

降雨イベントに伴う 森林域の物質挙動に関する研究

THE SUBSTANCE BEHAVIOR IN THE FOREST WATERSHED DURING RAIN EVENTS

縄田孝彦¹・土屋十圀²

¹学生会員 前橋工科大学 工学部建設工学科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

²正会員 前橋工科大学教授 工学部建設工学科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

The purpose of the study is to show clearly that substance behavior in the forest area, and to evaluate a purify function of the forest watershed. We observed the rainfall quality in the forest and out of forest, the soil water, and water channel in the forest area and afforest watershed. As the following account a results of the observation.

(1) Rainfall in the forest included substance from surface of trunks, branch and leaves. Accordingly, the concentration of T-N, T-P, TOC, and other substance for rainfall in the forest increased more than it out of forest. (2) The pH was gradually neutralized in the soil water, more than a rain of forest. (3) Concentration of a cation substance increased, but the pH was neutralized. Consequently, we estimate that exchange to be buffering activities of soil. (4) In comparison with water quality of forest area, there was the difference of change. (5) Due to an analysis of behavior substance in the soil we applied "trace method". As it turned out, rainfall quality is affected by the soil which is over about 70%.

Key Words: substance behavior, afforest area, forest area, buffering activities

1. はじめに

森林には人間社会にもたらす様々な効用があり、森林の公益機能として3つの便益が挙げられる。即ち、水源涵養機能、水質浄化機能など国土保全に関わる環境機能としての便益がある。その他、木材生産などの生産資源として、景観的な効果やレクリエーション効果など文化資源として位置付けられる。

近年、森林のこのような公益機能に関心が向けられ、市民による植林などの管理を行っている地域が多くなってきている。しかし、植林から森林管理の途中にある森林域の水源涵養機能、水質浄化機能などのメカニズムは十分に明らかにされていないのが現状である。

群馬県の森林域は利根川上流域に位置し、県の面積の約67%を占めている。これら森林域は首都圏の主要な水源域となっていて下流都県に水を供給している。このことから、利根川上流域では、首都圏約3千万人の人々への量と質の高い水を確保すること、つまり、水源涵養と水質保全が重要な課題の一つであると考えられる。したがって、森林域の機能を定量化することは重要な意味をもつものである。

本研究では森林のもつ公益機能の中でも国土保全に関わる環境機能の一つである水質浄化機能に着目し、林外雨水、林内雨水、土壌浸透水を観測分析し、水文素過程の中で形成される水質から、森林域での

物質挙動を解析する。一方、裸地域でのそれとの比較を行い、森林の定量化を行う。また、一連降雨について、裸地域に設置している三角堰の流量から、基底流出量と直接流出量を分離し、土壌浸透水質から、基底流出負荷量の算定を行うことで、降雨成分に対する土壌の影響を把握することを目的とした。

2. 観測方法

(1) 観測対象地域^{1), 2)}

観測対象地域を図-1に示す。対象地域は、利根川上流域に位置する薄根川の支川、田代川流域である群馬県利根郡川場村試験地内、通称ヒロイド地区の森林域と裸地域（幼齢林帯）である。両地域の植生は、森林域で樹齢約40年生のスギからなり、裸地域では樹齢が約5～10年生のシイ、クヌギで形成される幼齢林帯となっている。

この地域は、森林の有用性を唱え、森林保全、景観保全に努めている「友好の森」事業の対象地域となっている。よって、森林域及び裸地域は森林の間伐、林道の設置など、ある程度人間の手が加わり、整備されている地域である。裸地集水域（通称ヒロイド原）において、雨水質調査、土壌浸透水質調査および雨量観測、流量観測を行った。観測地の斜度は9度(1/6.3)であり、雑草が多いことからここでは裸地域とした。集水面積は9.3haであり、この流域にて

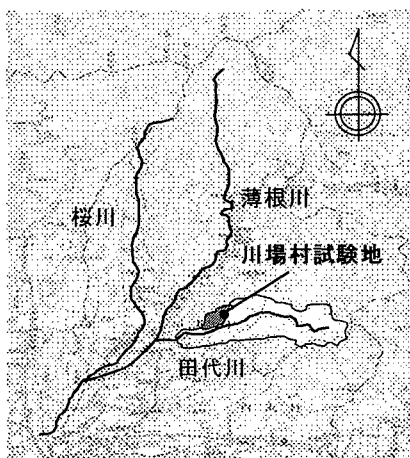


図-1 観測対象地域

流量の観測を行った。この地域の地質の特徴は、表層付近の腐植土層の下層に、火山灰が多く堆積している。火山灰の層厚は深いところで0.8m程度だが、斜面に一樣に分布はしていない。更に、下層には礫混じり粘土、シルトが続いている。

一方、森林土壌の地質の特徴は、表層付近の腐植土層が約0.2~0.5m程度であり、その下層は粘土混じりの火山灰土層が地表から約0.8m程度までとなっている。さらに、その下層は礫混じりの粘土層となっている。

(2) 採水方法

a) 雨水の採水

林外、林内雨水の採水には、図-2に示すようなレインキャッチャーを裸地域と森林域林内に設置し採水した。なお、精度を高めるために、各地域に2ヶ所ずつ設置し、林外では野鳥の影響を防ぐためにネットを施した。また、雨水採水に用いたボトルは、藻類の発生を防ぐために黒いビニルで覆い固定した。

b) 土壌浸透水の採水

森林域では、図-3に示したようなライシメータを設置し、浸透量を計測するとともに、そこからの流出水を専用のボトルに採水した。ここでは、ライシメータは土壌浸透水の採水装置として活用した。

裸地域の土壌浸透水は、先端にポーラスカップを施したサンプリング管を4箇所埋め込み、降雨イベント後に、真空デシケータを用いた吸引法により採水した。地中の採水深さは0.5m~1.5mである。図-4に採水の様子を示す。

c) 河川流出水の採水

裸地集水域（幼齢林帯）にて三角堰を設置し、比較的規模の大きい降雨イベントを選定し（NO.4, 台風15号時）、自動採水式のリキッドサンプラーを用いて、1時間間隔で採水を行った。

(3) 観測期間

観測期間は2003年7月から12月までの6ヶ月間で、

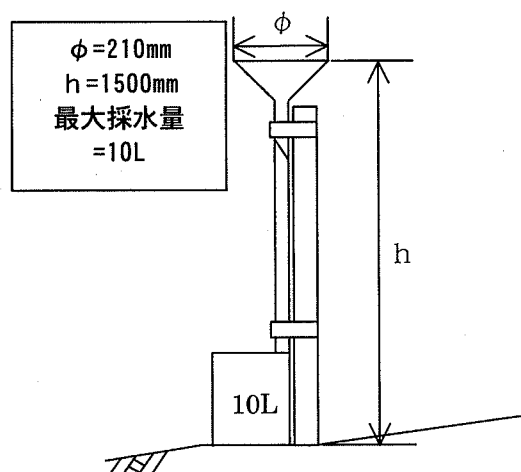


図-2 レインキャッチャー

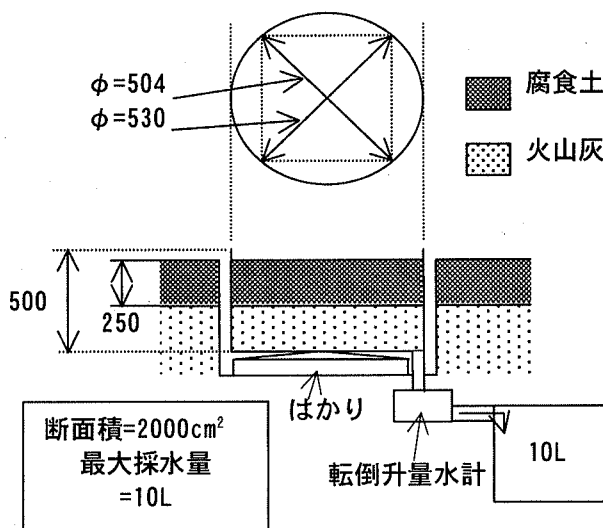


図-3 ライシメータ

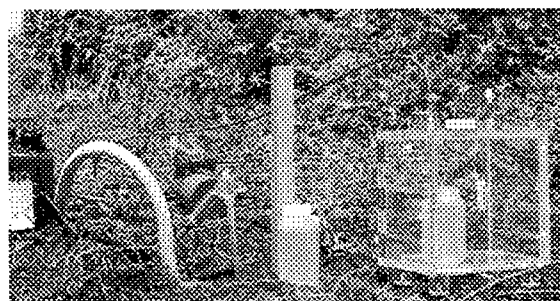


図-4 土壌浸透水の採水（裸地域）

表-1 観測期間

NO.	期間	総降雨量 mm	備考
1	7/25~ 8/ 8	35.5	
2	8/ 8~ 8/10	53.5	台風10号
3	8/26~ 9/ 3	31.5	
4	9/20~ 9/22	89.0	台風15号
5	10/31~11/14	55.0	
6	11/29~12/ 2	43.0	

この期間の降雨イベントについて、合計6回の観測を行った。表-1に観測毎の期間と総降雨量を示す。

なお、解析に用いたデータは、2003年度、計6回

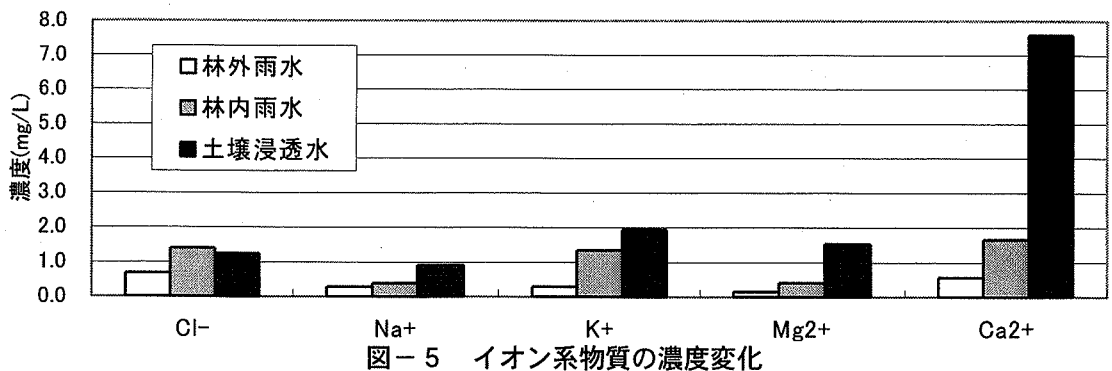


図-5 イオン系物質の濃度変化

のデータの平均を用い、第3章(2)流出過程での水質変化、第3章(3)裸地域との挙動比較においては、裸地域での土壤浸透水の採水にある程度大きい降雨量が必要なために、裸地域、森林域共に、N0.4の台風15号のデータを用いた。

3. 水質分析及び解析結果

(1) 森林域での物質挙動

a) アニオン、カチオン系物質及びpH値

水質分析結果を図-5、6に示す。まず、林外から林内への降雨水質成分の変化をみると、pH、T-P、TOC、及びカチオン系物質で、降雨成分濃度の上昇傾向が確認できた。特に、TOC、K⁺の項目での上昇現象は著しく、林外雨水に比べると、林内雨水はイオン系物質が高いことが確認できた。

これは、降雨が森林樹冠による影響を受けていることが考えられる。降雨の一部は、森林樹冠に達した際に葉や幹などに触れる。そこで、葉や幹の表面の物質を取り込んで地表に落下するため、林内雨水の成分濃度は上昇していると考えられる。

次に、林内雨水が土壤に浸透する過程で、T-P、TOC、いずれも林内雨水で最大値を示すが、土壤水は林外雨水と同程度か、それ以下の値まで下がった。また、カチオン系物質では、上昇の程度に大きな相違がみられるものの全体的に上昇傾向があり、逆に、アニオン系物質であるCl⁻、T-Pの項目で濃度は下降傾向を示した。

pH値の変化をみると、林内浸入、土壤浸透の各過程で中性化傾向にあった。林外ではpH値が4程度と強い酸性雨であったが、土壤に浸透すると6前後の値を示した。また、TOC濃度の下降傾向は、土壤中の微生物により除去され、T-Pは、土壤鉱物に吸着されていることが考えられる。

また、土壤浸透時にカチオン系物質の上昇傾向、pH値の中性化傾向が確認できることから、土壤鉱物中の交換性陽イオンによる緩衝作用が機能していることが推測される。交換性陽イオンの働きによる緩衝作用³⁾の原理は、降雨成分中の水素イオンが、吸着力の強い土壤鉱物中のカチオン系物質と入れ替わることにより、pH値が中性化する現象である。ここで、カチオン系物質の中でも、Ca²⁺、Mg²⁺の上昇が著しいことから、これらの物質が主に作用していると考えられる。

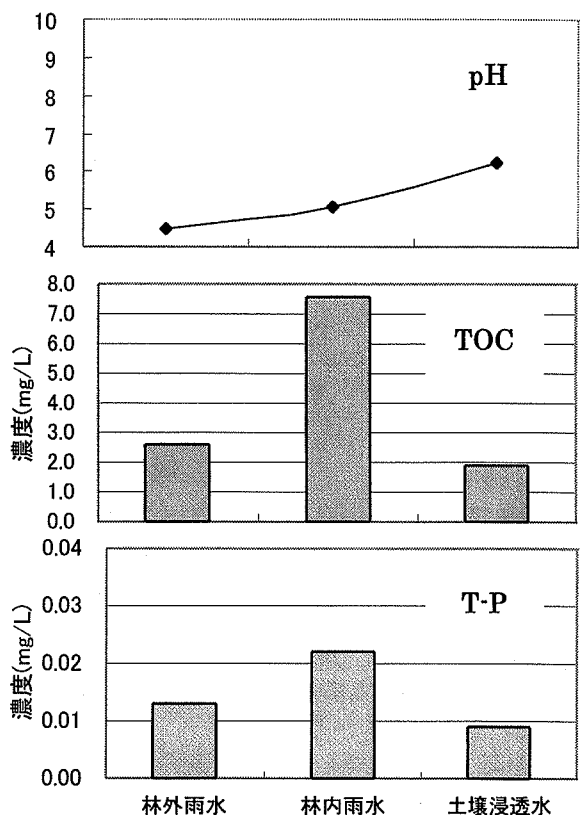


図-6 pH、T-P、TOCの変化

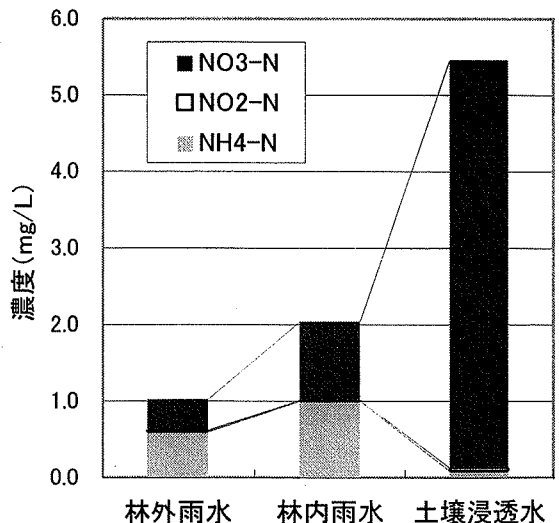


図-7 窒素系物質の変化

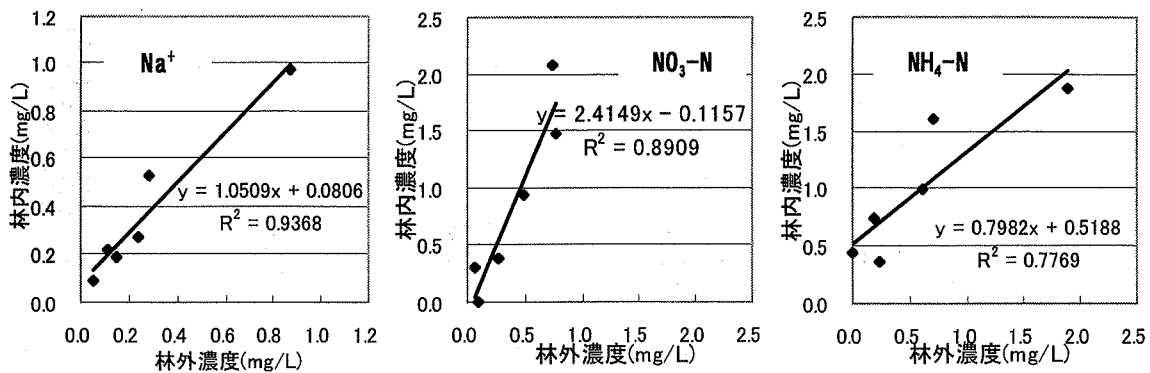


図-8 林外雨水と林内雨水の関係

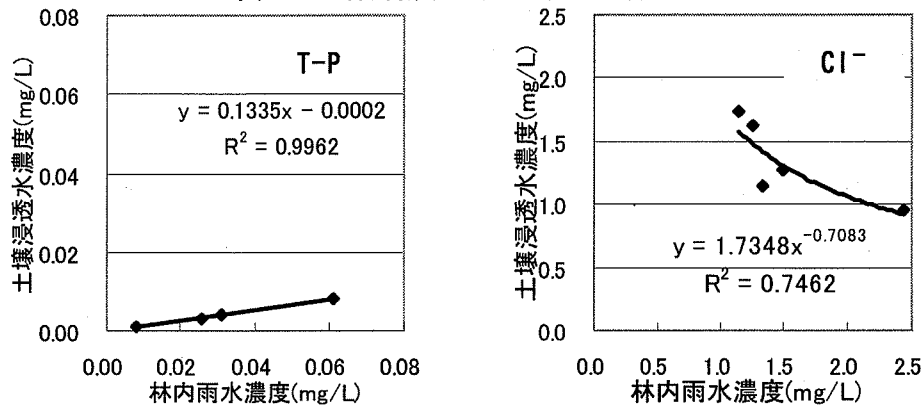


図-9 林内雨水と土壌浸透水の関係

b) 窒素系物質

窒素系物質の挙動（図-7 参照）に着目すると、林内浸入時、土壌浸透時の各過程で濃度の上昇傾向がみられた。また、林内に侵入する際には、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合にはほとんど相違がみられないが、土壌浸透時には窒素構成成分のほとんどを $\text{NO}_3\text{-N}$ が占めていることがわかる。

これは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が森林土壌に浸透する過程で、土壌中の硝酸化成菌による硝化作用^{4),5),6)}を受け $\text{NO}_2\text{-N}$ を経て、 $\text{NO}_3\text{-N}$ に変換されていることを示している。

また、一般には土壌には、硝酸の一部を N_2O 及び、分子状の窒素に還元する脱窒作用があるとされているが、今回の観測では、その作用を大きく上回る窒素成分の上昇傾向がみられた。

これは、森林土壌中に蓄積された窒素成分が溶出していることを示している。

(2) 流出過程での水質変化

降雨イベント毎に、林外雨水と林内雨水、林内雨水と土壌浸透水の関係について調べた結果を図-8、9に示す。まず、林外雨水と林内雨水の関係は、pH値、T-N、 Na^+ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の項目について、林外雨水の成分濃度が高いほど、林内での濃度上昇が大きく、比例関係にあることが分かり、高い相関が得られた。

一方、林内雨水と土壌浸透水の関係をみると、T-P、 Cl^- 項目ではある程度、高い相関で規則性があり、 Cl^- は林内雨水での濃度が高いほうが土粒子に吸着されやすい傾向があり、他の項目についてはほとんど

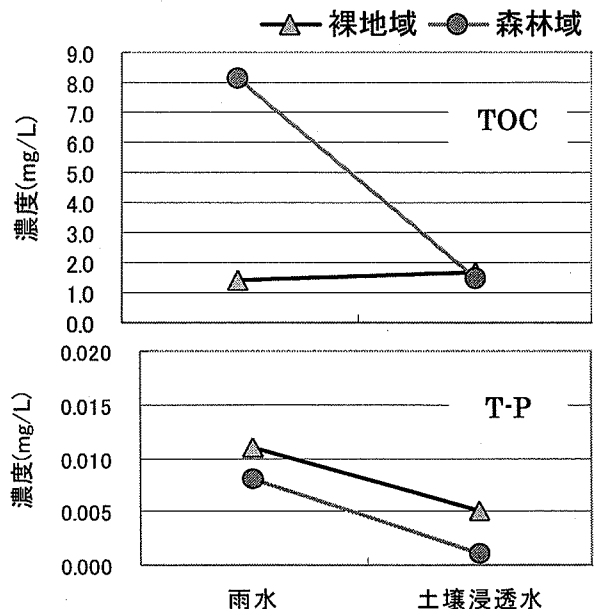


図-10 TOC、T-Pの変化比較

規則性はみられなかった。

これは、林内雨水が樹冠表面の物質を取り込んで濃度が上昇しているのに対して、森林土壌では交換性陽イオンによる緩衝作用³⁾や、硝酸化成菌による硝化作用^{4),5),6)}など、特有の化学反応に依存する部分が多いためであることが考えられる。

(3) 裸地域との物質挙動比較

TOC、T-Pの比較結果を図-10に示す。TOC濃度は、林内雨水が林外雨水と比較して極めて高い濃度

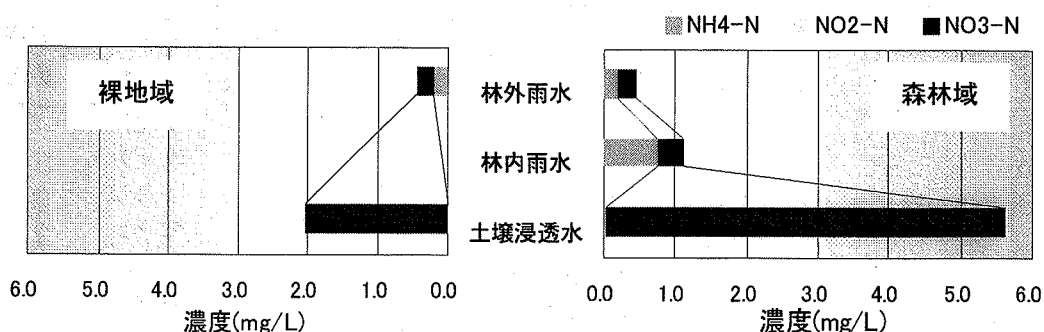


図-11 窒素成分の変化比較

度を示すが、土壌に浸透すると林内、林外ともに同程度の値を示した。つまり、降雨が森林樹冠の表面で取り込むため、濃度が上昇している TOC は、土壌中で完全に除去されていることを示し、裸地域での土壌浸透水よりも低い値になっていることから、森林土壌中の微生物による有機物の除去が裸地域よりも活発であると考えられる。

T-P については裸地域、森林域ともに微量な濃度の減少がみられ裸地域の方が森林域よりも若干濃度が高いことがわかった。他の物質濃度変化については、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- では、林外、林内雨水での濃度にほとんど差がみられなかったが、土壌に浸透すると裸地域では大きな濃度上昇があった。特に、 Cl^- については、裸地域では増加しているのに対して森林域では土壌浸透で濃度が減少していることがわかる。 Ca^{2+} 、 K^+ では両地域で濃度の増加がほぼ等しく、雨水の段階での差がそのまま土壌浸透水での差となっていた。

最後に、窒素物質の比較結果を図-11に示す。窒素成分の変化は、森林域での増加が顕著であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の変化をみるとT-Nの増加量がほとんどを $\text{NO}_3\text{-N}$ が占めていることがわかる。

これは、両地域の植生の違いが大きく関与しているものと思われる。森林域では地表面を覆う植生が少ないのに対して、裸地域では低丈の野草などが多く生い茂っているため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は様に覆われた植生によって吸収されていることが予測される。また、全体量が大きく増加している原因としては、土壌中に蓄積されていた窒素成分が過飽和状態になっているためと考えられる。

4. トレーサー法による検討

植林から森林管理の成長過程にある裸地域（幼齢林帯）にて、降雨流出に伴う基底流出の水質がどのような影響を与えているのかを調査した。その調査方法として、トレーサー法による検討を行った。

(1) トレーサー法⁷⁾

河川への流出成分が、降雨に由来する直接流出成分と降雨以前に流域内に貯留されていた基底流出成分の2成分から構成されているものとし、かつ、時

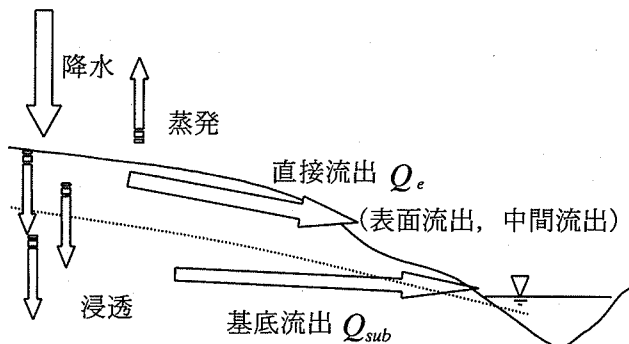


図-12 流出概念図

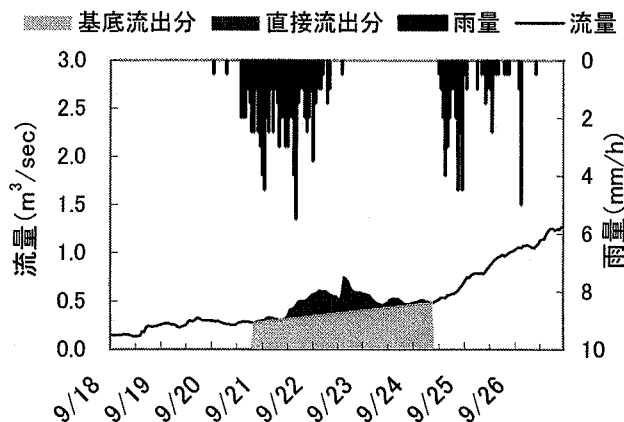


図-13 ハイドロハイトグラフ

表-2 分離計算結果 (m³/s)

直接流出流量	基底流出流量	総流出流量
Q_e	Q_{sub}	Q_t
9.44	32.62	42.06

間的に定常と仮定すると、河川の特定期間における水収支式と質量収支式は次式のように表される。

$$Q_t = Q_e + Q_{sub} \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_e Q_e + C_{sub} Q_{sub} \quad (2)$$

ここで、 Q は流量を、 C はトレーサー濃度を表す。

添字 t , e , sub はそれぞれ総流出、降水、地中水

を意味する。(1)、(2)式より地中水濃度 C_{sub} は以下
のようになる。

$$C_{sub} = \frac{C_t Q_t - C_e Q_e}{Q_{sub}} \quad (3)$$

式(3)の右辺の各項は実測することが可能である
ことから、異なる流出成分の間で化学反応がないも
のとし、この式に基づいてトレーサー法に適用させ
ることにより、地下水流出成分のトレーサー濃度を
算出することが可能である。よって、河川流出水成
分(総流出成分)に対して地中水成分(基底流出成
分)がどの程度依存し、影響を受けているかを求め
ることができる。

トレーサー法における、流出現象の基本的概念を
図-12に示す。

(2) トレーサー法による検討

2003年9/18～9/26までの降雨イベントに対する
ハイドロハイトグラフを示す。なお、総降雨量は
89.0mmである。この図-13が示す通り、9/25の午
後から再び降水が始まっているため、台風15号時に
流量が増加し23日頃にピークを示してから減少し、
再び増加している。9月20日の20時から9月24日の9
時までの間のこの降雨イベントを対象に、直接流出
流量と基底流出流量の分離計算を行った。流量の分
離計算結果を表-2に示す。

実測値より求められた総流量と、計算により分離さ
れた直接流量、基底流量をそれぞれ、 Q_t 、 Q_e 、 Q_{sub} に
挿入し、また、三角堰にて実測した総流出成分 C_t と、
比較的に浅い土壤浸透水を実測した直接流出成分を
 C_e としてヒロイド流域における地下水成分である、
基底流出成分濃度 C_{sub} を求めた。

$$C_t Q_t - C_e Q_e = C_{sub} Q_{sub} \quad (4)$$

さらに、上記の(4)式より基底流出負荷量
 $C_{sub} Q_{sub}$ を求め、総流出負荷量を占める基底流出負
荷量の割合を算出した。基底流出負荷量、基底流出
負荷量が総流出負荷量を占める割合を算出した結果
を表-3に示す。

表-3より、この流域ではほとんどの水質項目に
おいて、基底流出負荷量が7割程度と河川流出成分
に大きく影響を与えている事がわかった。

5. まとめ

本研究では、人工林である森林域(スギ林)及び
裸地域(幼齡林帯)を対象とし、約1年間に渡り観
測を行った。その結果、得られた成果を以下に示す。

降雨が林内に侵入する過程では樹冠表面の物質を
取り込んでいるため、T-N、T-P、TOC項目などで
成分濃度は上昇傾向にあった。降雨が土壤に浸透す

表-3 トレーサー法による解析結果

項目	基底流出負荷量 $C_{sub} Q_{sub}$ (mg)	基底流出負荷量 が占める割合(%)
TOC	30.88	66.76
T-N	54.13	70.33
T-P	0.12	71.96
Na ⁺	89.86	78.56
K ⁺	51.66	75.36
Ca ²⁺	251.23	80.19
Mg ²⁺	134.14	78.56
Cl ⁻	93.84	83.26
NO ₃ -N	51.60	73.03

ると、T-P、TOC濃度は再び下降したがT-N濃度は
更に上昇傾向を示した。pH値については各過程で中
性化がみられ、強い酸性雨であった林外雨水は森林
土壤中では緩和されていることがわかった。また、土
壌中ではカチオン系物質濃度の上昇傾向とpHの中
性化傾向が確認できることから土壤鉱物中の交換性
陽イオンによる緩衝作用が機能していることが推測
された。

森林域と裸地域では降雨成分の変化量に相違がみ
られ、特に森林土壌でのT-N濃度の上昇傾向が著し
く、そのほとんどをNO₃-Nが占め、土壌による強い
硝化作用が確認された。

裸地域での、トレーサー法の適用結果より、河川
に流出する総負荷量のうち、基底流出負荷量が占め
る割合は7割程度と大きいことが分かった。

今後の課題としては、継続的なデータ収集を行い
季節的な変化の検討、植生の違いによる物質挙動の
相違を明らかにすることなどが挙げられる。

謝辞：本研究を行うにあたり群馬県並びに川場村役
場からの貴重な資料や観測地の提供があった。さら
に、平成15年度(財)河川環境管理財団の研究助成を
受けていることを記すとともに多くの方々適切な
助言を頂いた。ここに記し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 川場村国土利用計画, 説明資料, p-5, 1998
- 2) 土屋十朗: 中間山村地域からの面源負荷発生・流
出機構に関する研究, 下水道協会公益信託基金
研究報告書, pp.35-36, 2001
- 3) 宮崎毅: 環境地水学, pp.160-161, 東京大学出
版, 2000
- 4) 日本地下水学会: 地下水質の基礎, pp.102-104,
理工図書, 2000
- 5) 太田猛彦・服部重昭: 地球環境時代の水と森
—どうまもり・どうはぐくめばいいのか—,
pp.98-103, 財団法人水利科学研究所, 2002
- 6) 仁王以智夫・木村真人ら: 土壌生化学, pp.111-112,
朝倉書店, 1994
- 7) 田中正: 水利科学 NO.240 —地中水に関する研
究の動向と流域水循環システム(I)—,
pp.14-16, 水利科学研究所, 1998

(2004. 4. 7受付)