

森林流域内の水移動にともなう地中水・ 渓流水の水質変化

大手 信人・徳地 直子・鈴木 雅一

Variations in Qualities of Groundwater and Stream Water Correspond
to Hydrological Cycling in Forested Watershed

Nobuhito OHTE, Naoko TOKUCHI and Masakazu SUZUKI

要 旨

森林流域における水質形成の過程を水循環と対応させて把握することを目的とし、滋賀県南部の山地に位置する桐生水文試験流域内小流域において、雨水－不飽和土壌水－飽和帯地下水－湧水－渓流水の各水質の分析を、雨量－土壌水分－地下水位－流域流出量の水文観測と対応させて実施した。1990年9月初旬の乾燥期、9月13日から9月24日にかけての雷雨、台風を含む数回の降雨イベント、9月下旬から10月初旬にかけての流出逓減期の観測・分析結果を中心に水移動にともなうpH、電気伝導度、8種のイオン濃度の変化を考察し、以下の知見を得た。

- 1) 降雨に対する出水の特徴から分類した観測井戸（斜面直下型、飽和帯型、遷移帯型）ごとに、水質が異なり、変動の特性も異なる。
- 2) 斜面直下型井戸の水質は、降雨イベントに応答して変動する。無降雨時、表層土の不飽和土壌水中に滞留しているイオンが雨水の浸透によって移動し、斜面直下型の井戸に水位を発生させる一時的飽和側方流の水質に影響していると考えられる。
- 3) 飽和帯型井戸の水質は、渓流水の水質に対応しており、飽和帯地下水帯の上流部、下流部を問わず一様な水質を示している。
- 4) 各イオン濃度の流域での水移動にともなう変化傾向は次の2パターンに大別できる。

①：雨水の濃度は低く、内部で飽和帯まで移動する間にある濃度まで上昇し流出する。斜面直下型の井戸では変動が大きい。

②：雨水の濃度は低く、斜面直下型井戸では高濃度が現れるが、飽和帯型井戸まで移動する過程で再び濃度が低下し流出する。雨水に対して渓流水はわずかに濃度が高い。

アニオンでは Cl^- と SO_4^{2-} がパターン①、 NO_3^- は②に属し、カチオンでは、 Na^+ が①に属し、他は②に分けられる。

- 5) 各水移動過程におけるpH値の形成に影響するイオンを特定することはできなかったが、 HCO_3^- イオンの影響を検討する必要性が示唆された。

I. はじめに

森林流域は、雨水から渓流水までの水質変換の場とみることができる。これまで、こうした観点からの観測報告は2, 3あげられるが^{1,2)}、主としてinput = 雨水とoutput = 渓流水と土壤水を対象とした応答的、または収支的な整理にとどまることが多い。本報告で論述する、流域内部における水質の変化過程、あるいは形成過程のメカニズムを明らかにしていく意味は、主として次の2点に集約される。

まず、森林生態系における物質循環に水移動が媒体として主要な役割を果たしていることは、循環の中の個別の過程、個別の物質ごとに報告がなされているが、流域レベルで物質の移動にもなう水質の変化の実態を明らかにする必要がある。

第二に、森林の公益的機能の一つとして、水質浄化機能は必ず挙げられるが³⁾、そのメカニズムを定量的に明らかにする必要がある。

こうしたことから、流域内での水移動を物理的に把握した上でそれにもなう水質の変化過程を解明していく観測や解析が必要となる。また近年、酸性雨や土壤酸性化の植生に対する影響が世界的に問題視され⁴⁾、本試験地でも実態の把握が必要となっているが、これも上記2つの動機の延長上に位置づけうるものである。

以上の見地から、森林流域内の源頭部に位置する内部小流域において、林外雨-林内雨-不飽和土壤水-飽和帯地下水-湧水-渓流水の各水質の分析を、林外雨量-林内雨量-土壤のサクシオン-飽和帯地下水位-流域流出量の一連の水文観測と対応させて行っている。本報告では、1990年6月に開始された滋賀県南部に位置する桐生試験流域における水質・水文観測のうち、1990年9月初旬の乾燥期、9月13日から9月24日にかけての雷雨、台風を含む数回の降雨イベント、9月下旬から10月中旬の流出逓減期の観測・分析結果を中心に提示し、地中水・渓流水のpH、電気伝導度、主要な8種のイオン(NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+)濃度の変化を流域の水文特性と対応させて考察した。

II. 観測流域の概要と観測方法

1) 観測流域の概要

対象とした流域は図-1に示すとおり、滋賀県南部に位置する桐生水文試験流域内の源頭部小流域である(仮称マツ沢。以下マツ沢と記する)⁵⁾。流域面積は0.68ha、基岩地質は花崗岩である。植生は40年生のアカマツとヒノキの混交林で、樹冠はほぼ閉鎖している。

表面地形における斜面傾斜は、15度以下の部分が全面積の62.8%、25度以上の部分が11.2%であり、緩斜面の卓越する流域といえる。

図-2に金ら⁵⁾によって測定された土層厚の平面分布を示す。平均土層厚は103.2cmで、150cm以上の表層土がある部分がかかなり多い。また、地表面の凹凸と基岩面のそれが必ずしも一致せず、地表面の主谷と基岩面の主谷の位置が異なることが指摘されている。

2) 観測・採水・分析方法

水文事象として、林外雨量、林内雨量、土壤のサクシオン、地下水位、流出量の観測を行っている。観測装置の配置は図-3のとおりであるが、このうち林外雨量は、マツ沢下流端から約450m離れた桐生試験流域内の露場に設置された転倒マス式雨量計によって測定されている。林内雨量はマツ沢内の貯留式雨量計によって測定されている。

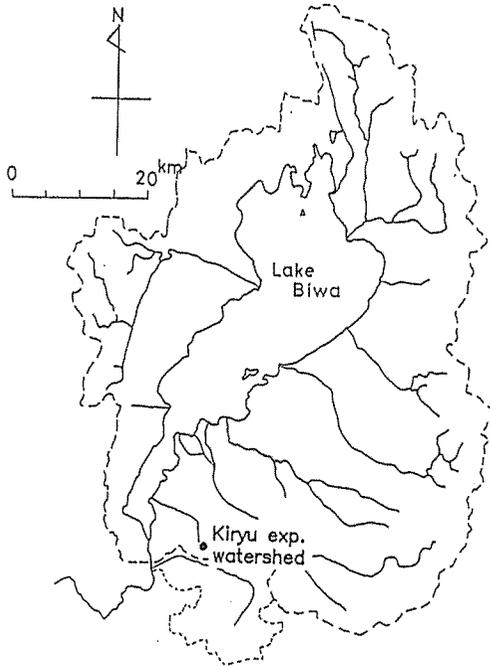


図-1 桐生試験流域の位置

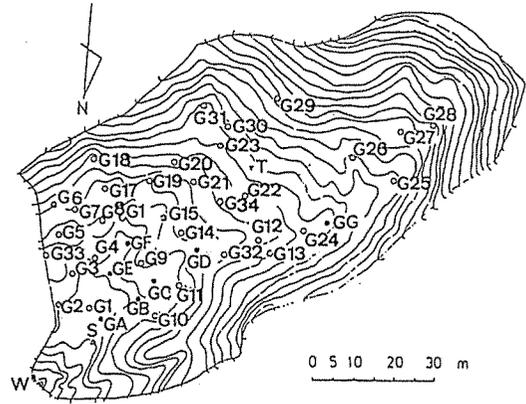


図-3 マツ沢の地形と観測装置の配置
 W: 量水堰, S: 湧水点, T: テンシオメータ,
 G1~G34, GA~GF: 地下水位計
 * 等高線は1m間隔。

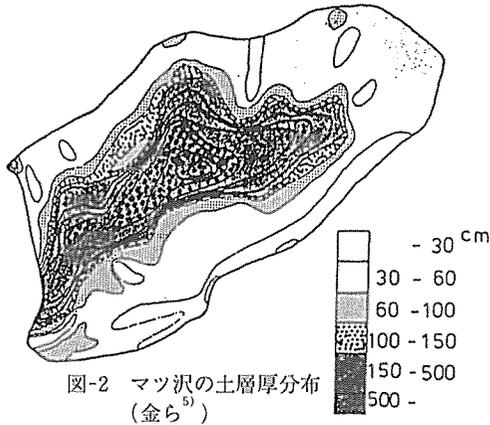


図-2 マツ沢の土層厚分布 (金ら⁵⁾)

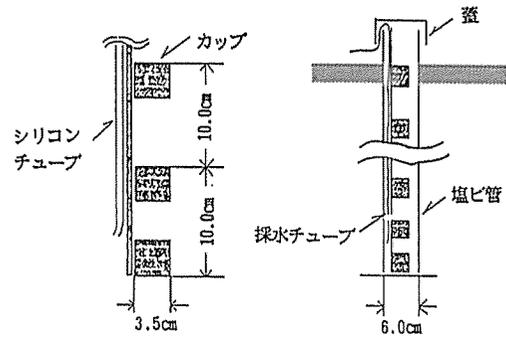


図-4 最高水位計

土壌のサクションを測定するためのテンシオメータは、流域のほぼ中央に設置され、地表から深さ10, 30, 60, 100, 150cmにセンサーが埋設されている。

地下水位は、流域内40地点に直径6cmの側面に穴をあけた塩化ビニル製のパイプを埋設して測定している。このうち、フロート式の自記水位計が3点 (GA, GE, GF), 窪田ら⁶⁾と同じ方式の最高水位計 (図-4) が37点設置されている。

マツ沢の流出量は、アクリル製整水槽付き30°三角堰とフロート式水位計によって自記測定されている。

採水は以下の方法で行っている。

雨水は、口径20cmのロートを取り付けたポリエチレン樹脂のボトルで捕捉、貯留する。

不飽和土壌水は、採水用ポーラスカップを土層中に埋設し、吸引瓶を用いて減圧採水する。

地下水は最高水位計のカップから直接採水する。また、G1, G15, G34 には、深度方向に3点ずつ採水チューブを設置し、カップを引き上げずに吸引採水することもできる。

原則として、週1回の定期観測時に各々の水を採取し、その場でpH、電気伝導度（以下ECと略す）、温度を測定し持ち帰る。降雨イベントでは集中観測を行う。この他、マツ沢の渓流水とG1の地下水は、定量ポンプを用いた自動採水器によって1日1サンプルの採取を行っている。

溶存物質の濃度の測定項目は、アニオンの Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , カチオンの K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ の8種、分析方法はイオンクロマトグラフィー法である（分析器：島津製作所製、HIC-6A）。

3) pHの測定とデータの取り扱い

また、採水試料のpHは溶存 CO_2 濃度によって変化する。こうしたことから、今回の観測においては、採水時のそのままのpHの測定が困難なケースが2つある。

① 自動採水器によって採取された水は採水後一定時間放置されるので、溶存 CO_2 濃度が大気と平衡するまで変化すると、採水された時刻の原位置の水にくらべてpHが高くなる。

② ポーラスカップや採水用チューブを用いた採水のように、吸引瓶を介して減圧すると溶存 CO_2 濃度を強制的に減少させることになり、これもpHが上昇する。

前者の測定例を図-5aに、後者の例（採水用チューブ）を図-5bに示す。

本報告では、上記の理由から自動採水器による水試料とポーラスカップを用いて減圧吸引した水試料については、pHの考察には供しないこととした。採水用チューブを用いた採水試料も、図-5bに示すように減圧吸引の影響がみられるが、大きくてもpH値0.2程度の上昇なので、これについては一部考察に用いている。

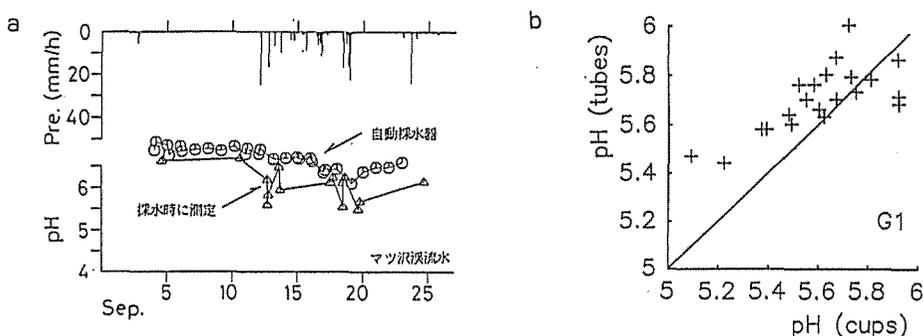


図-5 pH値測定の問題点

a 定期観測採水時に測定したpH値、△と、自動採水器によって定時採水貯留されている水を定期観測時に測定したpH値、○の相違

b 最高水位計のカップから採水測定したpH値と、採水チューブを用いて採水測定したpH値の相違

* 直線は、両者が等値の線を示す。

Ⅲ. 観測結果

1) 観測井戸の水文的分類

本報告では、流域内部の水質データとして40点ある地下水観測井戸の水質が主要な検討項目となるが、まず、前述した一連の過程、乾燥過程－降雨イベント－その後の流量減速過程に対応する地下水位変動の特徴から最高水位計の設置されている井戸を3種類に分類する。

- ①飽和帯型：通常飽和帯が存在し、最も乾いた時期においても地下水がなくなる井戸。
 ②斜面直下型：通常飽和帯は存在せず、降雨イベントに対応して斜面部に発生する飽和側方流によって水位がでる井戸。
 ③遷移帯型：①，②の中間的性質で、渇水期には地下水が存在せず、降雨がある程度連続して飽和地下水帯が上流に向かって拡大したときに水位がでて、しばらく飽和帯が残る井戸。

表-1に、9月5日から10月9日の間に水位が発生した点の井戸について、
 ×：前回の観測時から今回の観測時の間にも、現在も地下水位が出ていない。
 ○：前回から今回の間に地下水位が発生したが、現在は無い。
 ●：前回から今回の間に地下水が発生または残存し、現在もある。

表-1 各観測井戸の出水の特徴とその分類

井戸	1990	9 /								10 /	
		5	11	13	14	18	19	20	25	2	9
斜面直下型											
G5	×	×	○	○	○	×	●	×	×	×	
G6	×	○	○	○	○	●	●	○	○	○	
G7	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
G8	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
G10	×	×	●	●	○	○	○	○	○	○	
G11	×	×	●	○	○	●	●	○	○	○	
G12	×	×	○	○	○	×	○	×	×	○	
G13	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
G17	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	
G18	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	
G20	×	×	○	×	○	○	○	×	×	×	
G25	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	
G27	×	×	×	○	○	●	○	×	○	○	
G28	×	×	●	○	○	○	○	○	○	○	
G32	×	×	○	○	○	○	○	×	×	○	
G33	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
遷移帯型											
G4	×	×	×	×	×	×	●	●	●	-	
G16	×	×	×	×	×	×	●	○	●	●	
GC	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	
GD	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	
飽和帯型											
G1	●	○	×	●	●	●	●	●	●	●	
G2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
G3	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	
G15	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	
G34	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

×：前回の観測時から今回の観測時の間にも、現在も地下水位が出ていない。

○：前回から今回の間に地下水位が発生したが、現在は無い。

●：前回から今回の間に地下水が発生または残存し、現在もある。

-：欠測。

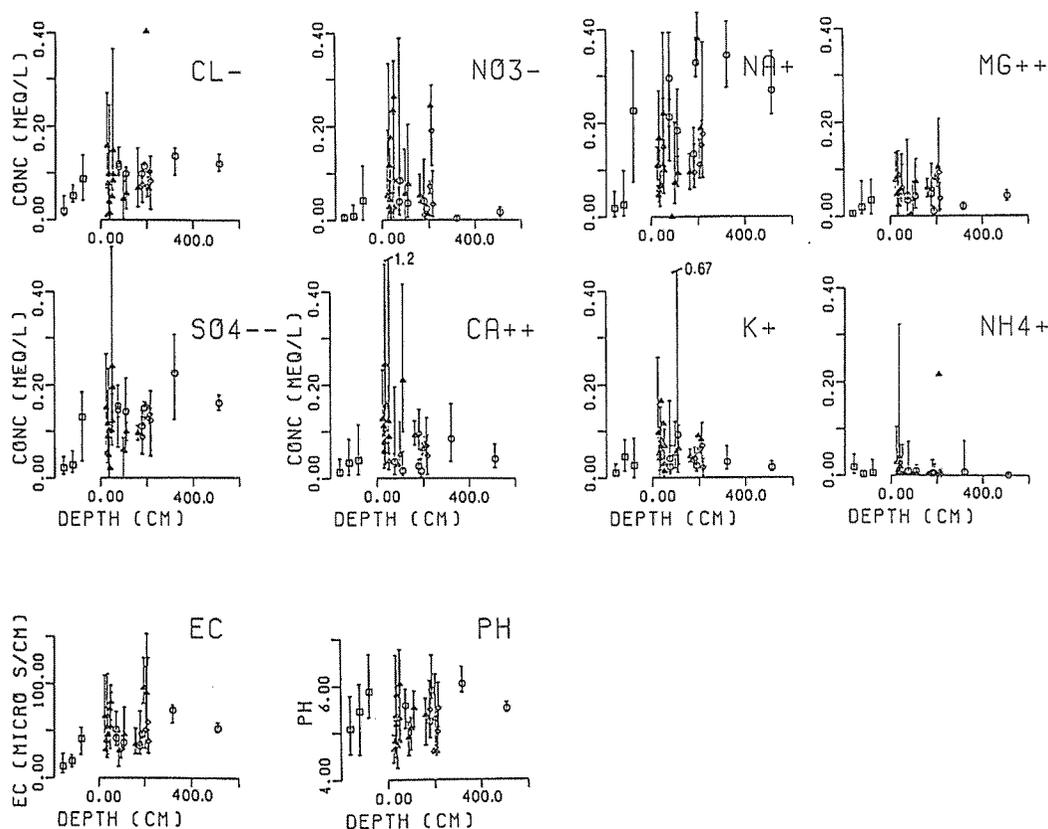


図-7 EC, pH, 8種のイオン濃度と観測井戸の深さの関係。

□：左から林外雨, 林内雨, 渓流水, △：斜面直下型井戸, ◇：遷移帯型井戸, ○：飽和帯型井戸
* マークは期間(1990, 9/5~10/9)平均値, 上下端は最高・最低値を示す。

各イオン濃度の流域内部での変化傾向は次の2パターンに大別できる。

- ①：雨水の濃度は低く、内部で飽和帯まで移動する間にある濃度まで上昇し流出する。斜面直下型の井戸では変動が大きい。
- ②：雨水の濃度は低く、斜面直下型井戸では高濃度が現れるが、飽和帯型井戸まで移動する過程で再び濃度が低下し流出する。雨水に対して渓流水はわずかに濃度が高い。

アニオンでは Cl^- と SO_4^{2-} がパターン①, NO_3^- は②に属し、カチオンでは、 Na^+ が①に属し、他は②に分けられる。平田らはスギ林において同様の観測を行っており⁷⁾、概ね上記と対応する傾向の観測例を示している。

まず、 Cl^- をみると、この時期林外雨にはほとんど含まれていないが、樹冠を通過する過程でドライフォールアウトを混入させるため、少し濃くなる。斜面直下型の井戸では、変動の幅が大きく、平均濃度のばらつきも大きい。飽和帯型の井戸では、 $0.1\sim 0.15\text{meq/l}$ 程度で揃い、渓流水に流出する。降雨に比べると約2倍に濃度が上昇する。 Cl^- は、一般に主として降雨によって供給され、森林土壌中では吸着されにくいというえ、植物の根系によって吸収されることがない。このため、上記の流域内部での濃度上昇は、蒸発散による水分損失の結果とみることができる。この割合が季節変化するかどうかは、今後の観測結果を待たねば判断できないが、桐生試験流域の

1972年～1981年の年間の流出量の平均値と平均降水量から計算される流出率は56.0%⁸⁾であり、濃縮の割合としては妥当な観測結果といえる。

NO_3^- は、雨にはほとんど含まれず、飽和帯にも通常ほとんど存在しない。斜面直下型の井戸や流域末端の飽和帯型の井戸で降雨イベントに対応して出現する。これは、 NO_3^- は土壤表層でのリター分解によって生産されるが、飽和帯まで溶液が移動する間に植物に吸収されたり、脱窒されたりして減少するという過程¹⁰⁾と対応している。

SO_4^{2-} は、 NO_3^- 同様リターの分解で生産され再び根系によって吸収されることが知られているが、化学的風化による供給もある⁹⁾。 NO_3^- と異なり飽和帯井戸の方が雨水に比べて濃度が高く、 Cl^- とよく似たパターンを示すが、これは、水分損失による濃縮に加えて、風化による供給フラックスの方が植物体を介した循環フラックスよりも大きいことに起因すると考えられる。

一般に自然土壤中の交換複合体は黒ボク等の特殊な場合を除いて、含まれている腐植の影響で、全 pH 領域で負荷電過多になっていることが多い。このため、通常の土壤ではカチオン吸着量がアニオン吸着量を上回る。すなわち、土壤水または地下水中のカチオン濃度は、アニオン濃度の増減に対して受動的に変動しているとみてよい¹¹⁾。本観測結果の場合、5種のカチオンの中で、 Na^+ のみ Cl^- 、あるいは SO_4^{2-} 型の濃度形成パターンを示し、そのほかは飽和帯で濃度が減少する NO_3^- 型のパターンを示す。特に Ca^{2+} は NO_3^- と強い対応関係を示す。

降雨の pH は4.5～6.0の範囲で変動する。Irwin and Williams¹³⁾によれば pH < 5.0の雨が酸性雨と定義されるが、本観測流域でも特に乾燥が続いた後の最初の降雨では4.5という低い値が観測され、気象条件如何によっては、今後その影響を無視することはできないと考えられる。斜面直下の井戸では、4に近い低い値が観測されることもある。これが、飽和帯→溪流へと移動する過程では5.5～6.0位に上昇する。

EC は、一般に溶存するイオンの総量に比例するとされているが、降雨では低く (0～25 $\mu\text{S}/\text{cm}$)、内部で40～50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで上昇して出てくる。

このことは、溪流水は雨水に比べて中性に近いが、イオンの総量は雨水より多く、流域内部のなんらかの過程で input 無しに生産されたイオンも流域外部へ流出し続けていることを示している。

3) 流域各観測点ごとの時系列変化の特徴

図-8a～cに、乾燥→降雨→流出通減という一連の過程での水質変化を示す。aは斜面直下型の井戸の内、代表的な G10, G17, G5 の変化を示している。同様に b は飽和帯型でかつ土層厚が厚い地点の G2, G15, G34 を示している。ここで、最下段のグラフは飽和帯に設置されている地下水位計の記録水位であり、ほぼ基岩面上の地下水位を示している。c は流域末端の飽和帯井戸水→湧水→溪流水の過程での変化を示している。流域末端の飽和帯型の井戸で、平時から地下水面がかなり地表に近い G1, マツ沢湧水, マツ沢溪流水, 及び桐生流域本流溪流水の観測値をプロットしている。最下段はマツ沢, 桐生流域本流の流量を示している。

斜面直下型の井戸では、9月12日までの乾燥期の後1回目の降雨で水位が発生したとき、強酸性の各アニオンと Ca^{2+} が高濃度で出現し、これに対応して pH 低く、高い EC が観測されている。その後、降雨イベントが数回連続すると濃度が低下する。通減期に散発的にある降雨によって水位が発生した時の水質は、井戸ごとに変化が異なり、G10ではその後 SO_4^{2-} と Cl^- の濃度が再び上昇する。こうした現象は前述のとおり、斜面部における一時的な飽和側方流の水質が、そこにおける不飽和土壤水中の溶存イオンの影響を受けることによると考えられる。

飽和帯型の井戸では、降雨イベントに対応して飽和帯地下水位が1990年での最低値から最高値

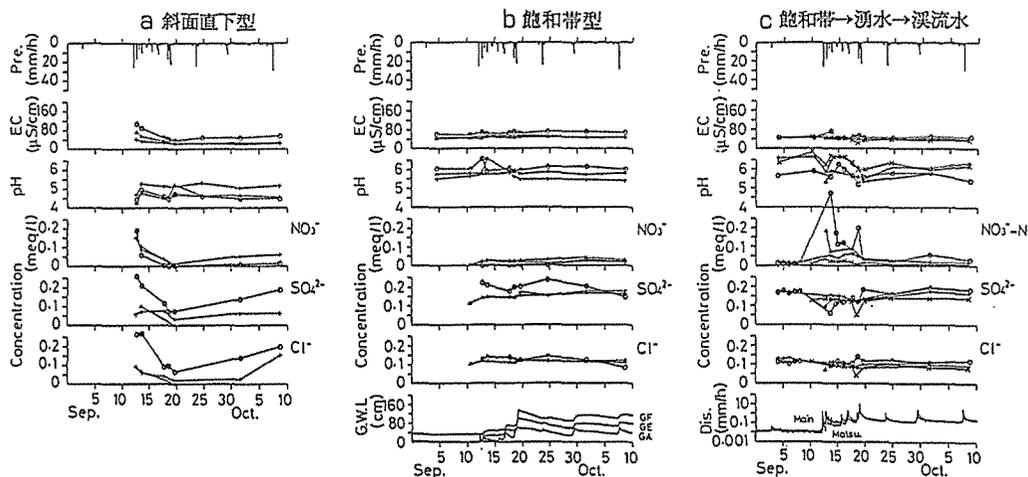


図-8 EC, pH, アニオン濃度の時間変化

a. 斜面直下型 / ○ : G10, △ : G17, + : G5

b. 飽和帯型 / ○ : G15, △ : G2, + : G34

c. 飽和帯→湧水→渓流水 / ○ : G1, △ : 湧水, + : マツ沢渓流水, × : 桐生本流渓流水

* Pre : 降雨強度, G.W.L. : 地下水位, Dis : 流量 (Matsu : マツ沢, Main : 桐生本流)

まで変化しているにもかかわらず、各水質項目とも安定して変化が小さい。すなわち、飽和帯のなかでも、通常地表近くの表層土の影響を受けにくい深さにある地下水は、降雨時にも対応する水位上昇の影響をほとんど受けず、常に安定した水質を保っている。

飽和帯から溪流へ流出していく過程では、飽和帯の濃度がそのまま湧水→溪流水へと出ていくと前節で述べたが、G1のような流域末端で地下水面が地表に近い飽和帯型の井戸では(○印)、表層土壌の影響で斜面直下型の井戸と同様に降雨イベントに対応して NO_3^- が出現する。その後降雨が続くと、安定を取り戻してくる。すなわち地表から浅い地下水面を持つ飽和帯井戸は表層土からのアニオンの流出の影響を受けている。表層土壌を通過して復帰してくる湧水の水質も同様であるが変動の幅は小さい。溪流水の水質は、さらに変動が小さくなり、降雨に対するヒドログラフの変化にかかわらずかなり安定している。

4) 3種のアニオン濃度の空間分布と降雨イベントに対する変動

次に流域内でのアニオン濃度の空間分布がどう変化するかを乾燥期、雷雨直後、台風直後、流出逓減途上について示す。図-9の左から NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、上から、乾燥期、1回目の雷雨後、それに連続する台風後、逓減過程である。

まず、 Cl^- と SO_4^{2-} は類似の変動を示している。すなわち、通常飽和帯の濃度は一定で、降雨があると乾燥期から最初に水位が出現する井戸では高濃度になり、降雨が連続すると、斜面直下型の井戸の水は、乾燥期の飽和帯型の井戸水よりも濃度が低くなる。この間一貫して飽和帯型の井戸水の濃度は、安定している。

これに対し、 NO_3^- は通常飽和帯型井戸での安定している濃度が低く、降雨に対応して出現する斜面直下の水の濃度はこれに比べてはるかに高い。しかし高濃度の地下水は他の2者と同様に、降雨が連続すると低濃度に推移していく。台風後高濃度の NO_3^- が出現する井戸は、この時はじめてに地下水が出た井戸である。また、この間一貫して飽和帯の濃度は低い。

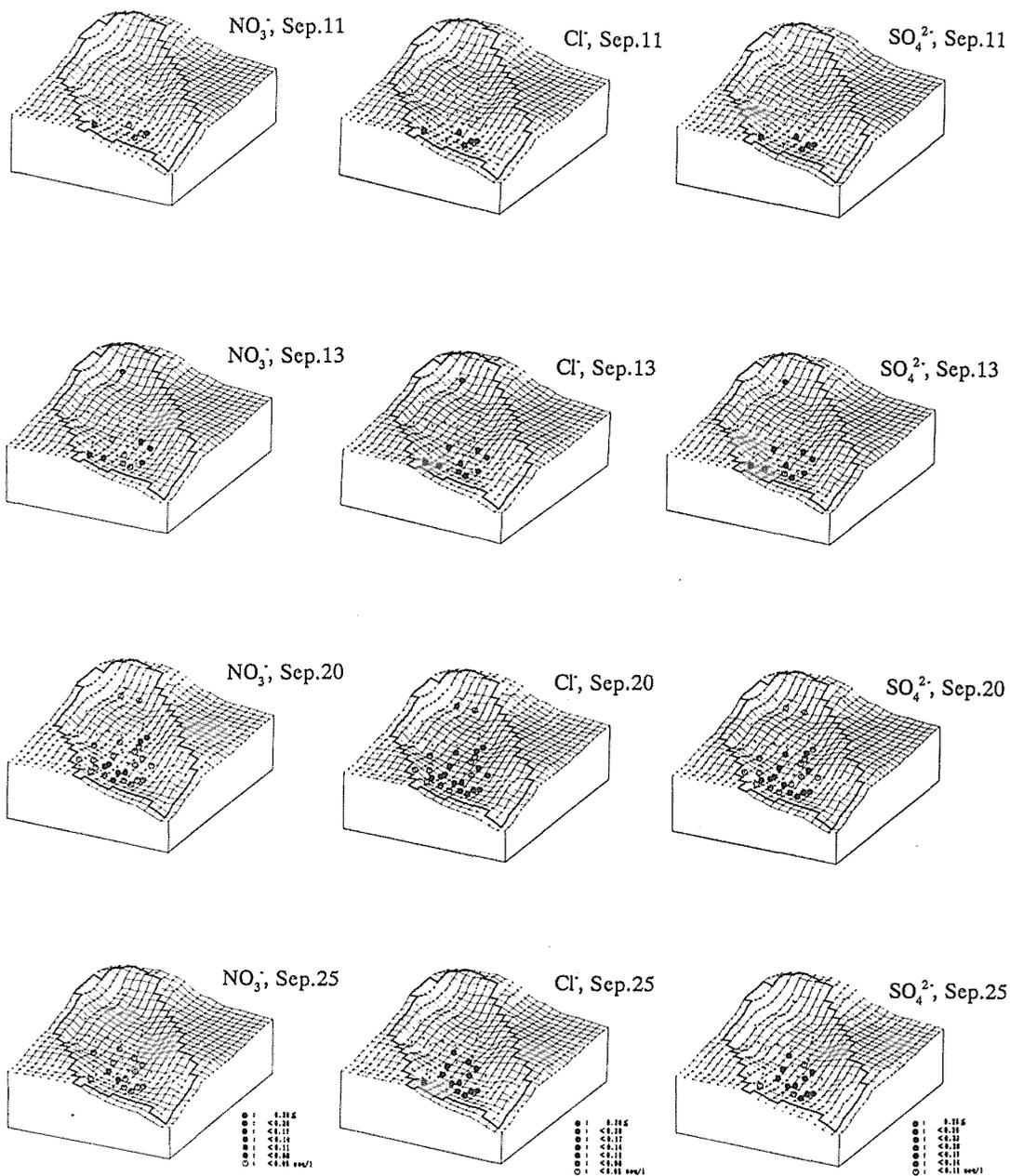


図-9 アニオン濃度の空間分布の降雨イベントにともなう変動

* 上段から、乾燥期、1回目の雷雨後、それに連続する台風後、逡減過程の分布を示す。マークは、黒色が濃いほど高濃度であることを示している。

5) 流域各観測点ごとの pH, EC 値形成の特徴

つぎに, pH と EC の形成に何が関与しているかを考察する。図-10に雨水, 斜面直下型の井戸水, 飽和帯型の井戸水, 湧水・渓流水の各々について, 測定されているアニオンの濃度と pH の関係をプロットする。

まず, 前述したように各過程で変動する pH の範囲が明確にわかれることが示される。また, 斜面直下型の井戸水を除いてどのイオンも pH と明らかな相関はない。斜面直下型の井戸水では, いずれかのアニオン濃度が高いと pH が下がる傾向がみられるが, どのイオンが影響しているかは, 明確に特定することはできない。

一方, EC と, アニオン, カチオンの各々の合計イオン当量との関係を図-11にプロットする。いずれの過程でも各々の合計イオン当量と EC とは, かなりよい相関をもっており, 回帰直線の傾きも一定している。また, カチオンの合計イオン当量の方がアニオンのそれにくらべて常に大きい傾向がみられる。これは, 今回分析していない HCO_3^- イオンの存在を示唆している。通常土壌水中では, HCO_3^- イオンは溶存 CO_2 と H_2O の反応で生じる。下垣ら¹³⁾は pH と CO_2 分圧の関係を理論的に整理し, 平衡状態で pH が 5 以上の溶液では, 溶存気体の CO_2 分圧が高いほど溶液の pH は低下することを示している。また, 土壌中では, 微生物等の呼吸作用によって CO_2 が発生するうえ, 大気中に比べガス拡散が著しく阻害されるため, 通常 CO_2 濃度は大気に対してかなり高いといわれている¹⁴⁾。このため, 今回の観測結果においても HCO_3^- イオン濃度が pH 形成に影響していることが考えられる。

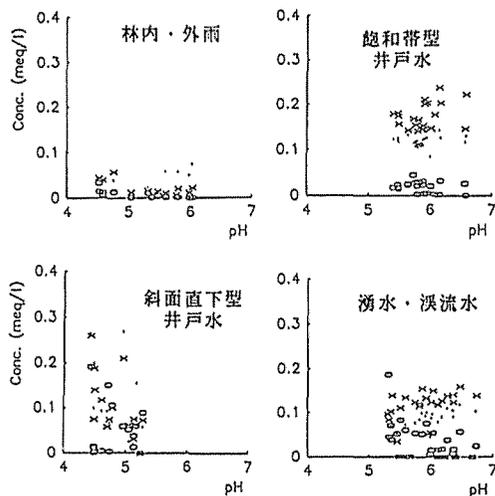


図-10 pH 値とアニオン濃度の関係
○: NO_3^- , ×: SO_4^{2-} , ・: Cl^-

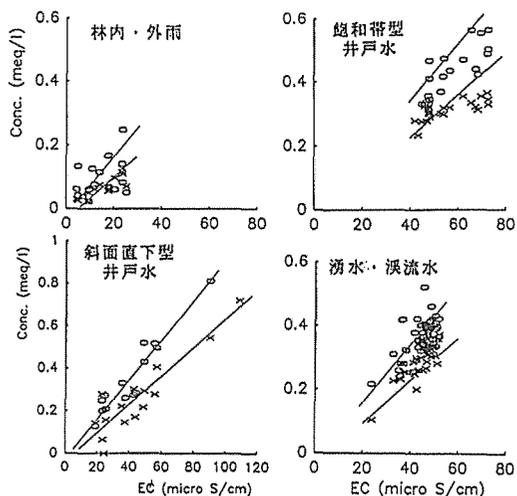


図-11 EC 値と測定した合計カチオン当量, 合計アニオン当量との関係
○: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ の合計イオン当量
×: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- の合計イオン当量
* 直線は斜面直下型井戸の測定値から求めた各関係の回帰直線。

IV. ま と め

森林流域における水文・水質観測結果を基に、水質形成の過程を流域内の水文条件と対応させて考察した。この結果、降雨に対する出水の特徴から分類した観測井戸ごとに水質が異なることが分かった。このうち、斜面直下型井戸の水質は降雨イベントにตอบสนองして変動する。これは、無降雨時表層土の不飽和土壌水中に滞留しているイオンが雨水の浸透によって移動し、斜面直下型の井戸に水位を発生させる一時的飽和側方流の水質に影響しているためと考えられる。飽和帯型井戸の水質は渓流水の水質に反映し、上流・下流を問わず一様な傾向を示すことがわかった。各々の井戸での pH 値形成に影響するイオンは明確には特定できなかったが、 HCO_3^- イオンの関与を検討する必要性が示唆された。個々のイオンの濃度形成メカニズムについての解釈は、未だ定性的推論の域をでないが、実態はかなり明らかになった。今後、観測面では、pH 値形成に重要な役割を果たすと考えられる HCO_3^- イオン濃度あるいは溶存 CO_2 分圧の実測を試み、解析面では、各溶存物質の動きをフラックスで表現し、水質形成のモデル化を進める。

引用文献

- 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, 131-139, 1988
- 2) 生原喜久雄・相場芳憲：スギ・ヒノキ壮齡林小流域における養分の循環とその収支。日林誌, 64, 8-14, 1982
- 3) 例えば、林野庁編：平成2年度林業白書。日本林業協会, p.9, 1991
- 4) 例えば、池田有光：酸性雨の発生。地球環境とシビルエンジニア, 土木学会誌別冊, Vol.75, 28-31, 1990
- 5) 金 載水・窪田順平・鈴木雅一・福馬義宏：桐生試験地の緩斜面における土壌水分と地下水の変動。京大演報, 60, 174-189, 1988
- 6) 窪田順平・福馬義宏・鈴木雅一：風化花崗岩山地源流域の地下水, 土壌水分変動の実態。京大演報, 59, 147-164, 1987
- 7) 平田健生・村岡浩爾：森林域における物質循環と渓流水質(1)。水・水学会1988年研究発表会要旨集, 172-175, 1988
- 8) 福馬義宏・鈴木雅一：山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生試験流域の10年連続日・時間記録への適用。京大演報, 57, 162-185, 1985
- 9) 堤 利夫：森林の物質循環。東京大学出版会, p.124, 1987
- 10) N.C. Brady: The Nature and Properties of Soils. Macmillan, New York, p.468, 1968
- 11) 日本化学会編：土の化学。季刊化学総説, No.4, 97-98, 1989
- 12) J.G. Irwin and M.L. Williams: Acid Rain: Chemistry and Transport. Environmental Pollution, 50, 29-59, 1988
- 13) 下垣 久・大隅多加志：土壌水の pH 測定における CO_2 ガスの影響について。水・水学会1989年研究発表会要旨集, 287-290, 1989
- 14) 久馬一剛 他：新土壌学。朝倉書店, p.122, 1984

Summary

To explain changing process of water qualities in forested watershed which correspond to water cycling, a research of water qualities which have been combined with hydrological observations have been started on a small forested watershed belong to the Kiryu experimental watershed in Shiga prefecture. The reserch have been operated by two main ways related each other: one is

the quality analysis of rainwater, unsaturated soil water, saturated ground water, spring water and stream water, the other is the measurements of precipitation, soil water suction, ground-water level and discharge from the watershed. This report shows mainly the data collected since early September to early October 1990. This period includes some stage; severe dry, storm event with typhoon and recession of discharge. The analysis items of water qualities are pH, electric conductivity, concentrations of Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , and NH_4^+ . Discussions about variations in water qualities related with water cycling lead us to following knowledge:

- 1) There are three types groundwater wells which are classified by characteristic of responses to storm events: 1. slope side, 2. saturated zone, 3. transitional zone. Each type has different water quality, and fluctuation of it are also different.
- 2) The water qualities of the slope side wells fluctuate corresponding with the storm events. It means that the suspended ion in unsaturated soil water for non-rainfall stage is moved by infiltration of rain water, and influences to the water qualities of temporary saturated lateral flow.
- 3) The water qualities of the saturated zone wells correspond with that of stream water, and are distributed over the zone uniformly.
- 4) The variational patterns of concentration of eight ions are classified into two types: 1. concentration of rainwater is low, and that of groundwater in saturated zone is high and same of stream water. That of the slope side well fluctuates keenly, 2. concentration of rainwater is low, and that of saturated zone is also low in spite of high concentrations of slope side wells. That of stream water is slightly higher than that of rain water. Cl^- , SO_4^{2-} , and Na^+ are type 1. Others are type 2.
- 5) The ion which influence the variation of pH value could not specify on each hydrological stage. And it is conjectured that an unknown factor, HCO_3^- is closely related to the variation of pH.