

(財)新日本地下水理化学研究所コーナー

山地森林流域における渓流水濃度推定法の開発と物質収支の定量評価

田村隆雄*, 端野道夫**

1. まえがき

酸性雨問題, 地下水汚染などの環境問題やトリハロメタンのような発ガン性物質への国民の意識の高まりとともに, 生命の源である水の質が大きな社会的関心事項となってきた。それが最も顕著に現れた社会現象が 1980 年代以降のミネラルウォーターや家庭用浄水器の売り上げの急増である。今では街のコンビニエンスストアに入れば, 国内産はもとより外国産の様々なミネラルウォーターを手軽に入手することができることもあって, 1 本百円程度と水道水と比較するとかなり高価であるにも関わらず, ミネラルウォーターを日常的に飲むということに対して抵抗感がなくなりつつある。日本ミネラルウォーター協会のまとめ¹⁾では, 2004 年の国内生産と輸入量の合計は約 162 万キロリットルで, 国民 1 人当たりで換算すると 12.7 リットル/年となる。最近 10 年間の消費量をみると 3 倍増である。

ミネラルウォーターのテレビ・コマーシャルでは, 美しい森林, 陽光を受けて岩の隙間から輝きながらピロピロ流れ出る清澄な清水, そして豊かな水量を誇る渓流などを背景にして商品の宣伝が行われる。こうしたことから, 多くの人が山地森林には美味しい水を供給する機能(水質保全機能)が備わっていることを知っていると思われる。国土面積の 70% が山地森林で占められている日本は, この森林の恩恵を長く享受できた。ところが高度経済成長期を境に, 産業目的やレジャー目的などによって, 山地森林の大規模開発が活発に行われるようになると, 本来清澄である溪流や河川上流において濁水の発生や栄養塩類の流出量増大が認められるようになり, 河川の水質環境の悪化, 生態系の劣化などが心配されるようになった。

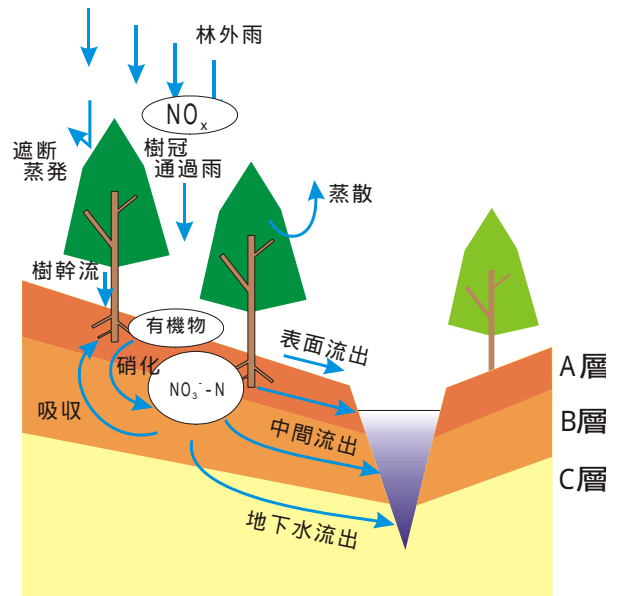


図-1 森林流域における雨水と物質の流出過程
(硝酸態窒素(NO_3^- -N)の例)

1990 年代に入ると「森は海の恋人」²⁾, 「森が消えれば海も死ぬ」³⁾という言葉が新たに聞かれるようになった。2004 年 3 月には水産庁, 林野庁, 国土交通省が「森・川・海のつながりを重視した豊かな漁場海域環境創出方策検討調査報告書」⁴⁾を発表し, 森林からの流出水が沿岸・海洋環境の保全に欠かせないものであると指摘された。流出水の水質についても BOD に代表される汚染指標だけでなく, 硝酸態窒素(NO_3^- -N)のような栄養塩項目や, シリカやフルボ酸鉄といった微量物質が重要になってきた。

これらのことから, 水源地である森林の適切な開発計画や保全計画, 流域全体の環境保全計画などを立案するために, 森林流域が有する水質保全機能, 個々の物質流出機構の定量的評価手法が求められている。

* たむら たかお・徳島大学 工学部 助手、** はしの みちお・徳島大学 工学部 教授

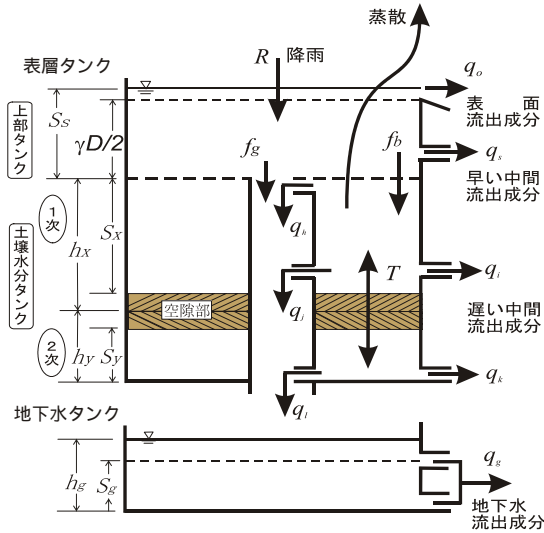


図-2 直列2段タンクモデル

本報では、著者らがこれまでに開発してきた「物質流出タンクモデル」の紹介と、モデルを適用した徳島県白川谷森林試験流域（主としてスギの人工樹林）の概要、水質観測結果、モデルを用いた渓流水 NO₃-N 濃度の再現結果、および NO₃-N と SO₄²⁻ の物質収支にもとづいた白川谷森林試験流域の水質保全機能の評価事例を報告する。

2. 森林流域の物質流出機構とそのモデル化

(1) 物質流出機構の概要とモデル化の要点

山地森林流域の物質流出機構の概念図を図-1 に示す。森林流域では、物質は基本的に雨水の流出過程に組み込まれて渓流へと流出する。その雨水流出機構を概観すると、雨水は樹冠における降雨遮断過程、土壌での浸透・流出過程、樹木による吸収・蒸散過程を経て、最終的に地下水流出成分、中間流出成分、表面流出成分といった様々な流出成分となって土壌層から流出し、渓流水を構成する。その過程で水質は、樹冠部における乾性沈着物の洗脱や樹体からの溶出、土壌表層での有機物の無機化、基岩からの風化溶出などといった生物化学的作用を受けて質的・量的に変化する。

次に渓流水質の変化という視点から物質流出機構を考えてみると、質的に異なる複数の土壌層から流出する様々な流出成分の水質評価が重要となる。一般に落葉落枝や動物の死骸や糞などに由来し、微生物の分解作用によって生産される NO₃-N は土壌表層付近から流出するため、地表近くから流出する流出成分（早い中間流出成分）

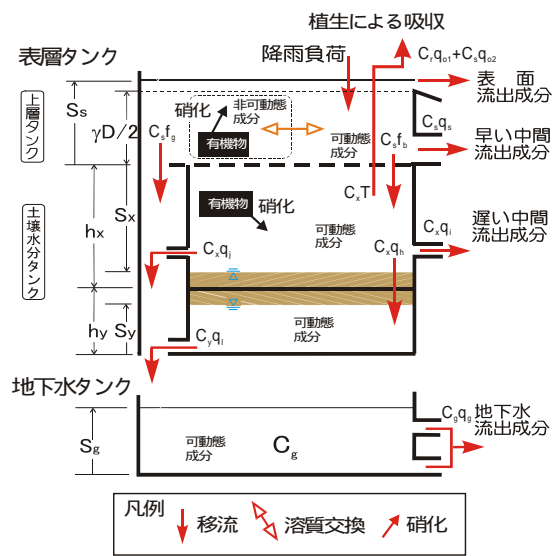


図-3 物質流出タンクモデル(NO₃-N モデル)

に多く含まれる。一方でカルシウムイオン (Ca²⁺) やマグネシウムイオン (Mg²⁺)、硫酸イオン (SO₄²⁻) のような鉱物由来の物質は、主として岩石が風化することによって供給されるために、基岩層を源とする地下水流出成分に多く含まれる。ゆえに早い中間流出成分が発生するような出水時には NO₃-N の濃度が増加する一方で、Ca²⁺ や SO₄²⁻ のような物質の濃度は低下する。逆に地下水流出成分しか発生していない低水時には NO₃-N 濃度は低く、Ca²⁺ や SO₄²⁻ の濃度は高い。森林開発による樹木の伐採や、表層土壌の攪乱があると中間流出成分や表面流出成分が発生しやすくなるので、濁水の発生が多くなるほか、河川の富栄養にかかわる NO₃-N の濃度の上昇、流出負荷量の増大が引き起こされる。

以上のように、土壌中での物質に働く生物化学的作用と渓流水を構成する流出成分の構成比の変化流出成分が渓流水質の変化をもたらす。したがって森林における物質流出モデリングの要件は次の3点となる。第一に森林における様々な水文素過程、特に質的に異なる複数の土壌層から発生する様々な流出成分の発生機構を表現できる雨水流出モデルを準備すること、第二に土壌中での有機物の無機化や鉱物の風化溶出など、物質が受ける生物化学的な過程を表す物質動態モデルを構築すること、そして第三に雨水流出モデルと物質動態モデルを有機的にリンクさせ、森林流域からの物質流出機構を表現することとなる。

(2)物質流出タンクモデルの概要

著者らが開発した森林流域からの雨水流出機構を表す「直列 2 段タンクモデル」⁵⁾の概念図を図-2 に示す。直列 2 段タンクモデルは大きく 2 つのタンクから構成される。1 つは土壌表層 (A 層, B 層) における浸透・流出, 植生による吸収を表現する表層タンクであり, もう一方は地下水層を表現する地下水タンクである。表層タンクは更に土壌表層近傍を受け持つ上部タンクと土壌中層を受け持つ土壌水分タンクからなる。このモデルによって表面流出成分, 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発生機構および流出量などを再現することができる。最も特徴的なのは, 森林土壌表層から発生する表面流出 (飽和地表面流) を中間流出や地下水流出と分離評価できる点にある。直列 2 段タンクモデルの詳細については参考文献 5) をご覧頂きたい。

直列 2 段タンクモデルに土壌内で生じている様々な物質動態をサブモデルとして組み込んだものが図-3 に示す「物質流出タンクモデル」である。図に示したのは有機物を起源とする NO₃-N を対象とした NO₃-N モデルである。モデルには森林土壌で生じている NO₃-N に関する様々な生物化学的作用が組み込まれ, 各タンクの物質濃度の算定と浸透移流成分に含まれる負荷量の算定を行っている。具体的には有機物が豊富に蓄積している土壌 A 層を仮想した上部タンクでは土壌微生物による硝化作用を考慮している。次に有機物の混入が認められ, 植生の根茎も発達している土壌 B 層を想定している土壌水分タンクでは, 硝化作用に加えて植生による吸収作用も考慮している。これら 2 つのタンクでは, 土粒子構造に取り込まれて非常に動きにくい成分 (非可動態成分) と土壌間隙水に含まれていて雨水流動に敏感に反応し浸透・流出する成分 (可動態) との溶質交換作用を考慮している。なお先に述べた硝化作用で生産される NO₃-N はまず非可動態の増分として扱われ, 土壌中の水分量の増減に応じて可動態に交換され, 雨水流動に従って浸透・流出する (移流過程) ものとしている。これらの物質動態を定式化したものが以下に示す式(1) ~ 式(4)である。

・微生物による硝化作用

$$L_{n,i} = \alpha_i \exp\{\beta_i(\theta - \theta_i) + \gamma_i(S_i/h_i - \phi)\} \quad (1)$$

ここで, $L_{n,i}$: 硝化量(mg/hr), α_i : 硝化速度係数, β_i : 硝化温度係数, γ_i : 硝化に関わる土壌水分係数, ϕ : 硝化に関わる土壌水分の閾値, θ : 地温計算値(), θ_i : 硝化に関わる地温の閾値(), S_i : 土壌水分高(mm), h_i : 土壌間隙高(mm), i : 各タンクを表す添え字 (s, x, y, g) である。なお地温は, 別途用意される「地温モデル」⁶⁾で計算される値を用いる。

・植生による吸収作用

$$L_{ad,i} = C_i \cdot \delta_i \cdot T \quad (2)$$

ここで, $L_{ad,i}$: 植生による吸収量(mg/hr), C : 土壌タンク濃度(mg/mm), δ_i : 植生の吸収に関わる係数, T : 植生蒸散量(mm/hr), i : 各タンクを表す添え字 (s, x, y, g) である。なお植生の蒸散量は, 著者らが開発した「ヒートパルス蒸散モデル」^{7),8)}で計算される値を用いる。

・溶質交換作用

$$L_{ex,i} = v_i(k_i \cdot S_{a,i} - C_i)S_i \quad (3)$$

ここで, $L_{ex,s}$: 可動態・非可動態成分の交換強度 (mg/hr), v_i : 交換強度係数, k_i : 交換濃度係数, C_i : 可動態物質濃度 (mg/mm), $S_{a,i}$: 非可動態物質濃度 (mg/mm), S_i : タンクの貯留水深(mm) である。

・浸透流出過程

$$L_{qn} = C_i \cdot q_n \quad (4)$$

ここで, L_{qn} : 物質移流量(mg/hr), C_i : 成分が発生するタンクの可動態濃度(mg/mm), q_n : 雨水移流成分量(mm/hr), n : 各移流成分を表す添え字(例えば, o, s, i など)である。

以上の NO₃-N に関する生物化学的作用と浸透・流出過程からなる物質収支式から各タンクの可動態濃度が算定される。表面流出成分, 中間流出成分, 地下水流出成分の濃度はそれらが発生する上部タンク, 土壌水分タンク, 地下水タンクの可動態濃度となる。参考までに土壌 A 層を想定している上部タンクの物質収支式を示す。

[可動態物質]

$$\frac{d(C_s S_s)}{dt} = L_R - L_{qo} - L_{qs} - L_{fb} - L_{fg} + L_{ex} \quad (5)$$

[非可動態物質]

$$\frac{d\{S_{as}(1-\gamma)D\}}{dt} = -L_{ex} + L_{n,s} \quad (6)$$

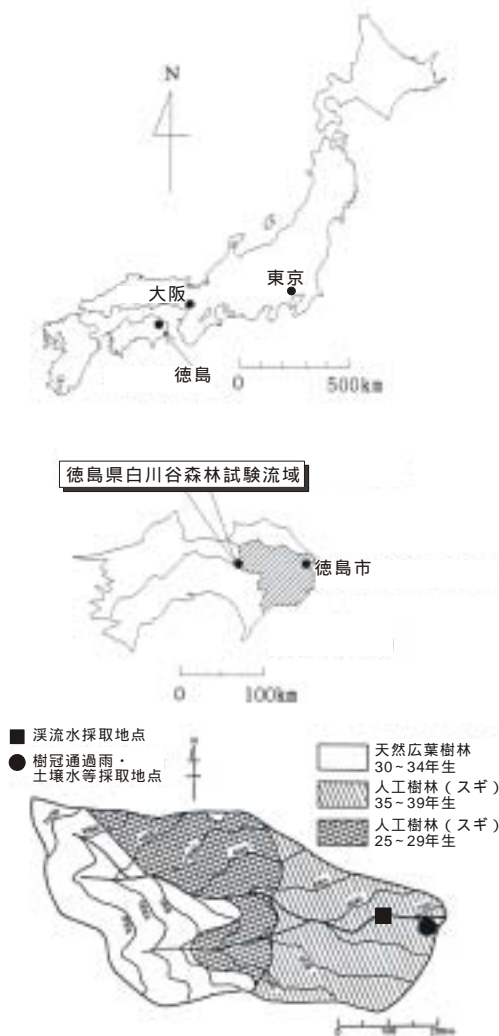


図-4 徳島県白川谷森林試験流域の概要

ここで、 C_s ：上部タンクの可動態物質濃度 (mg/mm)、 S_{as} ：上部タンクの非可動態物質濃度 (mg/mm)、 S_s ：上部タンクの水深(mm)、 γ ：土壌間隙率、 D ：表層土壌厚 (mm)、 L_R ：降雨入力負荷成分量 (mg)、 L_{qo} ：表面流出成分に含まれる負荷量 (mg)、 L_{qs} ：早い中間流出成分に含まれる物質質量 (mg)、 L_{fb} ：粗孔隙部への浸透負荷量 (mg)、 L_{fg} ：地下水タンクへの浸透負荷量 (mg)、 L_{ex} ：可動態と非可動態との交換量 (mg)、 $L_{n,s}$ ：微生物の硝化作用による増加量 (mg) である。

3. 白川谷森林試験流域と観測態勢の概要

物質流出タンクモデルを適用した白川谷森林試験流域と水文水質観測態勢の概要を説明する。

流域概要を図-4に示す。流域は四国のほぼ中央部、徳島県三好郡山城町粟山に位置する。流域面

積は 0.23km^2 、標高は $740\text{m} \sim 1140\text{m}$ 、流域の平均斜面勾配は $\theta = 21.5^\circ$ である。地質は三波川帯に属し、砂質片岩または泥質片岩の互層からなる。流域の大部分の土壌は褐色森林土で覆われているが、尾根部には黒色土などの分布も見られる。林相については、流域上流部から中央部にかけての $2/5$ 程度の面積に天然広葉樹林 (30~34年生、1995年2月現在) が存在し、流域中央部から下流部にかけての $3/5$ 程度にスギの人工樹林 (25~39年生) が存在している。

本流域における観測態勢は次のとおりである。渓流量量は、流域末端の流量堰横に設けられたフロート式自記水位計から得た観測水位を流量に換算して求めている。また水質測定に用いる渓流水の採取は、流量堰から上流へ水平距離で約 100m 程度、高低差にして約 10m 程登ったところで行っており、観測1回につき、 500cc を採取する。

林外雨量は流量堰天端上 5m に設けた 0.5mm 転倒マス式雨量計で観測し、雨量は転倒パルス回数としてデータロガーに記録 (10分単位) される。これとは別に水質分析用として、林外雨を直径 22cm の漏斗で集め、ポリエチレンタンクに貯留して採取する。

樹冠通過雨量は、図-5に示したような $250\text{cm} \times 450\text{cm}$ の大型集水板を堰の南側山腹のスギ林分内に設けて集水し、転倒マス型流量計からの転倒パルスをデータロガーに記録する。流量計を通過した樹冠通過雨はポリエチレンタンクに水質分析用試料として貯留する。

樹幹流下量データについては、試験林分内にある約 29 年生のスギを対象樹木として選定し、図-6に示すような装置を取り付けて樹幹に沿って流下してくる雨水を採集して計測する。装置は地上高約 1.7m 付近で幹の周囲に塩化ビニルホースを背割りにしたものをカラー状に巻きつけたものである。幹とホースとの間隙にはシリコンシーラントを詰め込んで漏水を防止している。この装置を用いて集めた樹幹流を転倒マス型雨量計で計測後、樹冠通過雨同様にポリタンクに貯留して水質分析用試料とする。なお林外雨、樹冠通過雨、樹幹流の水質分析は、一降雨ごとに採取して水質分析を行うことは、実務上困難なので、一定期間 (約 2 週間) の降雨を集めて分析を行う方法を採用している。

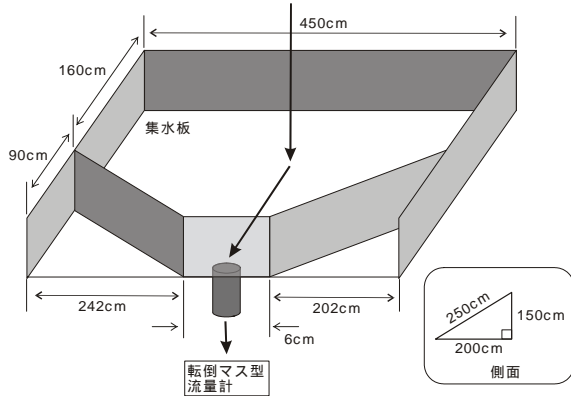


図-5 樹冠通過雨採取装置

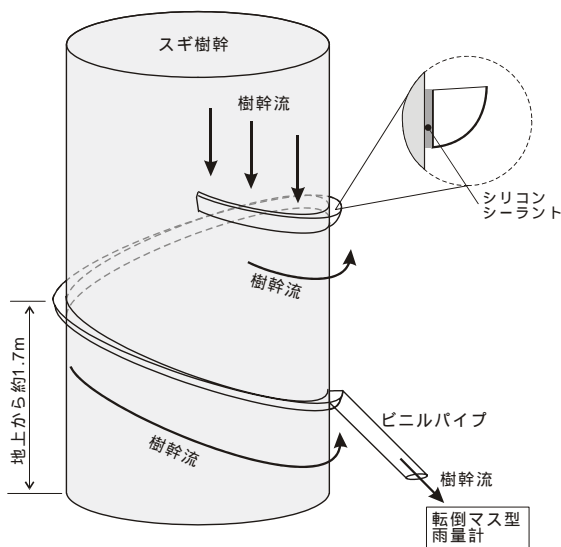


図-6 樹幹流採取装置

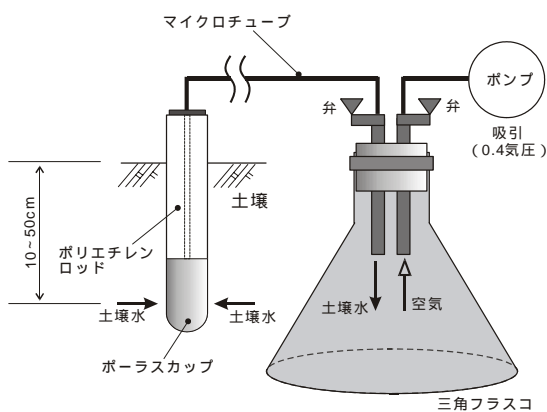


図-7 土壌水採取装置

物質流出タンクモデルのパラメータのうち、可動態濃度、非可動態濃度などの初期値を設定するために、土壌鉛直方向の物質分布状態の観測も土壌水採取装置を用いてスギ林分内で採取している。

具体的には図-7 に示すような直径 2cm、長さ 5cm の素焼きのポラスカップをポリエチレンロッドの先端に取り付けた装置をリター層を取り除いた地表面から所定の深度に埋設し、マイクロチューブによって三角フラスコと接続してある。なお試験地は土壌層が比較的浅いので、土壌水採取深度を 10、20、30、40、50cm の 5 深度としている。観測時の採取方法は以下のようなものである。まず、三角フラスコとポラスカップを接続しているマイクロチューブの弁を閉じておいて、吸引ポンプにより三角フラスコ内に約 0.4 気圧の吸引圧をかける。次にポンプ側の弁を閉じて、代わりにポラスカップ側の弁を開ける。こうすると、三角フラスコ内にかけた負圧によって、土壌水が吸引されて三角フラスコ内に貯留される。吸引圧が大きいと土粒子構造内において普段自由に動けない吸着水まで採取される可能性があるが、本研究では、0.4 気圧程度の負圧で吸引していることから、土壌内を自由に動くことのできる間隙水であると考えられる。また土壌水分状態にもよるが、本方法では短時間に水質分析に必要なだけの土壌水を採取することは困難である。したがって土壌水質についても、林外雨、樹幹通過雨、樹幹流と同じく、ある一定期間の土壌水の平均であることに注意する必要がある。

渓流水などの水質分析はイオンクロマトグラフィーを用いて、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、リン酸イオン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、ナトリウムイオン (Na^+)、塩素イオン (Cl^-)、カリウムイオン (K^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、マグネシウムイオン (Mg^{2+}) の濃度を測定する。

4. 白川谷森林試験流域における雨水と渓流水の季節変化

(1) 雨水濃度の季節変化

1992 年に白川谷森林試験流域で観測された林内雨 2629mm のうち、樹冠通過雨は 2443mm と 93% を占め、残りが樹幹流であった。そこで森林流域に入る前の林外雨と、森林土壌へ浸透する主成分となる樹冠通過雨の雨量と水質の季節変化を図-8 と図-9 に示す。いずれも上から順に観測雨量、各物質濃度である。濃度については一降雨毎の採取・分析は困難であるので、一定期間の降水をま

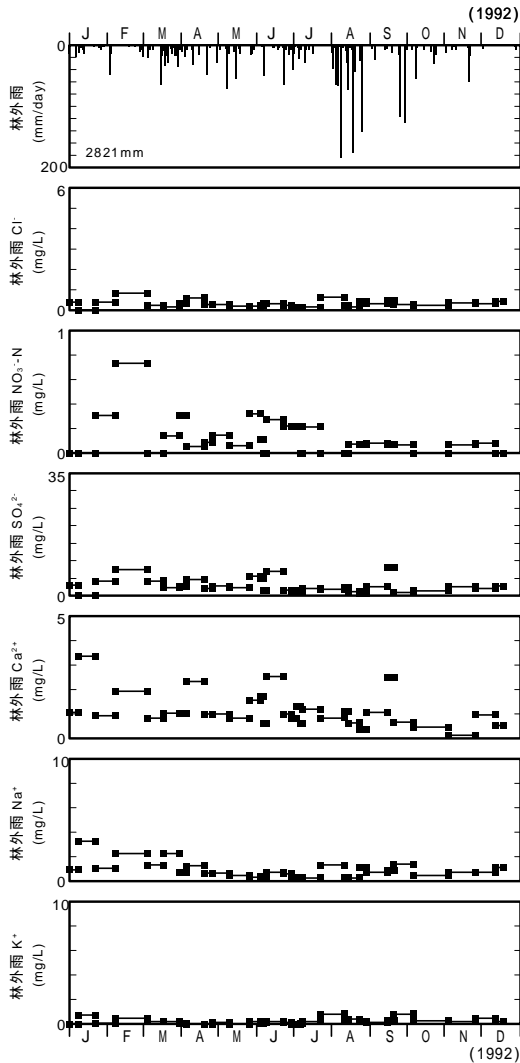


図-8 林外雨の水質観測結果

とめて採集して分析したものを示している。従って図中の濃度は採集期間に降った雨水の平均濃度である。

まず、雨量変化を見ると、3月～4月、6月～7月、そして8月にまとまった降雨とそれとともなう出水が観測されている。次に水質変化についてみると、林外雨の物質濃度は概して冬季に高い。これは冬季の雨量が少ないことから、晴天時に大気中に蓄積された物質が少ない雨水に洗い流されるために濃度が高くなるためであると考えられる。この影響で樹冠通過雨の物質濃度も同じような傾向を示すが、林外雨ほど明瞭に現れていない。次に林外雨と樹冠通過雨の濃度レベルを比較してみると、林外雨と樹冠通過雨の濃度レベルが同じか、樹冠通過雨の方が若干高いレベルとなっている。これは、晴天時に樹冠を構成する枝葉が捕捉した大気中のミストを樹冠通過雨が洗い流したためである。

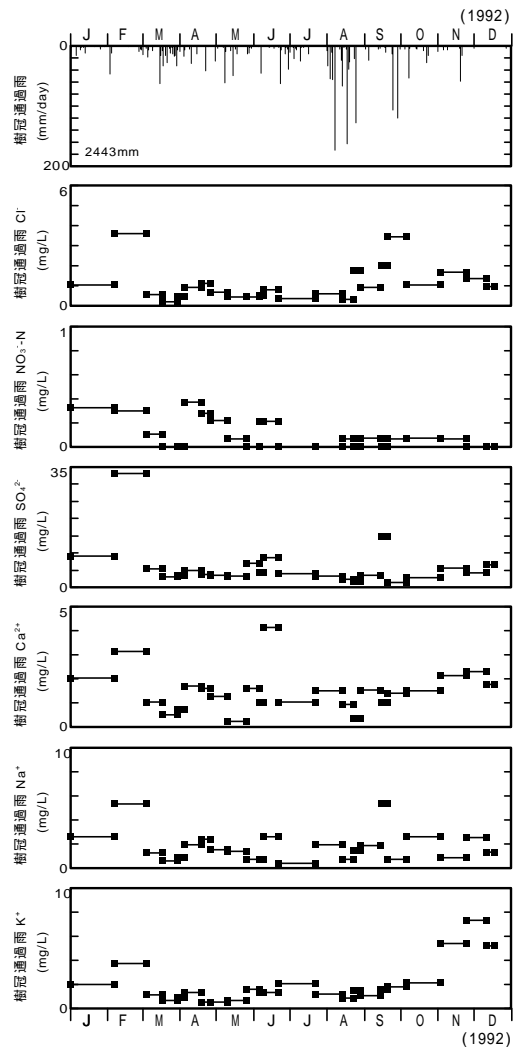


図-9 樹冠通過雨の水質観測結果

K⁺の樹冠通過雨濃度は林外雨成分よりかなり高濃度であるが、これはK⁺が植物の必須栄養元素で樹体に多く含まれることと、水に溶出しやすいためである。

(2) 渓流水濃度の季節変化

1992年に白川谷森林試験流域で観測された渓流水に含まれる物質の季節変化を図-10に示す。図は上から順に、樹冠通過雨量、Na⁺やSO₄²⁻など6つの物質濃度および渓流水流出高を示している。

なおNH₄⁺-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-Pは検出限界以下の濃度か、検出されても極めて低濃度であったので、示していない。流量の大小と渓流水濃度の変化から物質を次のように分類することが可能⁹⁾である。

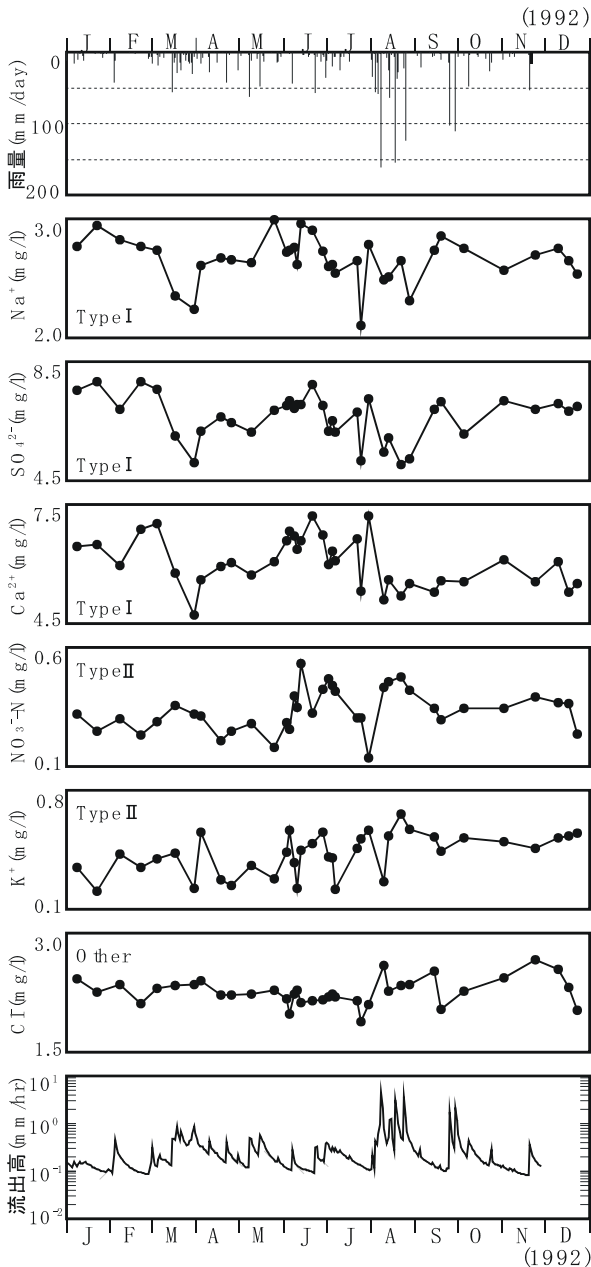


図-10 渓流水濃度の観測結果

・Type (濃度減少型)

これは流量が多い場合に渓流水濃度が減少する物質である。本観測でこれに適合する物質には、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} の3つである。いずれも森林流域内での循環量や土壌での蓄積量が少ないという共通点があり、流量が増加すると単純に希釈効果を受けて濃度が減少する。海洋由来の成分もあるが、基本的に鉱物由来の物質がこのタイプに分類され、例えば SO_4^{2-} は気流によって運ばれた海水飛沫や工場などから排出される硫酸化物に由来するものも少なくはない(詳細は、「白川谷森林試験流域の物質収支」で述べる)が、白川谷森林試験流域では、地質を構成する海底で堆積した泥岩

を含む三波川帯¹⁰⁾に多量に存在する¹¹⁾。

・Type (濃度上昇型)

これは流量が多い場合に渓流水濃度が上昇する物質である。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ の2つが相当する。ともに森林流域内での循環量が多く、しかも微生物や植生の影響を強く受けて土壌表層ほど多量に蓄積される物質である。ただし、生物学的影響が大きいため、季節によって変化の大きさがかなり異なる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合、3月~4月と9月~10月のほぼ同じ流出高を示しているときで濃度変化を比較すると、秋季は大きく春季は小さい。これは硝化菌などによる増加と植生による吸収、という生物活動が大きく関わっているに起因する。つまり気温が高くなると生物の活動が活発になり、土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 蓄積量が増加するため、同じ出水量でも春は濃度変動が小さく夏以降は濃度変動が大きくなると説明できる。また K^+ は、3月の出水では Type のように減少する傾向さえ示す。 K^+ の場合には植生葉面からの溶脱という生物学的影響を受けるため、雨水の影響を強く受ける。図-8、図-9を比較すると、年間を通じて渓流水より樹冠通過雨の濃度レベルが高く、2~3月はそれが顕著である。したがって3月の出水では Type のような変動を示したと考える。

・Type (その他)

これは、流量に関係なく濃度がほぼ一定を示すイオンである。本観測結果では、 Cl^- がこれに相当する。基本的に海洋由来の成分であり、土壌内で生産されることがほとんどないために、降水の浸透によって土壌鉛直方向の濃度が均一になり、流量の増減(流出成分構成比の変化)の影響を受けないものと考えられる。

5. モデルによる渓流水濃度変化の再現

1992年に白川谷森林試験流域で観測された水質観測データに物質流出タンクモデルを適用して、渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化を再現した結果を図-11に示す。なおモデルへの入力データには、別途用意した降雨遮断タンクモデル¹²⁾を用いて算定した地表到達雨量とその推定濃度を用いた。ここで地表到達雨量は樹冠通過雨量と樹幹流量の和であり、その濃度は成分を構成する93%が樹冠通過雨、7%が樹幹流であることから求めた重み付き平均値として求めることができる。図は上

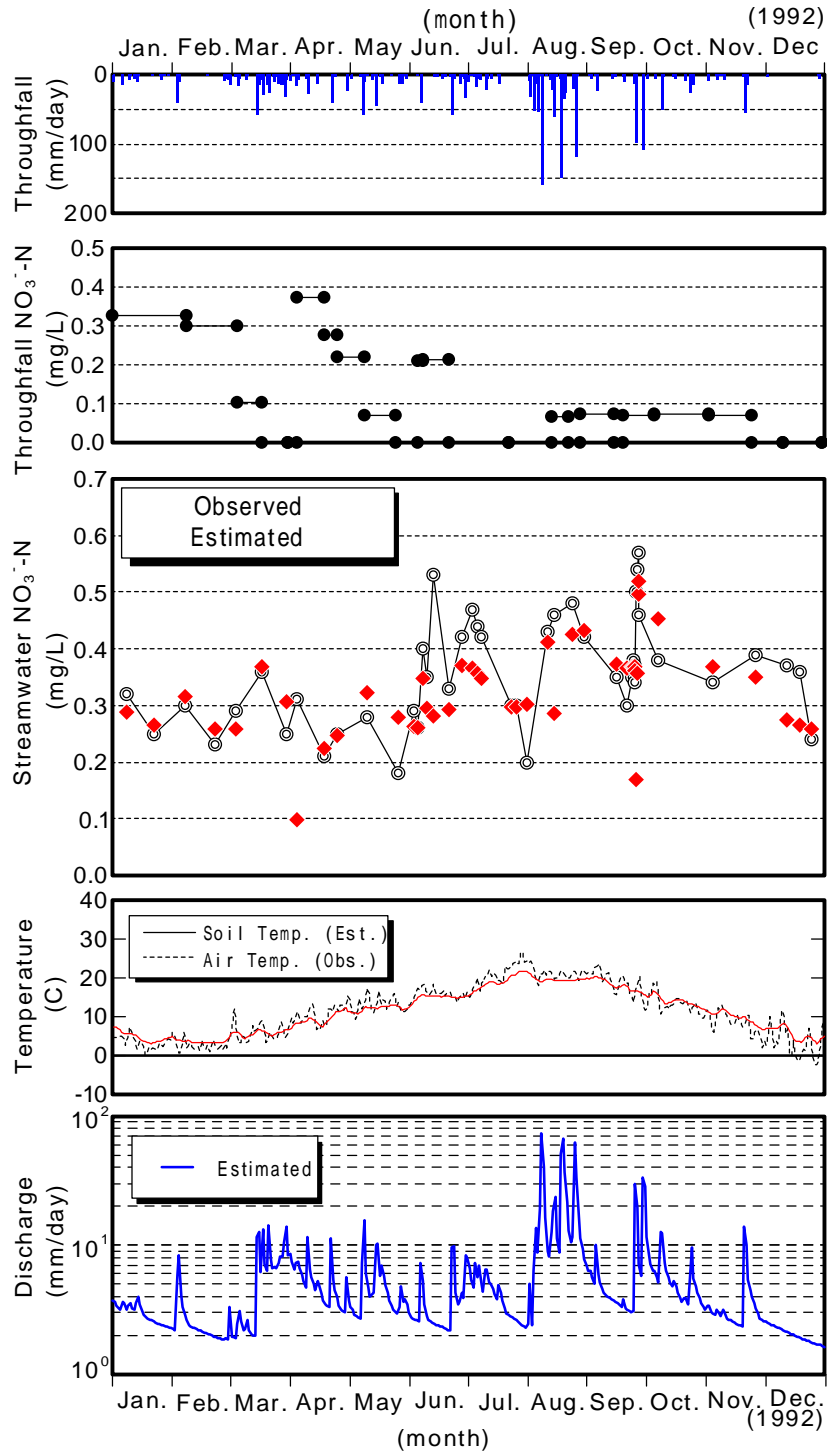


図-11 渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化の再現

から順に地表到達雨量，地表到達雨の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度，渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の観測値とモデル計算値，季節変化を把握するための気温観測値とそれを元に計算した地温計算値，および直列2段タンクモデルを用いて計算した渓流水流出高の計算値である。物質流出タンクモデルを用いた濃度計算は，1時間単位で行っているが，ここでは1年間の季

節変化を捉えるために行っている定期観測の値との比較を容易とするため，定期観測の時刻における計算値のみ（46個）を図に示している。

図-11を見ると，誤差はあるものの，モデルは1年を通じて渓流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変動の特徴を的確に表現できていることが分かる。具体的に観測値と計算値を1月から比較してみると，ま

表-1 流域物質収支(単位:kg/ha/year)

		雨水成分		SO ₄ ²⁻		NO ₃ ⁻ -N	
流入量	林 外 雨 (系外からの流入量)			59.0		2.6	
	樹冠通過雨 (樹冠で付加される量)	45.8	55.4	-0.3	-0.3		
	樹 幹 流 (樹幹で付加される量)	9.6				0.02	
	地表到達雨 (全流入量)	(= + +)		114.4		2.3	
流出量	溪 流 水 (森林からの全流出量)			130.0		6.8	
	森林土壌からの流出量	(= -)		15.6		4.4	

ず 1 月～5 月にかけては渓流水濃度が徐々に減少する傾向が見られる。この理由としては気温・地温の日平均値からも分かるように温度が 10 未満で土壌中での硝化量が少ないと推測される一方で、地表では植物が新芽を出すなどその活動を活発化させていることが認められることから、この時期の土壌中の NO₃-N は徐々に減少してゆくためだと考えられる。

次に 6 月～9 月にかけては、気温上昇とともに地温も急激に上昇して、生物活動が活発化する目安となる 10 (日平均値) を超えるようになる。土壌中では微生物による硝化量が大きくなると推測できる。また夏季は梅雨前線や台風による出水があるため、NO₃-N の蓄積が進む比較的浅い土壌層を起源とする遅い中間流出成分が渓流水に占める割合が多くなる。したがって観測濃度は急激に上昇している。モデル計算値は若干過小評価気味であるが、変化の傾向は表現できている。

夏季であるのにもかかわらず、7 月末に低濃度が観測されて計算値も同様の結果を示しているが、これは湧水 (晴天日数約 2 週間) によるものである。湧水では渓流水のほとんどは、NO₃-N の流出源でない地下水流出成分となるため、渓流流量の減少とともに、濃度は急激に低下する。

9 月後半に急激に観測濃度が上昇している箇所があるが、これは 9 月 23 日～25 日の台風による洪水イベントで、出水前と流出ピーク付近、および逓減期における観測値とモデル計算値である。

10 月以降は、気温とともに地温も徐々に低下するために、土壌中微生物や植生の活動量も減少すると推測できる。したがって土壌中の NO₃-N 蓄積量も降雨イベントが重なると徐々に減少するため、渓流水濃度は冬季に向かって徐々に減少する。モデル計算値も観測値の傾向を再現できている。

このように物質流出タンクモデルは、気温・地温の季節変化にともなう渓流水 NO₃-N 濃度の長期変化だけでなく、夏の湧水、出水のような比較的短時間に生じる濃度変化も再現することが可能である。

6. 白川谷森林試験流域の物質収支

「まえがき」で触れたように、近年、森林をはじめとする陸域からの流出水に含まれる物質が下流域ばかりか沿岸域の水質環境や生態系に好影響を与えていると指摘されている。これらの問題を定量的に議論するためには、渓流水の水質変化だけでなく、森林流域の物質収支も検討する必要がある。

森林流域における物質収支計算は、森林に流入する雨量とその濃度、森林から流出する渓流水量とその濃度から求められる流入負荷量と流出負荷量を計算することで可能となる。雨量や渓流水量は「白川谷森林試験流域と観測態勢の概要」で触れたような観測装置を用いることで比較的容易に観測することができる。しかし濃度は基本的に人手による採取と実験室での測定が必要なので、例えば濃度が急激に変化するような出水時の渓流水の採取作業は大きな危険をともなう。したがって濃度データは雨量や流量と比較して少なくなり、限られたデータから算定した負荷量は大きな誤差を含む可能性が高い。そこでモデルによって渓流水濃度の連続的な変化を推定することができれば、より精度の高い物質収支計算を行うことができる。

物質流出タンクモデルを用いて、白川谷森林試験流域の土壌に着目した年間物質収支算定結果を表-1 に示す。表には NO₃-N と同じく大気汚染物質として雨滴に取り込まれて流入したり、晴天時に気流によって運ばれ樹冠や樹幹に沈着する硫化

物イオン (SO_4^{2-}) も示している。

この表より SO_4^{2-} と $\text{NO}_3\text{-N}$ はともに林外雨に含まれる物質質量 () より逕流水に含まれる物質質量 () が大きいことから、森林が流出負荷源となっていることが分かる。さらに地表到達雨に含まれる物質質量 () と逕流水に含まれる物質質量 () の差である森林土壌からの流出量 () が正であることから、流出負荷源が土壌であることも特定できる。

$\text{NO}_3\text{-N}$ は、植物の必須栄養元素であり森林内部で循環する量が卓越するために、多くの森林流域で流入量より流出量が少ない^{13),14)}と報告されているが、白川谷森林流域では流入量に対して約3倍もの $\text{NO}_3\text{-N}$ が流出している。これについて4つの理由を考えることができる。第一に報告されている他の森林流域と比較して、流入成分である林外雨に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が相対的に少ないこと。例えば参考文献 13)によれば、滋賀県・田上のアカマツ林の降水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ は年間約 5kg/ha、北米落葉広葉樹林に至っては年間約 18kg/ha であるが、白川谷は 2.6kg/ha でしかない。第二に白川谷森林試験流域のスギの樹齢が高く $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸収量が少ない可能性がある¹⁵⁾こと、第三に白川谷森林試験流域の表層土壌が比較的腐食物を多く含む土壌である¹⁶⁾ということ、そして第四に流域の年間降水量の多さ (2821mm (1992年))もあって、陰イオンで正に帯電している土粒子に吸着されにくい $\text{NO}_3\text{-N}$ が非常に流出しやすい¹⁷⁾可能性があることである。

次に物質移動量に対する森林の作用を詳細に検討すると、 SO_4^{2-} と $\text{NO}_3\text{-N}$ に対して植生(スギ)の樹冠・樹幹の影響が異なることがわかる。まず SO_4^{2-} は系外から 59.0kg 流入するが、樹冠・樹幹を通過して地表に到達するまでに 45.8kg 増加する。この増加量は流域からの溶質流出量 130.0kg の 43%を占める。したがってスギの樹冠・樹幹が SO_4^{2-} に与える作用、具体的には晴天時に気流によって系外からもたらされる SO_4^{2-} の樹体への吸着と降雨時の樹体からの洗脱は、流域の SO_4^{2-} 収支に大きな比重を占めていることが分かる。同様に $\text{NO}_3\text{-N}$ をみると、スギの樹冠・樹幹は僅かではあるものの減少させる作用を持っており、地表に到達した段階で溶質量は 12%程度減少している。観測データがないので断言することができ

ないが、窒素が生物の必須栄養元素であることを考えると、樹体表面に生息する苔類や微生物など吸収作用を受けている可能性がある。

以上の結果から同じ大気汚染物質として系外からの流入も多い SO_4^{2-} と $\text{NO}_3\text{-N}$ ではあるが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はこれまで報告されている多くの森林とは異なり流出量が流入量を大きく上回っていること、 SO_4^{2-} と $\text{NO}_3\text{-N}$ に対する植生や土壌の作用は大きく異なることが分かる。

7. おわりに

本報告では、著者らが開発した「物質流出タンクモデル」の概要と白川谷森林試験流域への適用結果を示し、当該流域の物質収支について説明した。物質流出タンクモデルは土壌中での脱窒、イオン交換など、幾つかの物質動態を考慮していないが、森林流域におけるマクロ的な物質流出機構を十分な再現精度で表すことができるモデルだと考えている。今後は植生の種類、降水量、気温、地質など、定量的な評価が難しい森林の立地条件の影響を検討するために、観測とモデルの適用例を増やしてゆきたいと考えている。

水源地である森林流域は下流域だけでなく、沿岸や海洋の環境形成にも大きな役割を果たしているようであるので、沿岸域を含めた流域環境の総合的な整備を行うためにも森林の水質保全機能の評価は益々重要となりつつある。そこで現在、最上流に位置する森林だけでなく、汚濁物質の流出源となる田畑や住宅地、工場・商業地などが存在する中下流域、河川から流れ出る栄養塩類を利用した海苔や魚介類の養殖が盛んに行われる沿岸域までの物質流出機構を定量的に評価するためのモデル構築に向けた現地調査を開始している。本報告にあるような「森」という点ではなく「森-川-海」という線で物質流出機構を捉える観測は容易ではないが、流域の物質循環機構を解明するための貴重な資料や知見を得ることができると考えている。さらに河道には、ダムや堤防などの治水設備や、農業用の取水堰のような利水設備があるので、流域の治水・利水と環境保全の調和などの課題にも一役買えるのではないかと考えている。

なお本報告の一部は文部科学省科学研究費補助金(平成 17 年度若手研究(B)16760415 研究代表者 田村隆雄)によるものである。

参考文献

- 1) 日本ミネラルウォーター協会, <http://www.minekyo.jp/>
- 2) 畠山重篤: 森は海の恋人, 北斗出版, 1994 年。
- 3) 松永勝彦: 森が消えれば海も死ぬ, 講談社ブルーバックス, 1993 年。
- 4) 水産庁漁港漁場整備部, 林野庁森林整備部, 国土交通省河川局: 森・川・海のつながりを重視した豊かな漁場海域環境創出方策検討調査報告書, 2004 年。
- 5) 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 年。
- 6) 田村隆雄, 端野道夫, 小西俊雄: 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 年
- 7) 吉田弘, 端野道夫, 村岡浩爾: ヒートパルス速度を利用した蒸散量推定のための数理モデルの提案, 水文・水資源学会誌, 6(3), pp.244-253, 1993 年。
- 8) 吉田弘, 端野道夫, 村岡浩爾: ヒートパルス速度と微気象データを利用した材木蒸散量の提案, 水文・水資源学会誌, 6(4), pp.350-357, 1993 年。
- 9) 平田健正, 村岡浩爾: 森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響, 土木学会論文集, 399, pp.131-140, 1988 年。
- 10) 岩崎正夫 編: 徳島市民双書 13 徳島の自然地質 1, 徳島市中央公民館, pp.44-49, 1979 年。
- 11) 岩崎正夫: 森林土木技術研修資料 徳島県の地質と山地崩壊, 徳島県治山林道課, pp.1-3, 1976 年。
- 12) 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, 6(1), pp.19-30。
- 13) 只木良也, 吉良竜夫 編: ヒトと森林, 共立出版, pp.136-139, 1982 年。
- 14) 河田弘: 森林土壌学概論, 博友社, pp.346-350, 2000 年。
- 15) 小柳信宏, 戸田浩人, 久保井喬, 生原喜久雄: 北関東地方の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における炭素と窒素の動態特性, 日本林学会誌, 86(2), pp.134-143, 2004 年。
- 16) 国土庁土地局国土調整課, 土地分類図 1975 年 (徳島県), 財団法人日本地図センター, 1975 年。
- 17) 塚本良則 編, 森林水文学, 文永堂出版, pp.225-231, 1992 年。