

# 森林斜面域の観測に基づく流出特性と 土壌水分状態に関する研究

Study on Runoff Characteristics and Soil-Moisture Content  
based on Observation in the Experimental Basin

嵯峨 浩<sup>1</sup>・余湖典昭<sup>1</sup>  
Hiroshi SAGA and Noriaki YOGO

<sup>1</sup> 北海学園大学 工学部社会環境工学科 教授

## 要 旨

本研究は、小流出試験地における水文量の観測データに基づき、物質循環のメカニズムを明らかにすることを目的としている。

流出試験地は札幌市内の藤野地区に位置するオカバルシ川流域で、この河川は過去に大規模な出水で甚大な被害をもたらした、砂防河川に指定されている急流河川である。観測項目は流量、降雨量、土壌水分、河川水と降雨および土壌水の水質など多岐にわたっている。

本報告は、土壌水分状態と流出特性、特に、測定された土壌水分や実効降雨等から重回帰分析により流出率の推定を行なっている。また、森林内において土壌水の水量と水質に関する調査を重点的に実施し、降雨と河川流出の中間に位置する土壌の役割を検討している。

《キ - ワ - ド：流出試験地；土壌水分；林内雨；水質》

## 1. はじめに

著者らは小流域の降雨 - 流出現象および、それに関わる物質の循環メカニズムの解明を目的として、流出試験地を設け観測を続けてきた。対象流域は札幌近郊の南区藤野地区を流れるオカバルシ川流域である。観測開始時期は平成 14 年であるが、フィールド調査に伴う様々なトラブルと試行錯誤を経て、ようやく観測体制が整いつつあるのが現状である。オカバルシ川流域は、車で所要時間 20 分程度であり、本大学からおよそ 12km の距離に位置する。したがって、出水時には迅速に駆けつけることが出来る、条件のよい試験流域である。

本研究は、今年度の最重要項目として、水文現象で最も基本的な、しかも推測が困難とされる流出率の推定を目的に観測を続け、その研究結果と物質循環の結果の一部を報告するものである。流出率の推定は小さな一流域の結果であるため、汎用性を期待できるかどうかは今後の適用範囲の拡大を待つ必要があるが、この重要な問題を解決する一助となることを願うものである。

## 2. 流域の概要と観測項目

オカバルシ川は札幌市近郊の真簾峠付近にその源を発し、北流して豊平川右岸に合流する渓流河川である。この河川は砂防河川に指定されており、昭和 56 年 8 月には土石流や多量の土砂を含んだ洪水氾濫により、死傷者や家屋損壊の被害を出した暴れ川である。オカバルシ川流域の概要を図-1 に示す。

流域内には 2 つの観測地点があり、それぞれを *St.1*、*St.2* とする。*St.1* の標高は 207m、*St.2* の標高は 340m である。流域面積は 3.42km<sup>2</sup> であり、源流部は 370m で標高差 163m を約 3km の河道長で一気に下っている。上流部ではゴルフ場やスキ - 場、霊園等の一部が流域内に含まれているが、流域の 90% 以上を自然林が占めている。また、源流部は 500m 級の山々が連なって、崖地や急斜面になっており、崩壊等による土砂生産が多く砂防ダムが複数個設置されている。

*St.1* には 0.5mm 精度の雨量計と投げ込み式水位計が、*St.2* には雨量計のほかに土壌水分計が 30cm と 50cm の地中に 2 台埋設されている。また、自動観測温度計も *St.1*、*St.2* で設置されており、7 月 18 日から観測を行った。各観測値は自動観測で行われ、計測間隔は 10 分間である。データ回収の頻度は出水時の流速測定等の突発的なものを除いて観測期間中 9 回であった。

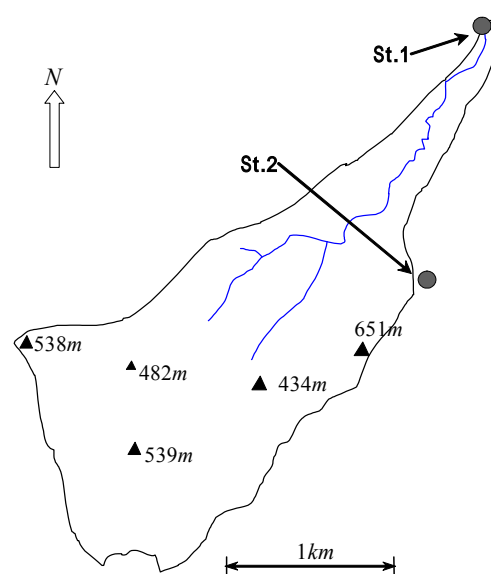


図-1 オカバルシ川流域の概要

図-2 に水位計，雨量計および土壌水分計とその設置状況を示す．このような流出試験地で最も懸念される事項は，流域が閉じているかどうかの水収支である．水循環の過程の中でこのことを実証することは困難なことであるが，観測期間直前と直後の流域内貯留量は同じと仮定して，期間中の「降雨量 - 流出量 + 蒸発散量」が成立していることを確認している．



(a) 水位計設置状況



(b) 雨量計設置状況



(c) 土壌水分計



(d) 土壌水分計設置状況

図-2 各測定器設置状況

水質関連の調査は平成 17 年 6 月から 11 月上旬まで 35 回実施した。研究方法等は以下の通りである。

雨水は雨量計に自作の採水装置を連結し，全量採水した。St.2 の林外，林内の 2 ヶ所に設置した。2006 年 7 月 11 日から 2006 年 10 月 20 日までサンプルはオカバルシ地点から 15 本，霊園・林内地点から 16 本採水することができた。

ポ - ラスカップ式土壌水採水装置（大起理化学工業社製，真空ポンプ付）を用いて 10，15，20，25，30，40，50，70，90cm の深度で土壌水を採水した。設置地点は St.2 の林内であり，試料採水回数は 20 回で，採水試料数は総計 290 本であった。

昨年度は林内と裸地の 2 ヶ所で土壌水を採水した。しかし林内採水量が裸地に比較して圧倒的に多かったため，今年度は林内のみで測定した。昨年の採水深度は 10cm，15cm，20cm，50cm であったが，表面付近の採水量の変化が大きく，さらに 50cm でも相当量の採水が可能であったため，25cm，30cm，40cm，70cm，90cm を新たに追加した。また昨年度までは降雨を挟んでサンプリングを行い，その吸引時間を厳密に定めていなかったが，今年度は真空ポンプのバッテリー - を強化し，連続的にポンプを稼働させた。これにより無降雨時の土壌水を採水することが可能となった。真空ポンプはトラブルなく稼働したため，全観測期間の土壌水を採水できたものと考えられる。

水質の測定項目は，塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ )，硝酸イオン ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )，硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ )（以上イオンクロマトグラフ法），ナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )，カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )，カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )，マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ )（以上原子吸光光度法），アンモニアイオン ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )（インドフェノール法），E220 および E260 である。

### 3. 土壌水分の測定デ - タ

土壌水分計の測定値の定義が曖昧であったので、標準砂を使った室内実験によってその工学的意味を調べた。その結果、測定値は飽和度であることを確認している。

平成 18 年度の全観測期間（2006 年 6 月 13 日～2006 年 11 月 1 日）において観測された 10 分間雨量と土壌水分を図-3 に示す。青色の点線が深度 30cm の飽和度を、赤色の実線は深度 50cm の飽和度を示している。

図-3 の で示している異常値は、デ - タ回収や電池交換でロガ - を停止させたために生じたものである。

図-3 より降雨に対して深度 30cm の飽和度は敏感に反応し、深度 50cm はその反応が鈍い様子が見られる。また、7 月 21 日～8 月 15 日の渇水の影響により地表面下 30cm の飽和度が 20% 以下まで低下し、今までの観測の中で、最も低い値となった。

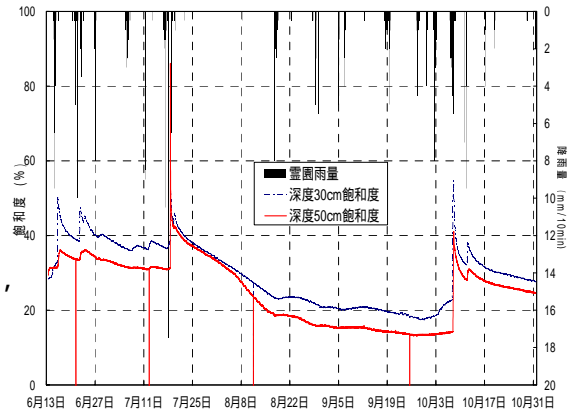


図-3 飽和度と降雨の関係

### 4. 実効降雨と飽和度の関係

実効降雨  $R_t$  は、土砂災害発生基準線 (CL) の設定に用いられている指標であり次式で示される。

$$R_t = r_t + (\alpha_1 r_{t-1} + \alpha_2 r_{t-2} + \alpha_3 r_{t-3} + \dots + \alpha_n r_{t-n}) = r_t + \sum_{i=1}^n \alpha_i r_{t-i} \quad (1)$$

$$\alpha_i = 0.5^{\frac{i}{T}} \quad (2)$$

ここに  $r_t$  : 時刻  $t$  の時間雨量,  $T$  : 半減期 (hr),  $\alpha_i$  : 減少係数,  $n$  : デ - タ数

半減期  $T$  は、地表に残った雨や地中にしみ込んだ雨が時間の経過と共に減少して行き、降った雨の半分になるまでの時間を意味する。また、地下水の変動は半減期 72 時間の実効降雨の変動と良く似ていることが知られている。オカバルシ川流域では、実効降雨と飽和度の相関を求めた結果、半減期 76 時間が最も適切な値だということが、既に明らかになっている。これは、一般に採用されている 72 時間という値に非常に近いものである。

半減期 76 時間で、2006 年度の降雨に対する実効降雨を求めた。2006 年に観測された深度 30cm の飽和度と実効降雨の関係を図-4 に示す。

青色の点線が深度 30cm の飽和度を、赤色の実線は半減期 76 時間での実効降雨を示している。縦軸の目盛スケールにより、見え方が変わるが両者の変動は、類似しており、実効降雨が地中の水分状態を表していることがわかる。

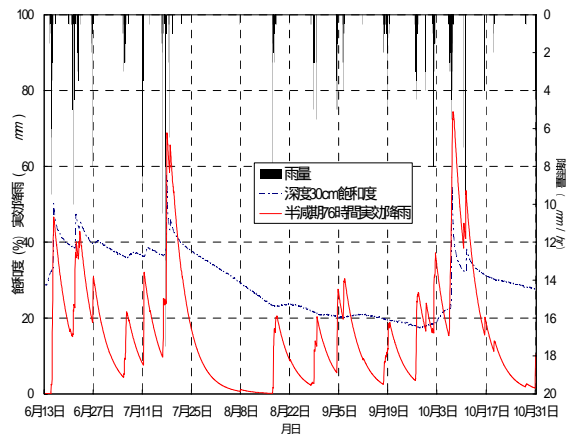


図-4 飽和度と実効降雨の関係

## 5. 重回帰分析による流出率の推定

流出率は、先行降雨，土壤水分状態，樹木の活性度，蒸発散量など多くの因子に影響されていることは周知の事実である。多くの影響因子があるため、これから起こる出水の流出率を推定することは、至難の技であり、今まで人の経験に頼らざるを得ないことが少なくなかった。数少ない流出率の推定法に、アメリカ合衆国で推定された *Curve Number* 法がある。この方法は、土壤・土地利用形態・水文状態と関連付けて、流出率  $f$  を求める経験則に基づく方法である。本研究においても、これらの一部を観測しているのので、観測値による流出率の推定を行った。推定方法は重回帰分析である。流出率を求める際、対象とした降雨規模は 15 (mm/24hr) 以上とした。あまり小さな出水では、洪水で問題とならない因子が強く作用し、これに引きずられて結果を見誤ることがあるためである。また、直接流出成分の分離法は、ハイドログラフ立ち上がり点と減水部第 2 折曲点を直線で結ぶ分離法を採用した。

### (1) 説明変数の選択

重回帰分析するために、説明変数として、初期直接流出高，深度 30cm の初期飽和度，初期実効降雨，降雨時の月平均気温を採用した。初期直接流出高は、ハイドログラフ立ち上がり時点での直接流出高とし、初期飽和度と、初期実効降雨は、その時点での観測値である。流出率に大きな影響を与える因子として、前述のように蒸発散量や、植物の活性状態がある。これを直接使う手段はないので、これらを考慮するために月平均気温を導入した。

### (2) 計算結果

計算の対象とした出水は、2003 年から 2006 年までに観測された 11 例である。2003 年度は土壤水分計を地表面下 20cm，40cm 地点に設置しており、20cm のデータが欠測していたので 40cm 地点の実測値より初期飽和度を算出している。また、気温の測定は 2006 年 7 月 18 日から未測定なものは気象庁観測の札幌市中央区の月平均気温を使用している。

求めた回帰式は次式である。

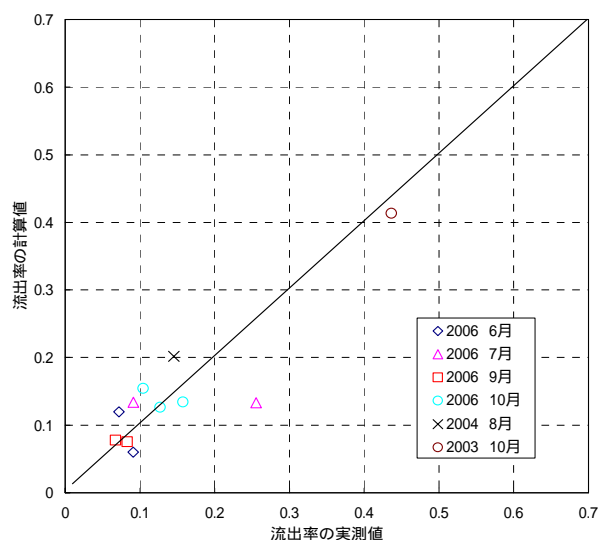


図-5 流出率の実測値と計算値の関係

$$Y = 0.134997 - 0.017X_1 + 0.00078X_2 + 0.004454X_3 - 0.00699X_4 \quad \dots (3)$$

$X_1$ : 初期流出高 (mm/hr)       $X_2$ : 初期実効降雨 (mm)       $X_3$ : 初期飽和度 (%)  
 $X_4$ : 降雨時の月平均気温 ( )       $Y$ : 流出率  
 標準誤差: 0.027, 重相関係数:  $R=0.880$ , 決定係数:  $R^2=0.775$

分散分析は表-1 のようになる .

表-1 分散分析表

	平方根	自由度	不偏分散	分散比(=検定量 $F$ )
回帰変動	0.093	4	0.0233	5.158
誤差変動	0.027	6	0.0045	
全変動	0.120	10		

重相関係数の値が真の値か確認するために、母相関係数を  $\rho$  として、無相関の検定を行う。次の仮説を立てた。

帰無仮説  $H_0 : \rho = 0$  (無相関である)

対立仮説  $H_1 : \rho \neq 0$  (無相関ではない)

検定統計量  $F$  は、自由度 4,6 に従う。その結果、検定統計量  $F = 5.158 > (F_{4,6}(0.05)) = 4.53$  であり棄却域に入る。よって帰無仮説  $H_0 : \rho = 0$  を棄却する。また、母相関係数  $\neq 0$  で、流出率の実測値と計算値の相関があることを確認した。

また、重回帰式の信用性を確認するために、分散比の値を使用して確率を求めると、 $F$  確率分布  $(5.158, 4, 6) = 0.038$  となり、求めた重回帰式は予測に役立たないという有意水準 0.05 の帰無仮説が棄却される。よって、求めた回帰式は流出率の予測に役立つことが確認された。

## 6. 土壌水の観測結果と分析について

### (1) 土壌水量について

図-6 に、観測期間中の日雨量と土壌水全採水量を示した。今年度は、降雨後に加えて晴天時にもある程度の間隔でサンプリングを行ったが、この結果から採水量は降雨直後に上昇し、その後次の降雨までに徐々に減少していくことがわかる。特に今年度は7月22日から8月16日まで長期の無降雨期間があったが、この間も土壌水の採水が可能であった。

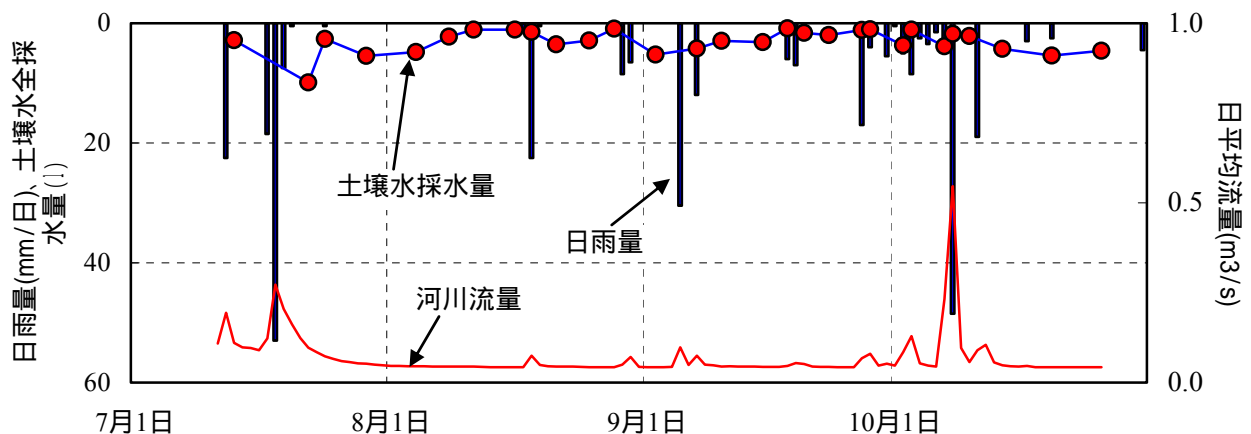


図-6 日雨量、河川流量と土壌水全採水量の変化 (2006年7月~10月)



図-7には深度別の総採水量を示した。この図から採水量は20cmにピークを持つ形状となった。この中で30cmの値が小さいが、調査終了後に点検したところ、ポラスカップに酸化鉄が付着しており、それによって水の吸引が阻害されたものと推定された。したがって30cmのデータは解析に用いないものとした。

図-8に、日雨量と深度別の土壌水採水速度（試料量を採水時間で除した値；ml/hr）の変化を示した。採水速度は、浅い地層ほど降雨に対する応答が明瞭に現れる。25cmまでの深さでは（図-8）、採水速度は10、15、25、20cmの順に大きくなり、その順位は全期間ほぼ同じである。また速度の変化パターンも、各深さで同様であった。7月22日から8月16日まで約25日間の無降雨期間の変化を見ると、採水速度は各深度でほぼ直線的に減少し、採水速度のピークが大きいほどその減少率が大きくなる。このような変化は8月17日以降についても同様であるが、9月末から10月初旬のまとまった降雨の後は無効雨時の減少率はやや小さくなっている。これは大きな先行降雨の影響や気温の低下による蒸発散の減少などにより、土壌中の貯留水量が増加したためと推定される。

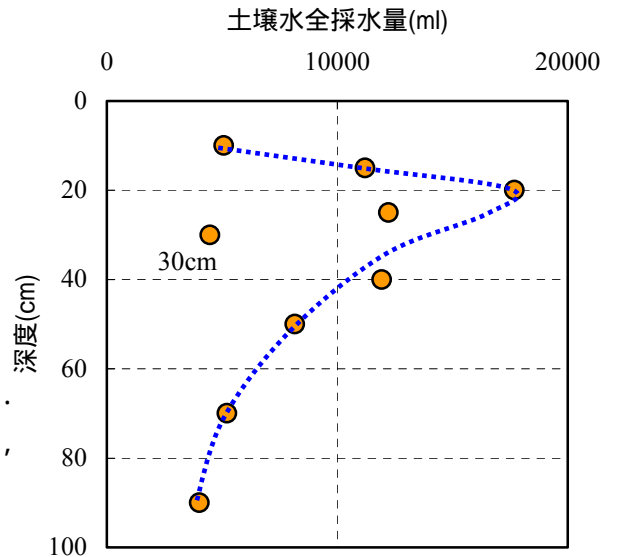


図-7 深度別の土壌水全採水量(ml)

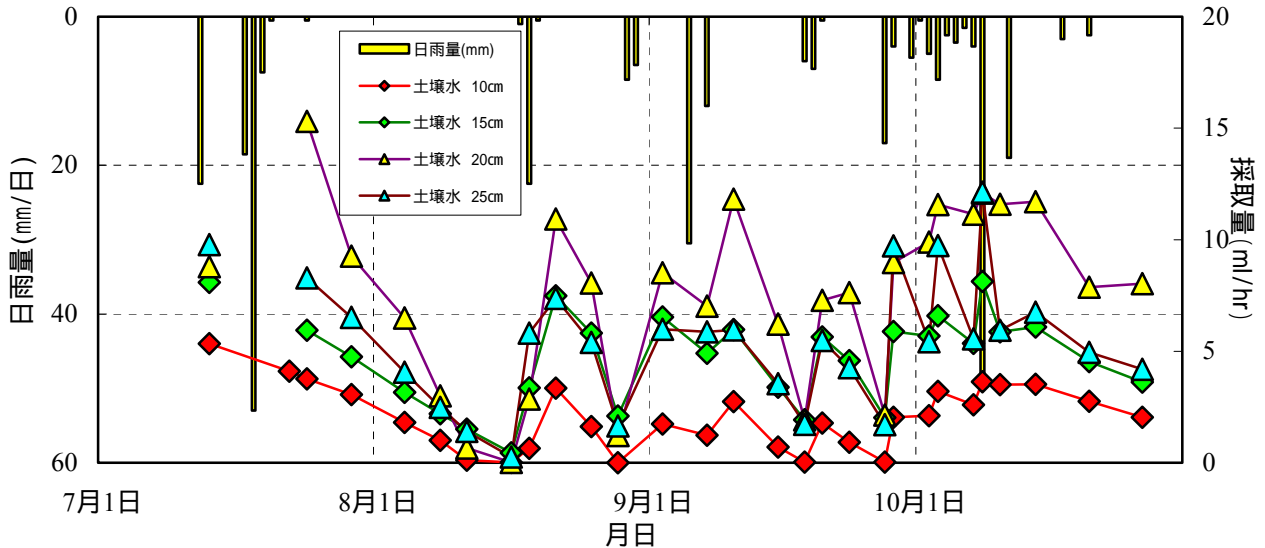


図-8 日雨量と土壌水採水速度の変化（10cm～25cm）

40cm以深の採水速度は（図-9）、浅い層に比べて明らかに降雨に対する応答が小さく、特に90cmではほとんど値が一定で降雨に対する応答は極めて小さい。70cmは一部突出した値が散見されるが、全体的な傾向としてほぼ90cmと同様の变化と考えてよい。40cm、50cmでは変動幅は小さいものの、降雨に対する応答が確認でき、降雨の影響が採水速度に影響するのは深さ50cm程度までと考えることが出来る。

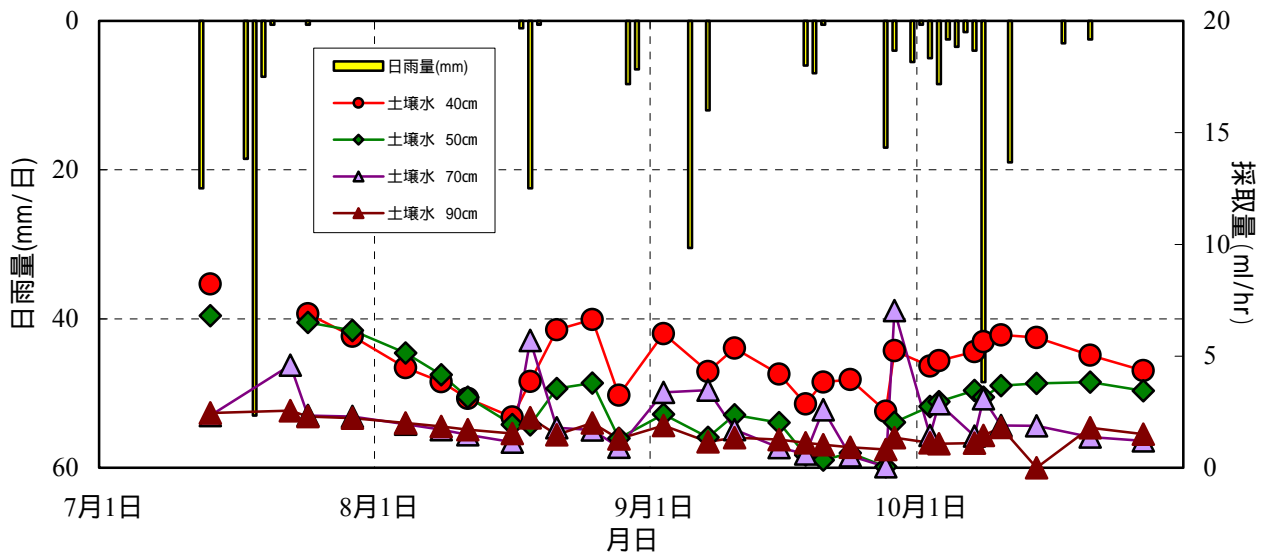


図-9 日雨量と土壤水採水速度の変化 (40cm~90cm)

図-10 には7月22日から8月16日までの無降雨期間中の採水速度の深度分布を示した。降雨直後に最大値を示す20cmの採水速度が次第に減少し、17日後以降には40~50cmをピークとする分布に変化していく様子が良く分かる。

以上のように土壤水の採水速度は、50cm以浅の土壤では降雨に対応して増減を繰り返すが、70cm以深では大きな変化が認められずほぼ一定である。また最大採水速度は、深さ20cmで観測されることが多く、降雨後しばらくの間は最大の値を示す。しかし無降雨が2週間以上継続すると、40~50cmに最大値を持つ分布に変化することが分かった。このような土壤水の採水速度の分布は、雨水の土壤中への浸潤速度、植物根による水の吸収、表土からの蒸発など数多くの要因が複雑に関係した結果と考えられるが、50cm以浅と70cm以深に分けて考えると、その変化は結果としては比較的シンプルなものとなっている。

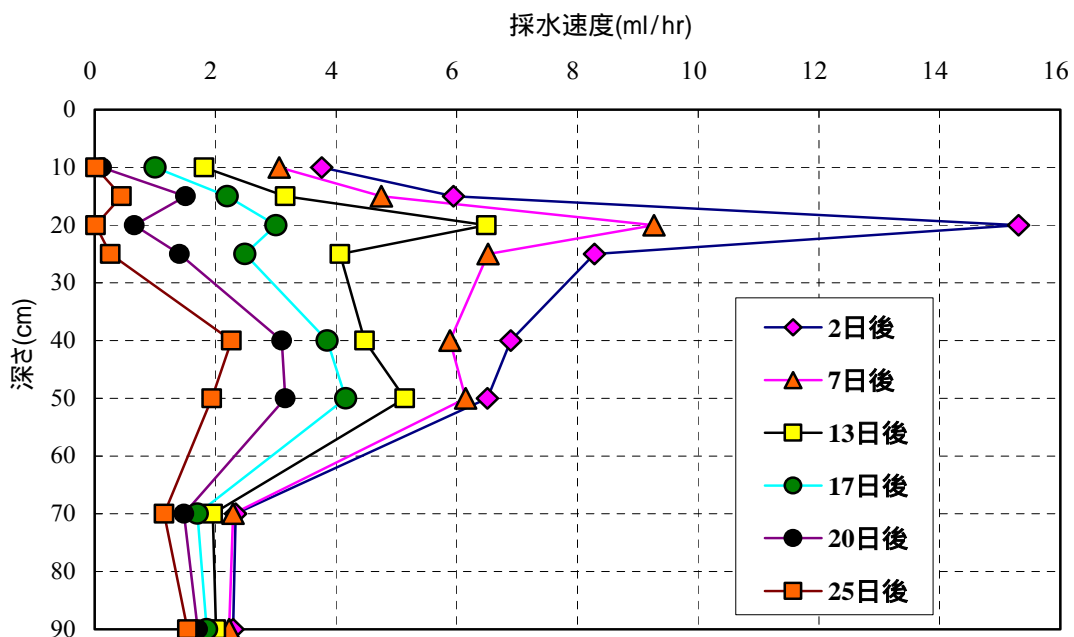


図-10 無降雨期間中の深度別採水速度の変化 (2007年7月22日~8月16日)



(2) 土壤水水質について

土壤水採水量に比べて、土壤水の水質は極めて複雑な変化を示す。図-11 には例として塩化物イオン濃度の変化を示した。最も特徴的な変化として、塩化物イオン濃度が8月中旬頃から深度10cm,15cmで上昇することが上げられる。降雨中の塩化物イオン濃度の変化を図-12 に示したが、降雨水質と浅い土壤水水質の変化は必ずしも対応しておらず、前節で述べた土壤採水量の変化と比較して、降雨に対する応答パターンは明確ではない。また20cm以深の濃度は多少バラツキがあるもの深度10cm,15cmのような大きな変化は認められない。このような傾向は他の水質成分についても見られ、ナトリウムイオンは塩化物イオンと同様の傾向があった。

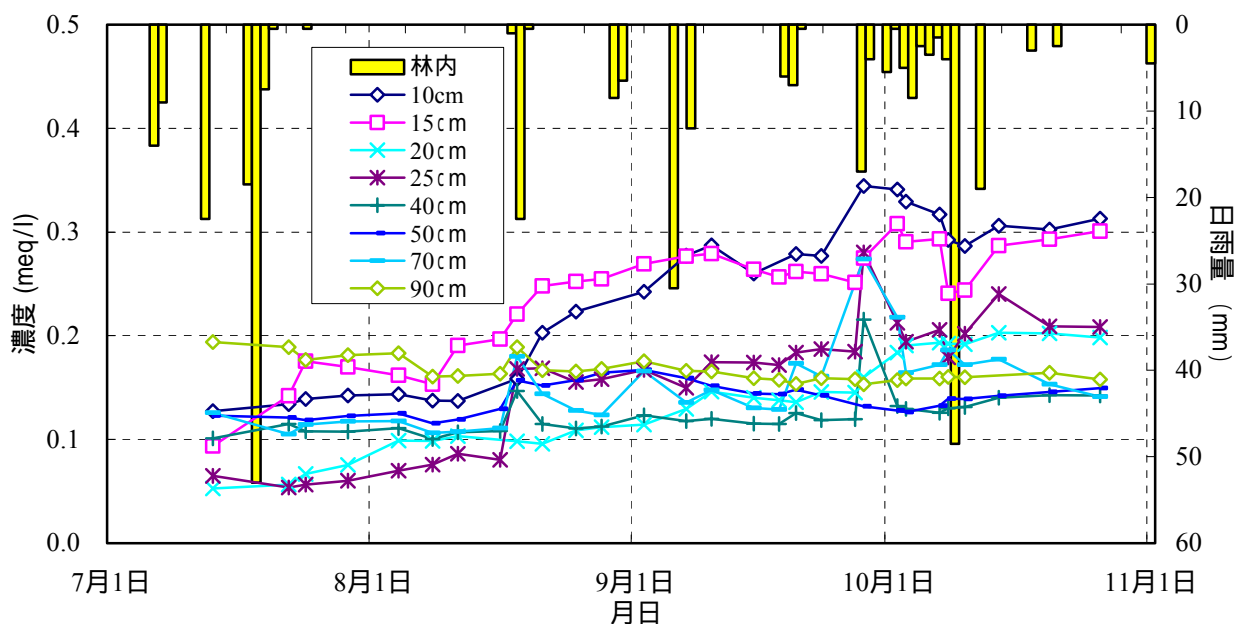


図-11 土壤水中塩化物イオンの濃度変化

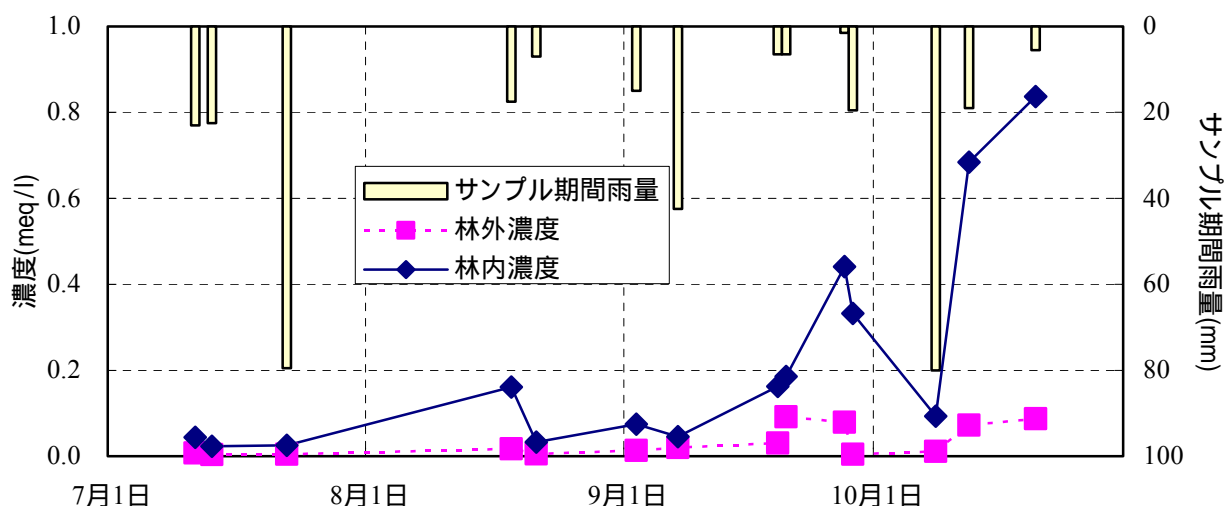


図-12 塩化物イオンの雨量と林外・林内濃度変化

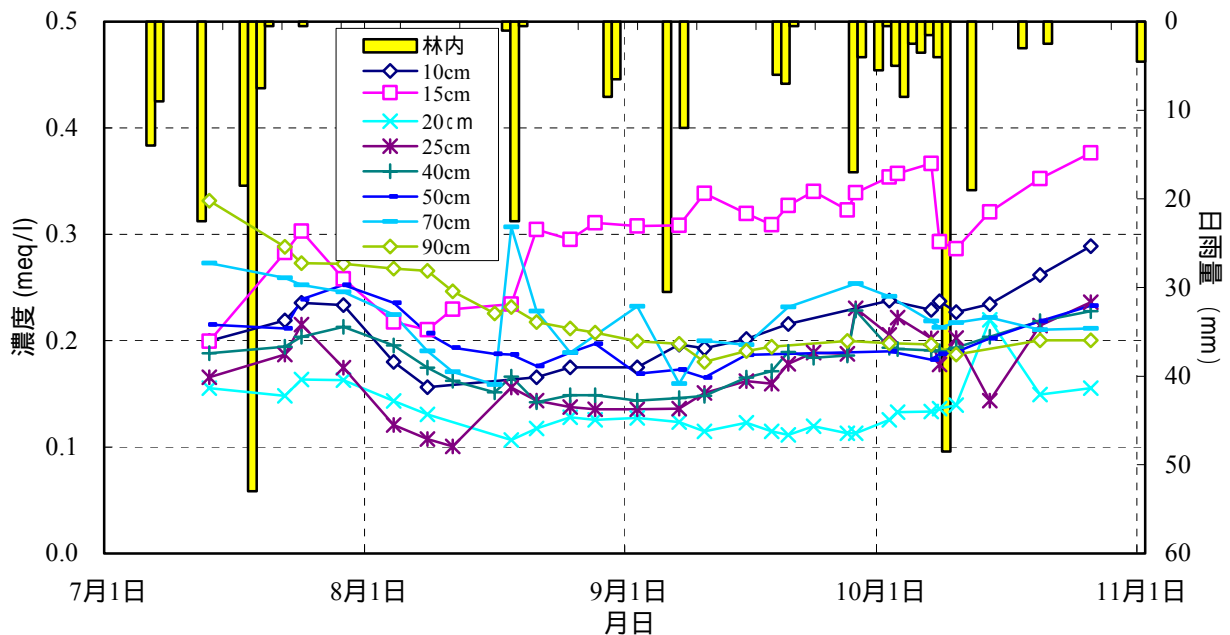


図-13 土壌水中カルシウムイオンの濃度変化

一方、カルシウムイオン(図-13)、マグネシウムイオン、硝酸窒素イオンなどでは深度 15cm のみの濃度が他の深度と比較して明らかに高い値で推移した。また図-11 の無効雨期間(7月22日から8月16日)に注目すると、塩化物イオンでは 10, 15cm の濃度が 1.5 倍程度に増加している。カルシウムイオンでは 15cm で 1.5 倍増となっているが、他の深度では減少した後に若干回復傾向にある。このような現象のメカニズムは現時点では明らかではないが、少なくとも土壌水質が無効雨期間にも変化し、降雨以外の要因によって大きく変化することが明らかとなった。

ここまで水量と濃度について述べてきたが、最後に土壌中の水質成分の通過量について検討した。まず水質成分の「通過速度」を次のように定義する。

$$\text{通過速度} = \text{濃度} \times (\text{土壌水採水量} \div \text{採水時間}) = \text{濃度} \times \text{土壌水採水速度}$$

通過速度は、河川で言う負荷量と同じ概念である。河川流量に相当する採水速度と、通過速度の関係は、河川水で多用される  $L-Q$  式と同じ考え方である。塩化物イオンについては図-14 が得られ、両者には正の相関が認められるが、深度別に見ると 20cm のバラツキが特に大きい。他成分の結果は省略するが、総じて深い深度(40cm 以上)では強い直線性が見られる。このような結果からも浅い土壌水の水質は、深い深度とは違った要因の影響を受けていることが分かる。

最後に、調査期間中の各イオンの総通過量を計算した結果を図-15 に示す。陽イオンではカルシウムイオン、マグネシウムイオン、陰イオンでは硝酸窒素が 15cm での通過量が最大となり、採水量よりも濃度の影響が強く表れた。またこれらの成分は 40cm 付近でもう一つピ - クを持っている。しかし塩化物イオンでは 15cm と 25cm にピ - クがあり、硫酸イオンでは 25cm で小さなピ - クを持つ分布となった。またカリウムイオンの通過量は他成分に比較して小さいが、10cm ~ 40cm でやや上昇している。

以上、土壌水の採水量と水質に関して検討を加えた。採水量については浅い部分で降雨の応答が明確に現れ、深度 20cm をピ - クとする採水速度の分布を把握することが出来た。水質については、特に浅い土壌中での濃度変化が複雑であり、降雨以外の要因との関係を考慮する必要のあることが分か

った。また深度別の通過量の計算結果から、土壌水中成分の物質通過量は表層部で大きいですが、成分によってピ - クを持つ深度は異なった。降雨後の採水量は 20cm にピ - クがあったが、通過量としては濃度が大きな 15cm にピ - クを持つ成分が多かった。

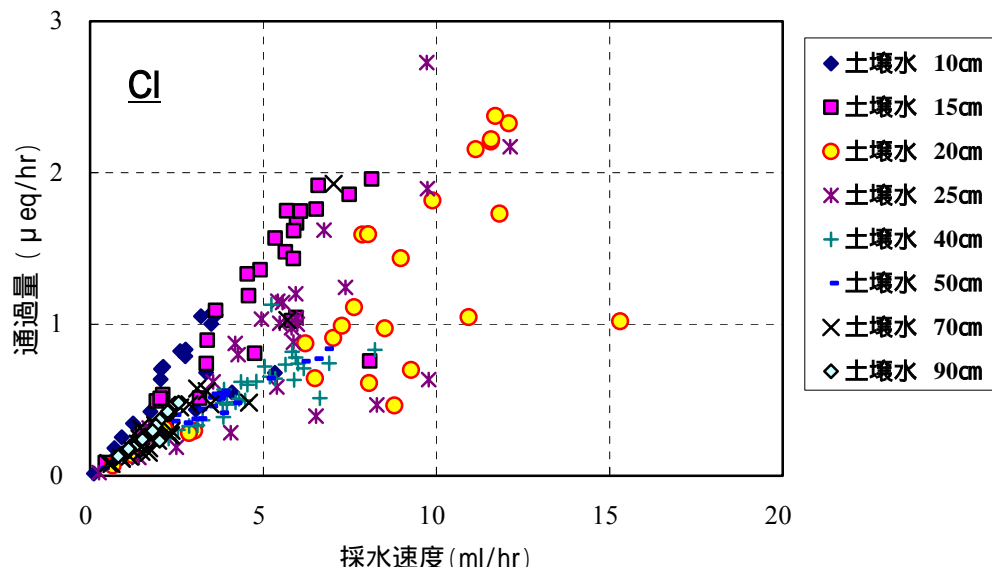


図-14 採水速度と通過量の関係 (塩化物イオン)

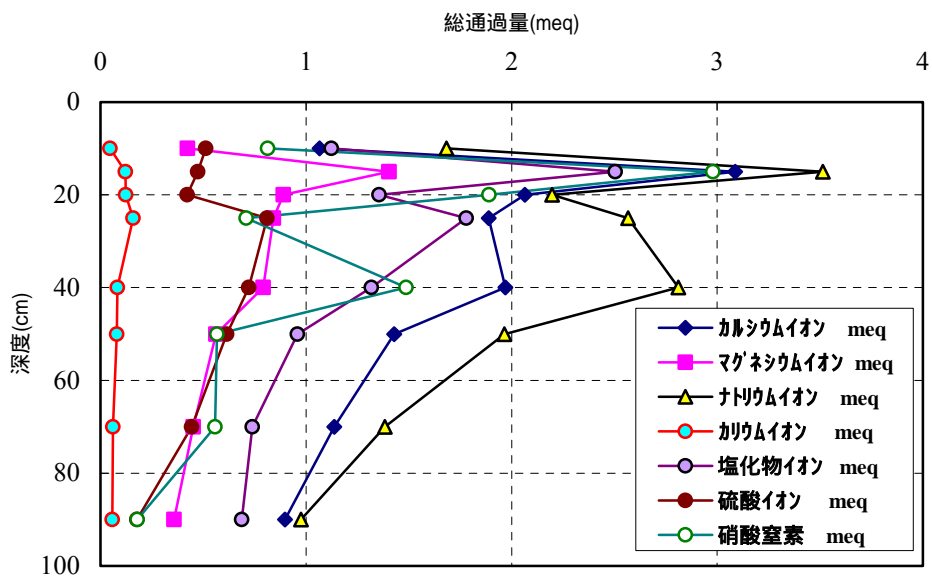


図-15 調査期間中の総通過量の分布

## 7. 結論

以上、得られた結果を挙げると次のようになる。

- (1) 本研究では回帰分析の適用によって流出率の推定を検討した。その結果、観測によって得られた流出高、飽和度、実効降雨、月平均気温から有効に流出率を推定することが出来た。これらの説明変数の値は、出水前に入手できるものであり、予測と言う観点からも有効であると思われる。今後、さらにデータの蓄積を図り、回帰式の精度をあげて行きたい。
- (2) 土壌水の採水速度は浅い深度では降雨に応答して増減する。降雨直後は深度 20cm で最大採水速度を示すが、採水速度が大きいほど減衰速度も大きい。40cm 以深では降雨に対する応答は小さくなり、70cm ではほぼ一定であった。
- (3) 土壌水の水質は浅い深度で変化が大きい。降雨量や降雨水質に対する応答は明確ではない。また無降雨期間中にも大きな濃度変化が生じており、降雨以外の要因も影響していると考えられる。深い深度での水質変化は比較的緩やかであった。
- (4) 調査期間中の深度別の各イオンの総通過量を計算すると、深度 15cm で最大ピクを持つ成分が多く、40cm 付近でも第二のピクが見られた。

謝辞：本研究は（財）北海道河川防災研究センターの研究助成により遂行された。また、北海道開発局石狩川開発建設部札幌河川事務所には観測機器設置に関し、（財）聖山会藤野聖山園には土地の使用に関して多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 星 清・中津川誠：地下水流成分を含む流域・河道系における貯留関数法の同定，（財）北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XIII，pp.253-272，2002.
- 2) 余湖典昭：小流域における水質成分流出モデルに関する基礎的研究，（財）北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XIV，pp.145-158，2003.
- 3) 今井圭介・山田俊則・嵯峨浩・余湖典昭：小流出試験地における降雨・流出特性に関する基礎的研究，土木学会北海道支部論文報告集，第 61 号，2005.
- 4) 山田俊則・今井圭介・嵯峨浩・余湖典昭：水質成分の流出機構に関する基礎的研究，水文・水資源学会 2004 年度研究発表会要旨集，pp.204-205，2004
- 5) 山田俊則・今井圭介・嵯峨浩・余湖典昭：小流域における水質成分の流出特性，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，-127，2004.
- 6) 山田俊則・嵯峨浩・余湖典昭：増水時流出特性を考慮した森林河川流域の物質収支，水文・水資源学会 2005 年度研究発表会要旨集，pp.292-293，2005.
- 7) 山田俊則・嵯峨浩・余湖典昭：森林流域における溶存成分の流出特性と収支，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，-126，2005.
- 8) 村瀬貴志・蝦名理沙・嵯峨浩・余湖典昭：流出試験地の観測に基づく流出率の推定について，土木学会北海道支部論文報告集，第 63 号 B-47，2008