

山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について Runoff of Dissolved Matters in Small Mountainous Watershed

国立公害研究所 正員 平 田 健 正
国立公害研究所 正員 村 岡 浩 爾

1. はじめに

森林域は集水域の中で最も面積が大きく、河川最上流部に位置することから、森林域からの物質の流出は河川水質のベースを構成している。ただ森林域の水収支に加え、物質収支までも含んだ研究例は数少なく¹⁾、さらに立地する水文・気象、地形・地質、植生状態で物質の流出特性も異なり、その定量評価を難しくしている。また渓流水を構成する流出成分の発現の場で物質濃度は異なり、そのため森林域からの負荷量を精度よく見積もるには、降雨から渓流水に至るまでの水分の移動経路を知る必要がある。逆に、物質の降雨に対する応答特性の違いを利用して、降雨流出成分の分離をする試みもなされている。トレーサとして電気伝導度²⁾、 NO_3^- -N^{3)・4)}、水温⁵⁾、環境同位体⁶⁾等が知られており、これらのトレーサと数値フィルターを併用した分離手法も提案されている⁷⁾。

こうした背景から霞ヶ浦に流入する面源負荷の一つとして、森林域からの流出量を求め、降雨流出の基本構造を知る目的で、筑波山系に森林試験流域を設けた。この試験地で1984年9月から降雨、森林地下水、渓流水の観測を開始した。本研究は、試験地の概要と、これまでに得られた資料の内、渓流水と森林地下水の季節変化、及び降雨時の渓流水質について考察する。

2. 試験地と現地観測の概要

2.1 観測位置と地形・地質

試験流域は、図1にある様に筑波山南東斜面に位置し、流域面積は67.5 haである⁸⁾。標高はおおよそ200mから380mの範囲にあり、流域の平均斜度は約15度である。標高200mの合流地点A1より北、西、南西に3本の渓流A、B、C沢が流れ、流域面積はそれぞれ31.5、19.3、16.7haである。

また試験地全域にわたって植林が施されており、スギ、ヒノキ、アカマツ植林で全流域の85%を占める。地質についてはB沢に沿って顕著な境界が走っており、基岩はB沢より北側で花こう岩、南側で片麻岩となっている。

2.2 現地観測

観測は降雨、渓流水と森林地下水の採取から成る。渓流水については3渓流の合流地点A1を含め、各渓流沿いに14点と残流域X地点の計15地点で採取する。渓流水量はA1地点にフロート式自記水位計

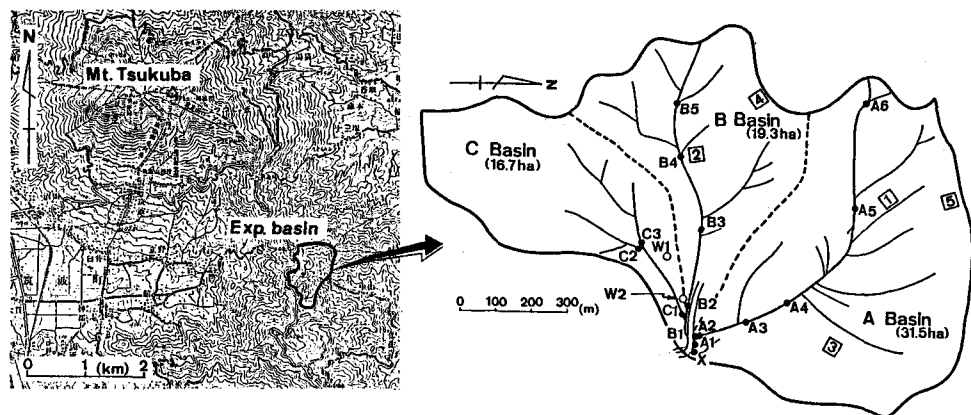


図1 試験地の位置と観測地点

を設置しており、観測水位から流量に換算している。一方降雨はA1地点近くの裸地に転倒マス型雨量計を設け、転倒パルスを検出することによって10分単位の降雨量を観測している。これとは別にボット型雨量計も設置し、降雨を集水する。

森林地下水についてはC沢沿いに2本の観測井W1とW2を建設した。両者の距離は77.2 m、標高差は10.5mである。観測井掘削時の電気検層結果から、W1地点ではGL-4 ~-5 mと-9~-10 m、W2地点ではGL-4~-5mと-8~-9m付近に帯水層のあることが確認されている。そこで、観測井W1では地下水水質の鉛直分布が調べられるようGL-3~-10mの全面に、W2ではGL-8~-9mにストレーナを設けた。いずれの水位もフロート式自記水位計で観測している。

渓流水と地下水は隔週に、降雨は毎週もしくは1雨毎に採取する。こうした定期調査に加え、降雨に対する溶存物質の応答特性を調べるため、降雨時の渓流水質と水量の連続観測もA1とXの2地点で実施した。水質の分析項目は栄養塩類、金属元素、SS、pH、電気伝導度である。

3. 地下水水質と渓流水質の季節変化

本試験地は、無施肥の人為汚染のない自然状態にある。そのため渓流水や地下水のInorg-Nはその大部分がNO₃-Nで占められ、PO₄-Pも0.02mg/l以下と小さい。ここではNO₃-N、SiO₂、Cl、電気伝導度を中心に考察する。

3.1 地下水水質

図2に1984年9月から1985年9月までの地下水位と水質の季節変化を示している。先述のように、W1では鉛直方向に多点で水質を調べているがNO₃-Nについて言うと、水位上昇時に表層付近で濃度の高まりが数回観測されている。ただ水深2m以深ではほとんど差が見られず、ここでは水深8 mの資料 W1-8でW1を代表している。W2についてはGL-8.5 m(W2-8.5)である。

一般の地下水位変動に見られる様に、筑波山森林地下水も降雨に対してある時間遅れを持って変動している。観測開始から冬季にかけて少雨であり、W1の地下水位は漸減している。その間の地下水位はW1でGL-3.2 ~-3.4m、W2でGL-1.0m 付近にある。1985年2月以降の降雨についてW2の水位変動幅は0.5m程度であるのに比べ、6月の降雨に対してW1では2mにも達している。概

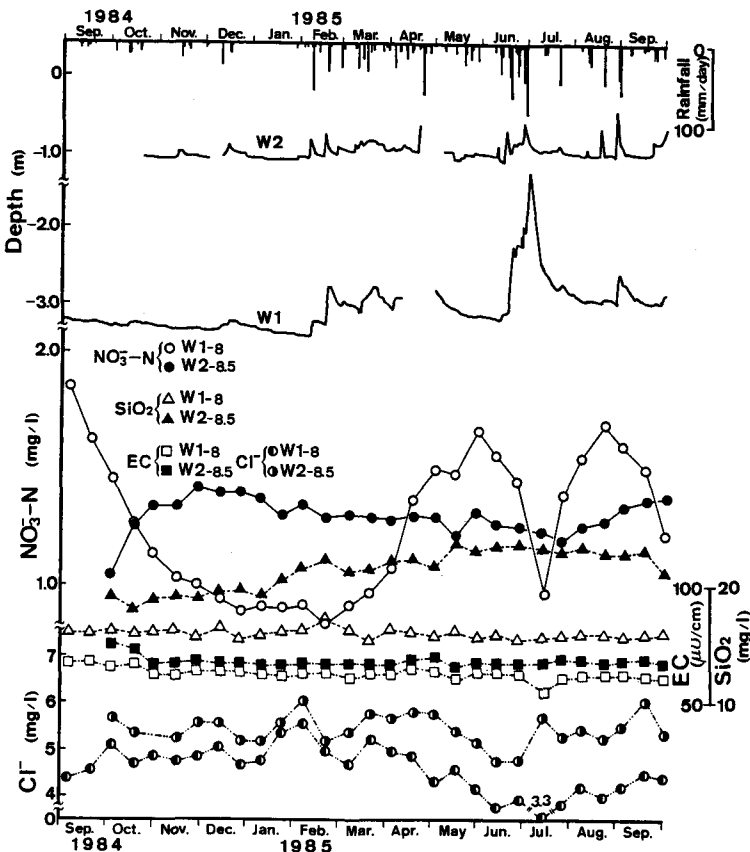


図2 地下水水位と水質の季節変化

してW2の地下水位の上昇と下降はW1に比較して速やかである。これは観測井W2はC沢の北6.7mに建設されており、C沢の水位と地下水位がほぼ同じレベルにあるためと考えられる。

次に水質の中で電気伝導度ECが最も安定しており、目立った季節変化は認められない。Clは冬季安定期から夏季にかけて減少し、その後増加の傾向にある。SiO₂について、W1では安定しているのに対し、W2では冬季から夏季にかけて増加し、季節変化があるようにも見受けられる。これらの水質の中で、W1のNO₃-Nが最も顕著な変動を示し、冬季安定期に最小、夏季に最大となる。また同一試験地内であっても、2つの観測井で水質の変動パターンが違ったり、同じパターンであっても濃度値に差が見られる。これには、地質や地下水流動の違いも含まれるが、W2では第2帯水層のみ対象としているのに対し、W1では観測井全断面にストレーナを設けており、第1及び第2帯水層と土壤水の浸透の影響が現れているのかもしれない。

3.2 渓流水質

試験地最下流端A1地点の渓流水質とW1-の水質を図3に比較している。最初にA1地点のNO₃-Nを見ると、降雨の少ない観測開始から冬季安定期にかけて変動は小さい。しかし2月以降、降雨の増加に伴い濃度とその変動幅は大きくなり、特に降雨時に採水された2月20日と6月25日の濃度は冬季安定期の2～3倍となっている。濃度レベルは異なるが、他の採水地点のNO₃-NもA1と同様の傾向にあった。また地下水水質W1-はA1とある時間遅れをもって変動しているようである。渓流水質は降雨流出の影響を強く受けるため、冬季安定期の両者の濃度値を比べると、SiO₂、EC、Cl共に渓流水A1地点の方が高い。図2から分かる通り、W1-よりはむしろW2-の方が渓流水質A1に近いようである。

他の水質も降雨の増加に伴いその変動幅は大きくなるが、必ずしもNO₃-Nのように冬季安定期の濃度値より高まるとは限らない。一例として図4にSiO₂の季節変化を示している。同図から降雨時に採水された2月20日、5月29日、6月25日の資料で濃度は減少し、その後の無降雨時にはほぼ冬季のレベルに回復している。SiO₂と同様のパターンを描くものにECとClがある。

しかし、これらの資料から直ちに降雨流出の水質に及ぼす影響を論ずることはできない。降雨があったとしても、水量増加時と通減時では水質も異なり、降雨に対して各水質は固有の応答特性を有するからである。溶存物質の降雨流出特性については次節で考察することにする。

4. 降雨流出特性

降雨時の渓流水質と水量の時系列資料は流出負荷量の推定に留まらず、降雨から渓流水に至るまでの水分の移動経路を知る手掛かりとなる。特に森林域は河川最上流部

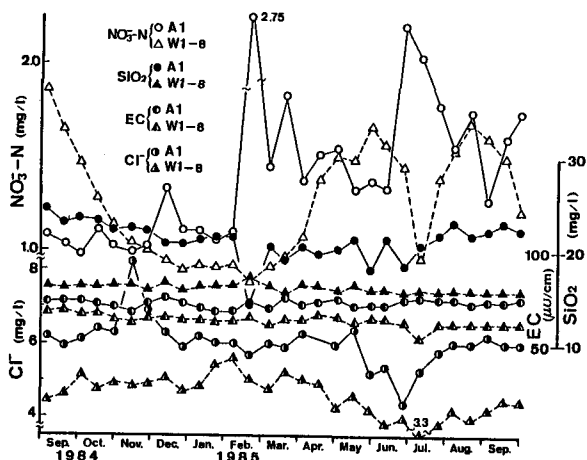


図3 渓流水質と地下水水質の比較

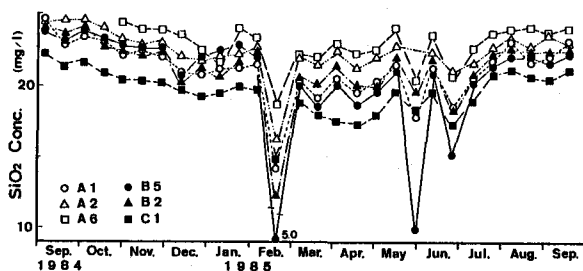


図4 SiO₂の季節変化

に位置し、土地利用形態が単純であることから、河川水質の起源を調べるには適している。ここでは1985年6月に得られた2つの観測資料について考察する。結果は図5から図10に示しているが、図中に描いた水量と水質は全てA1地点の実測値である。残流域からの水量と水質(×地点)も観測しているが、水量にして平常時にはA1の2%、降雨流出時には1%程度であるため考察資料から割愛している。また水量と水質の観測はピーク流量付近では15分間隔、上昇時と速減時は流量変化にあわせて30~60分間隔で行った。

図5は6月13日から14日にかけて得られた $\text{NO}_3\text{-N}$ と負荷量及び渓流水量の経時変化であり、図中下部に降雨に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ も併せて記している。このケースでは降雨継続時間が31時間と長い割には総雨量は48mmであり、時間雨量も最大で4.5mmと小さい。6月11日22時から12日6時にかけて11.5mmの降雨はあるものの、先行降雨終了から13日の降雨開始までに21時間経過しており、水量から見ればほぼ平常時に戻った状態から観測が始まっている。同図から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は流量の増加に伴って減少し、ピーク流量時に最小となる。そして降雨終了後に最大値を取り、その後も高濃度を維持している。一方、負荷量は流量増加が寄与してピーク流量時に最大となっている。

同じ降雨に対して、ECと SiO_2 を図6に、 Cl^- と SO_4^{2-} を図7に整理している。ECと SiO_2 は流量増加時に減少し、概して $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様のパターンを描くが、降雨終了後ほぼ降雨前の値に回復する点で $\text{NO}_3\text{-N}$ の挙動と異なる。特に SiO_2 は降雨中に含まれないため、ECに比べて変動幅は大きく、その特徴はよく表われている。 Cl^- と SO_4^{2-} は降雨流出初期に若干濃度は高まるものの、全体としての流出特性はECや SiO_2 に近い。

次に、6月30日から7月1日にかけて関東地方を通過した台風8506号時の観測結果を図8~10に示す。総雨量は136.5mmである。降雨パターンは4つに分かれ、最大時間雨量は時間経過の

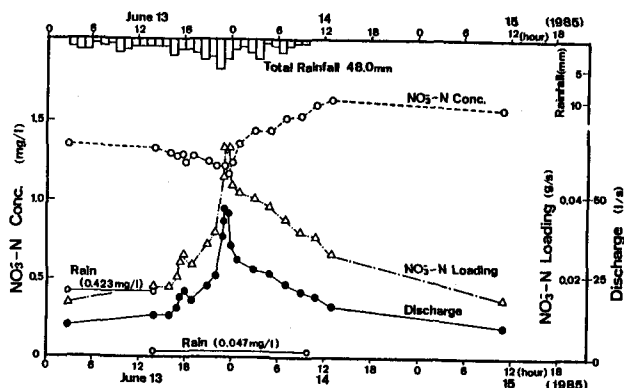


図5 $\text{NO}_3\text{-N}$ の降雨流出特性(1985年6月13日~14日)

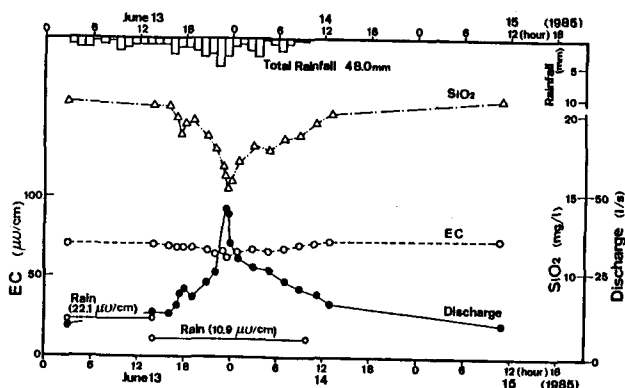


図6 SiO_2 とECの降雨流出特性(1985年6月13日~14日)

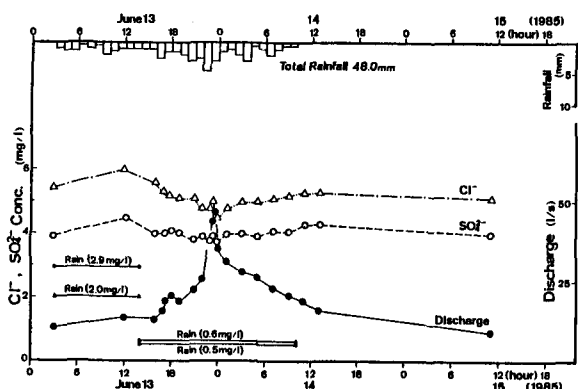


図7 Cl^- と SO_4^{2-} の降雨流出特性(1985年6月13日~14日)

順にそれぞれ6.5、12.0、10.5、12.5mm、先行雨量は 6月28日に 48mm、29日に 1mmである。また観測は第1 番目の降雨終了時から始まっており、そのため降雨前の値として 6月29日の資料を図中に載せている。

NO₃-N について、降雨パターンに対応したピーク流量時に濃度は最小となり、濃度レベルは異なるが定性的には図5と同様のパターンを描く。すなわち、各降雨パターンに対応した流量ピークに遅れて最大濃度が現れ、その値は時間の経過に伴い増加し、降雨終了後の濃度(3.02 mg/l)は降雨前(2.55mg/l)の1.2倍となっている。この結果は図3に見られた降雨時の濃度の上昇を説明している。このケースでは最初の降雨流出の影響が残っている状態から観測が始まっており、そのため観測開始時のSiO₂とECは既に降雨前のそれより小さくなっている。そして流量時系列とは逆位相のパターンを呈し、図6と同様に降雨終了後には降雨前の値に回復していることが分かる。図10は NaとKの時系列であり、NaはSiO₂の、KはNO₃-Nの挙動に近い。これ以外のMgとCaについては NO₃-Nの流出パターンと同様の結果が得られている。

以上をまとめると、NO₃-N の降雨流出特性は降雨終了後、降雨前の濃度より高まることに特徴付けられる。一方SiO₂、EC、Clは降雨終了後、表面流出がなくなるとほぼ降雨前の値に回復する。この結果は土壌水と地下水に含まれるSiO₂、EC、Clに大差ないことを示唆している。さらに降雨と溪流水との濃度値に十分な差があることから、SiO₂等をトレーサとすれば、既往の手法に倣って溪流水を構成する表面流出成分と地中水成分(土壌水+地下水)を分離することができる。ただ、降雨終了後のNO₃-N の高まりは土壌水の流出に由来すると考えられ、表面流出成分と地中水成分の構成比が分かっても、NO₃-Nの挙動は説明できない。

こうした溶存物質の降雨に対する応答特性の違いは、同一降雨の流量に対する負荷量のヒステリシスに見ることができ

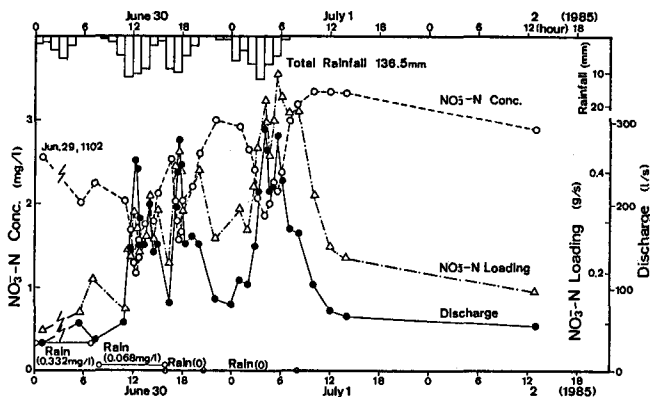


図8 NO₃-Nの降雨流出特性(1985年 6月30日～ 7月 1日)

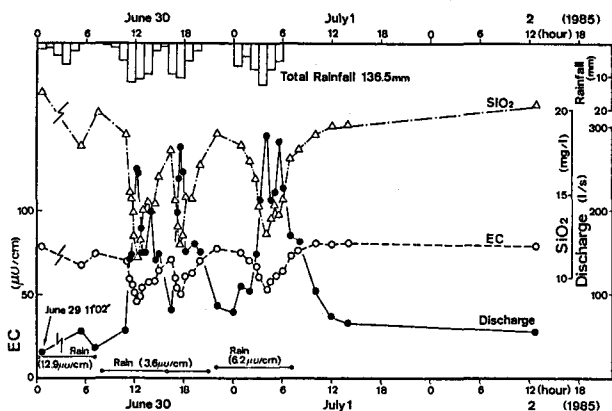


図9 SiO₂とECの降雨流出特性(1985年 6月30日～ 7月 1日)

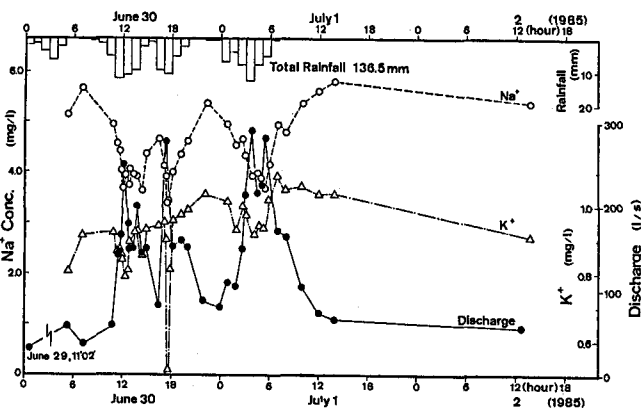


図10 NaとKの降雨流出特性(1985年 6月30日～ 7月 1日)

る。図11は先述した2ケースについて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と SiO_2 の負荷量及びECを流量に対してプロットした結果であり、流量増加時と逓減時を区別して描いている。この内、台風8506号については、逓減特性の明らかな第4番目の流出資料を用いた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は2つの資料共に反時計回りのループを描き、特に台風8506号時の資料で、同一流量に対する流量増加時と逓減時の負荷量の差は大きく現れている。 SiO_2 の負荷量とECは、総雨量48mmの場合顕著なヒステリシスは認められず、一方台風8506号時には反時計回りのループを描いている。

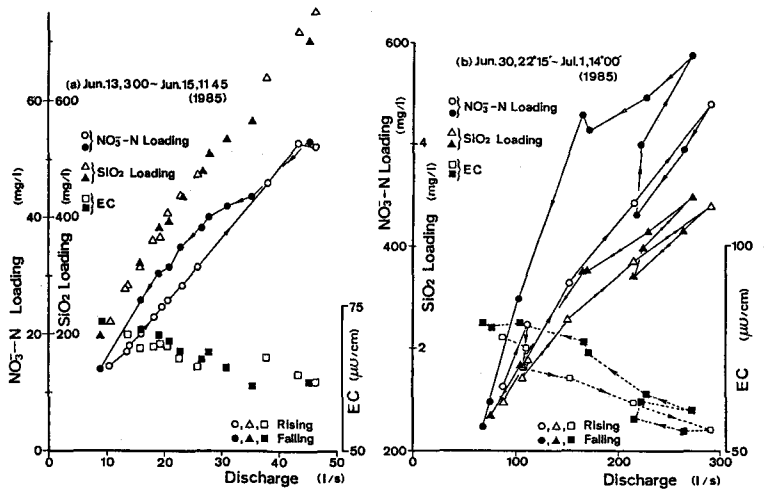


図11 流量変化に対する $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び SiO_2 の負荷量変化とECの変化

5. おわりに

森林域からの流出負荷量を推定するため、筑波山系に試験流域を設け、降雨、森林地下水と渓流水の観測を開始した。降雨時の観測資料の内、降雨に対する SiO_2 、EC、Clの応答特性を利用すれば、従来から指摘されているような表面流出成分と地中水成分を分離できることが確認された。ただ土壤水に由来すると考えられる降雨終了後の $\text{NO}_3\text{-N}$ の高まりを説明するには、土壤水や降雨流出資料の集積と並行して、より詳細な流出成分の分離を図る必要がある。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費・環境科学特別研究（代表者・滋賀県立短大助教授・国松孝男）の助成を得て行われたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩坪五郎・堤 利夫 (1968): 森林内外の降水中の養分量について(Ⅲ). — 流亡水中の養分量について. 京都大学演習林報、40、140-156.
- 2) 田中 正・安原正也・丸井敦尚 (1983): 丘陵地源流域における流出機構. 文部省科研費研究成果報告書. 一般研究(B)、50-62.
- 3) 海老瀬潜一・宗宮 功・平野良雄 (1979): 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、21(12)、1422-1432.
- 4) 竹内邦良・坂本 康・本郷善彦 (1984): NO_3^- を用いた流出成分分離と他の方法による分離結果の比較. 第28回土木学会水理講演会論文集、557-565.
- 5) Kobayashi, D. (1981): Separation of runoff components by stream temperature. Verh. Internat. Verein. Limnol., 21, 150-154.
- 6) Sklash, M. G. and R. N. Farvolden (1979): The role of groundwater in storm runoff. J. Hydrology, 43, 45-65.
- 7) 日野幹雄・長谷部正彦 (1984): 地球化学的データ ($\delta^{18}\text{O}$) とフィルター分離AR法による流出成分分離について. 第28回土木学会水理講演会論文集、553-556.
- 8) 村岡浩爾・平田健正 (1986): 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第1報). 国立公害研究所研究報告、印刷中.