

山地小流域での渓流水質形成過程に関する基礎的検討

Formation process of streamwater quality in small mountainous forested basin

吉田弘^{*}・端野道夫^{**}・田村隆雄^{***}・村岡浩爾^{****}

By Hiromu YOSHIDA, Michio HASHINO, Takao TAMURA and Kohji MURAOKA

This study focused on investigating the formation process of streamwater quality in small mountainous forested basin. Streamwater and soil water quality were observed and all solutes were classified into three types. In order to comprehend the formation process of the streamwater concentration, typical two solutes, NO_3^- -N and SiO_2 were picked up and the relationships among the structure of runoff components and both streamwater and soilwater concentrations were investigated. The roles of runoff components in the formation process of streamwater concentrations were qualitatively discussed.

keywords: streamwater, soilwater, solute transport, forested basin, runoff separation

1. はじめに

森林流域では、水分や養分が土壌、植生、大気の構成する連続体（Soil-Plant-Atmosphere Continuum：略称SPAC）を介して循環している。林外雨を通して系外からSPACへ取り込まれた後、最終的に溪流へ流出するまで様々な経路を通過する間に受ける生物・化学的作用（植生による吸収、土壌微生物による無機化、イオン交換等にもともなう溶脱・吸着など）によって質的にも量的にも大きく変化することが現地観測を通して定性的に明らかにされつつある¹⁾。こうした変化の過程で、森林土壌の有する大きな緩衝能によって物質の流出が調節されることから、渓流水質は安定しているといわれている。すなわち、このような水質調節機能が最近話題になっている森林の水質浄化機能の本質であると考えられる。森林流域における物質循環機構の把握と渓流水質の定量的な予測は、例えば山林域の開発あるいはダム貯水池の建設にもともなう水質富栄養化の解析といった実務上の問題にとって、その対策を検討する上での重要な指針を提供してくれる。しかしながら現状では、森林流域の物質動態を定量化する有効な手法は確立されていない。

著者らは物質動態の定量化手法として数理モデルを採用するのが有効と考えているが、そのためには、さ

*	正会員	工修	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)
**	正会員	工博	徳島大学教授	工学部建設工学科	(同 上)
***	学生会員		徳島大学大学院	工学研究科建設工学専攻	(同 上)
****	正会員	工博	大阪大学教授	工学部土木工学科	(〒770 吹田市山田丘2-1)

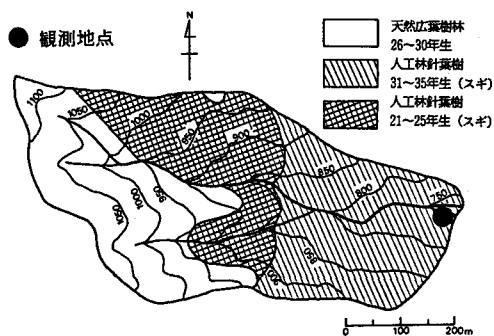


図-1 徳島県白川谷試験流域の概要

さまざまな素過程に関する水と物質の連成効果を把握することが肝要である。そこで、本研究では森林流域内における物質循環モデル構築のための先鞭として、山地小流域で林外雨、林内雨、樹幹流、渓流および土壌水質の観測を行った。観測は後述のように2週に1回の定期観測とある降雨イベントでの集中観測とからなる。物質循環過程が森林生態系と不可分な関係にあることはいうまでもないから、本来であれば、降雨イベントに関する短期的な解析に加えて季節変動を考慮にいたした長期的な解析が必要である。しかし本論文では、雨水流出にとまなう渓流水質の形成過程に関する定性的な考察を行うことを目的としている。特に渓流水質の形成機構の解明において重要である降雨流出成分の分離を著者らの森林水循環モデル²⁾によって行うことで、詳細なメカニズムの把握を目指す。したがって、ここでは季節変化よりも主として溶存物質の短期的な降雨流出機構に焦点を絞って議論する。

2. 実森林流域の概要

水質観測の対象としたのは図-1に示す徳島県白川谷森林試験流域である。流域面積は23ha、標高は740m~1100m、流域平均勾配は21.5°である。地質は砂質片岩と泥質片岩の互層をなしており、流域の大部分を褐色森林土が占める。流域上流側の約2/5が天然落葉広葉樹で、下流側の約3/5がスギの人工林でそれぞれ覆われている。流量は流域末端の砂防ダムに設けられた流量堰で、林外雨量はダムサイトの転倒マス型雨量計で、樹幹流下量は約31年生スギを対象に転倒マス型雨量計で観測した。林内雨は転倒マス型雨量計2台と面的情報を取得する目的で、水平受水面積7.2m²の集水板の両方で観測されている。また、流出解析のために

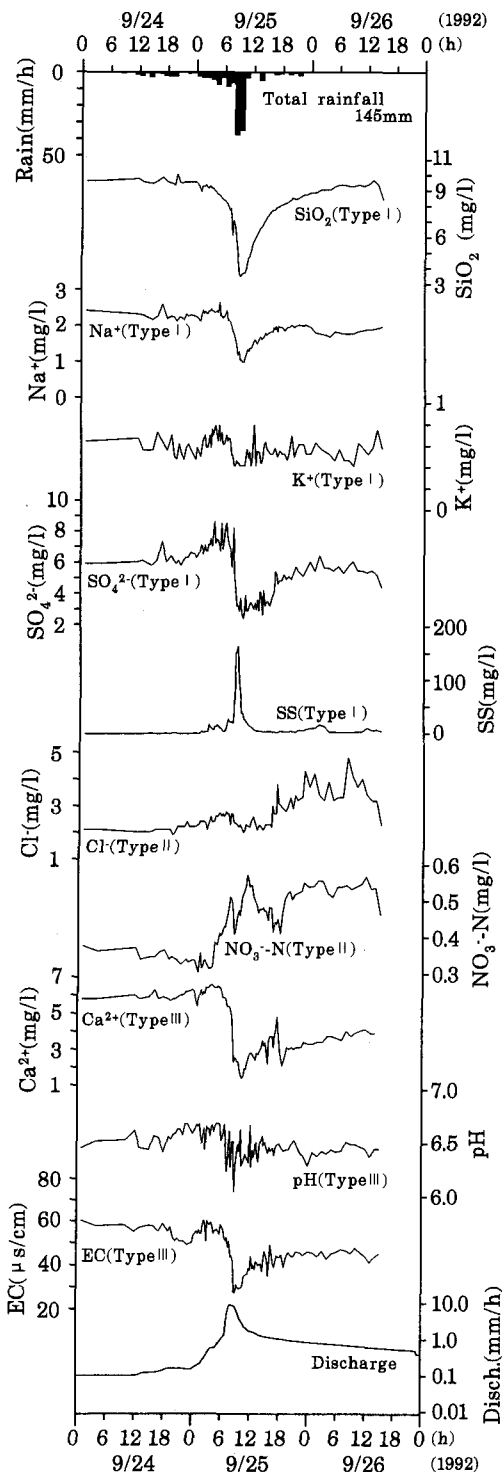


図-2 渓流水質濃度の降雨流出特性

気温、相対湿度、風速、純放射量、全天日射量が10分ごとに樹冠上約2m付近で観測されている。土壌水分ポテンシャルは樹幹流下量観測木の周辺で、10cmから10cmピッチの7深度で10分ごとに観測されている。なお、本流域では日照時間が観測されていないため、北東約21kmに位置する水資源公団池田総合管理所での観測値を援用している。水質観測のための採水は主として降雨流出特性の把握のために行った1992年9月23日から9月26日にかけての降雨イベントを対象とした集中観測とおよそ2週間に1回の定期観測とにおいて行った。渓流水はダムの上流部において流出ピーク時には最短15分、その前後においては30分～3時間の適当な間隔で採取した。土壌水は先端にポーラスカップのついたポリエチレンロッドを10cmから10cmピッチの5深度になるよう埋設し、土壌水採取装置（サンケイ理化製）を用いて、降雨イベント中で数回にわたって約0.5気圧程度で吸引採水した。本観測では出水中の採水であることと、0.5気圧程度の吸引圧から考えて、いわゆる重力水を採水できているとして取り扱う。林外雨、林内雨および樹幹流の水質については、ポリエチレン製タンクに集水し、定期観測の都度に採水した。本研究での解析対象物質は、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SiO_2 、pH、EC（電気伝導度）、およびSSである。

3. 降雨出水時における渓流水質、土壌水質の変動特性

一降雨の前後における渓流濃度変化に着目すれば、平田・村岡¹⁾が筑波山麓での観測において報告しているのと同様に、ほぼ次のような3タイプに分類できることが確認された。以下で、その詳細について述べる。

3・1 渓流水質の変動特性

図-2に観測期間でのハイドログラフ、ハイドログラフおよび渓流水における NO_3^- -N、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 SiO_2 、pH、ECおよびSS濃度の経時変化例を示す。この期間の総降雨量は145mmで、特に30mm/h程度の高強度の降雨が9月25日の8時から10時にかけて集中したために、ハイドログラフは典型的な1山型の非常に切り立った波形を呈している。それゆえに K^+ を除いた大抵の物質では、流出のピーク付近で濃度が減少する傾向にある。

(a) Type I（濃度回復型）

これはハイドログラフのピーク前後において濃度が変化しない（ピーク前の濃度に回復する）場合である。これと明瞭に適合する物質としては、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、EC、pHおよびSSの6つがある。いわゆる直接流出成分（＝表面流出成分＋早い中間流出成分）の終了後、ほぼ地下水流出成分のみとなった時点ではベース濃度まで回復していることから、基本的に物質濃度は地下水濃度によって支配されており、早い中間流出成分はもちろんのこと遅い中間流出成分について少なくとも地下水流出成分よりも濃度は薄いことがうかがえる。

(b) Type II（後期高濃度型）

これはハイドログラフのピーク後濃度の方がピーク前濃度よりも高い場合である。これと明瞭に適合する物質としては、 NO_3^- -N、 Cl^- の2つがある。後述のように流出の後半で濃度が上昇するということは、遅い中間流出あるいは地下水流出成分の全体に占める割合が大きくなるほど、これらの流出成分が濃度上昇に寄与しており、地下水濃度が大きく変化していない場合、特に遅い中間流出成分の濃度が高まっていることを示唆している。

(c) Type III（その他）

これはハイドログラフのピーク前濃度の方がピーク後濃度よりも高い場合である。これと明瞭に適合する物質としては、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および Na^+ の3つがある。定期観測結果から判断して最終的にはベース濃度へ戻るものと予想されるが、降雨流出直後では明らかに流出前に比較して低下したままである。地下水の情報がないために即断できないが、地下水濃度の低下が示唆される。

3・2 土壌水質の変動特性

土壌水質の鉛直分布をType IとType IIについて図-3および図-4にそれぞれ示す。ただし、採水に時間がかかることから図中の濃度はその時刻の瞬間値ではなく、その直前に行った採水時点からの平均値であることに注意されたい。なお、図-2のハイドログラフより判断して、9月23日3:00は降雨前、9月24日18:00はおおよそ先行降雨イベントの期間、9月25日10:45はハイドログラフの立ち上がり期間ならびに9月26日15:30はハイドログラフの通減期にそれぞれ相当する水質を採取していると考えられる。

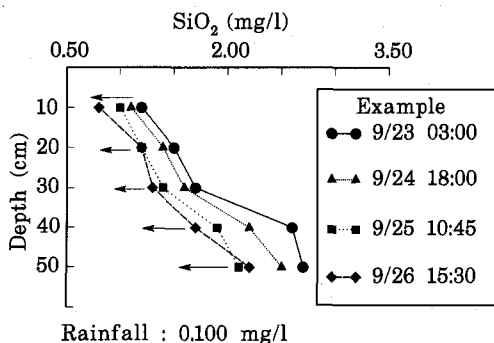


図-3 土壌水 SiO_2 濃度の鉛直分布

(a) Type I

代表物質として SiO_2 を取り上げる。図-3をみると明らかに土壌深部ほど多量に含有されていることが示されており、 SiO_2 が純粋に岩石起源であって、しかも接触時間が長いほど濃度が高まることを示している。さて降雨イベントを通してみると、いずれの土壌深度においても濃度は減少傾向にあり万遍なく流出している様子がうかがえる。

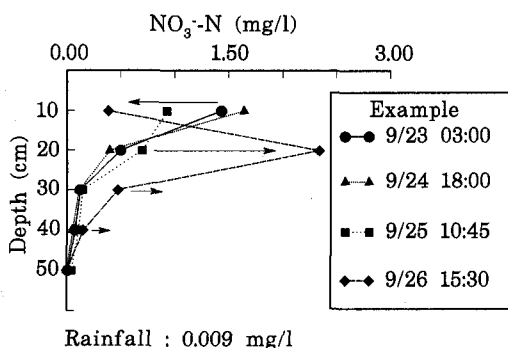


図-4 土壌水 NO_3^- -N 濃度の鉛直分布

(b) Type II

代表物質として NO_3^- -N を取り上げる。図-4より通常は SiO_2 とは逆に、表層付近ほど多量に含有されていることが判る。これは窒素が植物の必須元素であるため根系の発達している表層付近に蓄積されることに起因する。ただし、降雨流出が始まるといわゆるA層に位置すると考えられる10cmで濃度は大きく減少するが、それよりも下位の層位ではむしろ濃度が高まる傾向が読み取れる。とりわけ20cmでの9月25日から26日にかけての濃度上昇高が大きい。これは雨水の浸透降下に付随して NO_3^- -N の高濃度な部分が下方へ移動したためと考えられる。したがって、 NO_3^- -N の溪流への搬出に寄与する流出成分も下層位に由来する成分、すなわち早い中間流出成分から遅い中間流出成分へと変化していることを示唆している。

4. 物質の鉛直分布と降雨流出成分の分離結果に基づく渓流水質形成機構の検討

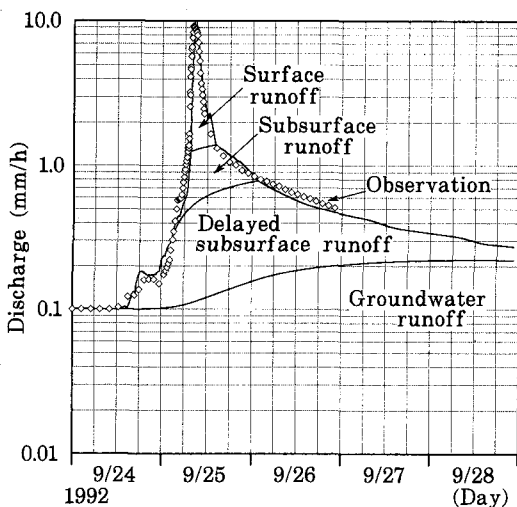


図-5 渓流水の流出分離結果

図-5に著者らの森林水循環モデル²⁾による降雨流出成分の分離結果を示す。全般にわたってハイドログラフを再現できているのが判る。以後はこの分離結果を用いて議論する。

渓流水質の形成機構を検討するためには、時々刻々において溶存物質運搬の担い手となる流出成分を的確

に把握し、流域内での雨水流動と連動させて物質動態を追跡すればよい。そこで、 SiO_2 と $\text{NO}_3^- - \text{N}$ を対象として各流出成分の構成比と溪流濃度の関係を以下で検討する。

4・1 SiO_2 の溪流濃度形成機構 (Type I)

図-6(a)~(d)に溪流濃度と表面流出、早い中間流出、遅い中間流出および地下水流出成分の構成比との関係を示す。図より直接流出成分となる表面流出成分および早い中間流出成分が増加すると溪流濃度は減少している。したがって直接流出成分は常に溪流濃度形成機構において希釈効果を発揮していることが示される。これは、例えば同じく SiO_2 に関して島田・大手・徳地・鈴木³³⁾(桐生試験地)や田中・山崎⁴³⁾(多摩丘陵)が観測した結果と非常に類似している。ただし図-6(a)ではヒステリシスが認められることから、希釈成分として有効に作用するのは土壌との接触時間が極めて短いピーク流量付近であることもうかがえる。(c)および(d)においては直接流出成分が消滅するといずれの成分も濃度上昇に寄与していることが判る。

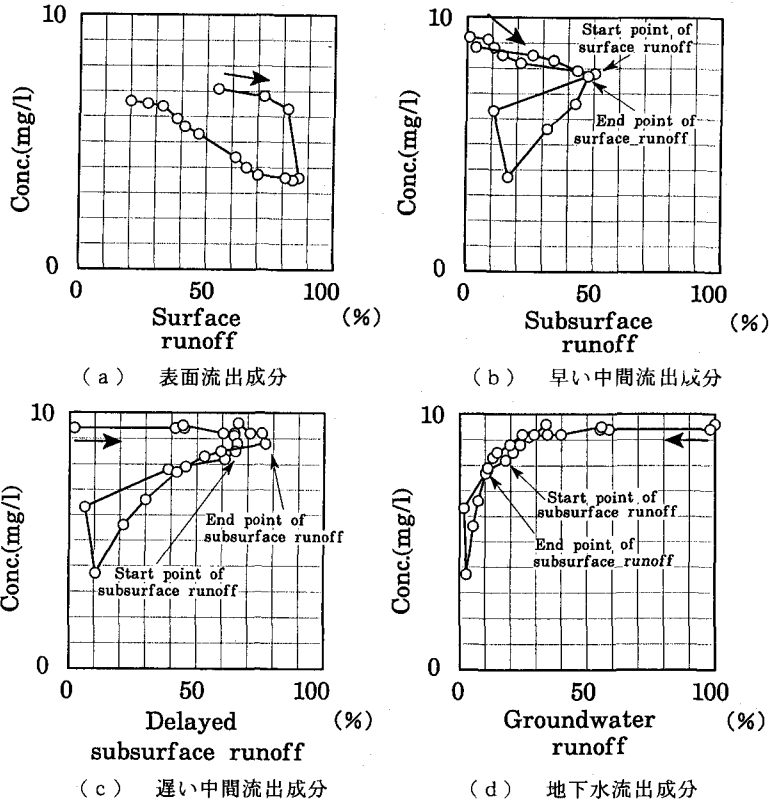
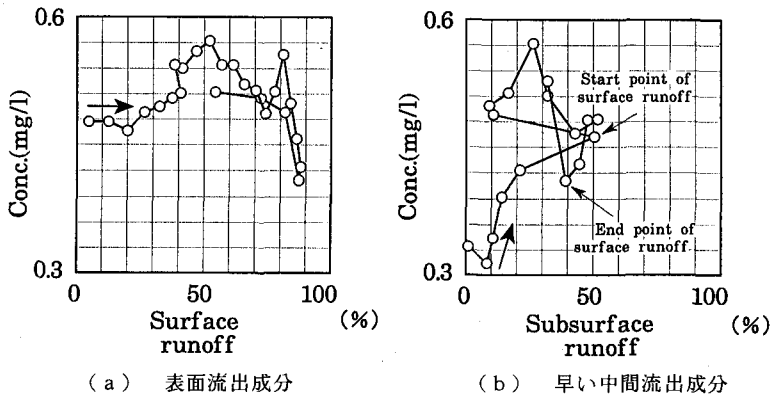


図-6 流出成分構成比と溪流 SiO_2 濃度の関係

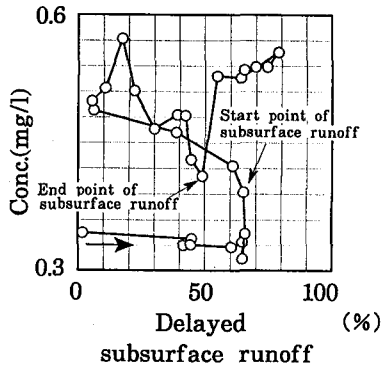
4・2 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の溪流濃度形成機構 (Type II)

図-7(a)~(d)に溪流濃度と各流出成分構成比との関係を示す。図-7(a)を見ると基本的に表面流出成分は溪流濃度を希釈していることが判るが、厳密には、表面流出の初期はどちらかという若干濃度増加に寄与する方向にすらある。 SiO_2 の場合と同様に、やはり流出ピーク付近が最

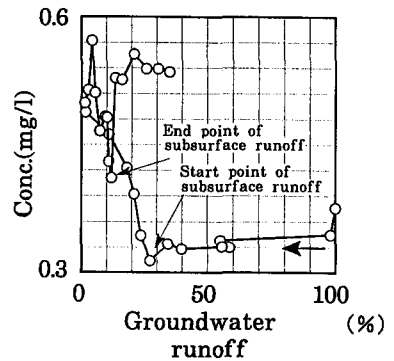


も希釈作用を発揮している。

図-7(b)の早い中間流出に関して、流量の増加期には早い中間流出が増加すると溪流濃度は増加しているが、減少期では逆に濃度が増加しており、流出ピークの前で同一流出成分の果たす役割が全く逆転している。すなわち、流量増加期において早い中間流出成分に多量の $\text{NO}_3^- - \text{N}$ が含有



(c) 遅い中間流出成分



(d) 地下水流出成分

図-7 流出成分構成比と溪流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度の関係

されているが、遷減期では既に搬送主体が他の流出成分に変化していることを示唆している。これと連動して図-7(c)を観察すると、初期は常に負の相関があって決して濃度増加に寄与していないが、早い中間流出が終了してからは正の相関に変化しており、早い中間流出に代わって $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の搬送主体となっていることがうかがえる。これは土壤水質の鉛直分布の変化から判断して雨水の浸透降下にともない高濃度な $\text{NO}_3^- - \text{N}$ を提供するソースが約20cmから30cm付近まで移動したためと推察される。

5. おわりに

本研究では、一降雨に関する水質観測結果に基づいて降雨流出の各成分構成比と土壤水質、渓流水質の関係を通して溪流濃度の形成機構について定性的な考察を行った。従来は流出成分の分離がネックとなって詳細なメカニズムにまで迫ることが困難であったが、本論文では、まず流出成分の分離を行い、分離された結果に立脚する方法論を採っている。すなわち、各流出成分の全流出量に占める割合と溪流濃度との関係を整理すると、それぞれの流出成分の流出機構に対する寄与率が評価できるので、占有割合と溪流濃度の増減関係から具体的な各成分の寄与方向（濃度上昇あるいは希釈）が評価できる。したがって物質の流出経路を時々刻々追跡することが可能となる。この点こそ従来最も必要としていた情報であって、著者らはたとえ定性的であっても、以上のような内部のメカニズムに迫る知見が物質循環機構の数理モデル化を前進させる原動力になりうると考えている。今後は、こうした定性的知見を基礎として定量的に溪流濃度変化を表現し得る数理モデルの開発を行う予定である。なお、本研究の一部は、平成4年度河川環境管理財団による研究助成（研究代表者、端野道夫）の補助を受けました。また、国立環境研究所平田健正主任研究員には多量のサンプルの水質分析を快諾頂きました上に、現地観測に関する様々な御助言を頂きました。徳島県治山林道課・徳島県森林土木協会および水資源公団池田総合管理所よりは、それぞれ試験流域および気象データの提供を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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/II-10，pp.131-140，1988.
- 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) 島田緑子・大手信人・徳地直子・鈴木雅一：山地小流域における地下水・渓流水の SiO_2 濃度形成，水文・水資源学会誌，5(2)，pp.3-11，1992.
- 4) 田中正・山崎崇：森林小流域の水循環過程における水質特性—多摩丘陵源流域を例として—，ハイドロロジー，15(1)，pp.21-32.