	0.59	160	11	0.64
SL	101	9.3	0.34	88	6	0.38	140	10	0.41
P_b	3744	57.2	7	6424	35	3	5852	90	7.38
C_r	1.2	0.4	0.01	1.2	0.4	0.01	1.2	0.4	0.01
C_a, C_b, C_c, C_d	10	5	0.2	10	5	0.2	10	5	0.2
SC_b	643	124	105	608	110	108	788	169	96
SC_c, SC_d	1833	250	125	1200	288	186	3760	1080	218
SC_{cb}	3000	561	121	3000	537	139	4500	935	136
SC_{sc}, SC_{sd}	3500	790	185	3500	750	236	5000	1250	364
r	0.08	0.17	0.08	0.2	0.42	0.28	0.08	0.19	0.09
k_{vp}	0.0019	0.00019	0.000026	0.0019	0.00019	0.000026	0.0022	0.00022	0.000013
k_{vr}	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
k_{wl}	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035
k_p	0	0.001	0.00014	0	0.001	0.00014	0	0.0011	0.00066
k_a	0.28	0.62	0.28	0.14	0.34	0.14	0.13	0.19	0.13
k_b	1.2	2.9	1.2	0.8	1.9	0.8	0.7	1.3	0.7
k_c, k_d	3.8	5.1	3.8	2.9	4.2	2.9	0.6	2.2	1.3
k_{dl}, k_{dr}	0.0013	0.0013	0.0013	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012
k_{db}	0.09	0.09	0.06	0.11	0.11	0.15	0.10	0.10	0.10
k_{dc}, k_{dd}	0.06	0.06	0.14	0.08	0.08	0.22	0.07	0.07	0.12
k_{bu}, k_{cu}	0	0.009	0.001	0	0.009	0.001	0	0.029	0.003

表-6b モデルのパラメータおよび初期値

樹種 土壌種類	アカマツ林	スギ・ヒノキ	広葉樹林
	Ba, Bb型	Ba, Bb型	Bd型
f	0.75	0.69	0.57
E	3	3	3
K	1	1	1
H_{pmx}	3	5	4
H_{amx}	10	10	10
H_{bmx}	50	50	50
H_{cmx}	100	100	100
H_{dmx}	1000	1000	1000
k_f	0.000054	0.000039	0.000036
k_{pp}	0.00063	0.00062	0.00022
k_r	0.00034	0.00043	0.00011

表-7 流量および COD, TN, TP 濃度の計算値と
測値の相関係数 (n=23)

流域名	流量	COD	TN	TP
樋ノ口川	0.94	0.82	0.91	0.82
滑川	0.88	0.85	0.81	0.78
細見谷川	0.93	0.72	0.75	0.85

(6) パラメータ感度解析

本モデルに用いた種々のパラメータを2倍にした場合について、樋ノ口川流域における COD, TN, TP の流出濃度に及ぼす影響を検討した。この結果からシミュレーションを行った全てのパラメータが COD, TN, TP 流出濃度に影響し、特に掃流係数 (k_{vr}, k_{wl})、分解係数 (k_{ar}, k_a)、 A_0 層有機物質吸着速度係数 (k_b)、リターフォール速度係数 (k_r)、樹体の総生産速度係数 (k_{vp}) の影響が大きかった (表-8)。

掃流係数 (k_{vr}, k_{wl}) については、流出濃度最大値は 1.18 ~ 1.44 倍に増加するが、流出濃度平水時の平均値は 0.93 ~ 1.07 倍とさほど影響を与えない。分解速度係数 (k_{ar}, k_a) については、流出濃度最大値は 1.13 ~ 1.57 倍、流出濃度平水時の平均値は 1.00 ~ 1.41 倍に増加する。リターフォール速度係数 (k_r) については、流出濃度最大値は 1.22 ~ 2.44 倍、流出濃度平水時の平均値は 1.81 ~ 4.00 倍に増加し、流出濃度の最大値よりむしろ平水時の平均値に及ぼす影響が大きい。樹体の総生産速度係数 (k_{vp}) については、COD の最大値で 32.7、平水時で 9.6 倍にもなる。概して、樹体の生産分解にかかるパラメータの影響が大きいため、生態学にもとづく適正な値の設定が重要であることを示唆している。

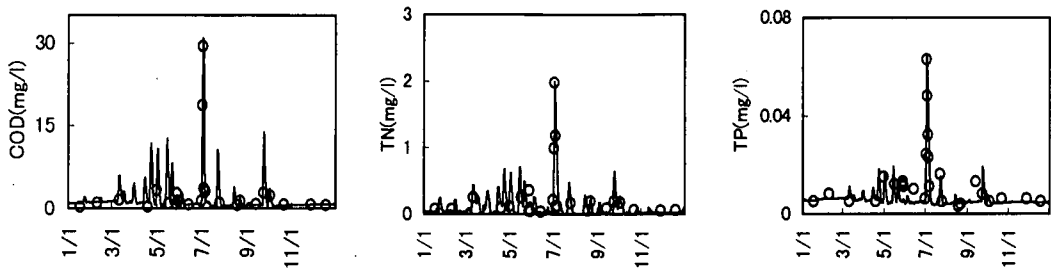


図-9 樋ノロ川のTN, TPおよびCODの実測値と計算値の比較 — 計算値 ○ 実測値

表-8 モデルのパラメータを2倍にした場合の平水時平均および最大濃度増減

パラメータ	仮定条件	平水時平均濃度増減(仮定計算値/計算値)			最大濃度増減(仮定計算値/計算値)		
		COD	TN	TP	COD	TN	TP
k_{wl}	×2	0.97	0.97	1.07	1.32	1.23	1.26
k_{wr}	×2	0.93	0.91	1.00	1.44	1.28	1.18
k_{ar}	×2	1.41	1.11	1.13	1.57	1.19	1.13
k_{dl}	×2	1.31	1.21	1.00	1.27	1.23	1.20
k_a	×2	0.91	0.62	0.63	0.92	1.01	0.99
k_r	×2	1.81	3.09	4.00	2.44	1.45	1.22
k_{pp}	×2	9.64	1.00	0.98	32.73	1.04	0.97

5. おわりに

本研究では、地質・土壌・植生特性の異なる3つの流域で、流出水質を把握するための晴天日定期調査、降雨時調査を行い、植生・土壌特性および流域内での物質循環を考慮し、流域特性を反映した物質流出モデルを構築し、実際の森林河川流域に適用を試みた。

調査流域の流出水質については花崗岩質で土壌層が貧弱であり、アカマツが多くを占める樋ノロ川のCOD, TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ は他の流域より低かった。流域内で伐採を行い、スギ林が多くを占める滑川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は他の流域より高かった。流域の A_0 層および土壌有機物質量の豊富な細見谷川のCODは他の流域より高かったが、TNとTPは晴天時ではなく、降雨時にやや高かった。

調査流域の土壌の吸着飽和量と吸脱着係数については下層の吸着力は表層より大きく、脱着しにくかった。構築したモデルを用いて流域特性の異なった3つの流域においてCOD, TN, TPについてシミュレーションを行った。計算値と実測値の相関係数はCODで0.72~0.85, TNで0.75~0.91, TPで0.78~0.85と高い値が得られた。感度解析の結果から樹体による生産やリターフールに関する影響が大きかった。

本モデルにおいては植生に関するパラメータの影響が

大きいことが示唆されたが、そのための情報はなお不十分であり、植生と流出水質を正確にむすびつけるまでには至っていない。今後は、上記の問題点を踏まえて、本モデルを様々な植生の自然流域や土地利用別の流域に応用できるように改良する必要がある。

謝辞：本研究を行うあたり、C-N コーダを使用させていただいた福岡県環境保健研究所に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩坪五朗, 堤利夫: 森林内外の降水量の養分量について 流亡水中の養分量について, 京大演習林報, 40, pp. 140-155, 1968.
- 2) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂, 185-193, 1989.
- 3) 橋治国: 森林河川における栄養塩類の流出と懸濁物質の役割, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 450-456, 1993.
- 4) 国松孝男, 須戸幹: 山地河川の窒素・リン・CODの濃度とその変動特性, 農業土木論文集, Vol. 166, pp. 35-44, 1993.
- 5) 大類清和, 生原喜久雄, 相場芳憲: 森林小集水域での水質変化の過程, 水文・水資源学会誌, Vol. 8, No. 4, pp. 367-381, 1995.
- 6) 平田健正, 村岡浩爾: 森林域における物質循環特性の溪流

- 水質に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第 399/II-10, pp. 131-140, 1988.
- 7) 羽田守夫: 雄物川の水質の変動特性とそのモデル化, 土木学会論文報告集, No. 265, pp. 73-81, 1977.
 - 8) 海老瀬啓一: 降雨時流出負荷量算定のための回帰式モデル, 衛生工学研究論文集, Vol. 20, pp. 27-38, 1984.
 - 9) 河原長美: 年間総流出負荷量の推定法に関する研究, 水道協会雑誌, Vol. 53, No. 2, pp. 38-44, 1984.
 - 10) 海老瀬啓一: タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析, 用水と廃水, Vol. 21, No. 12, pp. 46-55, 1979.
 - 11) 関根雅彦: 汚濁負荷流出・流下モデルに基づく河川水質予測手法に関する研究, 京都大学学位論文, 1991.
 - 12) 浮田正夫, 中西弘: 河川の汚濁負荷流達率に関する研究, 土木学会論文集, 第 357/II-3, pp. 225-234, 1985.
 - 13) 中西弘, 浮田正夫, 関根雅彦: 汚濁負荷流達率を利用したポルトグラフシミュレーションに関する研究, 水資源研究センター研究報告集, 第 7 号, pp. 79-92, 1987.
 - 14) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂, pp. 163-166, 1989.
 - 15) 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に関する基礎的検討, 水工学論文集, 39, pp. 1-6, 1995.
 - 16) イシヤツ, 浮田正夫: 森林河川における汚濁負荷と植生・地質との関係に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, 2-B, pp. 1346-1347, 1995.
 - 17) Andersen, J. M. : AN IGNITION METHOD FOR DETERMINATION OF TOTAL PHOSPHORUS IN LAKE SEDIMENTS, *Water Research*, Vol. 10, pp. 329-331, 1977.
 - 18) Likens, G. E., Bormann, F.H., Johnson, N.M. Fisher, D.W. and Pierce, R. S. : Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecol. Monogr.*, Vol. 40, pp. 20-47. 1970.
 - 19) Vitousek, P.M. and Melillo, J.M. : Nitrate losses from disturbed forests, patterns and mechanisms., *For. Sci.*, Vol. 25, pp. 605-619. 1979.
 - 20) 菅原正巳: 水文学講座 7 流出解析法, 共立出版, 1972.
 - 21) 近藤清一, 石川達雄, 安部郁雄: 吸着の科学, 丸善株式会社, pp. 87-102, 1991.
 - 22) 河原輝彦: 森林生態系における炭素の循環, 林試研報, No. 334, pp. 21-52, 1985.
 - 23) 片桐成夫, 千葉喬三, 堤利夫: 落葉落枝の分解こともなう養分量の変化, 京大演報 41, pp. 106-115, 1970.
 - 24) 堤利夫: 森林の物質循環, 東京大学出版会, 1987.
 - 25) 河田弘: 森林土壌学概論, 博友社, 1989.
 - 26) 堤利夫: 森林生態学, 朝倉書店, 1989.
 - 27) 依田恭二: 森林の生態学 生態学研究シリーズ 4, 築地書店, 1971.
 - 28) 村井宏, 山谷孝一, 片岡寛純, 由井正敏: プナ林の自然環境と保全, ソフトサイエンス社, 1991.

(1997. 11. 25 受付)

THE MODELING OF TN, TP AND COD RUNOFF IN FOREST BASIN

Elshat RAHIM, Masao UKITA, Masahiko SEKINE and Tsuyoshi IMAI

A model of TN, TP and COD_{Mn} runoff in forest basin was developed in this paper. This model reflects forest vegetation, soil character and material circulation in forest basin. The growth of vegetation, reduction of nutrients by litter fall, through fall and stem flow, decomposition of litter and soil organic material and nutrients absorption were taken into account in this model. Water qualities of runoff from forest were analyzed in long-term in three investigated forest basins. The correlation coefficients between calculated and observed values of TN, TP and COD_{Mn} were about 0.72~0.91. The results calculated from the model were in good agreement with the measured values and demonstrated this model being useful in long-term prediction.