

流出試験地の観測に基づく流出率の推定について

Study on Estimating Runoff Coefficient Based on Observation in the Small Experimental Basin

北海学園大学工学部○学生員 村瀬 貴志 (Takashi Murase)

北海学園大学工学部 学生員 蝦名 理沙 (Risa Ebina)

北海学園大学工学部 正 員 嵯峨 浩 (Hiroshi Saga)

北海学園大学工学部 正 員 余湖 典昭 (Noriaki Yogo)

1. まえがき

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溪流河川である。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3.42km²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ー場、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おり、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-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。

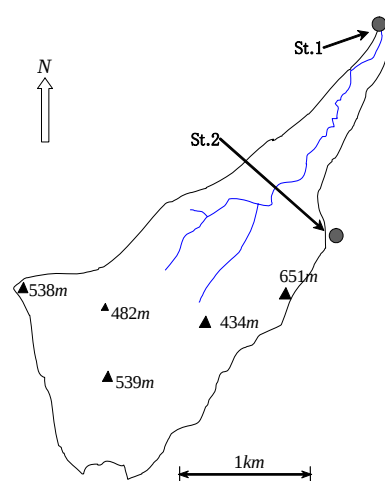


図-1 オカバルシ川流域の概要



(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

水質調査は平成18年6月から11月上旬まで実施した。観測項目、測定項目等は以下の通りである。雨水；雨量計に自作の採水装置を連結し、全量採取した。St.2の林外、林内の2ヶ所に設置した。土壌水；ポーラスカップ式土壌水採取装置（大起理化工業社製、真空ポンプ付）（10、20、30、40、50cmの深度で採取）（St.2の林内）、簡易型ライシメータ（5cmの

土壌深度に設置しリター層の重力水を採取) (St.2 の林内) 河川水自動採水; 伝導度検出器付きISCOオートサンプラーModel 3700 (St.1) 雨水、土壌水の採取は、出来るだけ降雨ごとに実施した (35 回調査実施)。水質測定項目 (分析法) は、水温、 pH 、電気伝導度、溶存酸素 (DO) (以上は現地で携帯型センサーを用いて測定)、塩化物イオン (Cl^-)、硝酸イオン (NO_3^-N)、硫酸イオン (SO_4^{2-}) (以上イオンクロマトグラフ法)、ナトリウムイオン (Na^+)、カリウムイオン (K^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、マグネシウムイオン (Mg^{2+}) (以上原子吸光光度法)、アンモニアイオン (NH_4^+-N) (インドフェノール法)、全窒素、全リン (ペリオキソ二硫酸カリウム分解法)、 COD (過マンガン酸カリウム法)、 SS (重量法)、 $E220$ および $E260$ (分光光度計で $220nm$ 、 $260nm$ の吸光度を測定) などである。

3. 土壌水分の測定データ

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、データ回収や電池交換でロガー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わかる。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。

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。

$$R_t = r_t + (\alpha_1 r_{t-1} + \alpha_2 r_{t-2} + \alpha_3 r_{t-3} + \dots + \alpha_n r_{t-n}) = r_t + \sum_{i=1}^n 0.5 \frac{i}{T} r_{t-i} \quad \dots (1)$$

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

ここに r_t : 時刻 t の時間雨量、 T : 半減期 (hr)、 α_i : 減少係数、 n : データ数

半減期 T は、地表に残った雨や地中に浸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

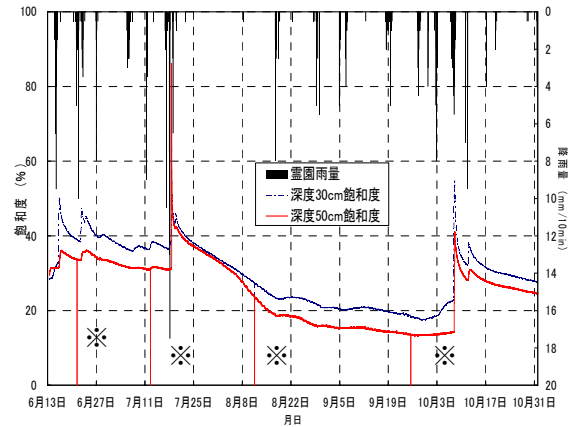


図-3 飽和度と降雨の関係

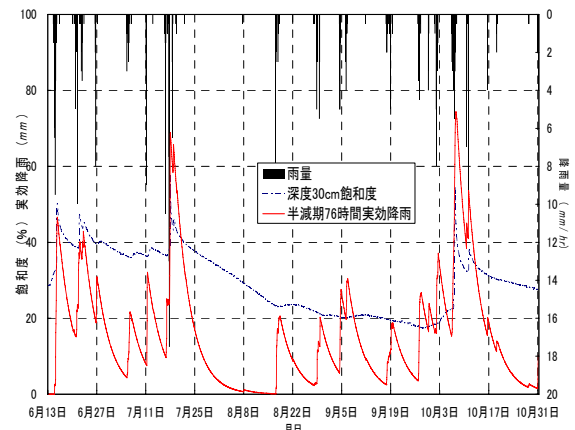


図-4 飽和度と実効降雨の関係

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。

5. 流出率との関係

流出率は、先行降雨、土壌水分状態、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、土壌・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。

6. 重回帰分析

6.1. 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。

6.2. 重回帰分析の結果

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 年度は土壌水分計を地表面下 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 日からで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。

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

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 (°C)

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 ρ 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。

計算結果と実測流出率を比較したものを図-5 に示す。プロットした点が中央 45 度の線に近いほど推定誤差が小さいこと意味し、十分な精度で推定されていると思われる。

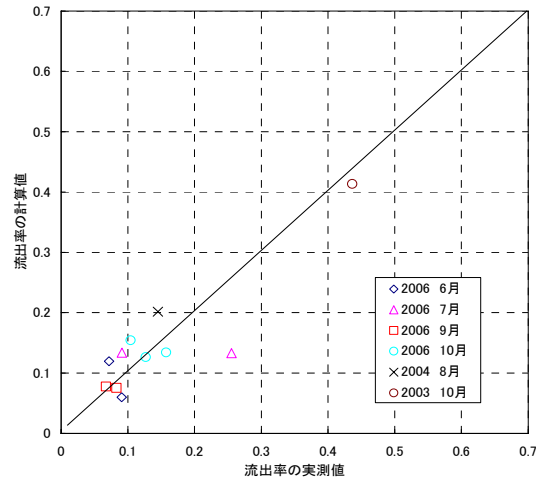


図-5 流出率の実測値と計算値の関係

7. 降雨から河川水までの水質変化

森林流域に降った降雨（林外雨）は、樹葉に接触して地表に到達する（林内雨）。さらに土壌層鉛直方向の浸透あるいは下流方向への流下を経て、河川水として流出する。ここでは流出までの各層における水質変化について述べる。調査結果から、降雨時の水質成分の濃度（等量）順位をまとめると表-2 が得られる。

表中には濃度の増加（あるいは減少）を伴う大きな変化を矢印で示してある。また各プロセスで考えられる供給成分についても記した。表から、林外雨から土壌水（10cm）までの間で、大きな順位の変化が生じ、土壌水中では比較的变化が少ないことが明らかである。

林内雨ではカリウム、塩化物イオン、E260 が主に植物からの溶脱によって供給される。特にカリウムイオンと E260 は、林内雨での濃度増加が圧倒的に大きい成分である。この 2 成分は増水時に河川水中濃度が上昇する特性があり、濃度が低下する他の溶存成分と異なった流出メカニズムを持っている。したがって、降雨に対応した単一供給源をもつカリウムイオンと E260 を、増水時の水質成分流出の環境トレーサーとして利用できる可能性が高い。

土壌表面（ライシメーター水）ではカルシウム、マグネシウム、硝酸窒素イオンが供給される。硝酸窒素イオンはリターの分解が供給源と思われるが、カルシウム、マグネシウムはその副生産物としてリターから供給されていると考えられる。硫酸イオン、アルカリ度は主に土壌中で微生物分解によって供給されることが推定される。

次に河川水（増水時）の濃度順位と比較して考察する。河川水の陽イオンの濃度順位と一致しているのは、ライシメーター水であるが、陰イオンではアルカリ度、硫酸イオンの濃度が河川水中で大きく、ライシメーター水と順位が一致しない。これらの成分については、流出過程で土壌や河床から微生物分解により供給されることが原

表－2 林外雨から河川水に至る水質成分の等量濃度順位(降雨時)

平均濃度 順位		林外雨	林内雨	ライシメータ 水	土 壌 水				増水時 河川水
					10cm	15cm	25cm	50cm	
カチオン	1	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
	2	Ca ²⁺	Na ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺
	3	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
	4	K ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺
アニオン	1	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	4.3Bx	4.3Bx	4.3Bx
	2	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
	3	4.3Bx	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	4.3Bx	4.3Bx	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	4	NO ₃ ⁻ -N	4.3Bx	4.3Bx	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
水 中 へ の 供 給 成 分			K ⁺ の溶脱 E260の溶脱 Cl ⁻ の溶脱	Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ NO ₃ ⁻ -N (微生物分解)	SO ₄ ²⁻ 、 4.3Bx (微生物分解)		4.3Bx (微生物分解)		
この層から下流へ移動？					(河川に流出するまでに、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、 4.3Bx、SO ₄ ²⁻ の濃度がさらに増加)				

因と思われる。マグネシウムイオンについては、アルカリ度、硫酸イオンが供給される際の対陽イオンとして同時に供給されている可能性がある。あるいは流下過程で吸着平衡の変化により土壌粒子から脱着し、河川水では濃度が上昇している可能性も否定できない。現段階では、流下過程における水質成分の供給プロセスは研究対象としていないが、これらの点については今後の検討課題としたい。

8. あとがき

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。

また雨水、土壤水および河川水の水質調査の結果から、濃度順位の増減を比較し、その供給源を推定した。一連のプロセスの中で、特に林内雨と土壤表面(約5cm)で大きな水質変化が生じていた。カリウムイオンとE260は、林内雨での供給が圧倒的に大きい成分であり、環境トレーサーとして利用できる可能性がある。また河川水の増水時水質成分濃度・順位を説明するには、流下過程における変化も考慮する必要があると考えられた。

9. 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) 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。
- 2) 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
- 3) 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、VII-127、2004。
- 4) 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。
- 5) 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、VII-126、2005。
- 6) 北海道開発局土木研究所若手水文学研究所：現場のための水文学
- 7) 社会法人地盤工学会：土質実験基本と手引き(第一回改訂版)
- 8) 塚本良則：森林水文学
- 9) 前野昌弘・三國彰：図解でわかる統計解析
- 10) 石村貞夫：すぐわかる統計処理
- 11) 木下栄蔵：わかりやすい数学モデルによる多変量解析入門