

直列二段タンクモデルを用いた全窒素・全リンの降雨流出特性の検討

～ 鍋田川上流域を例にして ～

The Runoff Analysis of Total Nitrogen and Phosphorus
in a Storm Event in a Forested Basin Using a Tank Model

田村隆雄*・吉田弘**・端野道夫***・重光世洋****

By Takao TAMURA, Hiromu YOSHIDA, Michio HASHINO and Seyo SHIGEMITSU

This study focused on the runoff characteristic of total nitrogen and phosphorus during a storm event in a forested basin. The stream water was separated into four runoff components using a tank model, and the correlation between those components and the temporal changes of stream water concentration of total nitrogen and phosphorus was investigated. It is clarified that stream water concentration of total nitrogen and phosphorus are formed by the temporal change of runoff components. Then, the modeling of runoff of total nitrogen and phosphorus from a forested basin is employed using a tank model.

Keywords : forested basin, runoff of nitrogen and phosphorus, runoff separation,
tank model

1. はじめに

著者らはこれまで山地森林流域の有する水質調節機能の定量評価を目指して、森林土壌内での物質動態を雨水流動にリンクさせる手法で物質流出タンクモデルの構築を進めてきた。そして本モデルを流域全体がほぼ自然林によって覆われている、徳島県白川谷森林試験流域および国立環境研究所筑波森林試験流域の2流域で観測された複数の降雨イベントにおける渓流水濃度の観測結果に適用し、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 濃度の再現性を通して、モデル構造の妥当性を検討してきた¹⁾。本研究の最終目標は、河川水富栄養化につながる窒素やリンといった栄養塩の森林流域からの流出負荷量や、土壌特性、植生、土地利用の異なる複数の流域での水質調節機能を物質流出タンクモデルにより定量評価することである。

そこで、これらの課題を検討するために、本論文ではこれまで対象としてきた2流域とは特性の異なる鍋田川上流域（大阪府大東市）で観測された一降雨イベントにおける全窒素、全リン濃度の観測資料を用いて、流出特性の異なる流域、ならびに溶存イオンではなく全窒素、全リンといった物質形態に対する物質流出タンクモデル適用の可能性について基礎的な検討を行う。具体的には、まず物質流出タンクモデルの基礎となっている直列二段タンクモデル²⁾のパラメータ同定を、鍋田川上流域における観測期間のハイドログラフを的確に再現できるように行い、観測流量を表面流出、中間流出および地下水流出の各流出成分に分離する。次に各流出成分の渓流流量への寄与率と全窒素・全リン濃度との関係を経時的に検討し、各流出成分が全窒素および全リンの流出に果たす役割を定性的に把握する。これによって各物質の流出源となる土壌層ならびに流出経路を定性的に把握することができる³⁾ことから、本流域ならびに全窒素、全リンの流出現象に対する著者らのモデリング手法の適用性を判断できると考える。

*	正会員	修士（工学）	高松工業高等専門学校助手	建設環境工学科（〒761 高松市勅使町 355）
**	正会員	博士（工学）	徳島大学助手	工学部建設工学科（〒770 徳島市南常三島町 2-1）
***	フェロー	工 博	徳島大学教授	工学部建設工学科（ 同上 ）
****	正会員	工 博	大阪産業大学教授	工学部土木工学科（〒574 大阪府大東市中垣内 3-1-1）

2. 鍋田川上流域の概要

図-1に鍋田川上流域の概要を示す。図には鍋田川の位置と土地利用区分を示すと共に各区分の流域全体に対する占有率も示されている。観測流域は大阪府大東市に位置しており、流域の西部は生駒山地の一部となっている。流域面積は1.45km²で、全体の71%が林地となっている。残りの29%は流域南部のゴルフ場、中央部と東部下流端の宅地、ならびに散在する農地で占められている。また鍋田川沿いに阪奈道路があり道路が流域面積の5.1%を占めていることから、ある程度開発の進んだ流域と言える。北端の最高点で海拔370m、流域末端で海拔14mと標高差が大きいため、鍋田川の勾配は急である。したがって河川の途中に落差工が多く設置されたり、下流部の多くの場所では側壁に矢板や石積みが施されている。このような流域の末端で降雨量、流量、および水質測定が行われている。水質観測項目は、全窒素、全リン、およびpHであるが、全窒素、全リンの内訳までは観測されていない。これらの観測は1993年10月より毎日2回程度の割合で定期的に行われているが、降雨出水時においても現在までに3回の集中観測が行われている。本論文で対象とするのは1995年7月4日から同月6日にかけて観測された降雨量160mmの降雨イベントにおける観測結果である。

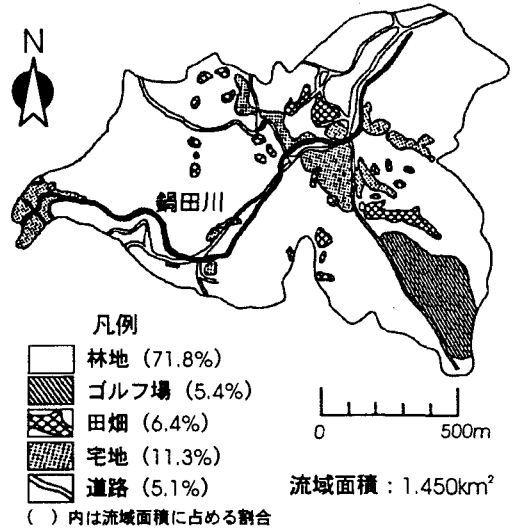


図-1 鍋田川流域の概要

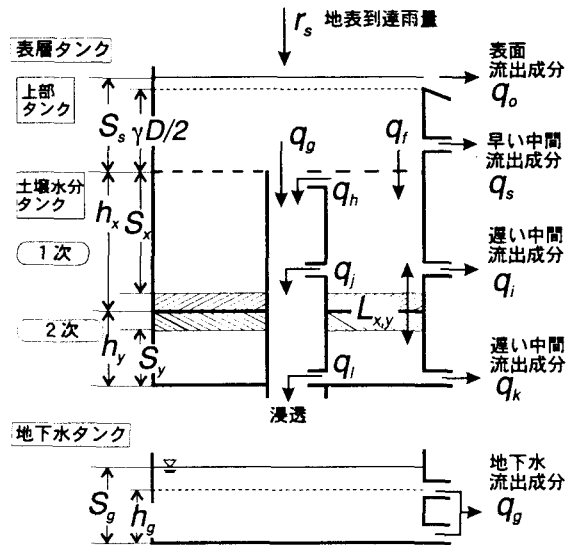


図-2 直列二段タンクモデル

3. 直列二段タンクモデルの概要

本論文では全窒素および全リンの降雨流出特性を把握する手段として、著者らのグループがこれまで開発を進めてきた直列2段タンクモデルを用いる。図-2にその概要を示す。これまで対象としてきた2つの森林流域での短期的、長

期的な雨水流動を的確に表現できるように開発された経緯から、モデルは最終的に4つの流出成分でハイドログラフを再現するようになっている。構造的には、モデルは大きく土壌表層部を表現する表層タンクと、地下水層を表現する地下水タンクで構成されており、表層タンクはさらに、主として土壌最上層のA層を表現する上部タンクと主としてB層及びC層を表現する下部タンクから構成されている。なお下部タンクは比較的孔隙が大きく雨水流動が活発な場を想定した一次土壌水分タンクと、孔隙が小さい場での雨水流動を再現する二次土壌水分タンクの二つのタンクから構成されている。これら複数のタンクによって土壌間隙率や生物活性の異なる各土壌層内、および土壌層間での雨水流動を的確に再現し、最終的にそれぞれの土壌層から発生する表面流出成分、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各流出成分量を

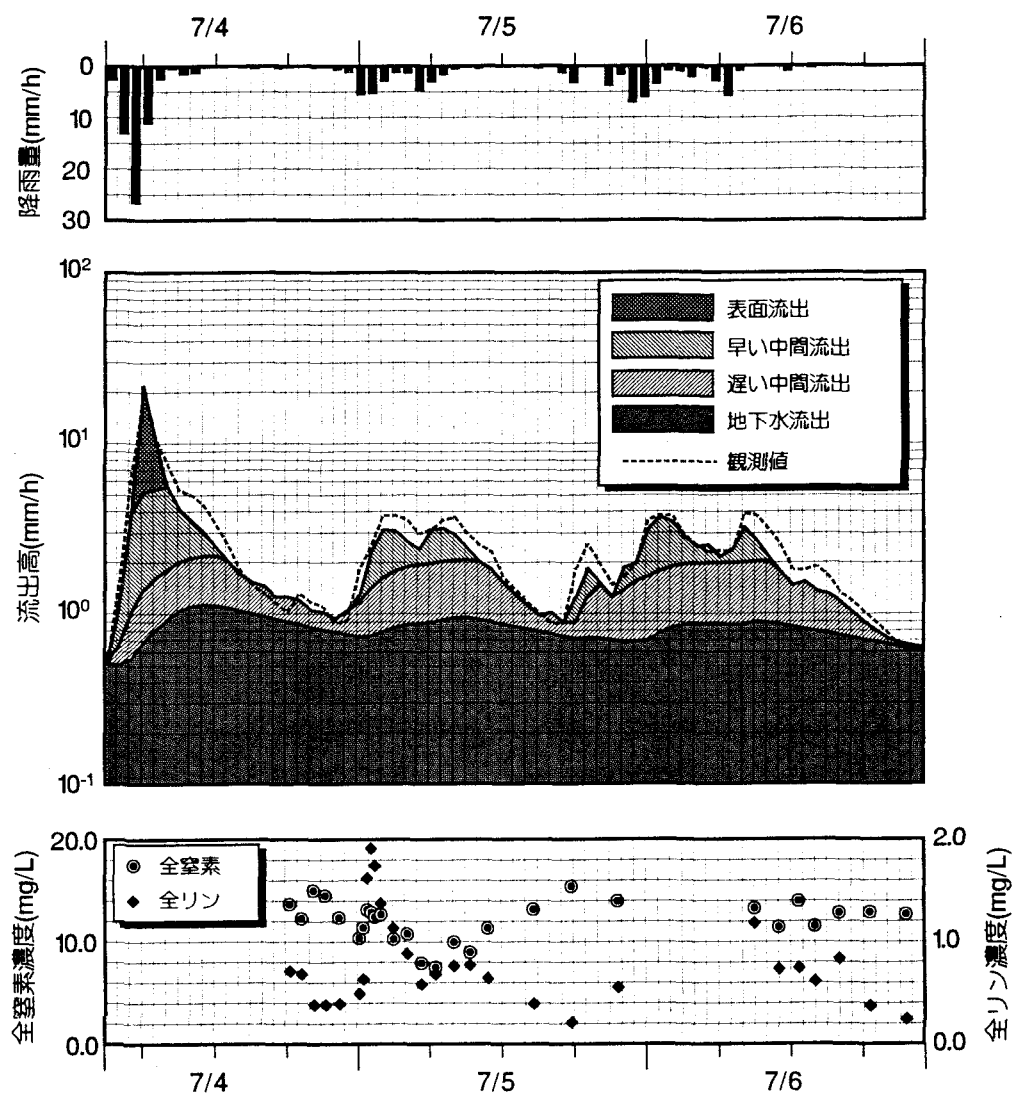


図-3 流出成分の分離結果と全窒素全リン濃度の経時変化
鍋田川 1995年7月4日 - 7月6日

算出する。なお入力量である地表到達雨量 (r_s) は、林地分については植生による遮断過程を考慮して別途、降雨遮断タンクモデル⁴⁾によって算定されたものを用いる。ゴルフ場、農地、宅地、および道路に到達した雨水は、地表に達するまで全く遮断されないものと仮定して、観測雨量を地表到達雨量とする。直列二段タンクモデル中の水収支式や成分分離のためのパラメータ同定手法の詳細については文献²⁾に詳しいので、そちらを参照されたい。

4. 全窒素・全リンの流出特性

4.1 流出成分の分離

本論文では、全窒素ならびに全リンの降雨流出特性ならびに流出源を定性的に把握する。そのために渓流水中の全窒素および全リン濃度の経時変化と物質の搬送主体となる各流出成分の増減とを対比させて議論する。これは土壌を構成する各土壌層は土壌特性や生物活性が異なるため、それぞれの土壌層から発生する流

出成分の水質は互いに異なることに着目したもので、これによって渓流水質形成機構での各流出成分の役割を明らかにするとともに、物質の主な流出源も推察することができる。

図-3に1995年7月4日から7月6日にかけての総降雨量160mm（地表到達雨量136mm）の降雨イベントで観測されたハイトグラフ、ハイドログラフと直列二段タンクモデルによる分離結果、および観測中の渓流水全窒素・全リン濃度の経時変化を示す。渓流水は図に示すように地下水流出成分、遅い中間流出成分、早い中間流出成分、および表面流出成分の4成分に分離されている。

まず、観測されたハイトグラフおよびハイドログラフを概観すると、流域が急勾配であることや、林地以外の土地が流域面積の28.9%を占めているために流出率が意外に高いことが分かる。また降雨後でハイドログラフの減速も早い。直列二段タンクモデルによる再現値を観測値と比較すると、差異が目立つ点が数箇所見られるが、全体を通してみると再現値は観測ハイドログラフと良く一致していると言える。したがって直列二段タンクモデルによる渓流流量の分離結果は妥当であると考え、この分離結果を踏まえて、全窒素および全リンの降雨流出特性の定性的な把握を試みる。

4.2 全窒素・全リン濃度の経時変化

図-3に示した全窒素および全リン濃度の観測値の経時変化をみると、全リンと全窒素では全く異なる挙動を示していることが分かる。まず全窒素濃度は、ハイドログラフと逆位相であることが読みとれる。具体的には、7月4日18:00から表層土壌から発生する早い中間流出成分、および遅い中間流出成分が発生しているが、それにともなって濃度が減少している。また降雨終了後、この2成分が減少すると濃度が元のレベルへ回復していくことも分かる。一方、全リン濃度の経時変化は全窒素濃度とは逆にハイドログラフと同位相であることが読みとれる。変化の割合も全窒素濃度と比較すると非常に大きく、観測された濃度の最大値と最小値の差は約9.5倍にも達する。以上のことから鍋田川の全リン濃度形成は全窒素と比較して降雨流出の影響を強く受けていると言えそうである。

4.3 全窒素・全リンの降雨流出特性

全窒素および全リンの濃度変化と各流出成分の流出成分構成比の経時変化とを比較し、各流出成分の渓流水濃度への寄与と物質の流出過程を考察する。ここで、流出成分構成比とはある時刻において任意の流出成分が渓流流量全体に占める割合を指し、式(1)で算出される。

$$R(q_{I,t}) = \frac{q_{I,t}}{q_{o,t} + q_{s,t} + (q_{i,t} + q_{k,t}) + q_{g,t}} \times 100. \quad (1)$$

ここで、 t :時刻、 $q_{I,t}$:任意の流出成分の時刻 t における流出高(mm/h)、 $R(q_{I,t})$:任意の流出成分 I の時刻 t における構成比(%), $q_{o,t}$ $q_{s,t}$ $q_{i,t}$ $q_{k,t}$ $q_{g,t}$:直列二段タンクモデルによって算定された表面流出高、早い中間流出高、遅い中間流出高ならびに地下水流出成分高(mm/h)、である。

まず、全窒素の降雨流出特性について述べる。図-4(a)~(c)には、水質観測が行われた1995年7月4日18:20から7月5日17:50までの全窒素濃度と各流出成分の構成比の変化の様子を時系列にしたがって示してある（ただし早い中間流出成分は出現が遅れているためにデータ数が少ない）。(a)、(b)、(c)がそれぞれ、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となっている。(a)を除いて複雑な挙動を示しているが、各グラフを概観すると早い中間流出成分と遅い中間流出成分の構成比と全窒素濃度とは右下がりの負の相関を示し、地下水流出成分の構成比と全窒素濃度とは右上がりの正の相関を示している。以上のことから、この降雨イベントにおいて全窒素は比較的深い土壌層が主な流出源であり、地下水流出成分によって、渓流へと運ばれていることが示唆される。相対的に早い中間流出成分と遅い中間流出成分は渓流水濃度形成に対して希釈成分としての役割を果たしている。

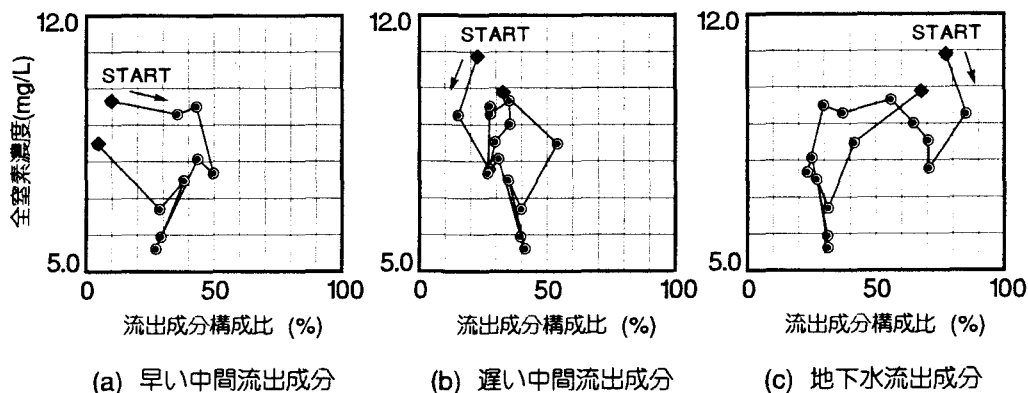


図-4 流出成分構成比と全窒素濃度の経時変化

鍋田川 1995年7月4日 18時20分 - 7月5日 17時50分

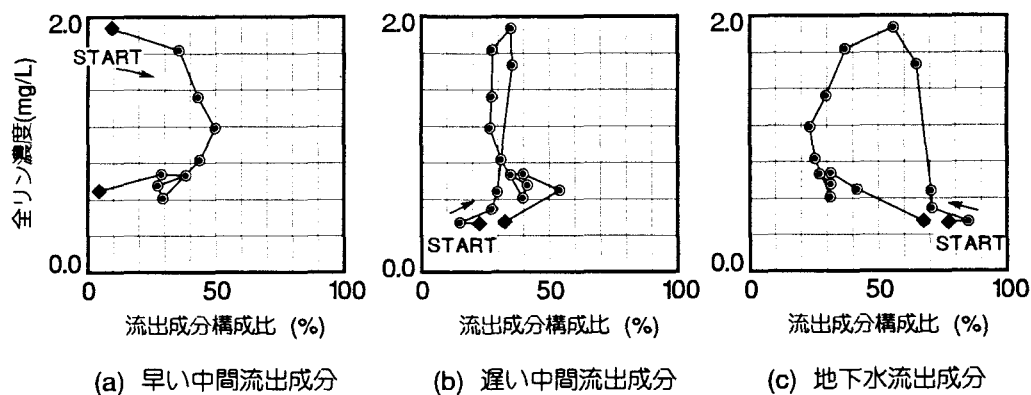


図-5 流出成分構成比と全リン濃度の経時変化

鍋田川 1995年7月4日 18時20分 - 7月5日 17時50分

次に全リンの降雨流出特性について述べる。図-5(a)～(c)に全リン濃度と各流出成分の構成比の経時変化の様子を示す。全リンは全窒素と異なり各流出成分の構成比と濃度変化の関係が明瞭である。まず早い中間流出成分についてみると、構成比が増すにつれて全リン濃度が急激に減少している。また構成比が最大となって、減少に転じて濃度は回復せず低下し続けている。したがって早い中間流出成分は全リンの渓流水濃度を希釈する役割を持つと考えられる。次に遅い中間流出成分と全リン濃度の関係をみると、この流出成分の初期増加において急激に濃度が上昇していることが分かる。しかしながら構成比が最大値となる以前に濃度が急激に減少している。これは遅い中間流出成分が発生する土壌層に全リンが多く蓄積されていることを示すものである。最後に地下水流出成分をみると、グラフは明瞭な左回りのループを描いている。またグラフ全体としては右下がりの傾向にあることから、地下水流出成分にはほとんどリンが含まれていないことが分かる。これは図-3に示した渓流水全リン濃度のグラフで降雨発生前と降雨発生後の濃度が降雨中の濃度と比較して極めて低いことから判断できる。

4.4 土地利用形態と全窒素・全リンの流出特性

各流出成分の構成比と全窒素、全リンの渓流水濃度変化とを比較することによって、鍋田川上流域における全窒素と全リンの主な流出源ならびに流出経路が明らかになった。本流域においては全窒素及び全リンの内容について観測されていないので、得られた結果をこれまで扱ってきた森林試験流域での結果（溶存態物質濃度の流出過程）と厳密に比較することは出来ないが、一般の自然林における窒素、リンの流出過程とは明らかに異なるものである。例えば自然林に覆われた一般的な流域では、窒素はリターや動物の遺骸などが存在する比較的浅い土壌層に偏在している。したがって一般的には、そのような土壌層から発生する中間流出成分が卓越すると渓流水窒素濃度の上昇が観測されることが多い⁹⁾。しかし本流域では、窒素の主な搬送主体が地下水流出成分という土壌の深層から発生する流出成分となっており、降雨に伴う中間流出成分は相対的に渓流水濃度に対して希釈作用を持つことが分かった。この原因の一つとしては、流域内に散在する農地、ゴルフ場ならびに宅地の影響が考えられる。鍋田川流域は流域面積の約11%が農地とゴルフ場で占められていることから、例えば一因として使用される肥料に含まれる大量の窒素が土壌中を浸透降下して地下水層まで達し、地下水流出成分の全窒素濃度が高くなっている可能性が考えられる。

5. おわりに

本論文では、直列二段タンクモデルによって分離した流出成分の増減と渓流水濃度の経時変化とを比較するという手法で、ある程度開発が進んだ森林流域（鍋田川上流域）における降雨イベント中の全窒素・全リンの流出特性について定性的な把握を試みた。その結果、全窒素は主として地下水層から地下水流出成分によって、全リンは土壌中層から中間流出成分によって大量に流出することが分かった。これは徳島県白川谷森林試験流域や国立環境研究所筑波森林試験流域での窒素およびリンの流出過程とは明らかに異なるものである。しかし対象とする流域によって物質の流出過程は異なるものの、物質の流出機構は基本的に雨水流動の上に成り立っていることには変わりない。したがって、本論文で対象としたようなある程度開発が進んだ森林流域、および全窒素・全リンという物質形態に対しても、現在開発を進めている物質流出タンクモデルを適用できる見通しを得た。将来的には、本論文で得た知見を活かし、様々な森林流域の水質調節機能を定量的に評価したいと考えている。

謝辞

最後に本論文をまとめるにあたり、現地観測やデータ整理に尽力頂いた大阪産業大学工学部土木工学科の重光研究室の学生諸君、徳島大学大学院生の広本勝昭君、ならびに高松工業高等専門学校の学生諸君に厚く御礼申し上げます。

本研究は平成7年度大阪産業大学学術研究助成金（代表者、大阪産業大学工学部、重光世洋）の補助によって行われたものであることを付記し、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 端野道夫・吉田弘・村岡浩爾：森林水循環モデリングと水収支の評価，水工学論文集，36，pp. 521-528，1993.
- 3) 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，Vol. 6，No. 1，pp. 19-30，1993.
- 4) 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.