

小流出試験地における降雨流出現象の解明に関する研究

A Study on Rainfall and Runoff Phenomena in the Small Experimental Basin

嵯峨 浩
Hiroshi SAGA

北海学園大学工学部社会環境工学科

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、降雨一流出系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、本学よりおよそ 10km 程度の距離にあり、アクセスの容易な観測に適した場所である。また、砂防河川に指定されており過去には大規模な出水で甚大な被害をもたらした河川である。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、特に流出率との関係や、先行降雨の影響を実効降雨として捉え、直接観測することなく流域内の土壌の水分状態を把握するための検討を行なっている。また、観測された降雨量、流出量を対象として擬似河道網による流出解析を行なった。

《キーワード：流出試験地；流出特性；土壌水分；実効降雨》

1. はじめに

小流域における流出特性を解明するため、平成 15 年度から豊平川支流のオカバルシ川に流出試験地を設け、降雨量、流出量、土壌水分、水質等の観測を行っている^{1), 2)}。本研究は、降雨流出特性と土壌水分の関係に注目し、流域の土壌水分状態が流出現象に与える影響を検討したものである。流出試験地は本大学から 10km ほどの所にあり、車で所要時間はおよそ 20 分である。このようにアクセスが容易であると、出水時の流速測定も比較的しやすく $H\sim Q$ 曲線の精度維持と向上にも有利である。

平成 18 年度の観測期間は 5 月 31 日から 11 月 15 日までである。観測開始時期が遅いのは、水位観測地点の直上流に堆雪場があり、冬季間の大雪により雪解けが大幅に遅れたからである。また、9 月 8 日に来襲した台風 14 号による出水によって河川断面が大幅に変わり、さらに水位計を設置していた H 鋼が倒されて流量を暫く観測できなくなった等のトラブルにも見舞われた。

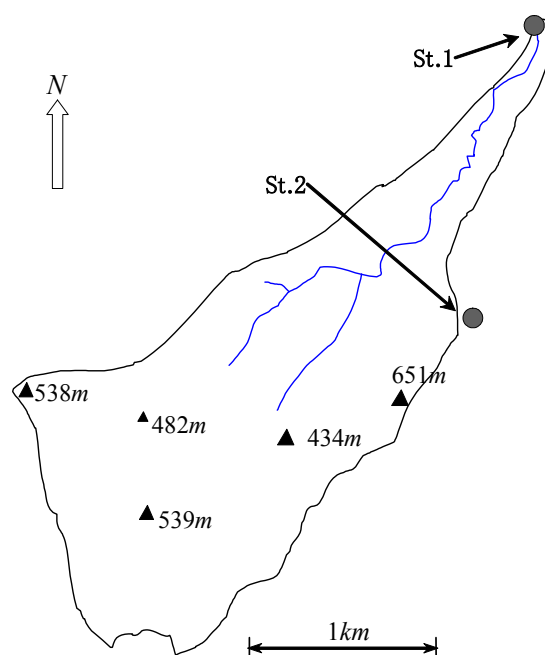
2. 流域の概要と観測項目

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一1 に示す。

流域面積は 3.42km^2 、観測地点 St.1 の標高は 207m、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。観測地点 St.2 の標高は 340m である。St.1 上流部や St.2 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%以上を森林が占めており土地利用の変化はここ数年見られない。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 には雨量計と土壌水分計が 30cm と 50cm の地中に 2 台埋設されている。降雨量、流量、土壌水分の測定値は 10 分おきに自動観測されておりデータは全てデータロガーに記録される。データ回収の頻度は出水時の流観等の突発的なものを除いて観測期間中 9 回であった。

図一2 に水位計設置状況、雨量計設置状況および土壌水分計とその設置状況を示す。水位計は河床に埋設された H 鋼の内部に取り付けられていたが、冒頭に記したように大規模な出水により根掘れを起こして倒壊し、観測を一時中断する事態に陥った。



図一1 オカバルシ川流域の概要



水位計設置箇所

(a) 水位計設置状況



(b) 雨量計設置状況



データロガー

センサー

(c) 土壌水分計



土壌水分計設置箇所

(d) 土壌水分計設置状況

図一2 各測定器設置状況

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 \equiv 流出量+蒸発散量」が成立していることを確認している。

3. 土壌水分計の測定値について

奇異なことであるが土壌水分計の測定値はマニュアルによると体積含水率となっている。水中で100%、空気中で0%という測定値は体積含水率とは到底理解できない。つまり、工学的にこの水分計は何を測定しているのか不明である。一体何を測定しているのか明らかにするために、標準砂を用いて室内実験を行なった。

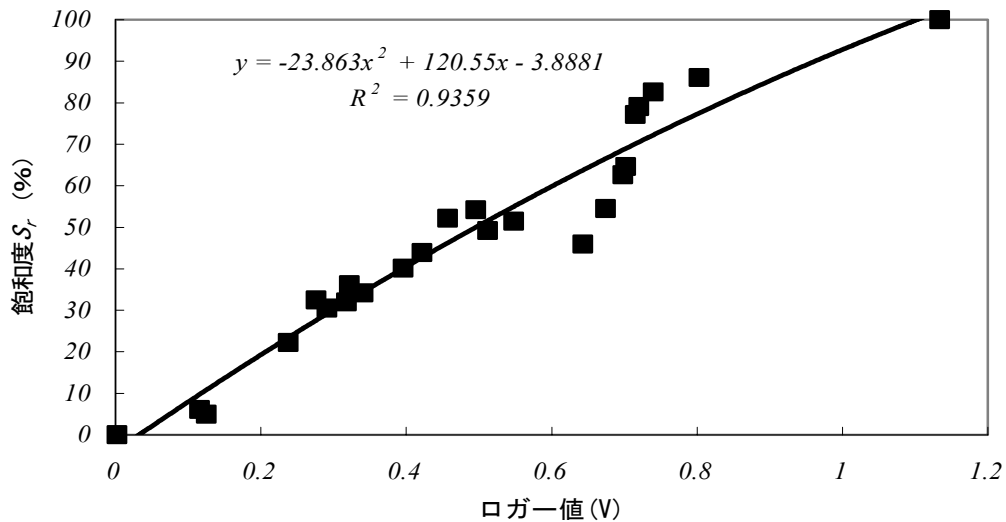
飽和度 S_r は、体積 V なる土の中に含まれる間ゲキの体積を V_v とし、 V_v のうち水の占める体積を V_w とすると、次式で表される。

$$S_r(\%) = V_w / V_v \times 100 \quad (1)$$

従って、土の種類に関係なく一義的に決まる値である。また、含水比を ω 、間ゲキ比を e 、土粒子と水の密度を ρ_s 、 ρ_w とすると、次式のようになる。

$$S_r(\%) = \frac{\omega \rho_s}{e \rho_w} \times 100 \quad (2)$$

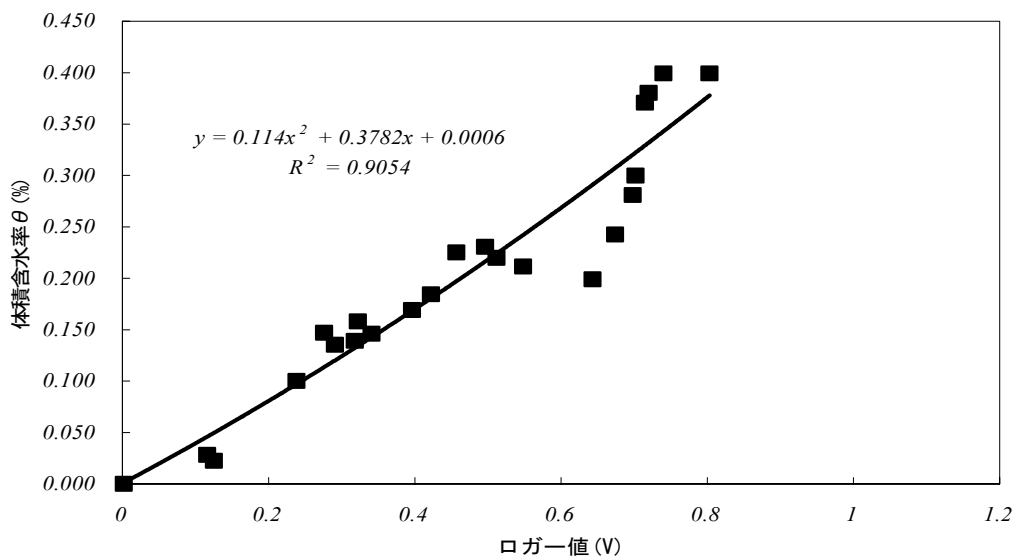
実験方法はケースに入れた標準砂のなかに土壌水分計を埋め、水をかけて色々な水分状態にし、その都度試料採取して含水比を測定した。その時のロガー値と得られた飽和度の関係を図一3に示す。なお、ロガー値は電圧である。



図一3 飽和度とロガー値の関係

飽和度 0%の点は、空気中でのロガー値で 0.002 であり、飽和度 100%の値は水中でロガー値は 1.134 である。実際の観測ではロガー値の測定範囲が 0.3~1.1 であったので測定値の範囲は十分網羅している。さらに、不飽和浸透流の数値計算等においては体積含水率 θ が必要となるので体積含水率 θ との関係も求めた。体積含水率 θ の定義を次式に、また、得られた関係を図一4に示す。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (3)$$

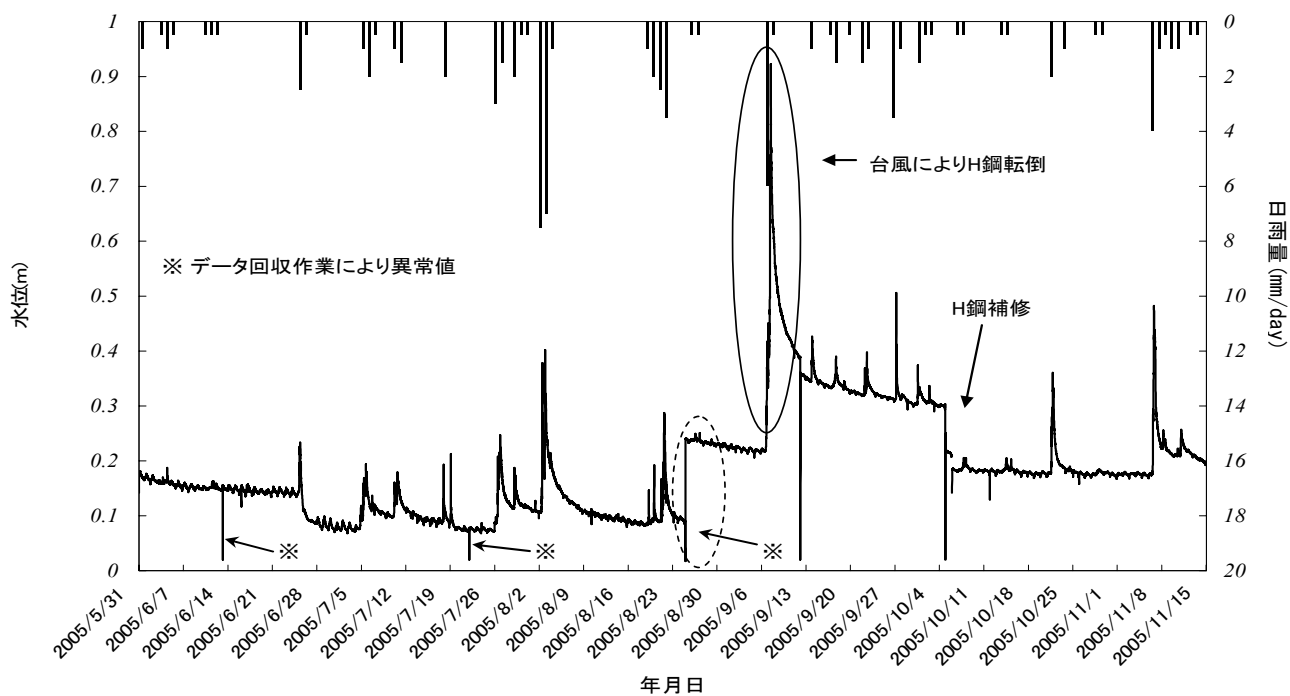


図一4 体積含水率とロガー値の関係

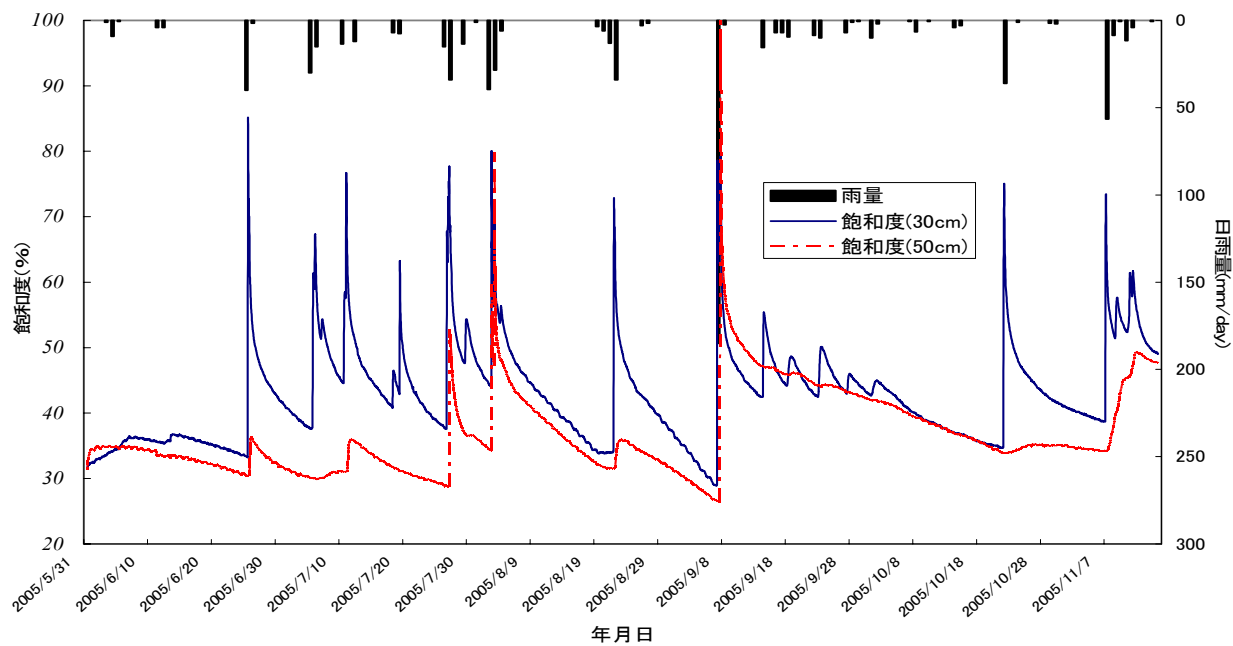
なお、測定値に対する温度の影響であるが、室温がおよそ7℃より低くなると正確な値を計測しなくなるようである。

4. 測定データ

平成 17 年度の観測期間において観測された降雨量、水位および土壌水分一覧を図—5、図—6 に示す。



図—5 観測期間中のハイエト・ハイドログラフ



図—6 観測期間中の飽和度と日雨量

図一5 において※印で示している点は、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。また、8月30日付近の点線で囲んだ部分は原因不明であるが、水位計に堆積した泥を取り除く際に水位計が動いた可能性が考えられる。実線の丸で囲んだ部分は台風14号によりH鋼が倒壊した出水であり、その改修は10月11日に行なわれたことを示している。なお、この時の24時間雨量はSt.2の雨量計で180mmを記録し、オカバルシ川の河道内に置いていた、重量およそ10kgのコンクリート製ブロックが200m程下流に流されるほど大きな出水であった。

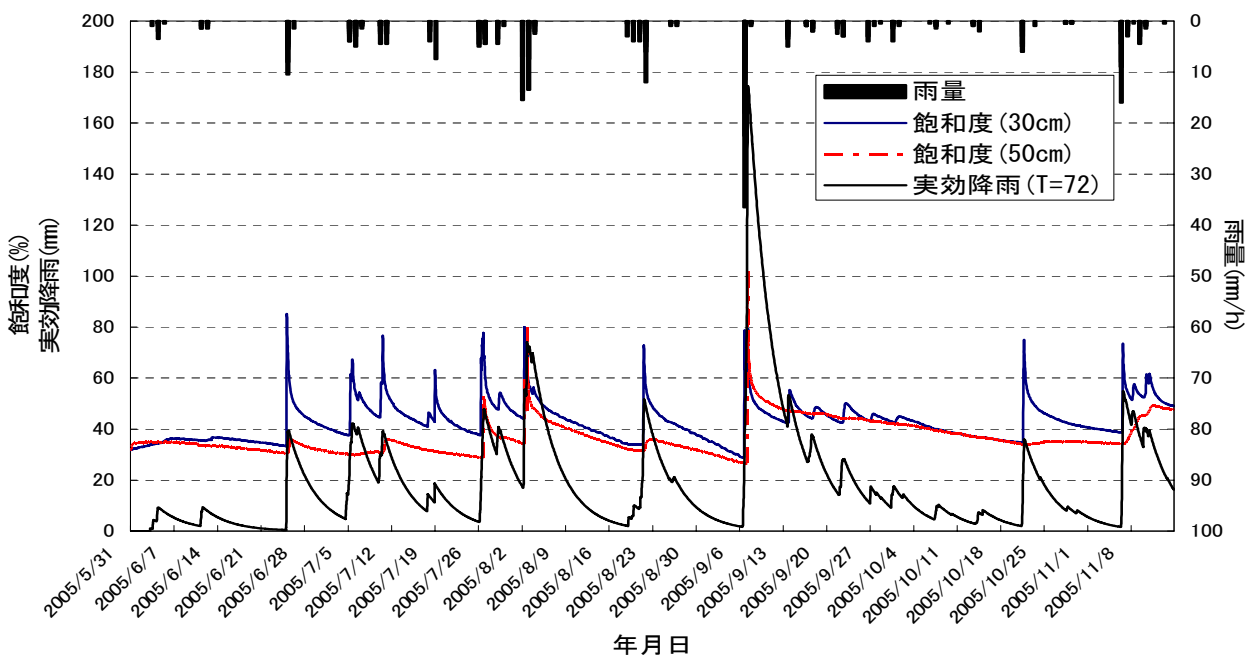
図一6の青い実線は地表面下30cmの飽和度を示し、赤い点線は50cmの飽和度を示している。降雨に対して浅い地中の飽和度は敏感に反応し、深い方はその反応が鈍いようである。また、9月8日の大雨による水分状態の増加が、元の水分状態に戻るのに1ヶ月以上を要している。このことから従来指摘されているように、降雨による短期的な出水は流域の地表面下数十cm程度の浅層の水分状態に大きく影響されているようである。

5. 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。

$$R_t = r_t + (\alpha_1 r_{t-1} + \alpha_2 r_{t-2} + \alpha_3 r_{t-3} + \dots + \alpha_n r_{t-n}) = r_t + \sum_1^n 0.5^{n/T} r_{t-n} \quad (4)$$

T は半減期と呼ばれ、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の長さを意味し、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確認されている。同様の指標に先行降雨指数 (API) があるが、実効降雨は半減期の導入により物理的意味が明白である。図一7に半減期 $T=72hr$ の場合の実効降雨と飽和度の関係を示す。



図一7 飽和度と実効降雨の関係

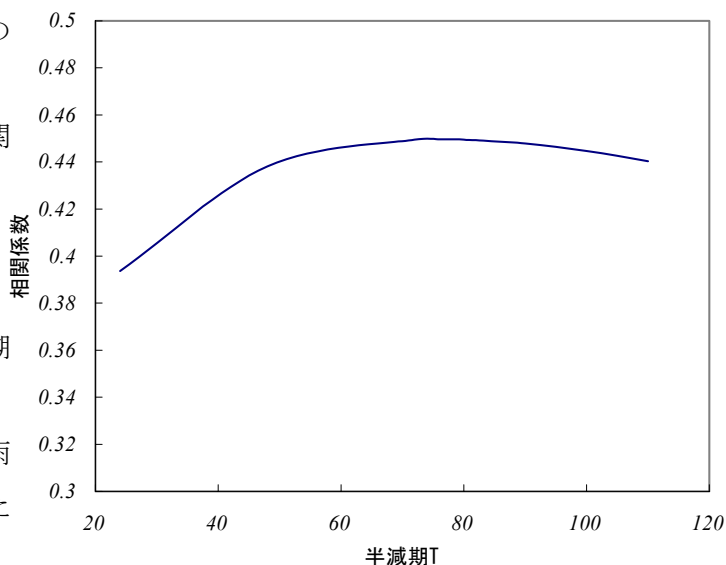
深度 30cm の飽和度と実効降雨は、その変動が非常に似ていることが良く分かる。図一8 は 30cm の飽和度と実効降雨の相関を半減期毎に求めたものである。

$T=76hr$ において一番相関が強く、相関係数は 0.450 となっている。つまり、この流域でも一般に言われている半減期 (72hr) とほぼ同じ値となっている。

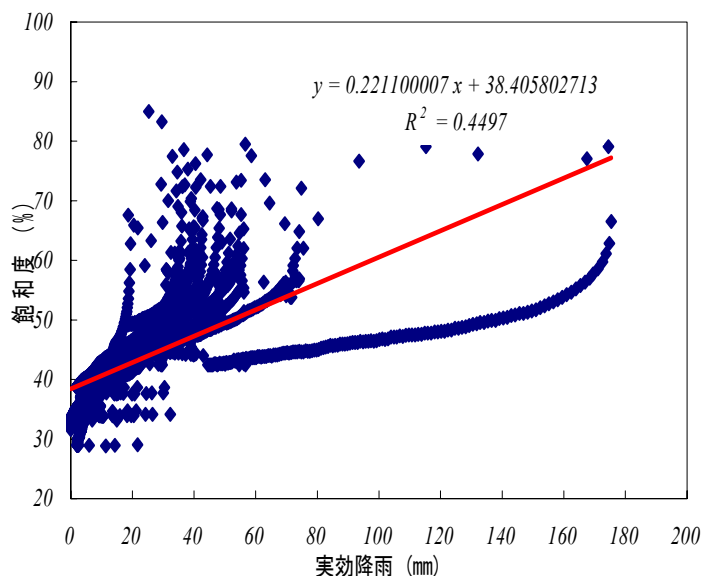
図一9 に深度 30cm の飽和度と実効降雨の関係を示す。半減期は図一8 で求めた $T=76hr$ である。

これらの関係は季節要因、すなわち気温や植物の葉の状態、活性度等を全く考慮していない。それにも関わらず、両者に相関があることを考えると、これらの季節要因を加味することで地中の水分状態を実効降雨から推定することが十分可能と思われる。

API との関係も検討したが、API は日単位の雨量を使った指標であるので、この流出試験地のように小規模な流域には適用に無理があるようである。



図一8 半減期ごとの飽和度と実効降雨の相関

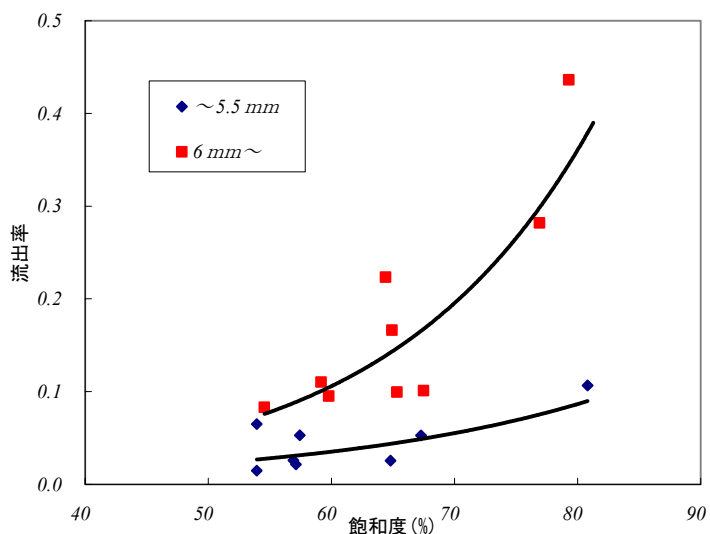


図一9 実効降雨と飽和度($T=72hr$)の関係

6. 流出率と飽和度の関係

今年度の観測において、台風による大規模出水のため水位観測に支障をきたしたので昨年度観測されたデータを使って、流出率と飽和度の関係を求めた。結果を図一10 に示す。

流出率を求める際、直接流出量はハイドログラフ立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。飽和度はハイドログラフ立上がり時点での飽和度であり、以後初期飽和度と



図一10 流出率と飽和度の関係

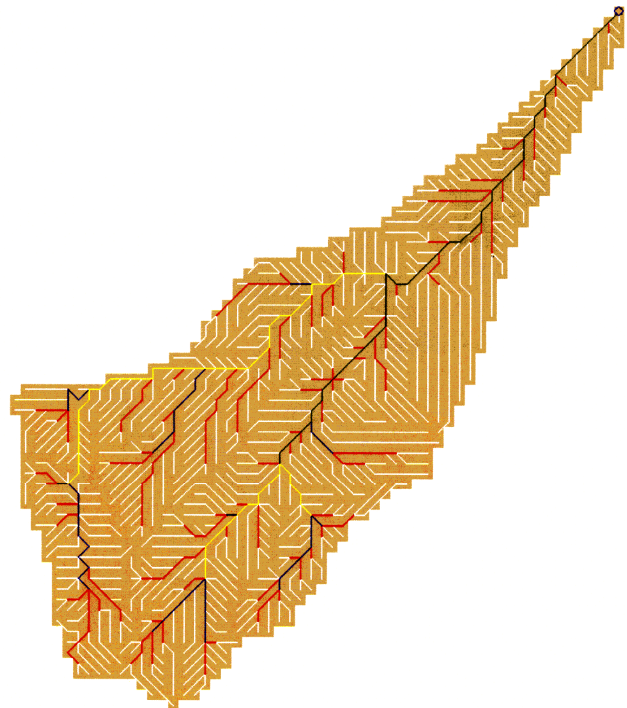
言う。流出率が降雨強度の違いや総降雨量によって異なることは周知の事実である。これは図—6 に示したように、降雨によって地表面下数十 *cm* 程度の水分状態が異なるためであると考えられる。図—10 においても総降雨量が *5.5mm* 未満の青い点と *6.0mm* 以上の赤い点が示すように、総降雨量によって流出率の変化に違いが見られる。また、ここでは示していないが実効降雨に季節要因を加えて流出率との関係を求めると良い相関が得られそうである。これは次年度の観測結果により明らかにしたいと考えている。

7. 擬似河道網による流出解析

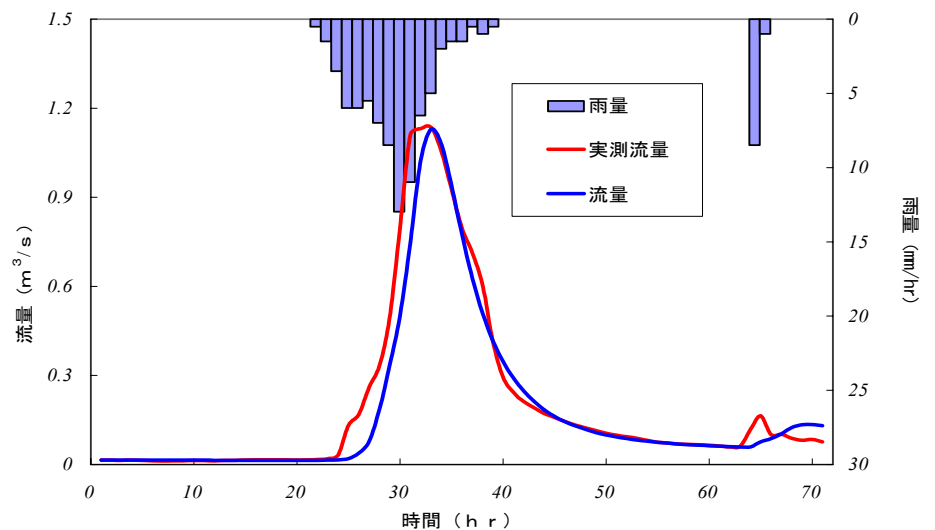
分布型流出モデルによりオカバルシ川で観測された出水の流出解析を行なった。計算に使用したプログラムは、苫小牧工業高等専門学校・都市環境工学科助教授・八田茂実氏により開発されたものであり、モデルの概要は以下のようになっている。

GIS を使用して流域界を指定すると落水線を作成し、窪地等があればその処理を行ってから擬似河道網をつくる。窪地の処理は、その窪地毎にサブ流域を作成し、隣のサブ流域との標高が最も低い地点に水を流す。斜面域および河道上の流れに *kinematic wave* 理論を適用し、流出量を求める。

kinematic wave は特性曲線法で解かれるが、その際未知パラメーターとなるのが流出率、斜面域および河道域の粗度係数と河道幅であり、適切な値を指定してやらねばならない。ここでは数学的最適化手法はとらず、試行錯誤的に値を与えて、次式で示される評価式により最適値を決定した。



図—11 オカバルシ川流域の落水線図



図—12 流出解析結果

$$J_{re} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|Q_{oi} - Q_{ci}|}{Q_{oi}} \right) \quad (5)$$

ここで N はデータ数、 Q_{oi} 、 Q_{ci} はそれぞれ観測流量、計算流量である。 J_{re} はハイドログラフ全体の観測値と計算値の誤差を表しており、この値が小さいほど計算精度が高いことを意味する。また、ピーク流量の評価には次式を用いている。

$$J_{pe} = \frac{(Q_{op} - Q_{cp})}{Q_{op}} \quad (6)$$

図一11 にオカバルシ川の擬似河道網を示す。図の右最上点がアウトレットである。落水線は流域を 50m メッシュで分割し、それぞれのメッシュの平均標高を比較して標高の高い所から低い所に流れるように決定する。流下方向は縦横 4 方向、斜め 4 方向の計 8 方向である。この流域では窪地が 3 地点あり、上述の方法でこの問題を解消している。図中、白、赤、青、黄、緑、黒色の線で描かれている河道は河道位数を示しており順に位数 1,2,3・・・6 である。

図一12 は流出計算結果である。対象出水は平成 17 年 8 月 19 日～22 日の出水で総降雨量は 56.5mm である。雨量はレーダー・アメダスのデータを用いて計算できるようにプログラミングされているが、ここでは St.1 と St.2 で観測された雨量を使用した。したがって、源流部上部の雨量分布はあまり考慮されていない計算となっている。 J_{re} が最小となった流出率は 0.8、斜面域の等価粗度は 0.7、河道域の等価粗度は 1.6、河道幅は 3m であった。この時の J_{re} は 0.2346、 J_{pe} は 0.0785 であり、比較的精度良く再現できている。

8. 結論

以上の結論を要約すると以下のようになる。

- (1) 市販されている土壌水分計の測定値の定義が曖昧であるので、標準砂を使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明らかにした。
- (2) 実効降雨の半減期を地中の飽和度との相関から求めた結果、この流域における半減期は 76 時間であり、一般に言われている値 72 時間とほぼ同じであることがわかった。
- (3) 実効降雨と地中深度 30cm の飽和度との関係を検討した。季節要因を考慮しなくても相関係数は 0.45 であり、今後、季節要因を考慮することでより地中の水分状態を降雨のみから推定する可能性を示した。
- (4) 流出率と初期飽和度との関係も、季節要因を考慮することで推定できる可能性を示した。このことは次年度の観測目標にする予定である。
- (5) 分布型流出モデルで流出解析を行なった。その結果、比較的良好的な精度で流出量を再現することが出来た。

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。苫小牧高専八田茂実助教授には分布型流出モデルのプログラムを提供して頂いた。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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.